

INFORME ANUAL

CALIDAD DEL AIRE 2019

CIUDAD DE MÉXICO



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

SEDEMA

CALIDAD
DEL AIRE

Claudia Sheinbaum Pardo
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

Marina Robles García
Secretaria del Medio Ambiente

Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Director General de Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández
Directora de Monitoreo de Calidad del Aire

Mónica del Carmen Jaimes Palomera
Subdirectora de Análisis y Modelación

Alfredo Alonso Soler
Subdirector de Análisis Meteorológico

Miguel Sánchez Rodríguez
Subdirector de Monitoreo de Calidad del Aire

José Luis del Río Jáuregui
Subdirector de Sistemas y Comunicaciones

Presentación

La calidad del aire es un tema que interesa cada vez más a una mayor cantidad de personas y en especial, cuando se presentan episodios de alta contaminación. Existen variables relacionadas con la calidad del aire, que también llaman la atención, entre ellas podemos mencionar la radiación solar, que cataliza la formación de contaminantes secundarios y es una de las principales causas del cáncer de piel. El viento, que genera tolvaneras que afectan la visibilidad y transporta los contaminantes a regiones aparentemente libres de emisores de contaminación, o bien, la ausencia de viento que ocasiona el estancamiento de contaminantes. Adicionalmente, la altura sobre el nivel del mar, la latitud y la geografía son características del Valle de México que le dan condiciones particulares a su atmósfera, por lo tanto, influyen en la presencia de contaminantes. También destacan tres épocas del año que propician el incremento de diferentes contaminantes; una es la temporada seca fría que se presenta en otoño e invierno, sus condiciones atmosféricas favorecen la presencia de partículas; otra es la temporada seca caliente que se manifiesta en primavera en donde se incrementa principalmente el ozono y finalmente la temporada de lluvias a mediados del año cuando la atmósfera está más libre de contaminantes criterio; sin embargo, es cuando se presenta la lluvia ácida.

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), es actualmente el más importante del país y uno de los más destacados en Latinoamérica. Su objetivo principal es monitorear la concentración de contaminantes en la atmósfera. Debido a que la información generada es de interés para diversas áreas como la investigación, la salud, la enseñanza y el desarrollo de políticas

ambientales, cada año su personal elabora el Informe Anual de Calidad del Aire, para ponerlo a disposición de todas las personas interesadas.

Este Informe Anual de Calidad del Aire 2019 inicia con el análisis del cumplimiento de la normatividad para cada uno de los contaminantes criterio. Posteriormente trata sobre el comportamiento de las variables meteorológicas registradas durante el año. Más adelante presenta el análisis de las variaciones de los cinco contaminantes principales y sus tendencias, también incluye la revisión del Índice de Calidad del Aire, así como del Carbono Negro. Agrega comentarios y análisis de las causas que ocasionaron los eventos de alta concentración de ozono y partículas durante este año. El capítulo referente al depósito atmosférico revisa la calidad del agua de lluvia y su contenido iónico. En este informe se incluye la evaluación del pronóstico de ozono proveniente del sistema de modelación de calidad del aire en la CDMX (AQFS-MexDF). Adicionalmente se describen los resultados de la campaña de medición del TAG-GC-MS durante la época seca caliente y el impacto de los incendios de mayo. Finalmente se dedica un capítulo al Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS), el cual es una herramienta para que la población de la CDMX tome decisiones en el cuidado de su salud, el IRPS es un índice multicontaminante y es resultado de la colaboración de la SEDEMA con la Universidad de Nueva York.

Secretaría del Medio Ambiente

Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire

Diseño

Jorge Cornejo Martínez

Integración del documento

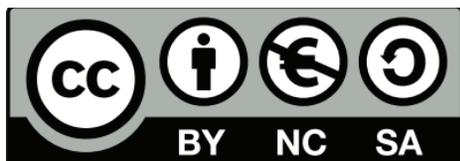
Mónica Jaimes Palomera, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Olivia Rivera Hernández.

Colaboraciones

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

D.R. © 2022

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
Plaza de la Constitución No 1, 3^{er} piso, Colonia Centro,
Cuauhtémoc, Ciudad de México, C.P. 06068



Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

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

Citar este documento como:

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2022). **Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2019**. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.



CALIDAD DEL AIRE

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

Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández

Subdirección de Análisis y Modelación

Mónica Jaimes Palomera, Alejandro Jonathan Gallardo Pérez, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Eduardo Preciado Martínez, Jorge Luis Lara Osorio, Francisco Luna Falfan, Sofía Fernanda Moreno Gillestegui, Citlalli Mendoza Munguía, Laura Edith Ocampo Trejo, Víctor Jorge Taracena Morales, Ángel Frago Chino, Antonio Terrazas Ahumada, Omar Alejandro Quijada Pérez, Lidia Estrada Villegas.

Subdirección de Análisis Meteorológico

Alfredo Alfonso Soler, Milena Lemes Rosales, José Ávalos Torres.

Subdirección de Monitoreo de Calidad del Aire

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

Subdirección de Sistemas y Comunicaciones

José Luis del Río Jáuregui, Juan Manuel Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Leyda Castro Rodríguez, Julio César Martínez Alpizar, Gabriela Hernández Cruz, María Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Octavio Valdés Espinosa, Jorge Cornejo Martínez, Ramón Gaona Díaz, Víctor Manuel Muñoz Valladares, Luis Enrique Ruiz López, Erick Consejo Valenzuela, Christian Alberto Martínez Lozano.

Administración

Margarita Barrientos Contreras, Xóchitl Loretto Carmona, Adriana Ramírez Tecla, Francisco Javier Serrano Vázquez, Carla Fernanda Mayorga Domínguez, Gerardo Samuel López Venegas, Stephanie Montero Bending.

En la elaboración de este informe se tuvo la colaboración de investigadores del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, así como del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Centro de Ciencias de la Atmósfera

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

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

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

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

Índice

Resumen Ejecutivo	10		
Capítulo 1: Cumplimiento de la Normatividad	13		
Dióxido de azufre	16		
Dióxido de nitrógeno	18		
Monóxido de Carbono	20		
Ozono	22		
Partículas PM ₁₀	24		
Partículas PM _{2.5}	26		
Capítulo 2: El tiempo	29		
Temperatura	30		
Humedad Relativa	34		
Precipitación	36		
Presión Atmosférica	38		
Viento	40		
Radiación Solar	44		
Índice UV	47		
Capítulo 3: Calidad del Aire	49		
Dióxido de azufre	52		
Dióxido de nitrógeno	55		
Monóxido de carbono	58		
Ozono	61		
Partículas suspendidas: PM ₁₀ , PM _{2.5} y PM _{10-2.5}	65		
Índice de Calidad del Aire	75		
Carbono Negro	80		
Tendencias	86		
Capítulo 4: Eventos de alta concentración	93		
Activación Fase I regional PM ₁₀ : 1 de enero	97		
Activación de Fase I O ₃ : 30 de marzo	101		
Activación de Fase I O ₃ : 10 de abril	104		
Activación de Fase I O ₃ : 16 de abril	107		
		Contingencia extraordinaria por PM _{2.5} + O ₃ : 10 al 17 de mayo	111
		Descripción de los días previos a la contingencia: 10 al 13 de mayo	114
		Activación de la contingencia extraordinaria: 14 al 17 de mayo	116
		Activación de Fase I PM _{2.5} : 25 de diciembre	120
		Capítulo 5: Depósito Atmosférico	123
		Depósito atmosférico y lluvia ácida	124
		Resultados de la campaña REDDA 2019	125
		Capítulo 6: Evaluación del pronóstico de ozono	135
		Evaluación con estadísticos discretos	137
		Evaluación categórica	138
		Resultados	139
		Capítulo 7: Especiación química horaria de aerosoles atmosféricos	149
		Resultados de la campaña EQAA2.	150
		Introducción	150
		Método	153
		Resultados	154
		Conclusiones y Agradecimientos	161
		Capítulo 8: Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS)	163
		Construcción y cálculo del IRPS	165
		Referencias	169
		Anexos	
		I. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT)	180
		II. Operación del SIMAT	190
		III. Estaciones nuevas	196
		IV. Estadísticas básicas	200
		V. Historial de Contingencias Atmosféricas	226
		VI. Mosaicos de calidad del aire.	230





El Dr. Mario Molina con la Jefa de Gobierno de la CDMX, Dra. Claudia Sheinbaum, en un evento sobre las condiciones de la calidad del aire en el mes de mayo de 2019.

Fuente: Jefatura de Gobierno/Comunicación/16 mayo 2019

Dedicamos este Informe en memoria:

Dr. Mario Molina Pasquel y Henríquez (1943 – 2020).

Ingeniero Químico y Premio Nobel de Química 1995.

*Estudió el impacto de los gases clorofluorocarbonos
en la capa de ozono de la estratósfera.*

*Promovió, a través del Centro Molina para Estudios Estratégicos
sobre Energía y Medio Ambiente (MCE2), la campaña MILAGRO
2006*

*(Megacity Initiative: Local and Global Research Observations),
considerada la primera evaluación de la calidad del aire de la
ZMVM*

a nivel regional.

**Por sus aportes al conocimiento de los fenómenos
que afectan la calidad del aire en nuestra Ciudad
y por su calidad humana.**

RESUMEN EJECUTIVO

Durante 2019, la concentración del dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), cumplieron los límites establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental (NOM); sin embargo, en el caso de ozono (O₃), partículas menores a 10 micrómetros y a 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}), se superaron los límites establecidos, a nivel nacional e internacional, como los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En las condiciones meteorológicas, la temperatura promedio anual fue de 17.2 °C, el cual fue mayor en comparación a 2018. La temperatura máxima se presentó en abril con 33.6°C, mientras que la mínima fue -2.8°C durante enero y diciembre. La humedad relativa (HR) tuvo un promedio anual de 53.5 %, inferior al año 2018, y el mes más seco fue abril con 38% HR. En la precipitación pluvial, los meses de abril a septiembre registraron acumulados mensuales menores a la normal climática (1981 – 2010) y solo octubre presentó anomalías positivas. La presión atmosférica promedio anual fue de 585 mmHg, la cual se mantiene constante respecto a los años anteriores. En el comportamiento del viento, se observó que de marzo a mayo se presentó la velocidad de viento más alta y en general, el promedio anual fue de 2.1 m/s.

El promedio de radiación solar UV-A y UV-B fue de 1.79 y 0.076 W/m², respectivamente. En el índice UV, el cual traduce la intensidad de la radiación UV a una escala numérica que relaciona los riesgos de la exposición al Sol, se registró un total 232 días durante 2019 (~64% del año) con un IUV EXTREMADAMENTE ALTO con los máximos en marzo, abril y agosto, esto representa un 18% de incremento comparado con 2018.

En términos de calidad del aire, el promedio anual de SO₂ fue de 3.3 ppb con los máximos en los sitios al norte de la ZMVM. El NO₂ tuvo una concentración promedio anual de 21.6 ppb, con el promedio más alto en el sitio Merced (MER) con 31.2 ppb. El CO presentó una concentración promedio anual de 0.38 ppm. La concentración promedio anual de O₃ fue de 31.4 ppb y la media de sus máximos diarios (1h) fue de 100.7 ppb. En las partículas, el promedio anual fue de 70 µg/m³ para PM₁₀, 27.7 µg/m³ para PM_{2.5} y 40 µg/m³ para PM_{10-2.5}; los valores máximos se presentaron en la temporada seca fría y en estaciones ubicadas al norte de la ZMCM. En términos del Índice de Calidad del Aire, fueron 94 días limpios, en los que no se superaron los 100 puntos en ningún contaminante; sin embargo, en 271 días hubo mala calidad del aire (índice > 100), de los cuales 12 fueron de la categoría muy mala (índice > 150).

De manera individual, el O₃ tuvo un total de 204 días con índice mayor a 100, mientras que en PM₁₀ fueron 175 y PM_{2.5} con 55 días.

Los datos de PM_{2.5} (REDMA) se utilizan para analizar la cantidad de carbono negro (CN) y se determinó que la concentración promedio de CN en 2019 fue de 2.4 µg/m³, con el máximo de 24 h de 10.9 µg/m³ en el noroeste de la ZMCM. En abril y mayo, se observaron algunos muestreos con datos altos de concentración que se pueden relacionar con fuentes regionales, como la contribución en las emisiones de los incendios forestales ocurridos en el oeste y sur del país durante la semana del 10 al 17 de mayo.

El análisis de la tendencia (1990 – 2019) de los contaminantes presenta una reducción constante para SO₂, NO_x, NO₂ y CO. Mientras que para O₃, de 1995 a 2007 hay una leve reducción y a partir de 2008 se estabilizó, esto es debido a que la formación de este contaminante secundario está mayormente influenciada por factores meteorológicos además de la emisión de sus precursores. Las PM₁₀, al igual que las PM_{2.5}, tienen un comportamiento variable y son afectadas por la cantidad de incendios forestales.

Durante 2019, se registraron seis eventos de contingencias atmosféricas, la primera fue del 1 al 2 de enero que se declaró Fase I Regional por PM₁₀ con 157 puntos del Índice de Calidad

del Aire en el sitio Villa de las Flores (VIF) y fue consecuencia del uso de pirotecnia y la presencia de inversión térmica. En los meses de marzo a mayo, frecuentemente ocurren condiciones de alta radiación solar, persistencia de sistemas de alta presión, estabilidad atmosférica y cielo despejado; estos factores influyeron en las contingencias por O₃. La segunda contingencia del 2019 se activó del 30 al 31 de marzo, en la que se declaró la Fase I por O₃ con un índice de 155 en la estación Pedregal (PED). El 10 de abril se declaró la tercera contingencia del año, Fase I por O₃ con un índice de 152 puntos en PED, la cual finalizó el 11 de abril. El cuarto evento de contingencia fue del 16 al 18 de abril, también Fase I por O₃ con 154 puntos en la estación Camarones (CAM). En el periodo del 10 al 17 de mayo, se presentó un evento de alta contaminación que fue ocasionado por múltiples incendios forestales dentro y fuera de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), esto afectó la calidad del aire en el centro del país. En consecuencia, del 14 al 17 de mayo, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) activó una **Contingencia Extraordinaria** por la combinación de PM_{2.5} (índice: 161) y O₃ (índice: 142) y debido a la gravedad de la contaminación, hubo cierre de escuelas a nivel básico. La última contingencia fue del 25 al 26 de diciembre, con la Fase I Regional de PM_{2.5} que registró un índice de 155 en el sitio Nezahualcóyotl (NEZ), ocasionada por el uso de pirotecnia y la presencia de inversión térmica.

En la temporada de lluvias se realizó el análisis del depósito atmosférico húmedo, en el que se determinó que el 18.5% de las muestras fueron ácidas ($\text{pH} < 5.6$) y la mayoría se registró en suelo de conservación de la CDMX; sin embargo, también se observó un aumento en muestras con $\text{pH} > 5.6$. Los iones más abundantes fueron el amonio (NH_4^+), el sulfato (SO_4^{2-}) y calcio (Ca^{2+}).

El equipo TAG-GC-MS adquirido por la SEDEMA, realiza especiación química de aerosoles con una resolución horaria. En la campaña del TAG del 2019 (1 de mayo al 06 de junio), se realizó la especiación química de las partículas derivadas de diversas fuentes y procesos, como son los vehículos y la quema de biomasa, que incluye los incendios forestales masivos ocurridos en mayo. Durante la campaña se presentaron marcadores orgánicos asociados con la quema de biomasa (reteno, levoglucosan, compuestos fenólicos, entre otros) y con la capacidad analítica que tiene el TAG-GC-MS, se diferenciaron los marcadores orgánicos de las emisiones vehiculares (benzo[*a*]antraceno, BaA). En este análisis se determinó que, los incendios forestales y agrícolas tuvieron la mayor contribución a la contaminación durante la contingencia del 14 al 17 de mayo, ya que sus marcadores orgánicos incrementaron considerablemente en dicho periodo.

A finales del 2018, la SEDEMA y el Instituto Marron de la Universidad de Nueva York desarrollaron el Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS), que es un índice multicontaminante ($\text{PM}_{2.5} + \text{O}_3 + \text{NO}_2$) y está dirigido a población con sensibilidad a la contaminación, ya sea por una enfermedad preexistente (asma, EPOC, etc.), o bien, porque corresponden a un grupo sensible como niños, adultos mayores, entre otros. El IRPS se publica diariamente y tiene un **valor único** que solo es aplicable para la CDMX; se presenta en una escala numérica (1 al 10+) y de colores (azul a café), entre más alto sea el IRPS, mayor es el riesgo en salud y en cada valor se dan recomendaciones para que la población proteja su salud. Los resultados del IRPS en 2019 demostraron que es una herramienta útil para identificar los días complicados de contaminación, como son año nuevo y navidad, las contingencias de ozono en marzo y abril, así como la semana de incendios en mayo.



CAPÍTULO 1

CUMPLIMIENTO DE LA
NORMATIVIDAD

En cada país se especifican estándares de calidad del aire, los cuales establecen los valores máximos permitidos de contaminantes en el ambiente y su principal objetivo es proteger la salud de la población general, así como de los grupos susceptibles (niños, adultos mayores, embarazadas, personas con enfermedades crónicas respiratorias o cardíacas). Además, en algunos países se consideran umbrales específicos que brindan protección contra la disminución de la visibilidad y para evitar el daño a la fauna, vegetación, a los cultivos y edificios (U.S. EPA, 2021).

En México se tienen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental, las cuales aplican en el territorio nacional y son de carácter obligatorio para las autoridades federales y locales que tengan a su cargo la vigilancia y evaluación de la calidad del aire, las NOM están diseñadas para la protección de los efectos en salud agudos (por exposición a concentraciones altas en periodos cortos) y crónicos (por exposición a largo plazo) relacionados con la contaminación del aire. La actualización de estas NOM es responsabilidad de la Secretaría de Salud (SSA) y de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). En la **Tabla 1.1** se presentan las especificaciones, los indicadores estadísticos, valores de concentración y la fecha de la última actualización para cada una de las NOM vigentes y evaluadas durante 2019.

Tabla 1.1. Normas Oficiales Mexicanas (NOM) vigentes en 2019

Contaminante	NOM	Especificaciones	Última actualización
Ozono (O ₃)	NOM-020-SSA1-2014	95 ppb Promedio horario	19/08/2014
		70 ppb Promedio móvil 8 h	
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm Promedio móvil 8 h	23/12/1994
Dióxido de azufre (SO ₂)	NOM-022-SSA1-2010	110 ppb Promedio 24 h	08/09/2010
		200 ppb 2 ^{do} máximo del promedio móvil 8 h	
		25 ppb Promedio anual	
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1-1993	210 ppb Promedio horario	23/12/1994
Partículas menores a 10 µm (PM ₁₀)	NOM-025-SSA1-2014	75 µg/m³ Promedio 24 h	20/08/2014
Partículas menores a 2.5 µm (PM _{2.5})		40 µg/m³ Promedio anual	
		45 µg/m³ Promedio 24 h	
		12 µg/m³ Promedio anual	

En este primer capítulo se presentan y analizan los resultados del cumplimiento de las NOM para cada contaminante en las estaciones de monitoreo dentro de las 16 alcaldías de la Ciudad de México (CDMX) y 29 municipios conurbados del Estado de México, que conforman la Zona Metropolitana de la Ciudad de México¹ (ZMCM). Adicionalmente, se realiza una comparación con los estándares vigentes de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA, por sus siglas en inglés) y con las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) del 2005, esto con el objetivo de analizar la situación de la ZMCM a nivel internacional. Es importante mencionar que, para determinar el valor de concentración de cada contaminante, primero se obtiene la suficiencia de datos en cada estación de acuerdo al indicador y estándar correspondiente (NOM o U.S. EPA)

En la **Tabla 1.2** se presenta un resumen del cumplimiento en 2019 de los estándares establecidos en las NOM, por la OMS y la U.S. EPA para cada contaminante y entidad que conforma la ZMCM, se puede observar que el CO es el único contaminante que cumplió con todos los estándares nacionales e internacionales en ambas entidades de la ZMCM, mientras que SO₂, NO₂ y CO solo tuvieron cumplimiento con las NOM en ambas entidades; las PM₁₀ únicamente alcanzan los estándares de la U.S. EPA y el O₃, así como PM_{2.5} no cumplen con ningún estándar.

Tabla 1.2. Resumen del cumplimiento de las NOM, valores guía OMS y estándares de la U.S. EPA en 2019.

Contaminante	NOM		OMS		US EPA	
	CDMX	EDOMEX	CDMX	EDOMEX	CDMX	EDOMEX
SO ₂	✓	✓	✗	✗	✗	✗
NO ₂	✓	✓	✗	✗	✓	✓
CO	✓	✓	✓	✓	✓	✓
O ₃	✗	✗	✗	✗	✗	✗
PM ₁₀	✗	✗	✗	✗	✓	✓
PM _{2.5}	✗	✗	✗	✗	✗	✗

✓ Cumple con el valor
✗ No cumple con el valor

¹ZMCM: es el área de cobertura, determinada por la representatividad espacial, de las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). Mientras que la ZMVM se refiere a todas las alcaldías y 59 municipios del Estado de México

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

La cantidad de SO₂ en el aire se relaciona con el azufre en combustibles fósiles y la principal fuente de emisión en la Ciudad de México es el Aeropuerto Internacional “Benito Juárez” en la alcaldía Venustiano Carranza (SEDEMA, 2021). Existen fuentes externas como el corredor industrial Tula-Tepeji en Hidalgo que tiene una contribución importante en los niveles de SO₂ en la ZMCM (De Foy et al., 2009) ya que se quema combustible con alto contenido en azufre que, al liberarse a la atmósfera, se transporta hacia la ciudad por acción del viento y ocasiona incrementos extraordinarios (SO₂ > 200 ppb) especialmente en los sitios al norte. En la ZMCM se usan combustibles de bajo contenido de azufre desde el 2010, por lo que la contribución de las fuentes móviles es menor.

Los impactos en salud por la exposición a SO₂ se relacionan con efectos respiratorios que incluyen exacerbación del asma y dificultad para respirar, también se han relacionado con un incremento de visitas a urgencias e ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, especialmente en grupos de riesgo como niños, adultos mayores y asmáticos (U.S. EPA, 2020). El SO₂ causa daño al ambiente, ya que contribuye a la acidez de la lluvia, que afecta cultivos, cuerpos de agua e infraestructura urbana (Turco, 2002). La NOM-022-SSA1-2010 establece los límites de SO₂, en la que se evalúan tres valores de concentración para: el promedio de 24 h, el segundo

máximo del promedio móvil de 8 h y el promedio anual; los cuales no deben superarse para el cumplimiento de la NOM y la protección de la salud. La NOM se actualizó a finales del 2019 y entró en vigor en 2020; sin embargo, la evaluación en este informe se hizo con NOM-022-SSA1-2010, vigente en 2019.

En la **Tabla 1.3** se presentan los máximos de los indicadores de la NOM, la comparación con la guía OMS y el estándar de la U.S. EPA. Se observa que la ZMCM cumple con la NOM; sin embargo, en ambas entidades se superan los umbrales de la OMS y U.S. EPA. En los valores máximos por estación (**Figura 1.1**) se observó que en el Estado de México se registraron los datos más altos de SO₂, debido al transporte de emisiones provenientes de Tula, industrias y fuentes móviles que usan combustibles con mayor contenido de azufre. En la Ciudad de México, los sitios del centro como Hospital General (HGM), Merced (MER) e Iztacalco (IZT) presentaron los máximos, debido a la cantidad de fuentes móviles, también se ha estimado por medio de trayectorias, que las emisiones del corredor industrial Tula pueden llegar al centro y sur de la ZMCM. Los sitios Milpa Alta (MPA) y UAM Xochimilco (UAX) en la CDMX; Montecillo (MON) e Instituto de Investigaciones Nucleares (INN) en Estado de México, cumplieron con la guía OMS para el promedio de 24 h.

Tabla 1.3. Evaluación del cumplimiento de la **concentración máxima** de SO₂ con la NOM-022-SSA1-2010, guía OMS y el estándar U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS	U.S. EPA	
	Promedio 24 h	2° máximo del promedio móvil de 8 h	Promedio 24 h*	Promedio trianual del P99 del máximo 1 h	
	110 ppb	200 ppb	25 ppb	75 ppb	
ZMCM	44 ppb	88 ppb	7 ppb	91 µg/m ³	119 ppb
CDMX	28 ppb	67 ppb	4 ppb	58 µg/m ³	100 ppb
EDOMEX	44 ppb	88 ppb	7 ppb	91 µg/m ³	119 ppb

*Calculado a condiciones locales de 585 mmHg y 17°C
No cumple con el estándar

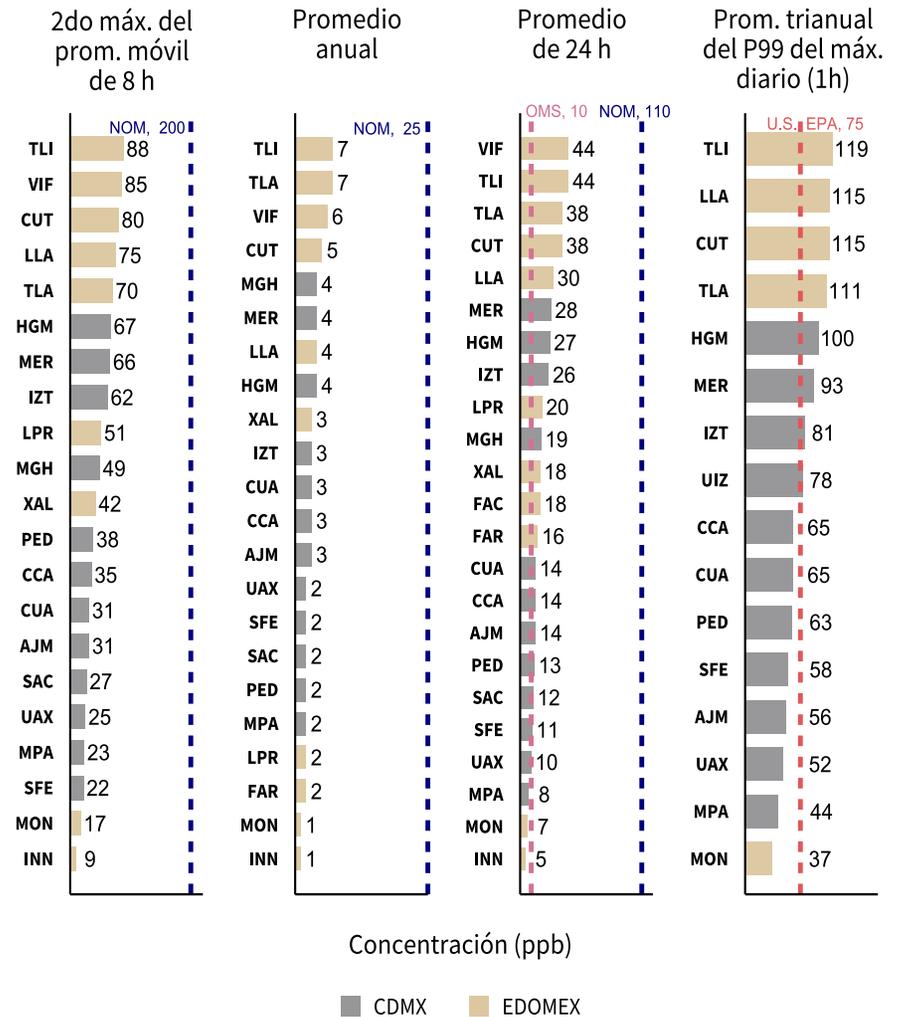


Figura 1.1. Evaluación de la NOM-022-SSA1-2010 (línea azul), guía OMS (línea rosa) convertida en ppb* y del estándar U.S. EPA (línea roja) por estación. Las barras en gris son los sitios en CDMX y las doradas son del Estado de México. Los valores corresponden al máximo anual de cada indicador.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

Los óxidos de nitrógeno es un conjunto de compuestos formados por oxígeno y nitrógeno, entre los que se encuentra el dióxido de nitrógeno (NO₂), el cual se relaciona directamente con las emisiones vehiculares ya que se forma a partir de la reacción del óxido nítrico (NO), que emiten los automóviles, así como del nitrógeno y oxígeno presentes en la atmósfera. En la Ciudad de México, se estima que el 86% de las emisiones de todos los óxidos de nitrógeno (NO_x) provienen de fuentes móviles (SEDEMA, 2021), por lo que, las personas que están cerca de vialidades con alto tránsito tienen una mayor exposición a niveles nocivos y constantes, lo que puede afectar la salud. La exposición a corto plazo al NO₂ puede agravar el asma, así como exacerbar otras enfermedades respiratorias y cardíacas preexistentes, esto incrementa las admisiones hospitalarias y visitas a urgencias. La exposición prolongada puede contribuir al desarrollo del asma y aumentar la susceptibilidad a infecciones respiratorias.

El principal efecto ambiental de los NO_x es su reacción con los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) para formar ozono, además interactúan con el amoníaco y otros compuestos para formar partículas que dañan la salud y el medio ambiente. Adicionalmente, la deposición de NO_x en la lluvia contribuye a su acidificación, a la eutrofización y saturación de nitrógeno en suelos y aguas superficiales. Estos efectos pueden cambiar

la diversidad de ecosistemas, afectar cultivos, infraestructura histórica y urbana (U.S. EPA, 2020).

La NOM-023-SSA1-1993 establece un límite para NO₂, correspondiente al máximo de 1 hora y que no deberá superarse durante el año para el cumplimiento de la norma y la protección de la salud. Es importante mencionar que esta NOM no se ha superado en la ZMCM desde el año 2010. En la **Tabla 1.4** se presenta la evaluación de la NOM, así como la comparación con la guía de la OMS y el estándar de la U.S. EPA. Se puede observar que la concentración de NO₂ cumple con todos los estándares excepto en el promedio anual sugerido por la OMS, el cual se supera en ambas entidades.

En la evaluación de los indicadores por estación (**Figura 1.2**) se observa que en el centro y norte de la ZMCM se registraron los valores máximos en el indicador de una hora, esto es ocasionado por la cantidad de fuentes móviles y tránsito vehicular en dichas regiones. En la Ciudad de México, las estaciones Merced (MER), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), UAM Xochimilco (UAX), Iztacalco (IZT) y Hospital General (HGM) presentaron los máximos, mientras que, en el Estado de México fueron Tlalnepantla (TLA), FES Acatlán (FAC) y Xalostoc (XAL). Los mínimos de NO₂ se registraron en el sureste, en sitios como Milpa Alta (MPA) y Tláhuac (TAH).

Tabla 1.4. Evaluación del cumplimiento de la concentración máxima de NO₂ con la NOM-023-SSA1-1993, guía de la OMS y el estándar de la U.S. EPA.

Entidad	NOM	OMS		U.S. EPA	
	Núm. de excedencias	Promedio horario*	Promedio anual*	Promedio trianual del P98 del máximo diario (1 h)	Promedio anual
	210 ppb	200 µg/m ³	40 µg/m ³	100 ppb	53 ppb
ZMCM	0 horas	161 µg/m ³	46 µg/m ³	83 ppb	31 ppb
CDMX	0 horas	155 µg/m ³	46 µg/m ³	83 ppb	31 ppb
EDOMEX	0 horas	161 µg/m ³	43 µg/m ³	76 ppb	29 ppb

*Calculado a condiciones locales de 585 mmHg y 17°C
No cumple con el estándar

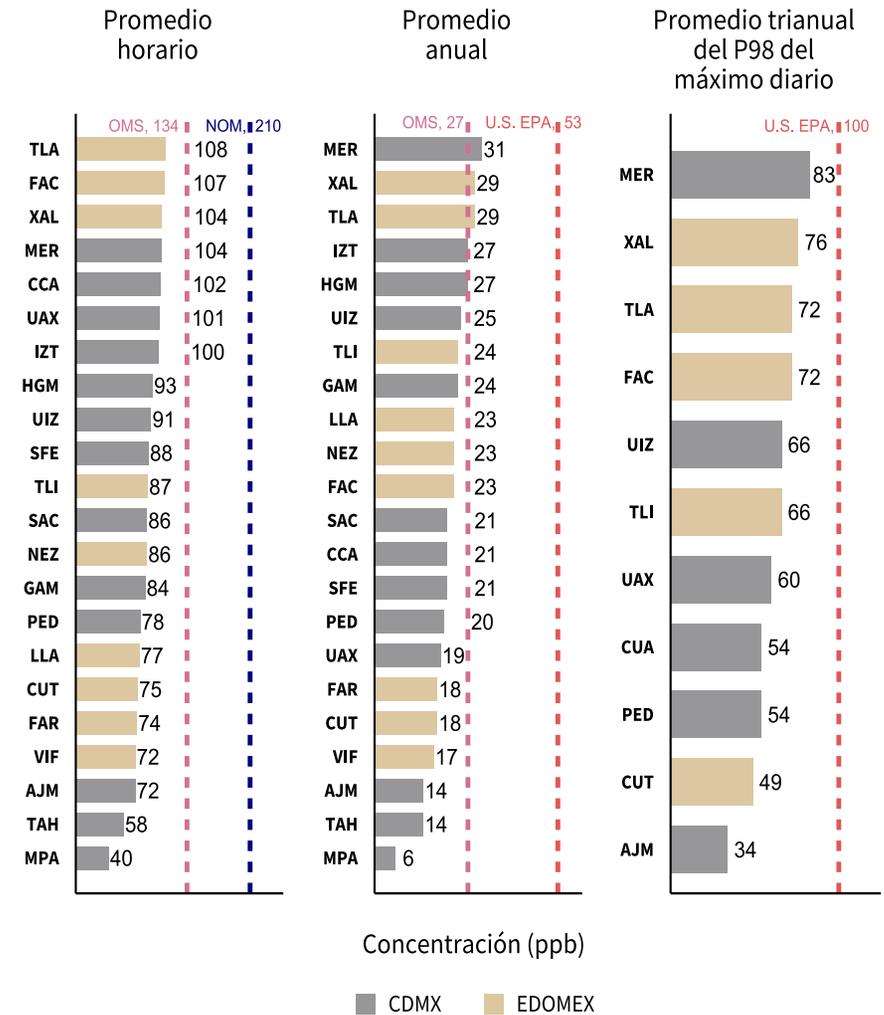


Figura 1.2. Evaluación de la NOM-023-SSA1-1993 (línea azul), guía OMS (línea rosa) convertida en ppb* y del estándar U.S. EPA (línea roja) por estación. Las barras en gris son los sitios en CDMX y las doradas son del Estado de México. Los valores corresponden al máximo anual de cada indicador.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El origen y comportamiento del monóxido de carbono es similar al NO₂, ya que su fuente principal de emisión son los vehículos. El CO se libera al ambiente cuando se queman combustibles fósiles o biomasa, debido a que la combustión es incompleta.

El impacto en salud más importante ocasionado por la exposición al CO es la reducción de la cantidad de oxígeno que llega a los órganos y tejidos del cuerpo. Para las personas con enfermedades cardíacas, esto puede provocar dolor en el pecho y otros síntomas que tienen, como consecuencia ingresos hospitalarios y visitas a urgencias. El efecto ambiental más importante de las emisiones de CO es que contribuyen a la formación de CO₂, que es el gas de efecto invernadero más importante (U.S. EPA, 2020).

La NOM-021-SSA1-1993 establece el límite para el CO, en la que se evalúa un valor de concentración correspondiente al promedio de 8 h, el cual no debe superarse en todo el año para el cumplimiento de la norma y la protección de la salud. Es importante mencionar que la concentración del monóxido de

carbono se ha mantenido por debajo del límite de la NOM desde el año 2001, además los valores máximos de concentración del contaminante también cumplen con la guía de la OMS y los estándares de la U.S. EPA (**Tabla 1.5**).

En la evaluación de los indicadores por estación de monitoreo (**Figura 1.3**) se puede observar que los sitios ubicados en el Estado de México registraron los valores máximos de CO, esto es ocasionado por la cantidad de tránsito vehicular en la zona. En la Ciudad de México, las estaciones Merced (MER) e Iztacalco (IZT) en el centro, así como Santiago Acahualtepec (SAC) en el sureste, son las que presentaron los valores máximos dentro de la entidad, mientras que, para el Estado de México, la concentración más alta fue en los sitios Villa de las Flores (VIF), Xalostoc (XAL), Nezahualcóyotl (NEZ) y La Presa (LPR). Las estaciones con los valores mínimos de CO en 2019 se registraron en el suroeste, en los sitios Santa Fe (SFE), Pedregal (PED) y Ajusco Medio (AJM).

Tabla 1.5. Evaluación del cumplimiento de la **concentración máxima** de CO con la NOM-021-SSA1-1993, guía de la OMS y el estándar de la U.S. EPA.

Entidad	NOM	OMS		U.S. EPA	
	Promedio móvil 8 h	Promedio horario*	Promedio móvil 8 h*	Promedio horario	Promedio móvil 8 h
	11 ppm	30,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 ppm	9 ppm
ZMCM	2.8 ppm	4,711 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,537 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5.2 ppm	2.8 ppm
CDMX	2.3 ppm	3,261 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,084 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	3.6 ppm	2.3 ppm
EDOMEX	2.8 ppm	4,711 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,537 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5.2 ppm	2.8 ppm

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

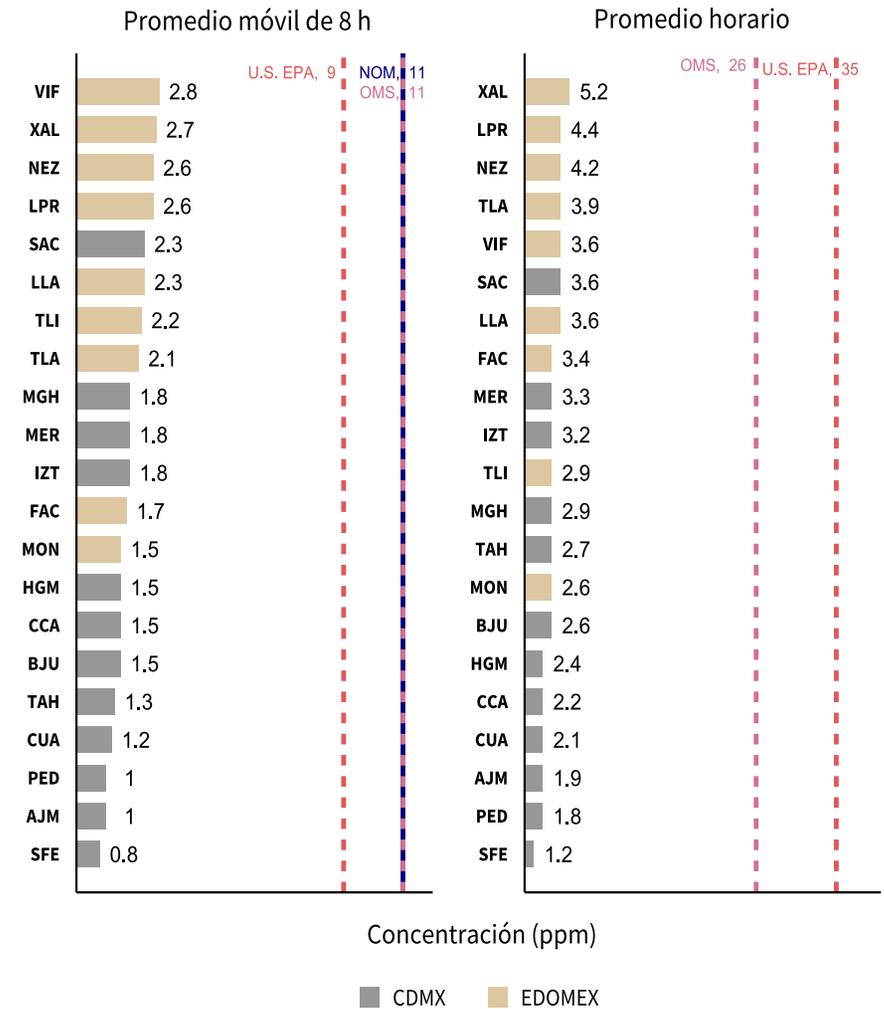


Figura 1.3. Evaluación de la NOM-021-SSA1-1993 (línea azul), guía OMS (línea rosa) convertida en ppm* y del estándar U.S. EPA (línea roja) por estación. Las barras en gris son los sitios en CDMX y las doradas son del Estado de México. Los valores corresponden al máximo anual de cada indicador.

OZONO (O₃)

El ozono es un contaminante secundario ya que se forma a partir de sus precursores que son los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno (NOx), la reacción se lleva a cabo en presencia de luz solar, la cual funciona como catalizador en la formación del ozono. Además, la cantidad y acumulación de O₃ en la ZMVM depende de factores meteorológicos (estabilidad atmosférica, velocidad de viento, nubosidad, entre otros) y geográficos (montañas, altitud y latitud).

Existen estudios que relacionan la exposición al O₃ con la reducción de la función pulmonar y ocasiona síntomas respiratorios, como tos y dificultad para respirar, puede agravar el asma, otras enfermedades como el enfisema y hace que los pulmones sean más susceptibles a las infecciones. La exposición al O₃ de largo plazo puede incrementar el riesgo de mortalidad prematura por causas respiratorias. En el impacto ambiental, el O₃ ocasiona daño a la reproducción y el crecimiento de las plantas, reduce la fotosíntesis y su capacidad de absorber CO₂, también se ha reportado que disminuye el rendimiento de los cultivos y además es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento de la atmósfera (U.S. EPA, 2020).

En la ZMCM, el O₃ es uno de los contaminantes que presenta mayor contribución a la mala calidad del aire, ya que constantemente supera el límite de la NOM-020-SSA1-2014 en ambos indicadores establecidos, en el promedio horario (95 ppb) y el promedio móvil de 8 h (70 ppb). En 2019 se superó la NOM en ambas entidades que conforman la ZMCM; sin embargo, en la Ciudad de México se alcanzan los valores máximos debido al transporte de contaminantes ocasionado por el viento predominante de norte a sur.

Adicionalmente, la concentración registrada también superó la guía de calidad del aire de la OMS y el estándar de la U.S. EPA (**Tabla 1.6**). En el análisis por estación (**Figura 1.4**), se puede observar que los sitios ubicados en la Ciudad de México registraron mayor número de horas que superaron 95 ppb, con el máximo en Pedregal (PED) con un acumulado de 389 horas durante 2019, mientras que el mínimo de horas se registró en el Estado de México en las estaciones Chalco (CHO) con 2 horas y Villa de las Flores (VIF) con 18 horas. En el indicador del promedio móvil de 8 h, las estaciones Tultitlán (TLI) en el Estado de México y Camarones (CAM) en CDMX, presentaron los valores máximos con 126 y 124 ppb, respectivamente.

Tabla 1.6. Evaluación del cumplimiento de la concentración máxima de O₃ con la NOM-020-SSA1-2014, guía de la OMS y el estándar de la

Entidad	NOM		OMS	U.S. EPA
	Núm. de excedencias	Promedio móvil 8 h	Promedio móvil 8 h*	Promedio trianual del 4 ^{to} máx. del móvil de 8 h
	95 ppb	70 ppb	100 µg/m ³	75 ppb
ZMCM	785 horas	126 ppb	247 µg/m ³	155 ppb
CDMX	688 horas	124 ppb	247 µg/m ³	155 ppb
EDOMEX	499 horas	126 ppb	245 µg/m ³	142 ppb

*Calculado a condiciones locales de 585 mmHg y 17°C
No cumple con el estándar

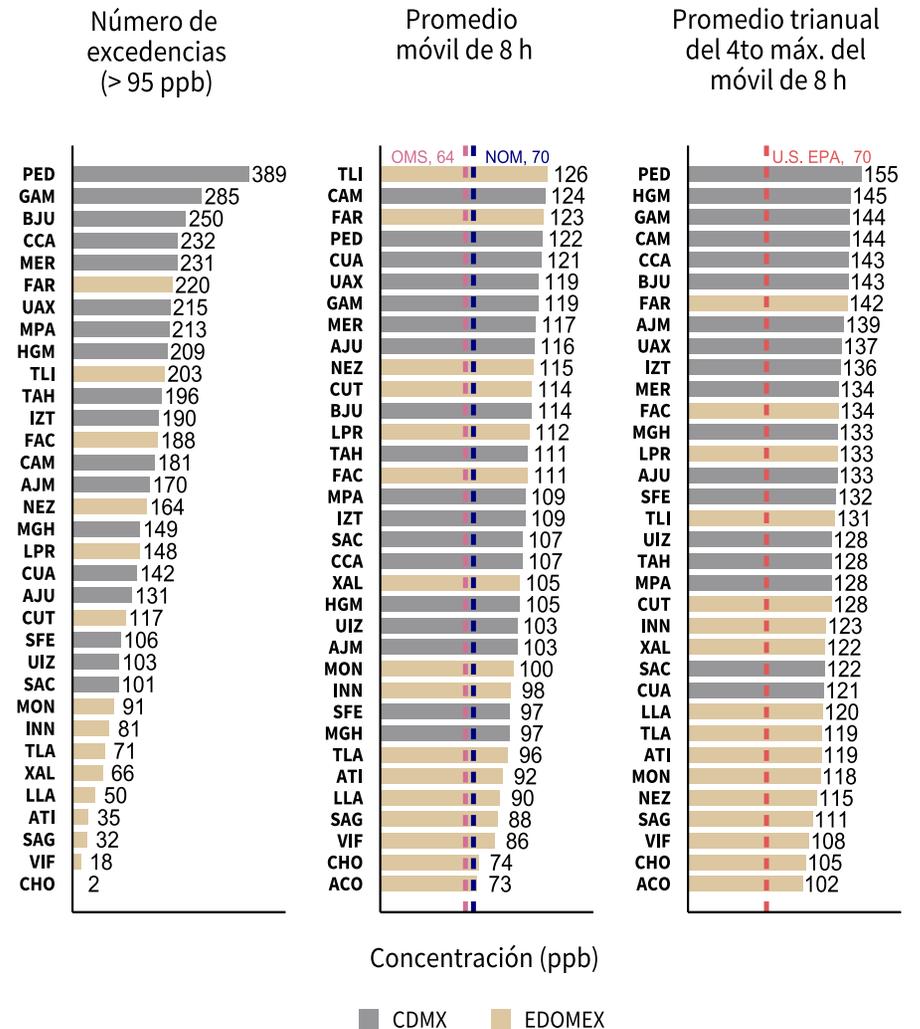


Figura 1.4. Evaluación de la NOM-020-SSA1-2014 (línea azul), guía OMS (línea rosa) convertida en ppb* y el estándar U.S. EPA (línea roja) por estación. Las barras en gris son los sitios en CDMX y las doradas son del Estado de México. Los valores corresponden al máximo anual del indicador. La NOM especifica que, si un sitio no tiene suficiencia de datos, pero supera el límite, se evalúa su cumplimiento de la NOM debido al principio precautorio.

PARTÍCULAS MENORES A 10 μ m (PM₁₀)

Las PM₁₀ se originan en diversos procesos, por lo tanto, su composición y cantidad dependen de diferentes fuentes tanto de origen antropogénico (tránsito vehicular, industria, construcción) como natural (polvo del suelo, bio-aerosoles, emisiones volcánicas e incendios forestales). De acuerdo con el Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2018, las principales fuentes de PM₁₀ es la resuspensión de polvo en vialidades pavimentadas, fuentes móviles y fuentes de área (SEDEMA, 2021). En el impacto a la salud, las PM₁₀ tienen un efecto directo con enfermedades pulmonares como el asma y el EPOC (MacNee y Donalson, 2000). El impacto ambiental de las PM₁₀ es la reducción de visibilidad, además pueden contener compuestos que alteren el equilibrio de nutrientes en suelos y cuerpos de agua, dañar los bosques sensibles y los cultivos agrícolas (U.S. EPA, 2020).

La NOM-025-SSA1-2014 establece límites para las PM₁₀, en la cual se evalúan dos indicadores correspondientes al promedio de 24 h y el promedio anual, que no deberán superarse para el cumplimiento de la NOM y la protección de la salud de la población. Sin embargo, la concentración de PM₁₀ en la ZMCM constantemente alcanza valores altos, lo cual es más frecuente de enero a febrero y noviembre a diciembre.

Es importante mencionar que la evaluación de la NOM se realiza con los datos de la **Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)** debido a que cuenta con los equipos con el método de referencia establecido por la U.S. EPA.

En 2019, se superaron los límites de la NOM y de la guía de calidad del aire de la OMS, con los valores máximos en el Estado de México, este comportamiento es similar en años anteriores. Por otro lado, el estándar de la U.S. EPA es el único que se cumplió en ambas entidades (**Tabla 1.7**).

En la evaluación de los límites por estación de monitoreo (**Figura 1.5**) se observó que los sitios ubicados en el Estado de México registraron los valores máximos en todos los indicadores calculados de PM₁₀ como es el caso de Xalostoc (XAL) y La Presa (LPR). Dentro de la Ciudad de México, las estaciones Lomas (LOM) y Merced (MER) presentaron los valores más altos; sin embargo, son considerablemente menores que en el Estado de México. El valor mínimo se registró en Pedregal (PED) y es el único sitio que cumplió con la NOM en ambos indicadores durante 2019.

Tabla 1.7. Evaluación del cumplimiento de la concentración máxima de PM₁₀ con la NOM-025-SSA1-2014, guía de la OMS y el estándar de la U.S.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA
	Promedio 24 h	Promedio anual	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2° máx. 24 h
	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZMCM	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CDMX	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
EDOMEX	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

No cumple con el estándar

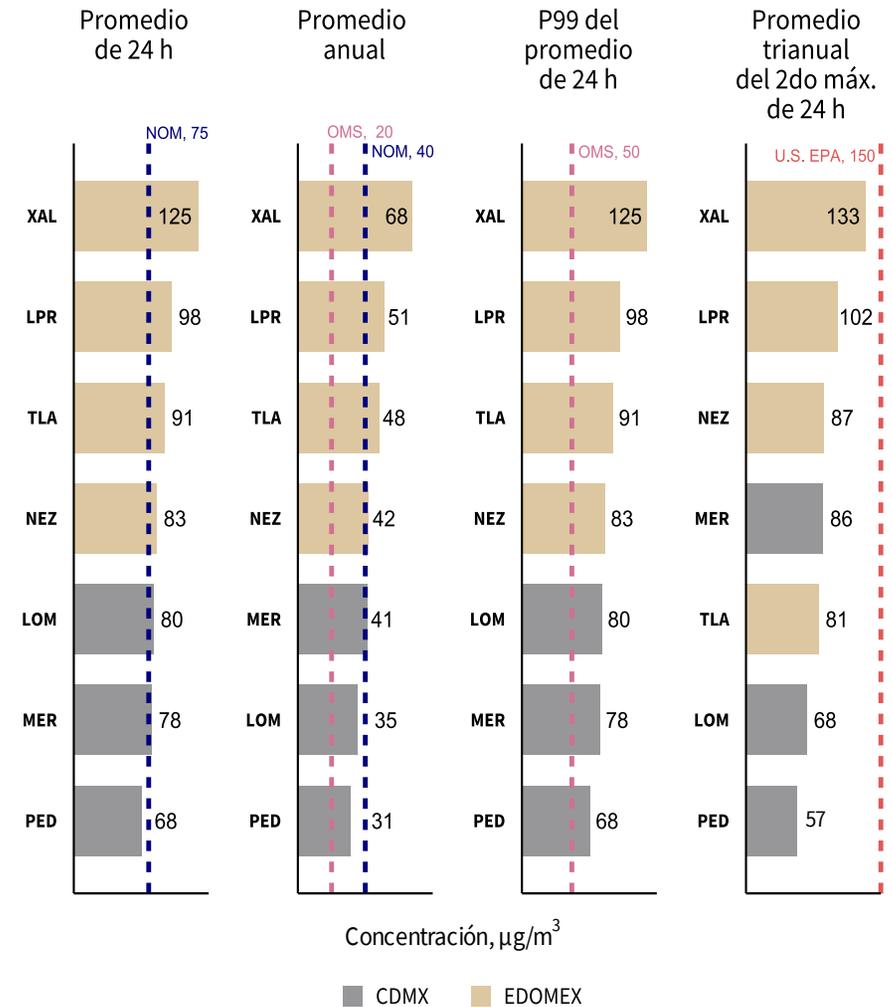


Figura 1.5. Evaluación de la NOM-025-SSA1-2014 (línea azul), guía OMS (línea rosa) y el estándar de U.S. EPA (línea roja) por estación. Las barras en gris son los sitios en CDMX y las doradas son del Estado de México. Los valores corresponden al máximo anual de cada indicador.

PARTÍCULAS MENORES A 2.5 μm (PM_{2.5})

Las PM_{2.5} tienen origen antropogénico y natural, estas partículas más finas son parte de las PM₁₀ y se estima que contribuyen aproximadamente con el 52% de la masa total de PM₁₀ (SEDEMA, 2020); sin embargo, esta contribución varía dependiendo de la ubicación de las estaciones. De acuerdo con el último Inventario de Emisiones de la Ciudad de México (SEDEMA, 2021), la mayor contribución de PM_{2.5} es fuentes móviles con 43% y fuentes de área con 36%. En la Ciudad de México se hicieron campañas para estudiar la composición de las PM_{2.5} y observó que en su mayoría están constituidas en un 59% por compuestos orgánicos, minerales y metales, 33% por inorgánicos (nitrato, sulfato, amonio) y 8% por carbono negro (SEDEMA, 2018).

La exposición a PM_{2.5}, tiene consecuencias en la salud de la población, en el sistema cardiovascular, incluidos ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares, también están relacionadas con ataques de asma, exacerbación de síntomas respiratorios y cáncer. Estos efectos pueden resultar en visitas a urgencias, hospitalizaciones y, en algunos casos, muerte prematura. El impacto ambiental de PM_{2.5} es la reducción de visibilidad, se depositan en suelos o aguas superficiales y puede acidificar cuerpos de agua, alterar los nutrientes en el suelo, dañar bosques y cultivos agrícolas; así como afectar la diversidad de ecosistemas (U.S. EPA, 2020).

Es importante mencionar que la evaluación de la NOM y estándares internacionales se realiza con los datos de la **Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)** debido a que cuenta con los equipos con el método de referencia establecido por la U.S. EPA.

La NOM-025-SSA1-2014 establece límites para las PM_{2.5}, en la que se evalúan dos indicadores correspondientes al promedio de 24 h y promedio anual, los cuales no deberán superarse en todo el año para el cumplimiento de la NOM y la protección de la salud. Sin embargo, las PM_{2.5} es uno de los contaminantes que frecuentemente presenta valores altos en la ZMCM. De acuerdo con los datos obtenidos para 2019 (**Tabla 1.8**), la concentración de PM_{2.5} no cumple con los límites nacionales ni con los estándares internacionales, OMS y U.S. EPA. Los valores máximos de los indicadores se presentaron en el Estado de México, en estaciones como XAL y TLA, mientras que, en la CDMX los máximos ocurrieron en los sitios MER y PED (**Figura 1.6**). Durante mayo del 2019 se registraron múltiples incendios dentro y fuera de la ZMVM, en consecuencia, las PM_{2.5} incrementaron en el suroeste, centro y este de la zona metropolitana, lo cual impactó en sitios como PED, que comparado con 2018, tuvo un incremento de 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en su promedio de 24 h.

Tabla 1.8. Evaluación del cumplimiento de la **concentración máxima** de PM_{2.5} con la NOM-025-SSA1-2014, guía de la OMS y el estándar de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA	
	Promedio 24 h	Promedio anual	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del P98 24 h	Promedio trianual
	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZMCM	66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CDMX	58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
EDOMEX	66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

No cumple con el estándar

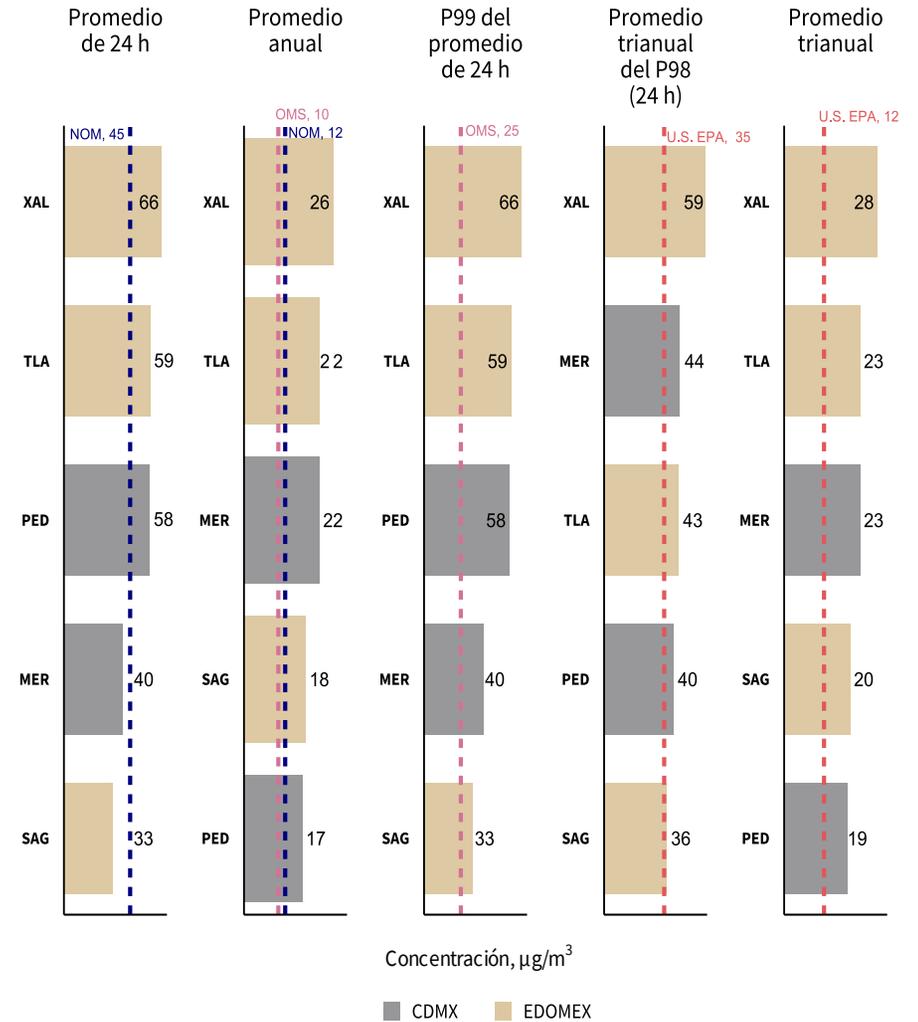


Figura 1.6. Evaluación de la NOM-025-SSA1-2014 (línea azul), guía OMS (línea rosa) y el estándar de U.S. EPA (línea roja) por estación. Las barras en gris son los sitios en CDMX y las doradas son del Estado de México. Los valores corresponden al máximo anual de cada indicador.



CAPÍTULO 2

EL TIEMPO

TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud escalar que se mide con un termómetro o termistor, existen varias escalas para representar su magnitud, la más conocida es la Celsius (°C), la cual se utiliza en el país en la caracterización de la temperatura. Esta variable tiene una distribución en el planeta relacionada con la cantidad de radiación solar, ya que, en latitudes tropicales, donde llega mayor radiación, se registran temperaturas más elevadas que en el resto de las latitudes. Sin embargo, en una misma latitud se pueden observar diferencias de temperatura asociadas con la altura, es decir, a mayor altitud menor temperatura, por lo que en regiones costeras la temperatura es mayor en comparación con zonas centrales, aunque sea la misma latitud. En términos de calidad del aire, la temperatura elevada está relacionada con alta radiación ultravioleta, además de la interacción con otras variables meteorológicas; lo que favorece condiciones para la formación de contaminantes fotoquímicos como el ozono. Los episodios de alta concentración de PM_{2.5} también se pueden asociar a la combinación de temperatura elevadas con otros factores como baja humedad relativa y lluvia escasa, que propicia un suelo seco, y en consecuencia, aumenta la probabilidad de incendios, así como condiciones adversas para que se puedan controlar y sofocar.

Por el contrario, la temperatura baja ocasiona que la masa de aire sea más seca y predominan condiciones de estabilidad atmosférica, si esto se combina con viento débil y cielo despejado, provoca que los contaminantes queden suspendidos cerca de la superficie por más tiempo y se incremente su concentración.

La Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA por sus siglas en inglés) reportó que el 2019 fue el segundo año más cálido en 140 años, con una anomalía² de temperatura global en superficie terrestre y oceánica de +0.95 °C respecto a la media. Este valor es 0.04 °C menor al récord de +0.99 °C de 2016 y es 0.02 °C mayor al registrado en 2015 (+0.93 °C). Los cinco años más cálidos de 1880-2019 se han observado desde 2015, mientras que nueve de los diez años más cálidos desde 2005. El 2019 comenzó con un “Niño” de débil a moderado y pasó a condiciones neutrales del ENSO (El Niño –Southern Oscillation) en julio. Durante el año, cada temperatura mensual se situó entre las cinco más cálidas para sus respectivos registros históricos, con junio y julio como los más cálidos. La temperatura anual global ha aumentado a un ritmo medio de 0.07°C por década desde 1880 y más del doble (+0.18°C) desde 1981 (NOAA, 2020)

²Anomalía: desviación o sesgo del valor de un elemento del clima con respecto a su valor normal para el mismo lapso de tiempo.

Durante el 2019, de acuerdo con la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), la temperatura anual en la ZMCM incrementó con respecto a los años anteriores, con un valor de 17.2 °C (**Figura 2.1a**), el cual fue 0.5 °C superior al observado en 2018. En los promedios mensuales, el máximo se registró en mayo con 20.3 °C, mientras que el mínimo fue durante enero con un promedio de 14.0 °C (**Figura 2.1b**). La temperatura horaria máxima registrada fue de 33.6 °C, el 18 de abril a las 15:00 h en FES Acatlán (FAC); mientras que el mínimo fue de -2.8 °C, registrado en dos ocasiones, el 21 de enero a las 08:00 h en Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) y el 7 de diciembre a las 07:00 h en Ajusco (AJU). Estos valores mínimos estuvieron relacionados con el desplazamiento de frentes fríos sobre el país; en enero fue el frente frío No. 29 (17-21 de enero) de la temporada septiembre 2018 – mayo 2019; que provocó el mayor descenso de temperatura en el país (SMN, 2019a). El 4 de diciembre se presentó el frente frío No. 20 de la temporada septiembre 2019 – mayo 2020 (SMN, 2019b).

En la variación horaria (**Figura 2.1c**) se observa que el mínimo fue entre las 05:30 y 06:30 h, lo que implica que fue el horario en que la superficie liberó completamente la radiación absorbida durante el día y sugiere que la irradiación en la cuenca fue casi una hora más temprano que en años anteriores, esto es consecuencia de una menor cobertura de

nubosidad durante la madrugada. Por otro lado, los valores más altos se registraron entre las 14:00 y las 16:00 h.

La distribución espacial de temperatura anual (**Figura 2.1d**), presenta los valores más altos en el centro de la ciudad, debido a la escasez de áreas naturales, mayor tránsito vehicular y materiales de construcción de las edificaciones y calles, esto ocasiona el efecto de isla de calor. En cambio, las estaciones más alejadas de las zonas urbanizadas, es decir, en la periferia, tienen los valores mínimos de temperaturas. La estación con el máximo anual fue Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) con 18.9 °C, en los límites de las alcaldías Gustavo A. Madero y Azcapotzalco. El mínimo anual fue en INN con 10.0 °C, al suroeste de la ZMCM en Ocoyoacac, Estado de México, donde el relieve es de valle y es una zona boscosa.

La serie de tiempo del periodo 1986-2019 (**Figura 2.2**) presenta una tendencia creciente en las últimas décadas, lo cual es congruente con los registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2019a), que en 2019 reportan una temperatura a nivel nacional de 22.4 °C, lo cual fue 1.5 °C mayor a la normal climatológica 1981-2010, este valor continúa con la tendencia del incremento desde el año 2011. En la **Tabla 2.1** se presenta la cantidad de registros en 2019 que superaron o igualaron el récord de temperatura máxima diaria para su estación climatológica en la Ciudad de México.

EL TIEMPO

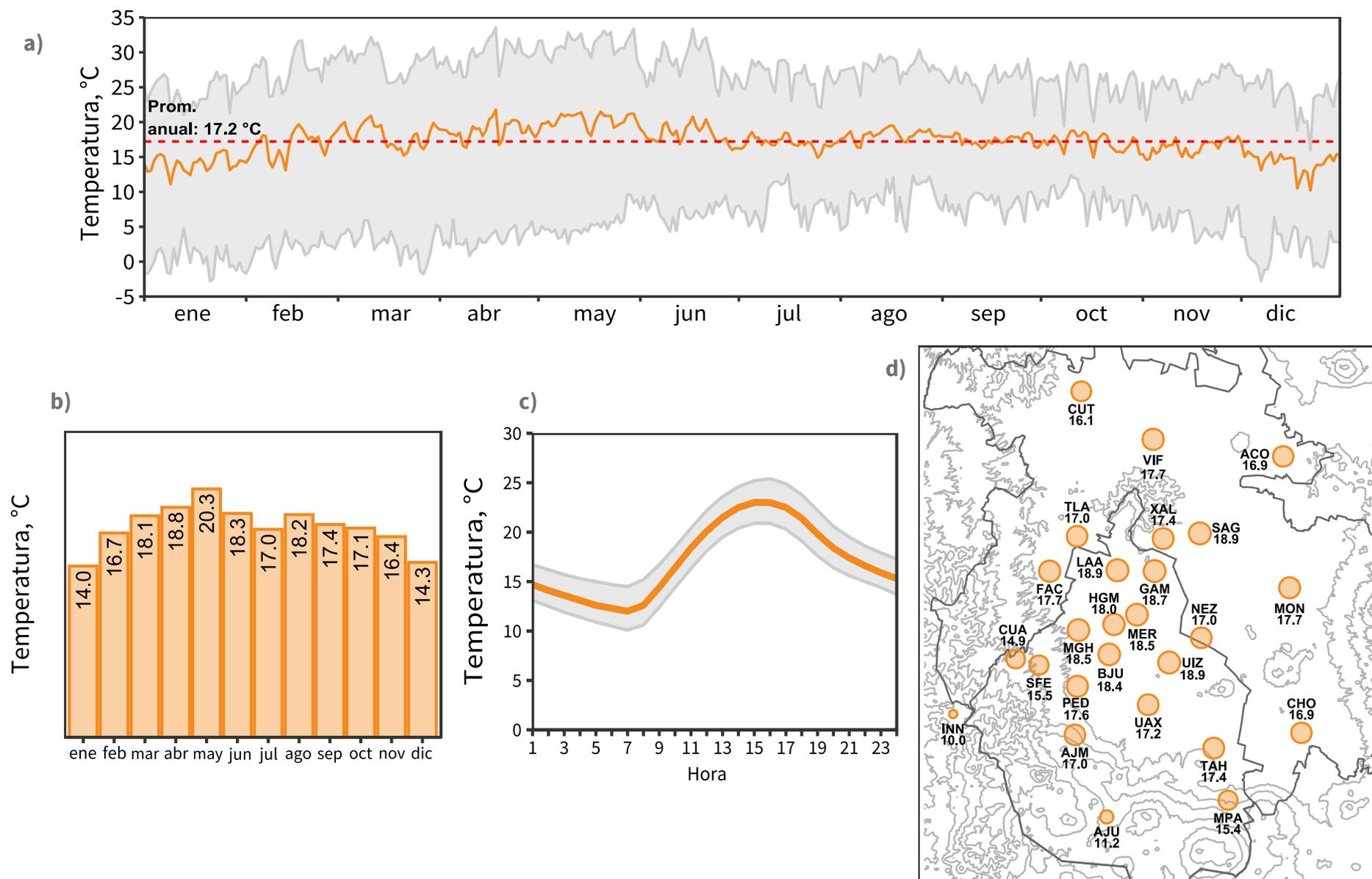


Figura 2.1. Comportamiento de la temperatura ambiente en 2019. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea gruesa continua), máximo y mínimo (sombreado gris) y el promedio anual (línea punteada). **b)** Promedio mensual de la temperatura. **c)** Perfil horario, la línea gruesa representa el promedio en cada hora, mientras que el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual de la temperatura (°C) por estación.

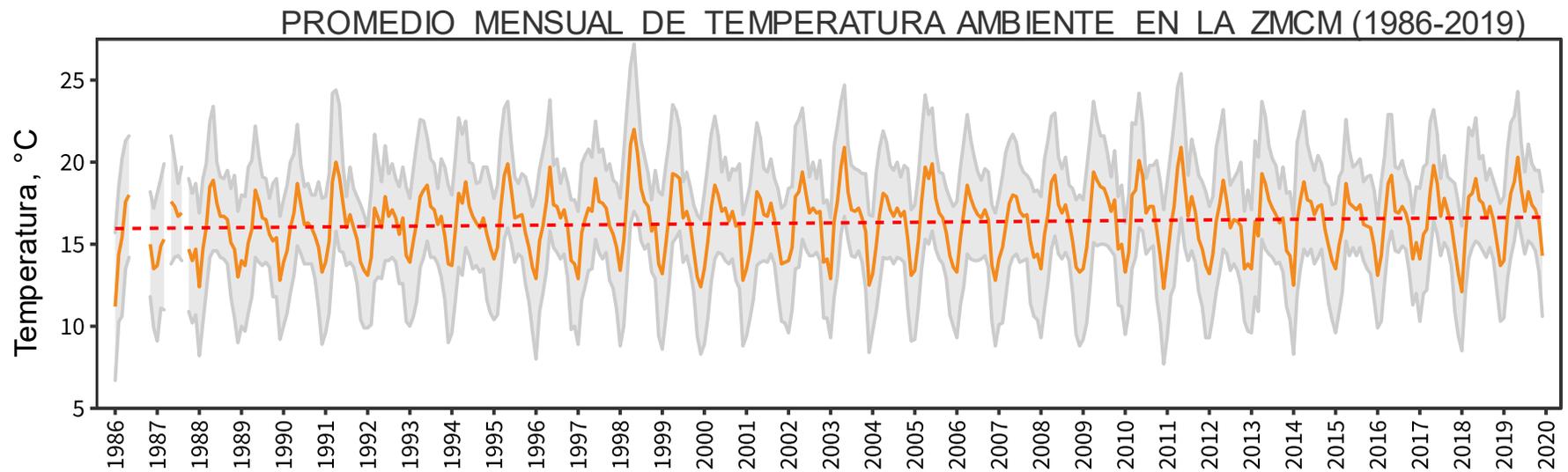


Figura 2.2. Serie de tiempo de temperatura en la ZMCM (1986-2019). La línea gruesa continua representa el promedio mensual con todas las estaciones de REDMET. La línea roja discontinua es la tendencia en el periodo analizado.

Tabla 2.1. Registros superaron o igualaron el récord histórico de temperatura máxima diaria en Ciudad de México. **Fuente:** Reportes mensuales SMN, 2019.

Mes	Registros
Febrero	2
Marzo	1
Agosto	5
Octubre	2

HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa es la medida de la cantidad de vapor de agua contenido en la atmósfera. Existen otras magnitudes para medir el vapor de agua, como la humedad absoluta³, razón de mezcla⁴ y humedad específica⁵; pero la humedad relativa es la más usada. Esta última se expresa en porcentaje y se define como el cociente de la cantidad de vapor de agua que posee una masa de aire entre el vapor de agua que puede contener para saturarse a temperatura específica (humedad relativa de saturación = 100 %). Por ejemplo, una humedad relativa del 60 %, significa que falta un 40 % para la saturación completa. En el 2019, la humedad relativa registró un promedio anual de 53.5 % en la ZMCM (**Figura 2.3a**), valor inferior en 3.6 % al 2018. Durante marzo a mayo, se reportaron los promedios mensuales mínimos y en la temporada de lluvias (junio a octubre) se registraron los máximos, esto ocurre normalmente en el ciclo anual. El mes de abril fue el más seco con 38 % en la humedad relativa, lo cual se asocia con el predominio de anomalías negativas de altura de geopotencial⁶ en 500 hPa, estas anomalías ocasionaron temperaturas elevadas, cielo despejado y precipitaciones escasas. El SMN clasificó el abril de 2019 como el segundo más seco desde 1941 y el octavo más cálido desde 1953 (SMN, 2019a).

Los meses con mayor humedad relativa fueron julio y octubre con 67 % y 66 %, respectivamente (**Figura 2.3b**). En el perfil horario (**Figura 2.3c**) se observa que los máximos ocurrieron entre las 06:00 y 08:00 h, mientras que los mínimos fueron de 13:00 a 16:00 h, esto se asocia con los máximos de temperatura y radiación solar que se alcanzan dichas horas lo que provoca una mayor evaporación del contenido de agua en la atmósfera. La distribución espacial (**Figura 2.3d**) tuvo un comportamiento similar al de años anteriores, donde los máximos están en las estaciones de la periferia y los mínimos en el interior de la ciudad; lo que indica que la tasa de evapotranspiración⁷ es menor en las zonas altamente edificadas, pero incrementa donde predominan las áreas naturales y regiones montañosas arboladas. La estación que presentó el promedio anual mínimo fue Miguel Hidalgo (MGH) con 46.8 % la cual está en el centro de la Ciudad de México en una zona urbana de mediana densidad. El sitio que registró el máximo fue Cuautitlán (CUT) con un 63.2 %, en el norte de la ZMCM dentro del Parque Xochitla en Tepetzotlán, Estado de México; la estación se encuentra instalada en una zona semi rural tipo valle y rodeada de abundantes áreas verdes.

³**Humedad absoluta:** cantidad de vapor de agua (gramos) por unidad de volumen de aire (m³), en temperatura y presión específicos.

⁴**Razón de mezcla:** relación entre la masa de vapor de agua y la del aire seco contenidos en una muestra de aire (kg de vapor de agua/kg de aire seco), en temperatura y presión específicos.

⁵**Humedad específica:** relación entre la masa de vapor de agua y la del aire húmedo (kg de vapor de agua/kg de aire húmedo), en temperatura y presión específicos.

⁶**Altura geopotencial:** Altitud de un punto en la atmósfera, expresada en términos de la energía potencial entre el punto y el nivel del mar, depende de la aceleración de la gravedad en el lugar.

⁷**Tasa de evapotranspiración:** suma de agua evaporada por suelo y la transpirada por plantas en un período específico, condiciones meteorológicas y de humedad de suelo existentes.

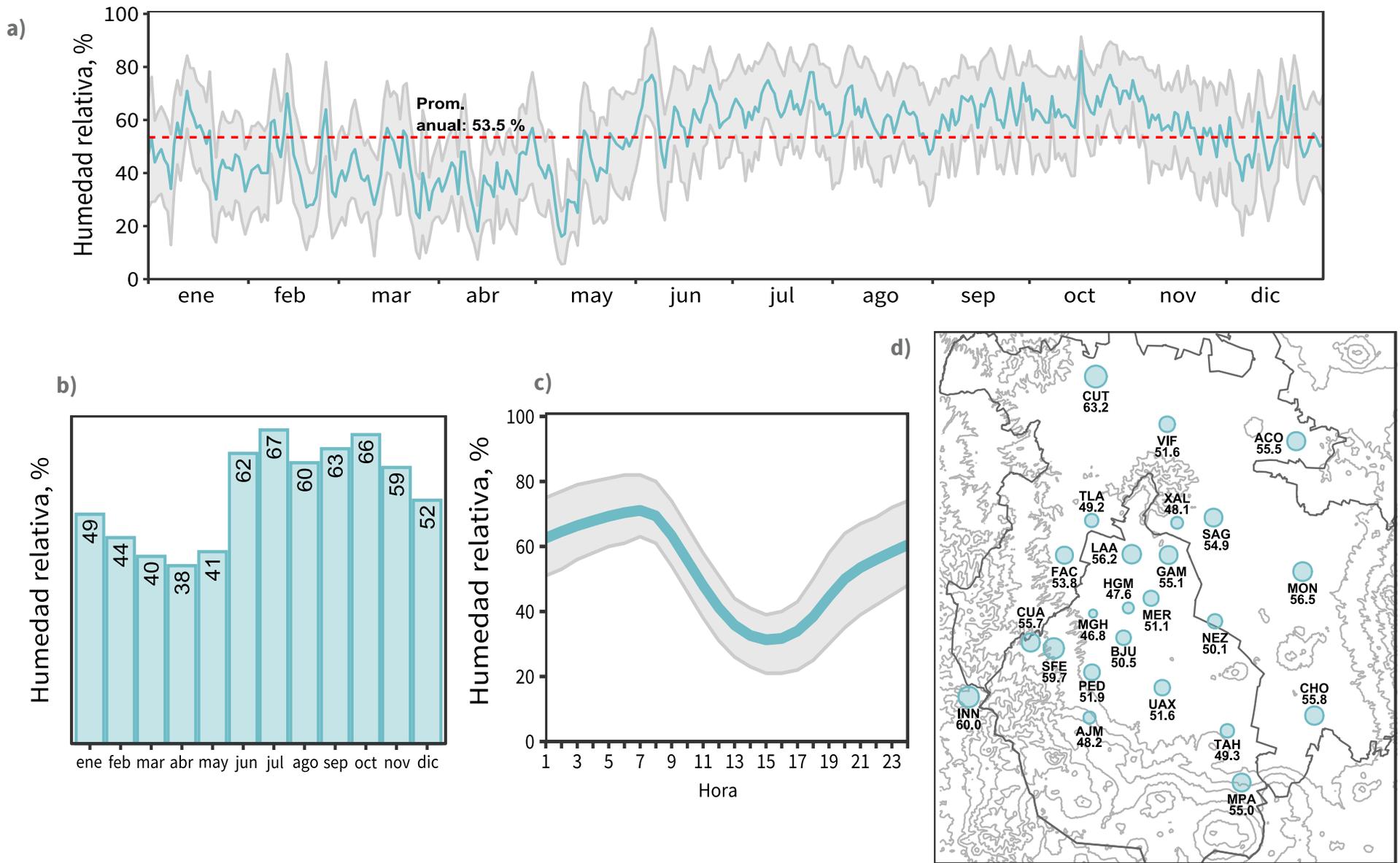


Figura 2.3. Comportamiento de la humedad relativa en 2019. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea gruesa continua), desviación estándar (sombreado gris) y el promedio anual (línea punteada). **b)** Promedio mensual de la humedad relativa. **c)** Perfil horario, la línea gruesa representa el promedio en cada hora, mientras que el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual de la humedad relativa (%) por estación.

PRECIPITACIÓN

En calidad del aire, existe una relación importante entre humedad relativa, precipitación y contaminación, ya que la lluvia tiene efecto de lavado en la atmósfera, por lo tanto, en los años que han sido más secos, durante los meses de marzo y mayo son críticos para el aumento de la contaminación debido a las lluvias escasas y otros factores meteorológicos.

La región central mexicana tiene un periodo de lluvias desde mayo hasta octubre; lo que coincide con la temporada de ciclones tropicales y ocasiona mayores acumulados de precipitación, también influyen las ondas tropicales, los canales de baja presión y la vaguada monzónica⁸ o de la Zona Intertropical de Convergencia⁹. La lluvia total en México durante 2019 fue 3.2 % menor al promedio histórico (1941-2018) y se clasificó como el año número 19 con menor precipitación. La región noroeste de México tuvo los mayores excedentes de lluvia comparado con sus valores promedio, en los estados de Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí, los extremos norte y sur de la Península de Baja California, así como pequeñas porciones del Pacífico sur. En el resto del país se observaron lluvias menores al promedio, con déficits más notables en la vertiente del Golfo de México desde Tamaulipas hasta Tabasco y amplias regiones de la costa del Pacífico (SMN, 2019a).

De acuerdo con el SMN, en la ZMVM los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre, registraron precipitación acumulada cercana a la normal climatológica. Mientras que de abril a septiembre se reportaron acumulados mensuales menores a la normal climática y solamente octubre presentó anomalías positivas con respecto a la climatología 1981-2010. Esto estuvo asociado a un flujo de componente suroeste proveniente del Pacífico en niveles de 700 hPa y transportó humedad. Así mismo, se presentó actividad de la Oscilación Madden Julian¹⁰ Fase 1 en la primera quincena del mes y Fase 2 en la semana siguiente; que actuó como moduladora de la precipitación en octubre. El resto de la temporada de lluvias (mayo-septiembre) tuvo menos de precipitación acumulada debido a que las trayectorias de las ondas tropicales se observaron en latitudes más bajas. En la **Tabla 2.2** se presentan los datos mensuales del SMN para la Ciudad de México, se observa que el promedio en 2019 fue de 565.3 mm, lo que representa una reducción de 220.9 mm (-28%) en comparación con 2018. Los valores más altos ocurrieron de junio a octubre y en julio tuvo el máximo con 145.5 mm, esto es congruente con el patrón de lluvias de la ciudad; sin embargo, hay una notable disminución en todos los meses en comparación con 2018. El mínimo mensual fue en diciembre con 0.1 mm, seguido de abril con 4.3 mm.

⁸**Vaguada monzónica o cuasi-ecuatorial:** cinturón de baja presión cerca del Ecuador, se desplaza estacionalmente al norte en el verano boreal y al sur en verano austral.

⁹**Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ):** región donde confluyen vientos alisios del hemisferio norte y hemisferio sur, forman nubes y tormentas en el Ecuador y latitudes tropicales adyacentes.

¹⁰**Oscilación Madden Julian (MJO):** fluctuación intra estacional en trópicos globales, responsable de la variabilidad climática e influye en los parámetros: velocidad y dirección de viento, nubosidad, lluvia y temperatura de la superficie del mar. Tiene una duración de 30 a 60 días.

Los datos de las estaciones pluviales del **Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX)** presentaron los máximos en las alcaldías del suroeste, como Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Tlalpan con 578, 542 y 450 mm, respectivamente. Los mínimos se observaron en el sureste de la ciudad, en la alcaldía Milpa Alta con un acumulado de 208 mm, seguido de Tláhuac y Xochimilco con 218 y 220 mm, respectivamente (**Figura 2.4**).

Tabla 2.2. Precipitación acumulada por mes
(Reporte Anual del Clima en México, 2019, SMN)

Mes	Precipitación (mm lluvia)
Enero	5.3
Febrero	5.7
Marzo	7.2
Abril	4.3
Mayo	21.6
Junio	108.1
Julio	145.5
Agosto	87.2
Septiembre	76.1
Octubre	86.8
Noviembre	17.6
Diciembre	0.1
Total	565.3

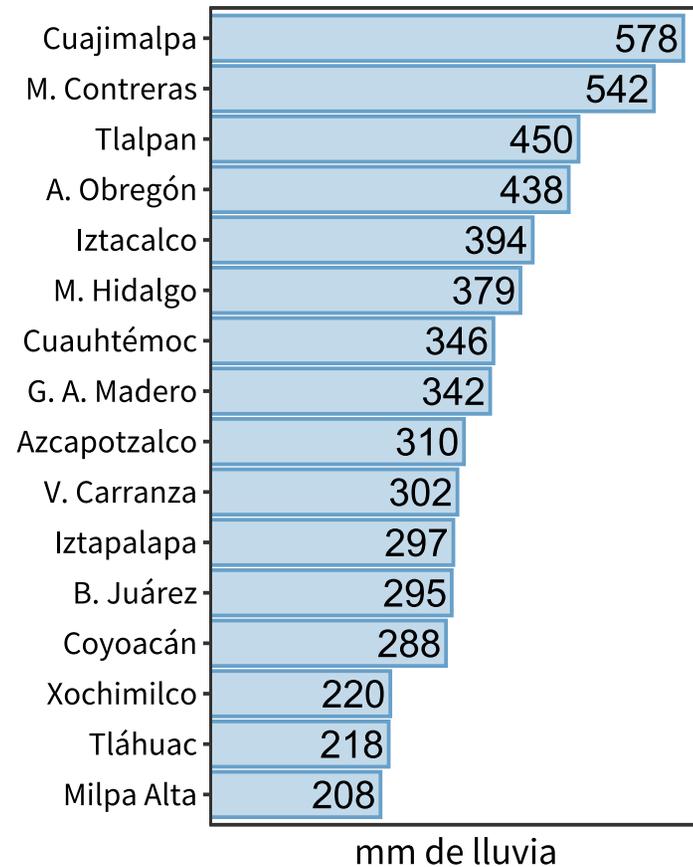


Figura 2.4. Precipitación acumulada por alcaldía de la Ciudad de México durante 2019 (SACMEX, 2020)

PRESIÓN ATMOSFÉRICA

La presión atmosférica o presión barométrica es la fuerza que ejerce la masa de la atmósfera sobre la superficie terrestre, esta variable es proporcional a la densidad de la atmósfera y disminuye con la altitud. La presión barométrica es llamada así porque se mide con un barómetro anerode¹¹, el cual es un instrumento muy sensible a los cambios en las masas de aire que acompañan a los fenómenos meteorológicos. El aire frío en una zona, se relaciona con circulaciones de tipo anticiclónicas o sistemas de alta presión atmosférica, mientras que el aire cálido se relaciona con circulaciones ciclónicas o sistemas de baja presión.

En el año 2019 se registró una presión atmosférica anual de 585 mmHg (**Figura 2.5a**), prácticamente sin cambio con respecto al promedio anual del 2018 que fue de 584.9 mmHg. En la **Figura 2.5b** se observa el comportamiento mensual con los valores mínimos de presión fueron en mayo y octubre con 584.2 y 584.3 mmHg, respectivamente; mientras que los máximos se presentaron en junio (585.8 mmHg) y julio (585.9 mmHg).

Los valores mínimos de presión se pueden asociar con un mayor número de frentes fríos, esto se observó en los meses con presión atmosférica baja, octubre tuvo 6 frentes fríos y 7 en mayo (la climatología es de 4 y 5, respectivamente). A partir de junio y hasta septiembre, disminuye la influencia de los sistemas de alta presión de origen continental, pero se observó una mayor contribución del sistema de alta presión (anticiclón) subtropical del Atlántico y del anticiclón del Pacífico Norte, por lo que durante estos meses la presión atmosférica tuvo un ligero incremento.

En el perfil horario de presión (**Figura 2.5c**), se observa la variabilidad durante el día, con los máximos de 09:00 a 12:00 h y los mínimos de las 15:00 a 18:00 h. Los cambios en la presión son influenciados por la altitud de la ciudad (a mayor altura, menor presión), entre otros factores como sistemas de escala sinóptica, flujos de calor las zonas altamente industrializadas o urbanizadas, así como por los cambios en la radiación solar que ocurren entre el día y la noche.

¹¹**Barómetro anerode:** instrumento de medición de la presión atmosférica, cuyo funcionamiento se explica por la deformación que provoca la presión atmosférica exterior sobre la pared elástica de un cilindro en el que se ha hecho un vacío (anerode=sin aire).

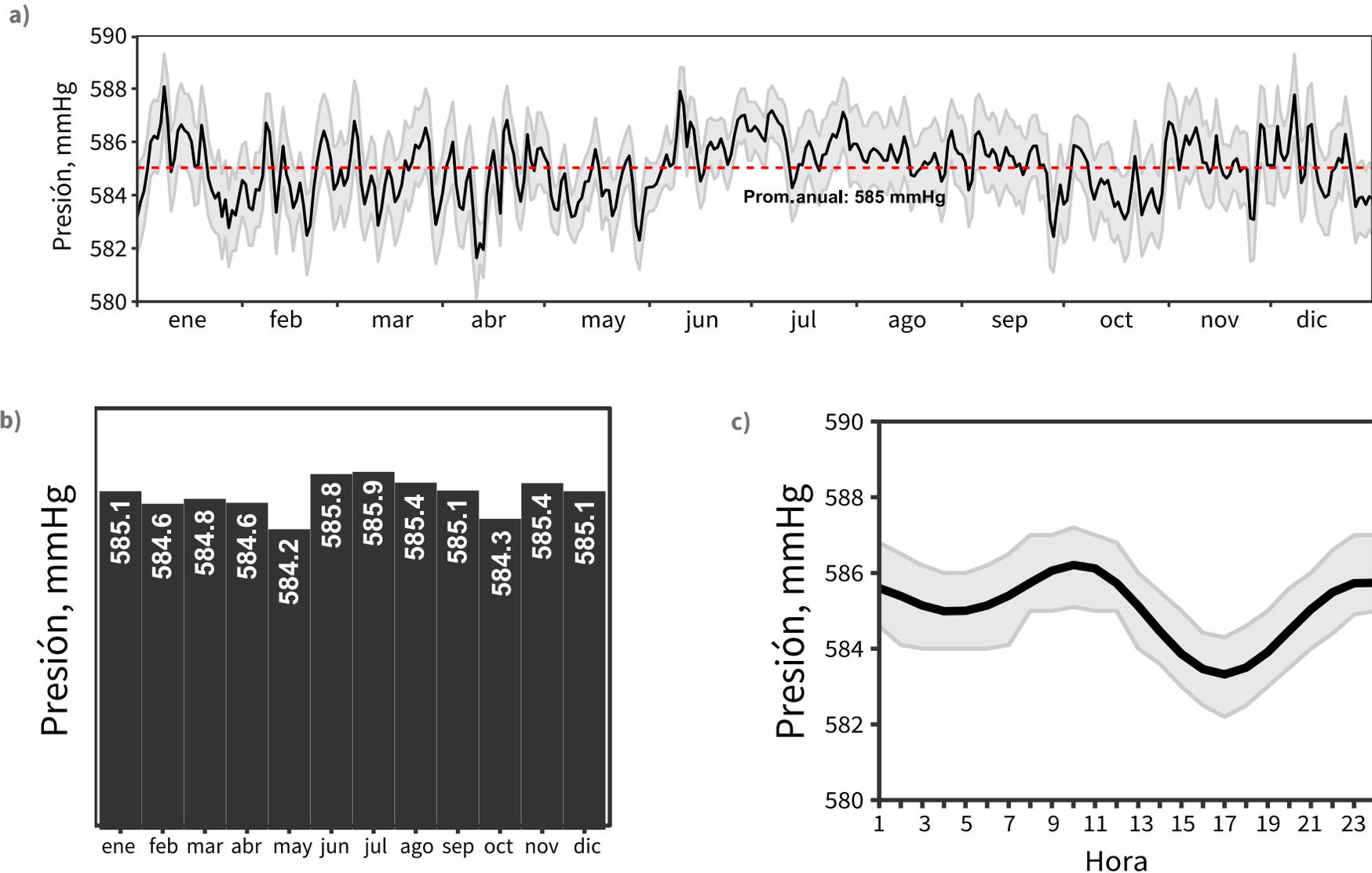


Figura 2.5. Comportamiento de la presión atmosférica en 2019: **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea gruesa continua), desviación estándar (sombreado gris) y el promedio anual (línea punteada). **b)** Promedio mensual de la presión. **c)** Perfil horario, la línea gruesa muestra el promedio en cada hora, mientras que el sombreado gris es la desviación estándar.

VIENTO

Los patrones de viento a nivel de superficie y en las capas altas de la tropósfera, están influenciados por las diferencias de presión atmosférica ya que el movimiento de masas de aire es desde las presiones altas hacia las más bajas. El viento es un factor importante en la dispersión, acumulación y tiempo de reacción de los contaminantes. En el ozono, la intensidad de viento moderada a fuerte (> 4 m/s) contribuye a que los precursores del contaminante se dispersen y su tiempo de reacción sea menor. Sin embargo, en partículas, si hay viento muy fuerte (> 7 m/s) combinado con lluvia escasa y baja humedad relativa, se puede presentar re suspensión de polvo y tolváneras, especialmente en zonas sin cubierta vegetal.

Los frentes fríos en la región central del país ocasionan incrementos considerables en la velocidad del viento que provocan tolváneras en la ciudad. En marzo y mayo del 2019 se registraron 7 frentes en cada mes, por lo que se superó su promedio histórico, ya que para marzo la media es de 6 y para mayo es 4 frentes fríos. Es importante mencionar que en marzo también ocurrió un evento de norte¹² en la vertiente del Golfo de México que afectó la región central. En mayo, la corriente en chorro subtropical se presentó baja en latitud durante la primera quincena del mes, lo que provocó un incremento en el promedio mensual de la intensidad del viento.

De acuerdo con la REDMET, el promedio anual en 2019 fue de 2.1 m/s (**Figura 2.6a**), lo cual fue 0.1 m/s superior al registrado en 2018. Los promedios máximos mensuales ocurrieron en marzo, abril y mayo; con 2.25, 2.36 y 2.37 m/s, respectivamente (**Figura 2.6b**). Estos meses indican un periodo de transición en la atmósfera, ya de noviembre a febrero predominan frentes fríos y sistemas de la atmósfera superior que se trasladan de oeste a este, mientras que de junio a octubre predominan los sistemas que se desplazan del este al oeste, como ondas y ciclones tropicales. La interacción de estos sistemas durante la temporada seca caliente ocasiona eventos intensos como tormentas eléctricas o vientos más fuertes debido al incremento de las diferencias de presión sobre la ZMVM e incluso el país.

En la ZMVM, el perfil horario de la velocidad de viento (**Figura 2.6c**) presenta sus mínimos durante la madrugada y parte de la mañana; mientras que los máximos se registran al final de la tarde entre las 17:00 y 19:00 h, por lo que en este periodo ocurre la mayor dispersión de los contaminantes. En el análisis por estación (**Figura 2.6d**), el mínimo se registró en Cuautitlán (CUT) con 1.51 m/s y el máximo fue de 2.94 m/s en Xalostoc (XAL).

¹²**Evento de Norte:** episodio con viento fuerte del norte provocado por un sistema de alta presión después de un frente frío en el país. Estos eventos afectan con mayor intensidad a los estados

Esta variación de la velocidad del viento, se relaciona con las diferencias en la altura de cada estación y con el entorno de los sitios, debido a que en las zonas rurales o semi rurales se observa un menor efecto de fricción del viento con la superficie, por el contrario, en las estaciones urbanas, la cantidad de edificios así como su distribución en altura y tamaño, incrementa la fricción del viento con la superficie, en consecuencia, se frena y disminuye la velocidad del viento.

En la **Figura 2.7** se presenta la dirección de viento a nivel de cuenca y se observa que en 2019 predominaron los vientos provenientes de norte hacia el sur, lo que es congruente con el patrón normal de vientos en la zona metropolitana. En los meses de febrero, marzo y abril, se formaron zonas de convergencia¹³ en el centro de la Ciudad de México, debido a que también se presentó una corriente con viento del sureste hacia el norte, esto fue un factor importante para que ocurrieran eventos de alta concentración de ozono durante estos meses. Es importante mencionar que, el patrón de viento predominante en el año (norte a sur) junto a la geografía de la ZMVM que se caracteriza por elevaciones montañosas en la región oeste, suroeste y sur, limitaron la dispersión de los contaminantes, en consecuencia, se acumularon cerca de la superficie por más tiempo.

Los principales eventos de contaminación por ozono se presentaron en la última semana de marzo, entre el 10 y 20 de abril, ambos episodios relacionados con la estabilidad atmosférica provocada por un centro anticiclónico (sistema de alta presión) en los niveles de 700 y 500 hPa que influyó en el centro del país, esto inhibió los movimientos verticales ascendentes (convección¹⁴) y por lo tanto, los días permanecieron despejados con temperaturas elevadas y escasa precipitación, estas condiciones se combinaron con viento débil en la capa de 2000 metros por encima de la superficie del valle, lo que limitó la ventilación en la cuenca.

¹³**Zona de convergencia:** es una región en la atmósfera donde dos corrientes predominantes de viento se encuentran e interactúan, por lo general resulta en condiciones meteorológicas distintas. Esta zona puede ser de escala local o de gran escala. En regiones urbanas, las zonas de convergencia ocasionan estancamiento y acumulación de contaminantes.

¹⁴**Convección:** en meteorología es el mecanismo físico por el cual se transporta calor, momento lineal, humedad, mediante el movimiento ascendente de las masas de aire.

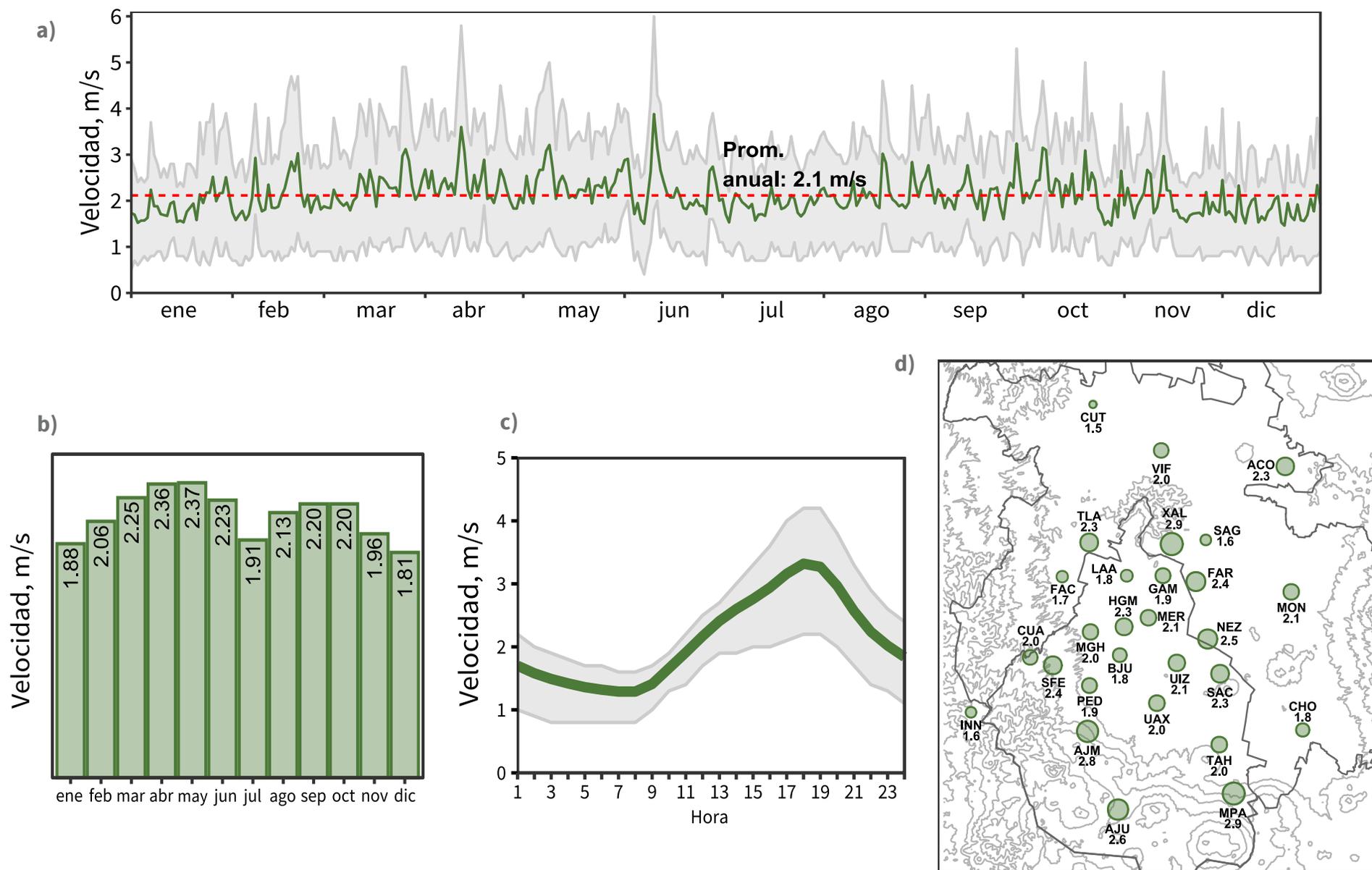


Figura 2.6. Comportamiento de la velocidad del viento en 2019: **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea gruesa continua), desviación estándar (sombreado gris) y el promedio anual (línea punteada). **b)** Promedio mensual de la velocidad del viento. **c)** Perfil horario, la línea gruesa muestra el promedio en cada hora, mientras que el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual de la velocidad de viento (m/s) por estación.

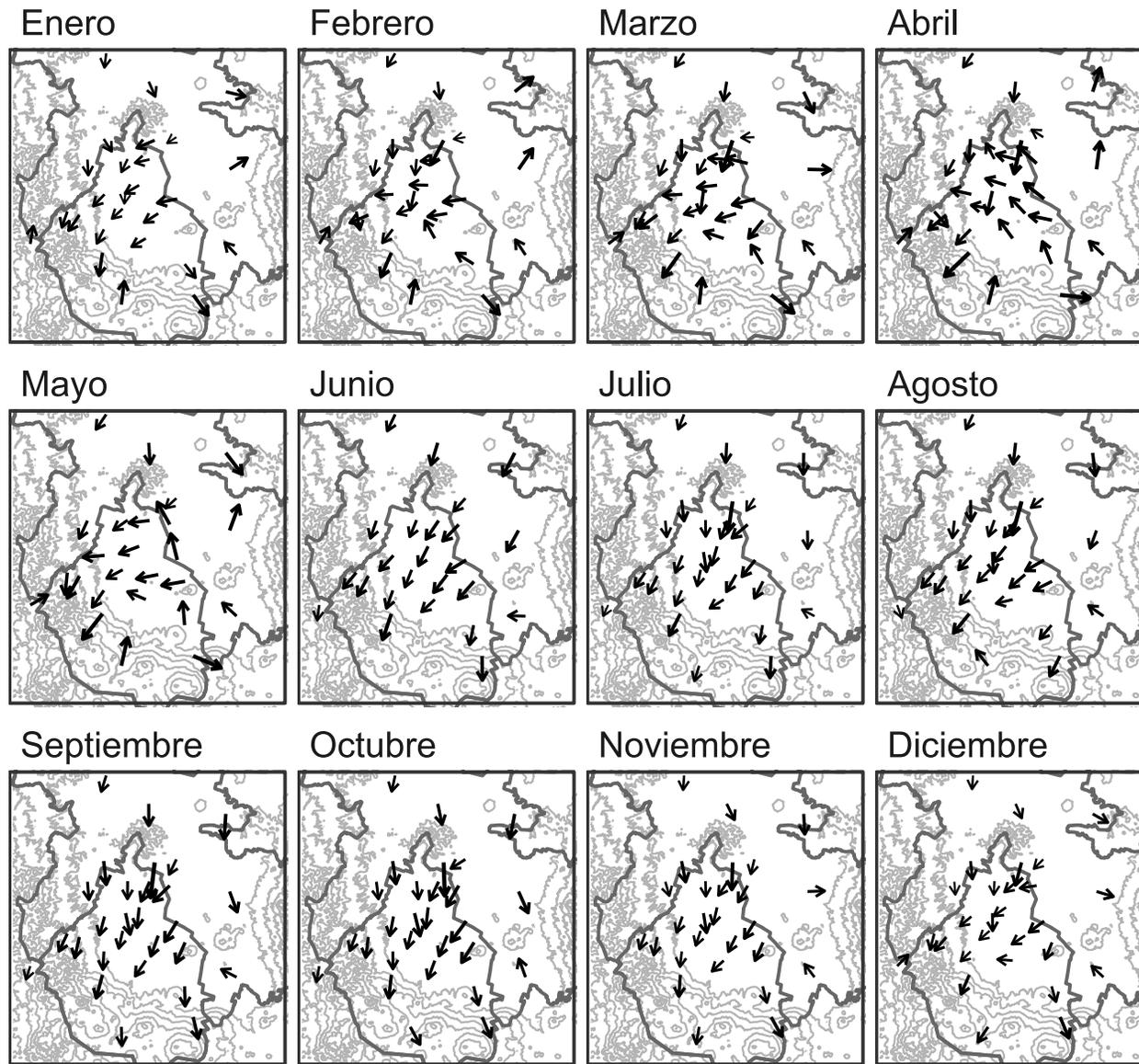


Figura 2.7. Campo de viento diurno en superficie. Las flechas de los vectores representan la dirección del viento predominante por mes entre las 08:00 y las 20:00 h; el tamaño del vector es proporcional a la intensidad del viento.

RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esta radiación es de onda corta, principalmente en las bandas del ultravioleta (UV), visible y el infrarrojo cercano. La energía se emite desde la superficie solar y es generada por reacciones de fusión nuclear del hidrógeno en el interior del Sol. La radiación solar ultravioleta (UV) que llega a la Tierra es un factor determinante en la dinámica de procesos atmosféricos y climáticos.

La región del espectro electromagnético que corresponde a UV es el intervalo de longitud de onda (λ) de 100 a 400 nanómetros (nm) y se divide en tres bandas: la **UV-A** (315-400 nm) no es absorbida por la capa de ozono, así que el 95% llega a la superficie terrestre y es responsable del bronceado en la piel; la **UV-B** (280-315 nm) es peligrosa para cualquier tipo de vida y es absorbida parcialmente por la capa de ozono, así que sólo el 5% llega a la superficie; finalmente, la **UV-C** (100-280 nm) es absorbida completamente por el oxígeno y ozono en la atmósfera, es la UV más peligrosa pero no llega a la superficie.

Es importante mencionar que todos estamos expuestos y somos vulnerables a la radiación UV procedente del Sol y de otras fuentes artificiales como las camas bronceadoras,

algunos equipos o instrumentos utilizados en la industria y comercio.

Las dosis pequeñas de UV son beneficiosas para el ser humano y esenciales para la producción de vitamina D, también se usa para tratar enfermedades, como el raquitismo, eczema y la psoriasis. Estos tratamientos son con supervisión médica, por lo que la valoración de las ventajas y los riesgos de la exposición a la radiación UV, es cuestión de juicio clínico. En el ser humano, la exposición prolongada tiene efectos agudos y crónicos en la salud de la piel, los ojos y el sistema inmune. Las quemaduras solares y el bronceado son los efectos más conocidos de la exposición excesiva a la radiación UV y a largo plazo, se produce un envejecimiento prematuro de la piel, incluso cáncer de piel, como consecuencia de la degeneración de células, tejido fibroso y de vasos sanguíneos. La radiación UV también produce reacciones oculares de tipo inflamatorio, como la queratitis actínica.

La radiación UV se mide en unidades de irradiancia, que es la cantidad de energía incidente por unidad de tiempo y área, se expresa en Watts por metro cuadrado (W/m^2). La Ciudad de México recibe una cantidad importante de radiación solar debido a su latitud ($19^{\circ}40' N$) y altitud ($\sim 2,240$ msnm). En 2019, el promedio anual de la radiación UV-A y en UV-B fue de 1.79 y $0.076 W/m^2$, respectivamente (**Figura 2.8**).

En el periodo de febrero a octubre se observaron los niveles más altos, la irradiancia máxima de UV-A fue el 2 de julio a las 13:00 horas con 0.380 W/m^2 , mientras que para UV-B el máximo se presentó el 3 de agosto a las 13:00 h con 6.523 W/m^2 . Durante el año, la intensidad de la radiación varía con la declinación solar (**Figura 2.9a**) por lo que es máxima en el verano y mínima en invierno. En la **Figura 2.9b** se presenta la variación de la radiación UV en el transcurso del día, que su

intensidad depende principalmente del ángulo de elevación del Sol, incrementa a medida que el Sol asciende y es máxima cuando alcanza el punto más alto en el cielo, entre las 12:00 y 14:00 h, además se observa que la intensidad de la radiación UV-B que incide en la ciudad es significativamente menor que la radiación UV-A; sin embargo, la UV-B es de mayor energía, en consecuencia es más peligrosa y provoca un mayor daño en la salud humana, aun con valores de intensidad reducidos.

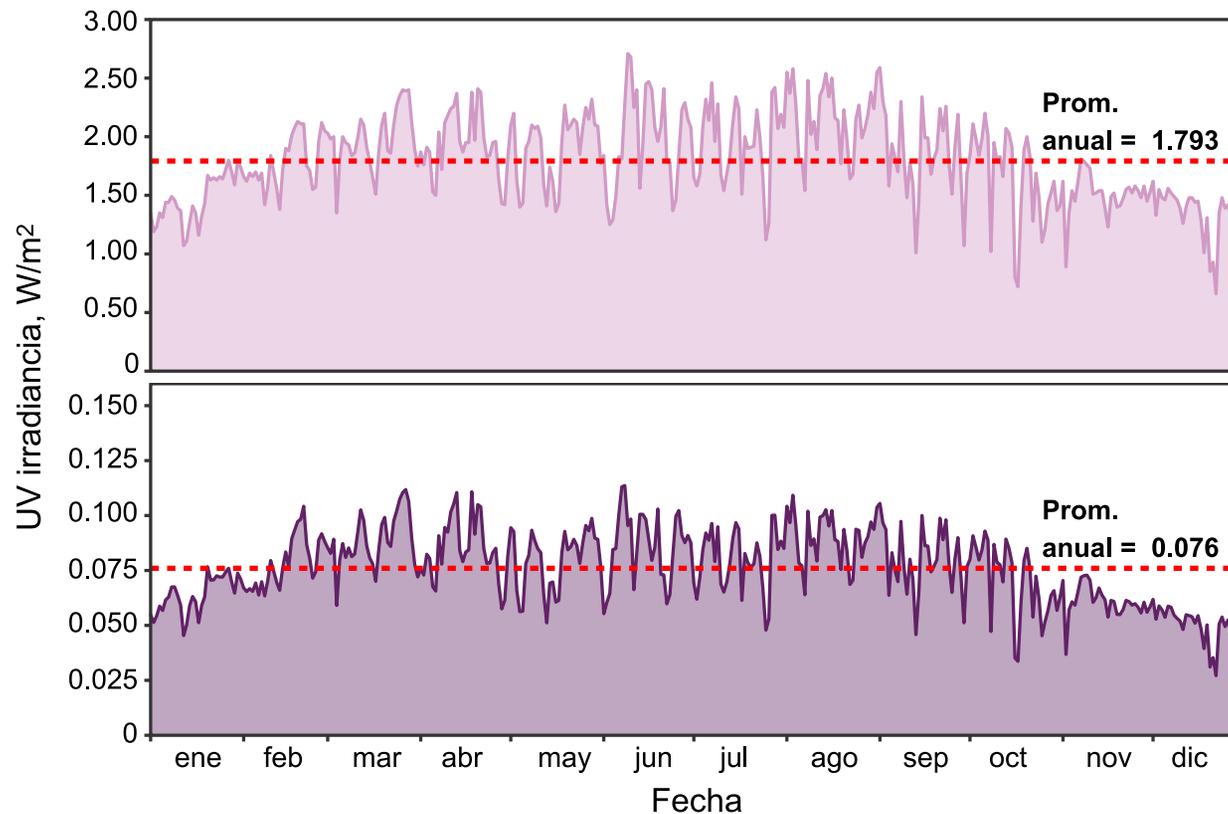


Figura 2.8. Promedio diario de la irradiancia de UV-A (superior) y UV-B (inferior), entre las 06:00 y 20:00 h. La línea punteada es el promedio anual.

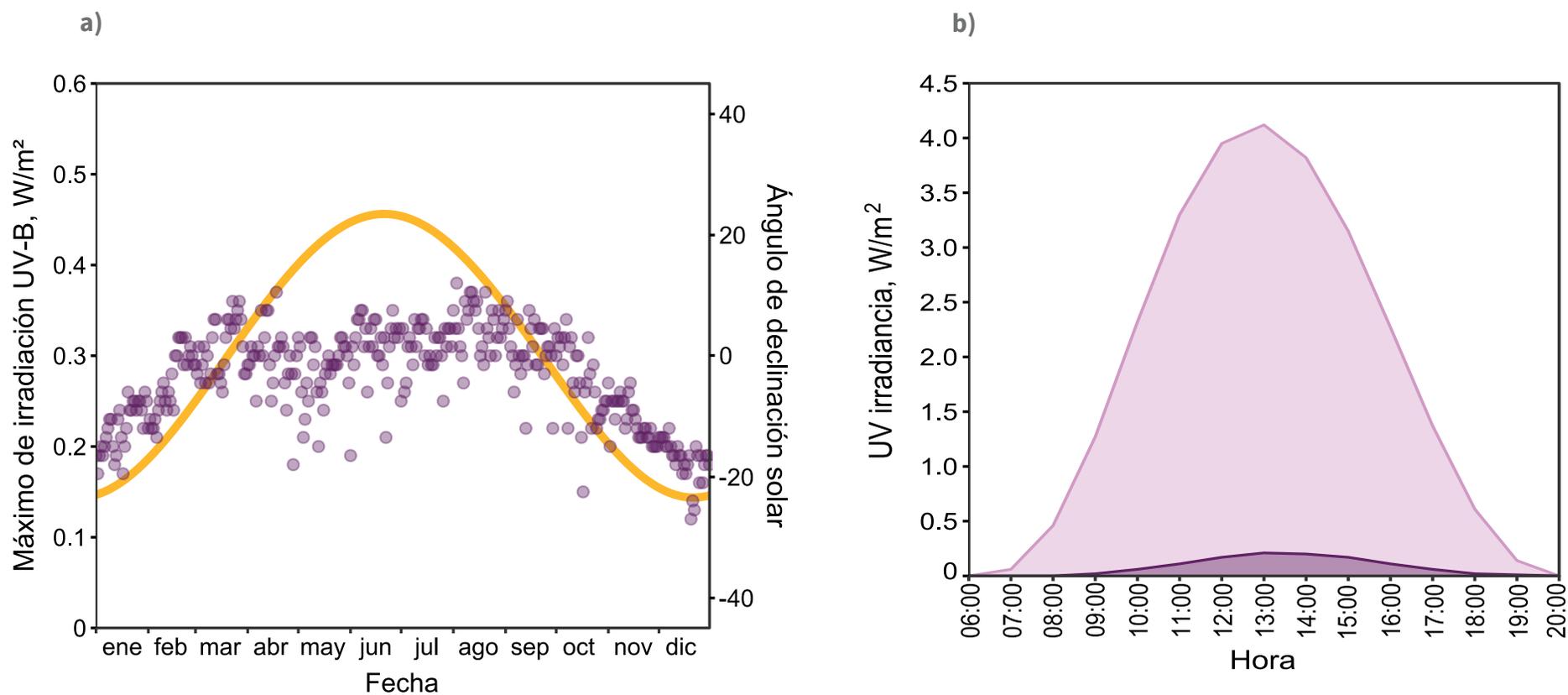


Figura 2.9. a) Comparación entre la intensidad máxima diaria de la radiación solar UV-B y el ángulo de declinación solar. **b)** Perfil promedio diario de la intensidad de la radiación solar UV-A (morado claro) y UV-B (morado oscuro) durante 2019.

ÍNDICE DE RADIACIÓN SOLAR

El índice UV (IUV), desarrollado por la OMS en 2003, sirve para comunicar la intensidad de la radiación solar UV y su capacidad dañar la piel. Es adimensional y entre más alto sea su valor, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares en menor tiempo de exposición. El IUV sirve para concientizar a la población sobre los riesgos de la radiación UV y para que se adopten medidas de protección. El objetivo es fomentar una menor exposición al Sol, para que se disminuyan daños a la salud y costos de la atención médica.

El IUV se calcula con la intensidad de la radiación UV-B, y durante cada día, se reporta cada 10 minutos con la intención de proporcionar información casi inmediata para los ciudadanos; sin embargo, para este documento se calcularon y analizaron sus promedios horarios. El IUV en la ZMCM, utiliza la escala recomendada por la OMS (1 a 11+), agregando el cero que es equivalente a la ausencia de radiación y el valor 11+ expresa un IUV de 11 o superior, es decir, si el índice alcanza un máximo equivalente a 15, se reportará como 11+ en apego a las recomendaciones de la OMS. La escala del IUV está agrupada en las siguientes categorías: BAJA con IUV de 1 a 2; MODERADA de 3 a 5; ALTA con valores de 6 a 7; MUY ALTA de 7 a 10 y EXTREMADAMENTE ALTA con el IUV de 11 a 15.

La intensidad de la radiación UV en la Ciudad de México normalmente alcanza valores que corresponden a un IUV mayor a 7 por lo que incrementa el riesgo de dañar la piel sin protección en un tiempo menor a 30 min. Entre marzo y octubre, se registran los máximos del índice y supera con frecuencia el valor de 11 en periodos de 1 hasta 3 horas continuas, mientras que los mínimos son a mediados de noviembre y diciembre. El momento del día con mayor riesgo es entre las 11:00 y 16:00 h, ya que frecuentemente el IUV es de 11+. Un índice igual o superior a 11 corresponde a una intensidad EXTREMADAMENTE ALTA e implica un riesgo considerable de daño en prácticamente todos los fototipos¹⁵ de piel y en un periodo muy corto (menos de 15 min).

En 2019, el IUV tuvo intensidad MODERADA en dos días de diciembre, similar a 2018; en categoría ALTA se registraron 22 días que ocurrieron durante enero y diciembre; la MUY ALTA tuvo 109 días, la mayoría en temporada seca fría que es desde noviembre a febrero; y con IUV EXTREMADAMENTE ALTO se registraron 232 días, esto es un incremento del 18% comparado con 2018. En marzo, abril y agosto se presentaron los valores más altos, ya que se registraron 5 días con IUV de 15, uno fue en abril y cuatro en agosto (**Figura 2.10**).

¹⁵El **fototipo** es la capacidad de adaptación al Sol que tiene cada persona, es decir, el conjunto de características que determinan si una piel se broncea o no, cómo y en qué grado lo hace.

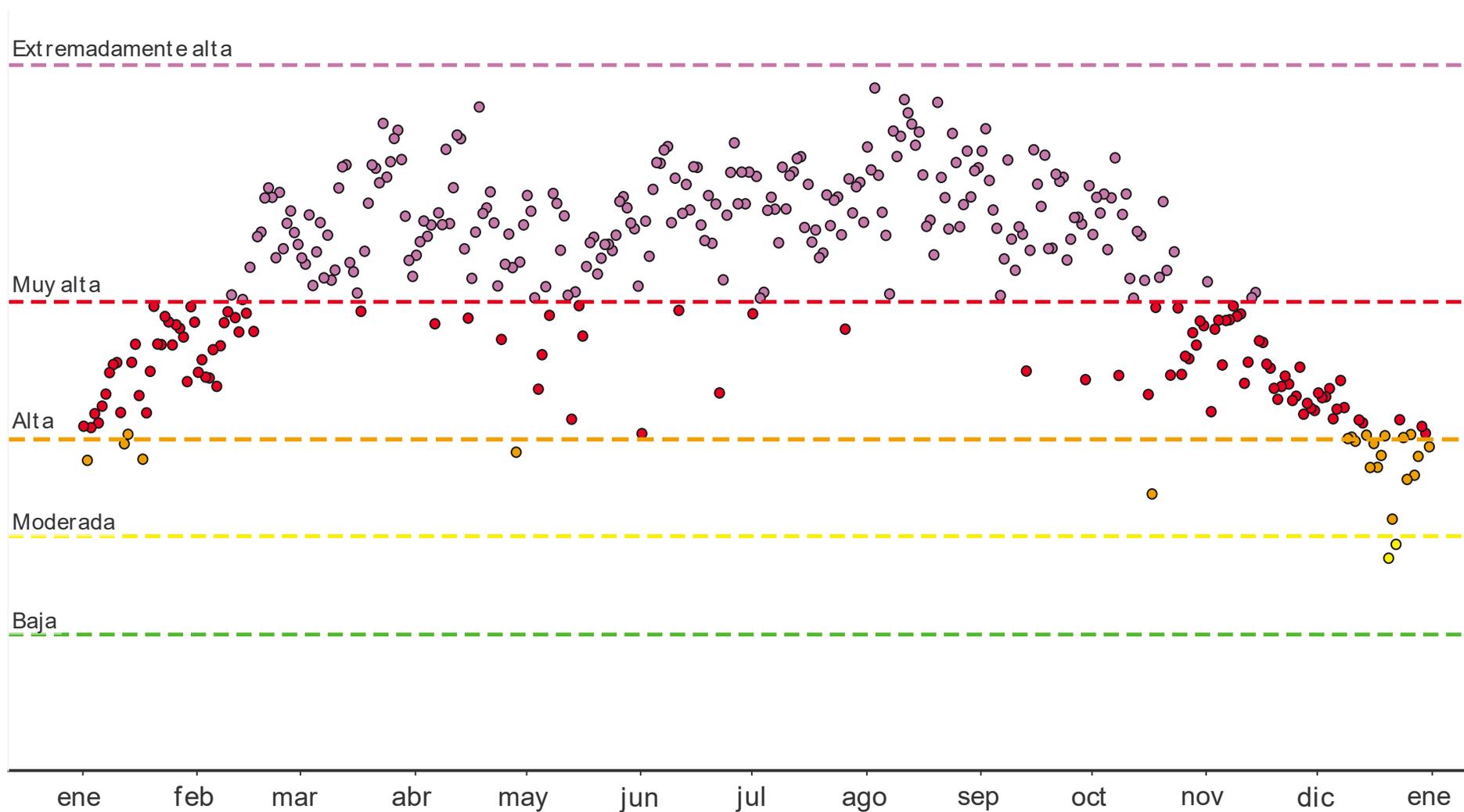


Figura 2.10. Comportamiento del máximo diario del IUV durante 2019.



CAPÍTULO 3

CALIDAD DEL AIRE

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea al planeta, está constituida por una mezcla equilibrada de gases, así como otras sustancias, y es el resultado del proceso evolutivo de la Tierra. A esta mezcla de gases se le conoce como aire y es un medio continuo a través del cual los contaminantes son transportados y dispersados. Este transporte es ocasionado por el movimiento del aire a escala planetaria, regional y local. Cuando los contaminantes son liberados a la atmósfera, su persistencia en el aire dependerá de varios factores, como el lavado por la lluvia, la deposición por efecto de la gravedad e impacto contra superficies, o bien, porque hay reacciones químicas en la atmósfera que los transforman en otras sustancias (contaminantes secundarios). La capacidad de la atmósfera para diluir la concentración de los contaminantes es fundamental para preservar una buena calidad del aire y se debe principalmente a las condiciones meteorológicas. Así, en una atmósfera estable con viento débil, cielo despejado y alta radiación solar, se facilita la acumulación de contaminantes y la formación de contaminantes secundarios, mientras que, en una atmósfera inestable con vientos de mayor intensidad, se favorece la dispersión y transporte de los contaminantes con mayor eficiencia debido a las turbulencias de los vientos.

En las grandes ciudades o zonas urbanas, el aire que se respira es el resultado de la mezcla de sustancias químicas liberadas por las actividades humanas como son el transporte, los productos de uso personal y residencial, así como, las

actividades industriales o comerciales, las cuales se concentran en áreas de mayor densidad de población. Estas emisiones tienen un papel importante en el deterioro del agua, el suelo y la vegetación, dañan la infraestructura de edificios, afectan el clima y la visibilidad del entorno. Los efectos de los contaminantes sobre la salud humana se han analizado a través de estudios epidemiológicos, en los que se relacionan enfermedades respiratorias y cardiovasculares, con la exposición crónica y aguda al aire contaminado. Es importante mencionar que, nosotros como parte de la población somos responsables de la mayoría de las emisiones en las áreas metropolitanas, ya que alrededor del 80% corresponden a la quema de combustibles, que todos consumimos directa o indirectamente, así como diversos productos que utilizamos, por esto es fundamental tener conciencia del aporte que cada uno hace, cambiar la forma en que realizamos ciertas actividades y así, reducir nuestra contribución de emisiones con la finalidad de minimizar el impacto a la salud y a los ecosistemas.

Es relevante señalar que también existen procesos naturales que generan contaminación del aire, como son: la actividad volcánica, el humo y cenizas de incendios forestales, tormentas de arena y contaminantes biológicos. Durante los incendios, la quema de biomasa (la combustión) no es completa y esto genera contaminantes como el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), así como óxidos de

nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COV), estos últimos son precursores de ozono (O₃), que contribuyen a deteriorar la situación de calidad del aire. Los contaminantes derivados de los incendios pueden cambiar su composición química, sus características físicas y su concentración a medida que se transportan lejos de su lugar de emisión. En 2019, durante la temporada de ozono se presentó una situación de incendios masivos en el centro y suroeste del país que afectaron la calidad del aire del 10 al 16 de mayo y los contaminantes resultantes fueron transportados por el viento hacia el Valle de México. En consecuencia, durante una semana se registró mala calidad del aire, que se intensificó por la combinación de las emisiones cotidianas de la ciudad, las condiciones meteorológicas adversas que se presentaron como baja velocidad del viento que impidió la dispersión horizontal de los contaminantes; la falta de nubosidad que favoreció altas temperaturas y radiación solar; así como, la cantidad de incendios forestales y agrícolas en el centro del Valle de México. El resultado fue el incremento de la concentración de PM_{2.5} en un 40% comparado con lo registrado normalmente en la misma época del año.

Los vehículos, la industria y los servicios de la Ciudad de México y su área metropolitana emiten diariamente alrededor de 210 mil toneladas de contaminantes gaseosos o en forma de partículas, de las cuales 4 mil (~2%) son de contaminantes criterio (SEDEMA, 2021) siendo la fuente principal la quema de

combustibles fósiles. La contaminación del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), presenta patrones estacionales durante el año, que están asociados a las condiciones meteorológicas, con esto se han identificado tres periodos importantes: la temporada de ozono, la temporada de partículas y periodo de lluvias. La temporada de ozono se caracteriza por niveles elevados de O₃ y otros contaminantes secundarios asociados al esmog fotoquímico, provocados por la presencia de precursores y las condiciones meteorológicas, esta temporada generalmente se presenta a finales de febrero y concluye en junio, con la llegada de las lluvias. La temporada de partículas se presenta en los meses de noviembre a febrero y se caracteriza por el aumento en la concentración de PST, PM₁₀ y PM_{2.5} así como de otros contaminantes primarios, esto es ocasionado por la estabilidad atmosférica, inversiones térmicas de superficie, así como el descenso en la humedad y temperatura. Por último, la temporada de lluvia, de junio a octubre, se caracteriza por bajos niveles de contaminación, provocados por el lavado atmosférico.

En esta sección se describe el comportamiento temporal, espacial, las tendencias de los contaminantes criterio y carbono negro durante 2019, así como la evaluación de la calidad del aire, a través del índice establecido en la NADF-009-AIRE-2017.

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

La presencia de SO₂ en el aire ambiente de la Ciudad de México está asociada principalmente con el transporte del aire contaminado emitido en la zona industrial de Tula-Tepeji. La mayor concentración de SO₂ ocurre en días en los que el viento proviene del noroeste hacia la ciudad y además, se ha observado que la presencia del contaminante en los sitios de monitoreo es más frecuente durante la noche y madrugada debido a que, en estas horas, la altura de la capa de mezcla es menor, lo que ocasiona que la masa del aire avance cerca del suelo.

El promedio anual de la concentración de SO₂ en 2019 fue de 3.3 ppb y este valor representó una reducción del 23% con respecto al 2018. La mayor concentración del contaminante se observó en los sitios al norte de la ciudad (**Figura 3.1a**), debido a la influencia del corredor Tula-Tepeji y en menor proporción, por las emisiones industriales locales. Las estaciones Tultitlán (TLI), Tlalnepantla (TLA) y Villa de las Flores (VIF), reportaron los promedios anuales máximos con 6.7, 6.5 y 5.6 ppb, respectivamente. Las estaciones Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) con 1.2 ppb, así como Montecillo (MON) y Acolman (ACO) con 1.5 ppb registraron los mínimos del promedio anual (**Figura 3.1b**). Los episodios de SO₂ asociados a las emisiones del corredor Tula-Tepeji se observaron en todo el año, por factores como la

dirección del viento y altura de la capa de mezcla; sin embargo, ocurrieron con más frecuencia en invierno, cuando hay mayor número de inversiones térmicas (**Figura 3.2a**). Los promedios mensuales (**Figura 3.2b**) más altos se registraron durante noviembre a enero y en marzo, el máximo fue en diciembre con 5.2 ppb. En el resto de los meses, incluyendo la temporada de lluvias, se observó que la concentración mensual disminuyó hasta un 50% y el mínimo fue de junio a agosto con 2.0 ppb, es importante mencionar que este contaminante reacciona fácilmente con el agua y la lluvia se acidifica, este fenómeno se analiza en el capítulo 5 de este informe. En el promedio por día de la semana (**Figura 3.2c**) se observó que el máximo fue el domingo y el mínimo se registró el viernes, este perfil se asocia a que la fuente más importante de SO₂ no son los vehículos, así que su comportamiento en los días de la semana es diferente al resto de los contaminantes primarios. La concentración máxima se presentó entre las 07:00 y 11:00 h (**Figura 3.2d**); sin embargo, es frecuente que, en la madrugada, las estaciones en el centro y norte de la ciudad registren incrementos extraordinarios (SO₂ >200 ppb) asociados a la emisión de la zona industrial de Tula-Tepeji. El valor horario máximo del contaminante se registró en la madrugada del 21 de enero con una concentración de 219 ppb, en Villa de las Flores (VIF) ubicada en el municipio de Coacalco, Estado de México.

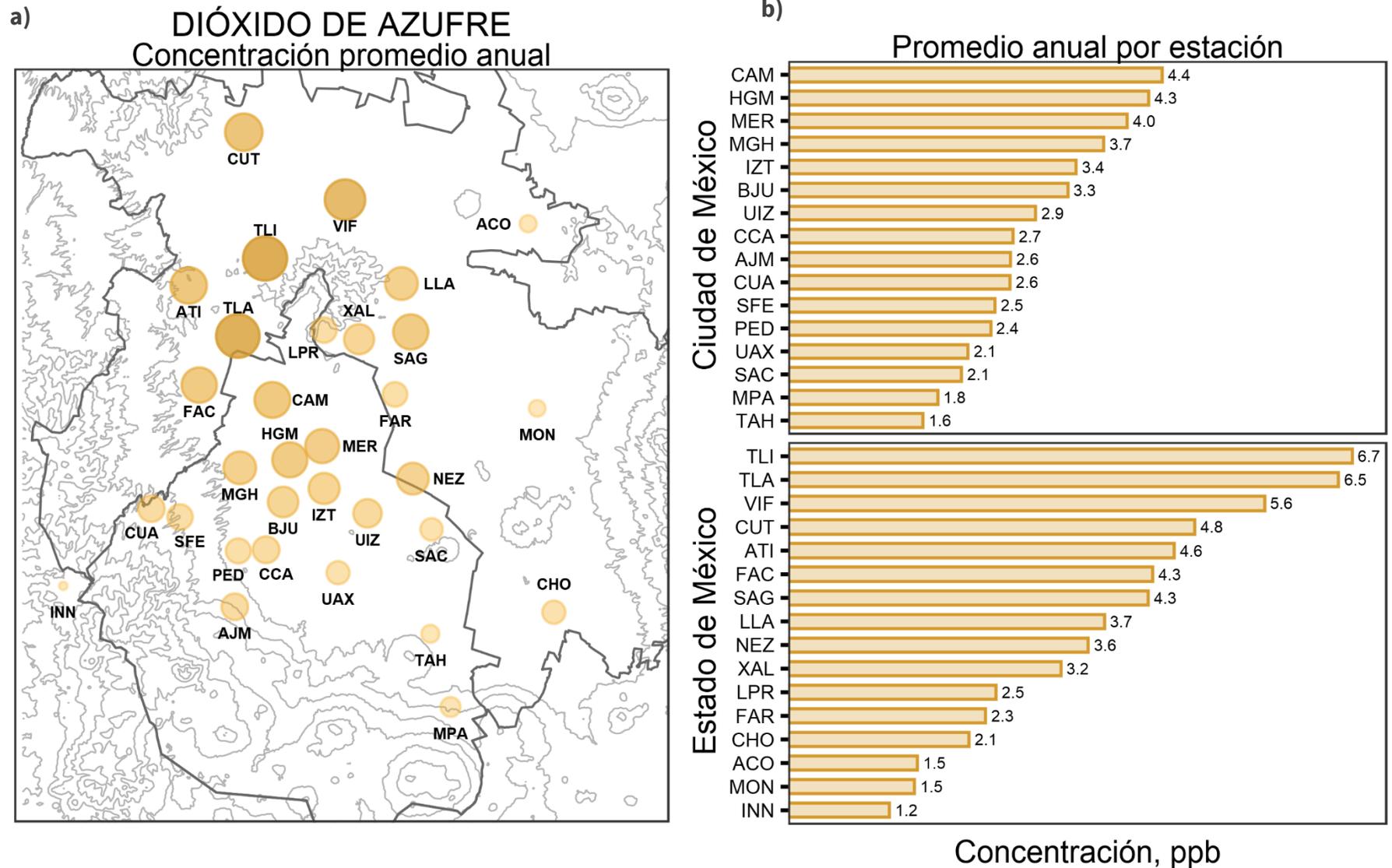
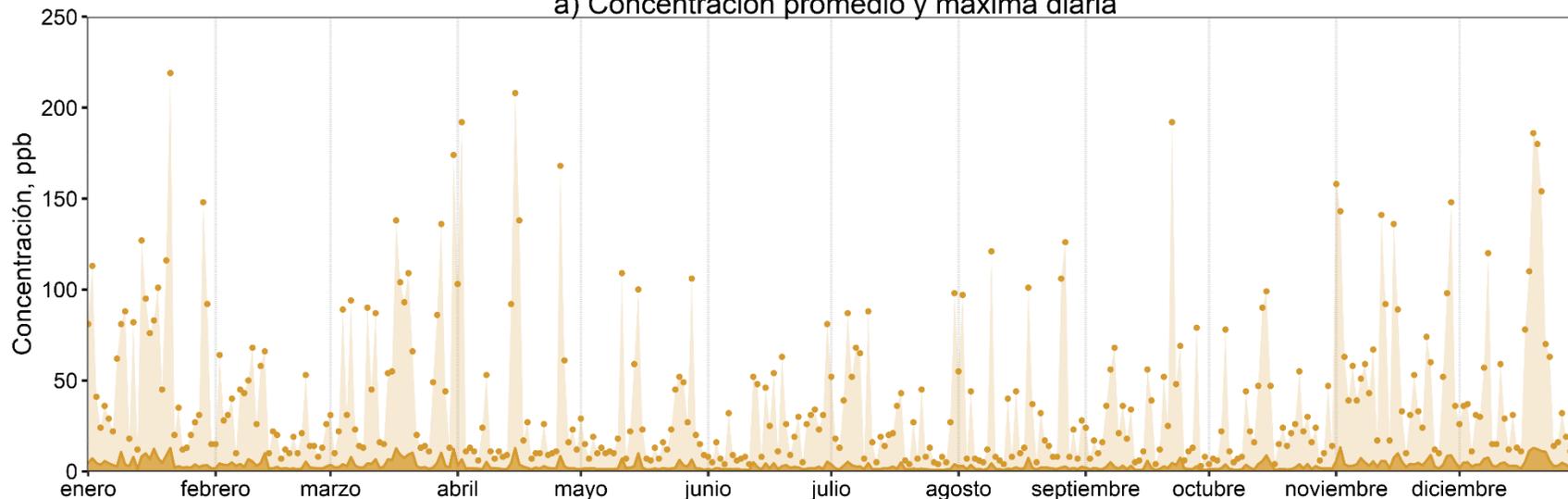


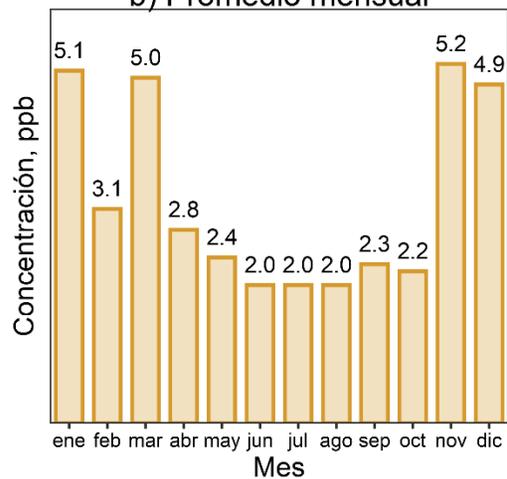
Figura 3.1. Promedio anual de SO₂ por sitio de monitoreo. a) En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y b) las gráficas de barras corresponden al valor anual dividido por entidad.

DIÓXIDO DE AZUFRE

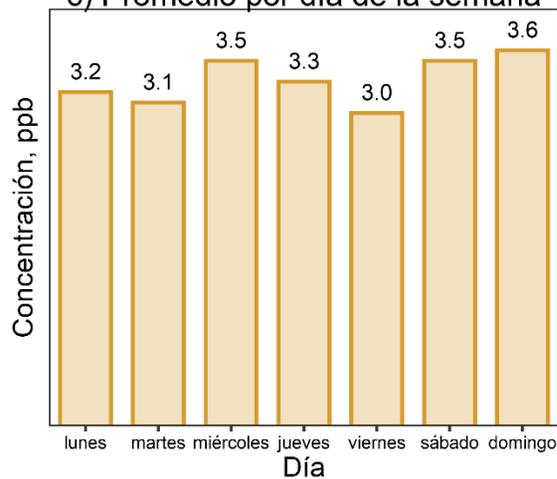
a) Concentración promedio y máxima diaria



b) Promedio mensual



c) Promedio por día de la semana



d) Perfil horario

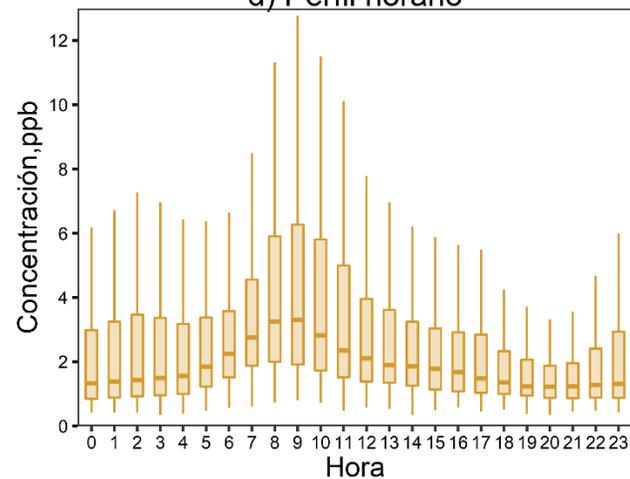


Figura 3.2. Distribución temporal del SO₂ en 2019. **a)** El promedio diario es el área sombreada fuerte, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea dentro de la caja indica el percentil 50 (mediana), el tamaño de la caja es el intervalo intercuartil (IQR) y los bigotes corresponden a 1.5 veces el IQR.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son un grupo de especies químicas que contienen oxígeno y nitrógeno. Se generan principalmente durante procesos de combustión en los motores de los automóviles, en calderas, estufas y calentadores domésticos, así como en los incendios y durante las tormentas eléctricas. En la Ciudad de México, la principal fuente de NO_x son los vehículos, los cuales emiten principalmente monóxido de nitrógeno (óxido nítrico – NO –); sin embargo, se oxida en la atmósfera para formar dióxido de nitrógeno (NO₂) y este contaminante es el único de los NO_x que está regulado por la normatividad mexicana debido a sus efectos negativos en la salud. El NO₂ también es un factor importante en la formación de ozono troposférico en ambientes urbanos y rurales.

En 2019, la concentración promedio anual del NO₂ fue 21.6 ppb, este valor es menor al registrado en 2018 e indica una reducción del 11.8%, con respecto a ese año. La concentración de NO₂ tiene aportaciones de origen primario y secundario, por lo tanto, su distribución espacial está determinada por la ubicación de las fuentes de emisión y por la actividad química de la atmósfera. Los sitios de monitoreo que se encuentran en zonas donde el tránsito vehicular es abundante, el centro y norte de la ciudad (**Figura 3.3a**), reportan los promedios anuales más altos.

La estación Merced (MER), ubicada en la alcaldía Venustiano Carranza, en el centro de la Ciudad de México, registró el promedio anual máximo con 31.2 ppb, y en la estación Milpa Alta (MPA), ubicada en la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México, reportó el promedio anual mínimo con 6.4 ppb (**Figura 3.3b**).

El NO₂ tiene un comportamiento similar que los otros contaminantes con un patrón estacional durante el año, los valores mínimos de concentración se presentan en los meses de lluvia y los máximos durante la temporada seca (**Figura 3.4a**). En 2019, diciembre reportó el promedio mensual máximo con una concentración de 29.0 ppb, mientras que septiembre registró el promedio mensual mínimo con 17.4 ppb (**Figura 3.4b**). En los días de la semana, durante el jueves y viernes se presentaron los promedios máximos con 23.0 ppb, mientras que el promedio mínimo fue el domingo con 18.0 ppb (**Figura 3.4c**). Este comportamiento coincide con los patrones de tránsito vehicular durante la semana. La concentración horaria máxima fue de 109 ppb el día 7 de enero. El perfil diurno (**Figura 3.4d**) presenta una distribución bimodal, con un pico matutino de las 09:00 a 10:00 h y uno vespertino de las 20:00 a 23:00 h. Ambos picos están asociados con las horas de máximo tránsito vehicular. Entre las 14:00 y las 17:00 h la concentración de NO₂ disminuye ya que se consume en la reacción de formación de ozono.

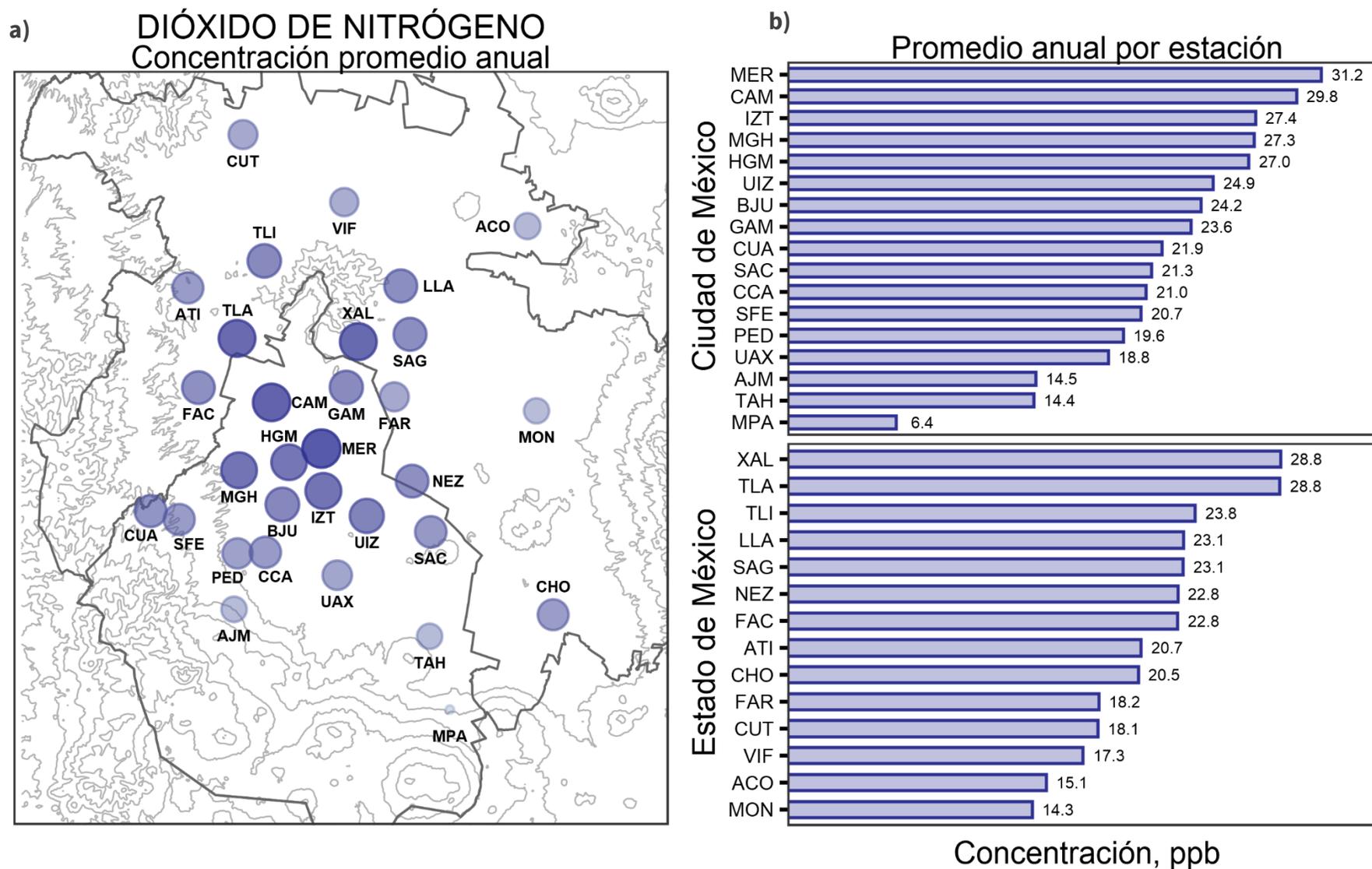
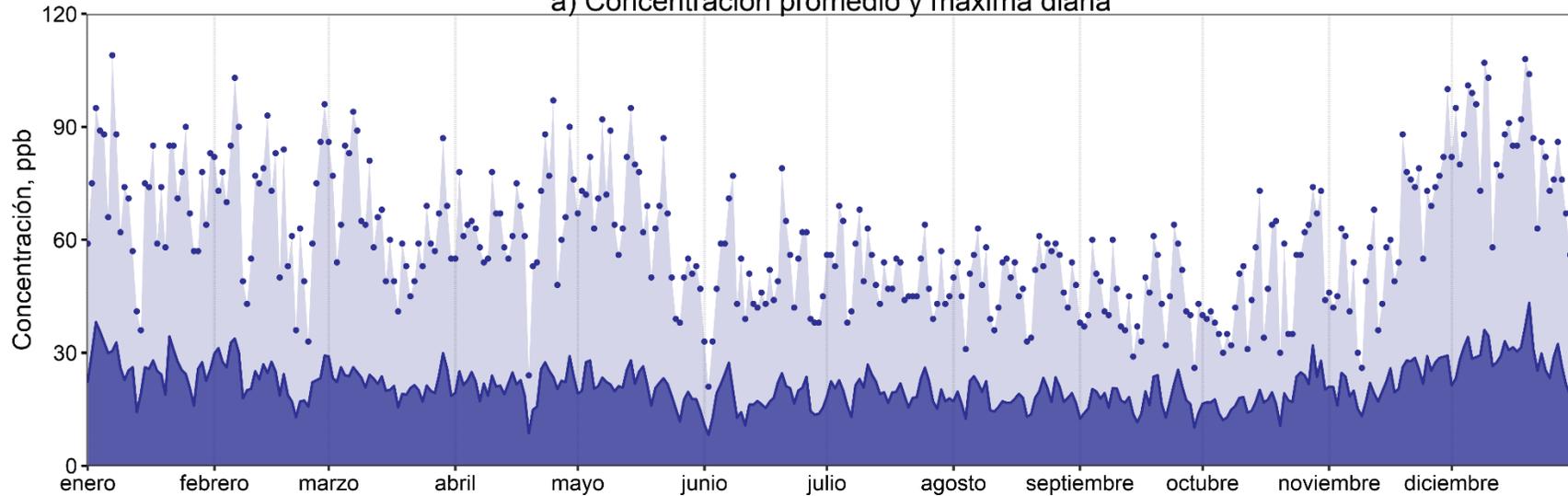


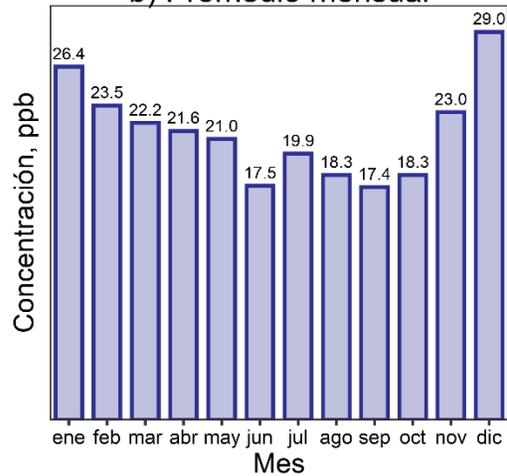
Figura 3.3. Promedio anual de NO₂ por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras corresponden al valor anual dividido por entidad.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO

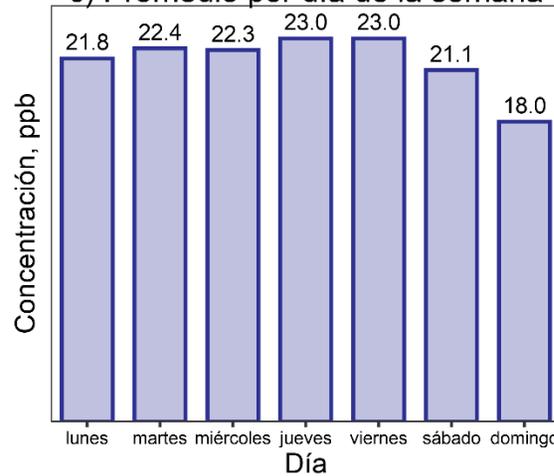
a) Concentración promedio y máxima diaria



b) Promedio mensual



c) Promedio por día de la semana



d) Perfil horario

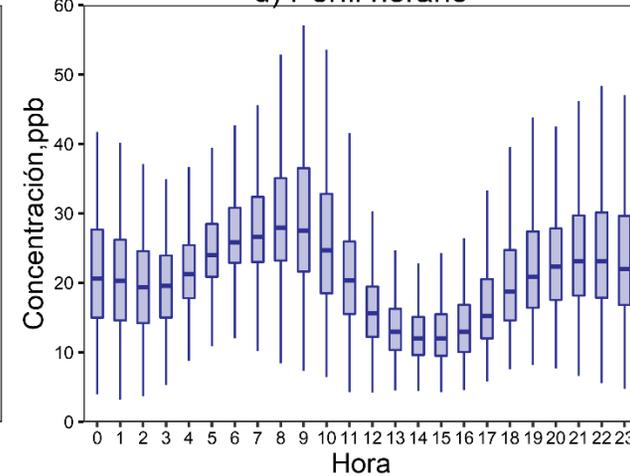


Figura 3.4. Distribución temporal del NO₂ en 2019. **a)** El promedio diario es el área sombreada fuerte, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea dentro de la caja indica el percentil 50 (mediana), el tamaño de la caja es el intervalo intercuartil (IQR) y los bigotes corresponden a 1.5 veces el IQR.

MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es un compuesto asociado a la combustión incompleta de materia orgánica en un ambiente deficiente de oxígeno. En zonas urbanas, su principal fuente de emisión es el humo del escape de los vehículos que utilizan gasolina como combustible. Al igual que los COV, el CO tiene participación en la formación de ozono, aunque su reactividad es baja.

En 2019 la concentración promedio anual de CO fue de 0.38 ppm, la cual fue menor al reportado en 2018, lo que indica una reducción del 11% con respecto al año previo. La emisión del monóxido de carbono está asociada directamente con los vehículos, ya que contribuyen con más del 90% de las emisiones totales, por lo tanto, la mayor concentración de CO se registra en las estaciones ubicadas en zonas con tránsito vehicular intenso. En el caso de la Ciudad de México, los sitios ubicados en el centro y norte de la ciudad reportaron los niveles más altos de concentración de CO (**Figura 3.5a**). En 2019, la estación La Presa (LPR), ubicada en el municipio Tlalnepantla de Baz en el Estado de México, reportó el promedio anual máximo de 0.60 ppm, mientras que el mínimo se registró en el sitio Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN), en el municipio Ocoyoacac en el Estado de México, ubicada en una zona predominantemente boscosa (**Figura 3.5b**).

Este contaminante tiene un comportamiento estacional, con máximos durante el invierno cuando la dispersión es deficiente y aumenta la frecuencia de días con inversión térmica de superficie. En la temporada de lluvia, cuando también ocurren las vacaciones de verano, los niveles de CO disminuyen significativamente (**Figura 3.6a**). Se observó que diciembre registró el mayor promedio mensual con 0.55 ppm, mientras que el mínimo ocurrió en junio con un valor de 0.29 ppm (**Figura 3.6b**). La concentración horaria máxima fue de 5.2 ppm y se registró el 1 de febrero.

La evaluación por día de la semana indicó que el martes y jueves fueron los más contaminados con una concentración de 0.41 ppm. Mientras que el domingo fue el día más limpio con un promedio de 0.32 ppm. La concentración en los días hábiles fue de 0.40 ppm y no se observó una diferencia real entre ellos; sin embargo, el domingo sí es notable ya que el tránsito disminuye significativamente (**Figura 3.6c**). Durante el día, la concentración de CO tiene un comportamiento característico, con los máximos en las horas de mayor tránsito vehicular. La concentración más alta se registra por la mañana, entre las 07:00 y las 10:00 h. Mientras que por la tarde también se observa otro pico, pero de menor intensidad, entre las 20:00 y 23:00 h. Ambos periodos coinciden con las horas de mayor tránsito vehicular (**Figura 3.6d**).

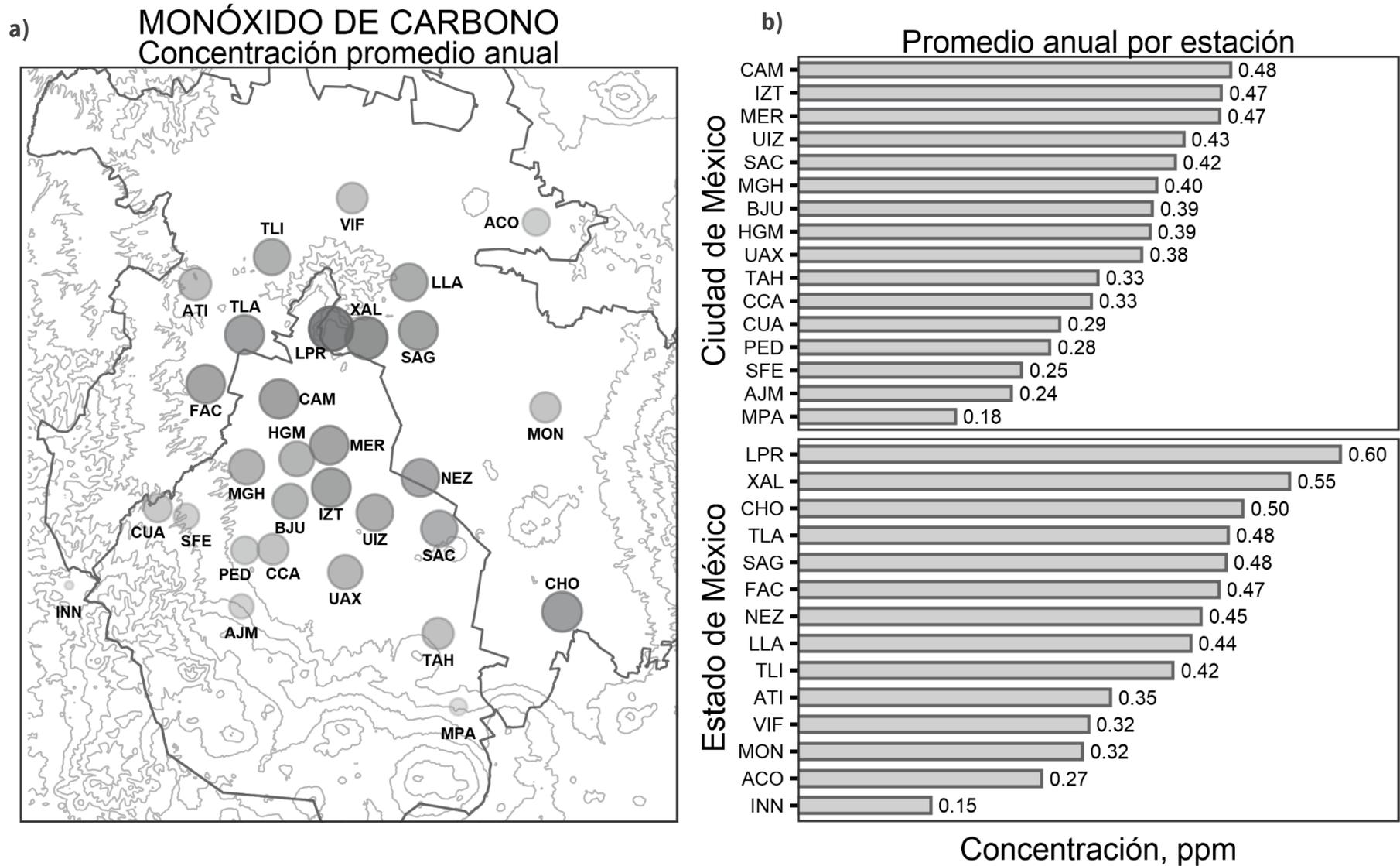
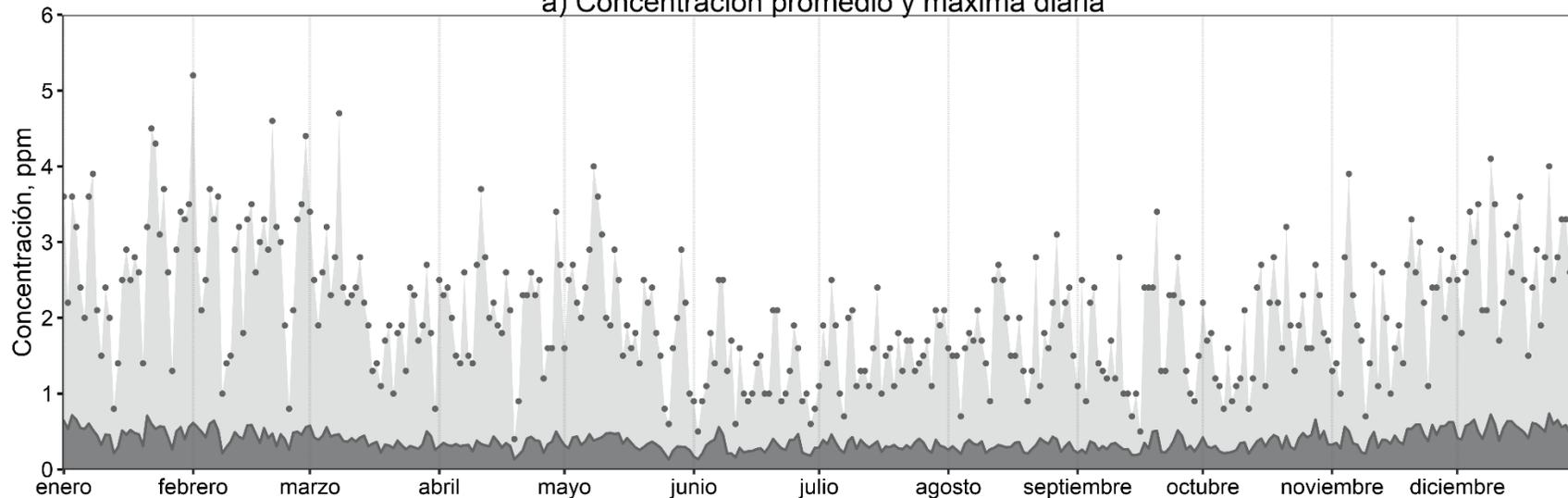


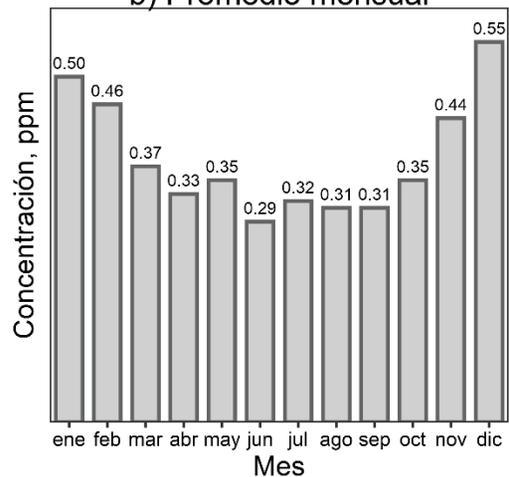
Figura 3.5. Promedio anual de CO por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras corresponden al valor anual dividido por entidad.

MONÓXIDO DE CARBONO

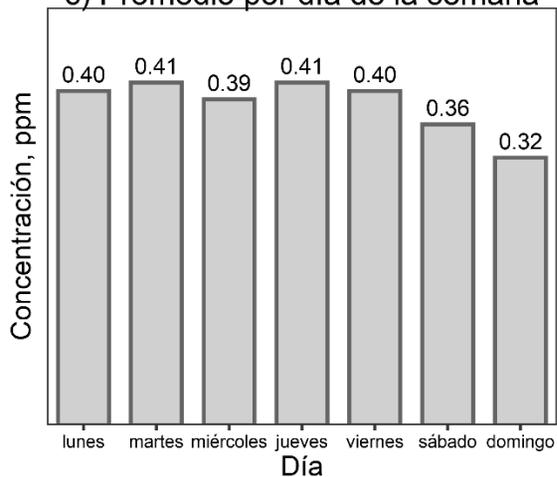
a) Concentración promedio y máxima diaria



b) Promedio mensual



c) Promedio por día de la semana



d) Perfil horario

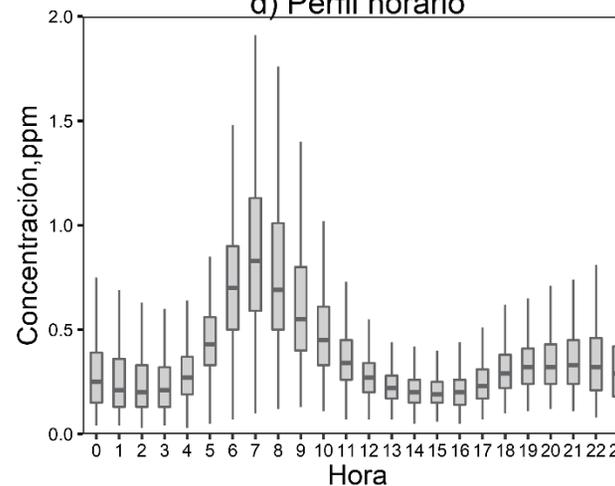


Figura 3.6. Distribución temporal del CO en 2019. **a)** El promedio diario es el área sombreada fuerte, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea dentro de la caja indica el percentil 50 (mediana), el tamaño de la caja es el intervalo intercuartil (IQR) y los bigotes corresponden a 1.5 veces el IQR.

OZONO (O₃)

La Agencia Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) desarrolló una Evaluación Científica Integral del Ozono (ISA por sus siglas en inglés) publicada en 2020, en la cual menciona que los estudios recientes respaldan la evidencia de que la exposición al O₃ en el corto plazo tiene efectos en el sistema respiratorio. Así mismo, hay evidencia sobre el impacto ambiental del ozono en los ecosistemas y la vegetación, en la cual se ha documentado que en variedad de especies de cultivo y forestales, el O₃ tiene efectos como lesión foliar, reducción del crecimiento y la disminución del rendimiento en cultivos. También existe evidencia de que el ozono troposférico tiene contribución en el forzamiento radiativo y en las variables climáticas, incluida la temperatura y la precipitación (denominado cambio climático).

El problema de contaminación por O₃ en la Ciudad de México ha sido estudiado durante diversas campañas intensivas de monitoreo (MCMA-2003 y MILAGRO 2006 –Molina et al. 2007 y 2010–). Los resultados han demostrado que la reactividad de la atmósfera en nuestra ciudad es una de las más intensas en comparación con otras ciudades y tiene una gran complejidad en la distribución de las especies orgánicas, así como su interacción con los compuestos oxidantes en la atmósfera. Además, se ha demostrado que los procesos de formación del O₃ no ocurren de manera lineal y su complejidad es un gran reto para la gestión de la calidad del aire en la Ciudad de

México. En términos químicos se ha demostrado que la formación del ozono es sensible a la concentración de COV en la atmósfera, es decir, un aumento o disminución en la cantidad de COV ocasiona un incremento o reducción en O₃; sin embargo, dicha asociación no es siempre lineal, ya que influyen otros factores. Esto explica porque, a pesar de que en las últimas décadas se ha logrado una reducción significativa en la cantidad de las emisiones provenientes de los vehículos y la industria, la concentración de O₃ no ha disminuido en la misma proporción.

En 2019, la concentración promedio anual de O₃ fue 31.4 ppb, mientras que en 2018 fue de 29.6 ppb, lo que representó un incremento del 6% con respecto al año previo. El promedio anual de los máximos diarios fue de 100.7 ppb, el cual también fue superior al reportado en 2018 de 100 ppb. Esto es debido a que el 2018, a diferencia del 2019, fue un año de condiciones favorables para la dispersión en la temporada de ozono.

En la ZMCM, la mayor concentración de O₃ se registra viento abajo de las fuentes de emisión de sus precursores, es decir, al sur de la ciudad, ya que las principales fuentes de COV y NO_x están en el norte y centro de la zona metropolitana. En 2019, la distribución espacial del número de horas que superaron el límite de la NOM para el promedio horario (95 ppb), muestra que la mayoría ocurrió al sur de la Ciudad de México (**Figura 3.7a**) y la estación Pedregal (PED), en la alcaldía Álvaro Obregón, reportó el máximo con un total de 389 horas,

mientras que los mínimos fueron en Chalco (CHO) con dos horas y Acolman (ACO) con cero horas, ambos en Estado de México y en zonas semirurales (**Figura 3.7b**). En cuanto al número de excedencias a la NOM, en 2019 se registró un total de 204 días en los que su máximo horario fue superior al límite de 95 ppb.

En el comportamiento temporal, los máximos de O_3 normalmente se presentan durante la primavera, en la temporada de ozono, cuando aumenta la duración de los días y la intensidad de la radiación solar. En esta temporada, con la falta de nubosidad y el viento débil, se favorece la estabilidad atmosférica, además, las inversiones térmicas de subsidencia son frecuentes. Por otro lado, en periodo de lluvias, disminuye la cantidad de precursores de O_3 y aumenta la inestabilidad atmosférica, esto conlleva a una reducción en la formación del ozono (**Figura 3.8a**). La concentración máxima registrada en 2019 fue el 30 de marzo a las 16:00 h con 159 ppb en la estación Pedregal (PED), este día también se activó la Fase I de contingencia, este evento se describe a detalle en el capítulo 4 de este informe.

Los meses con la concentración más alta de ozono fueron marzo, abril y mayo, lo cual es similar a los años anteriores, mientras que los promedios mensuales mínimos fueron de octubre a diciembre (**Figura 3.8b**). En cuanto al promedio por día de la semana (**Figura 3.8c**), los sábados y domingos

registraron los valores más elevados, esto es debido al régimen de producción de O_3 que es sensible a COV y se conoce como “efecto fin de semana”. Stephens et al. (2008) realizó un estudio con los datos de 1986 a 2007 medidos por el SIMAT, en el cual se demostró que los días hábiles presentaban patrones similares en sus perfiles y la concentración de los contaminantes primarios, como CO y NO_x , es menor en sábados y domingos; sin embargo, en estos días no se reducía el O_3 , esto es debido a que con la disminución de NO_x , los radicales OH se encuentran disponibles para reaccionar con los COV y se favorece la formación de O_3 , es decir, una reducción en NO_x puede incrementar la generación de O_3 . En el perfil horario de ozono (**Figura 3.8d**) se observó que la concentración máxima se presentó entre las 12:00 y 17:00 h, este periodo coincide con el de mayor intensidad de radiación solar, mientras que los mínimos ocurren en la noche.

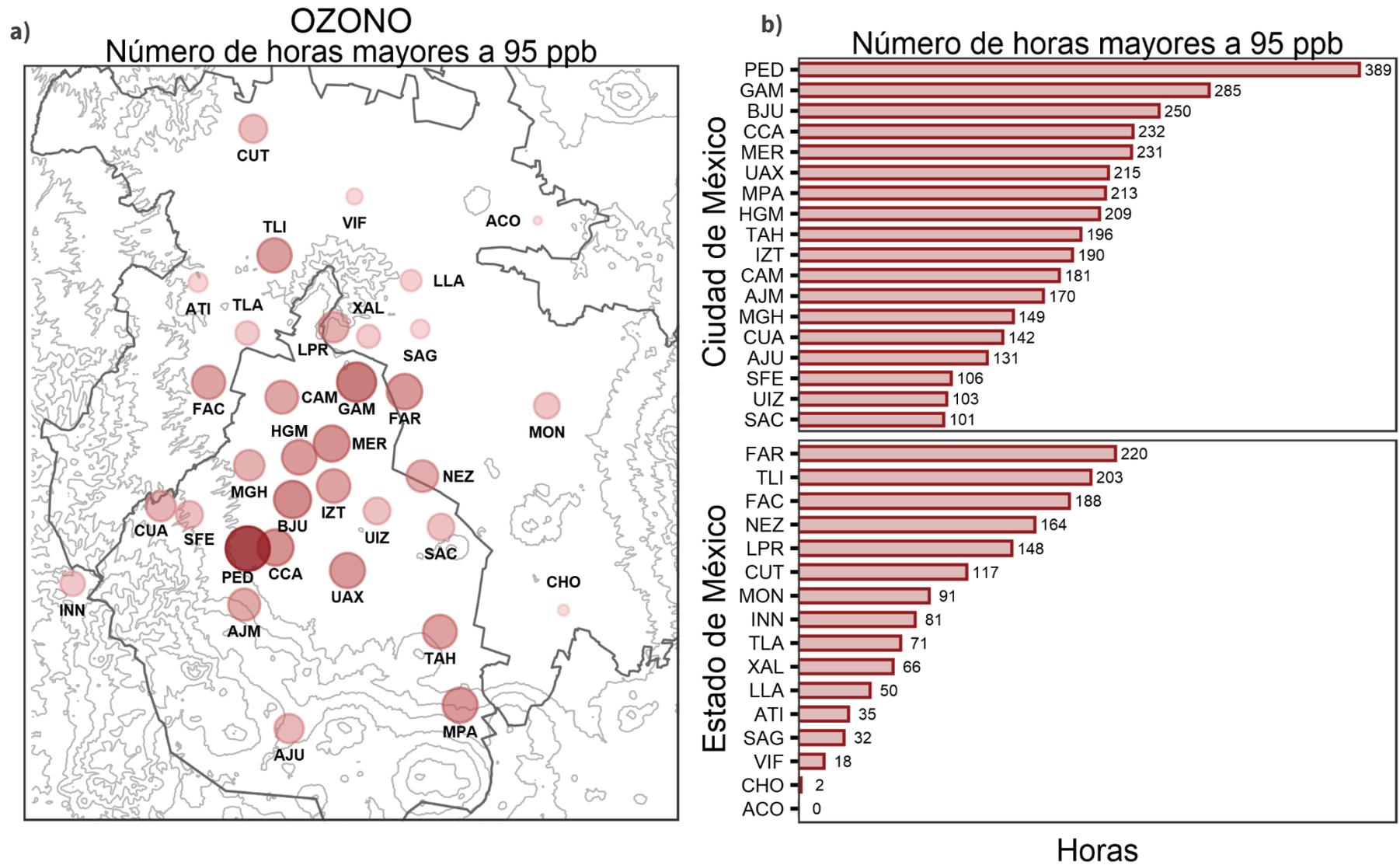
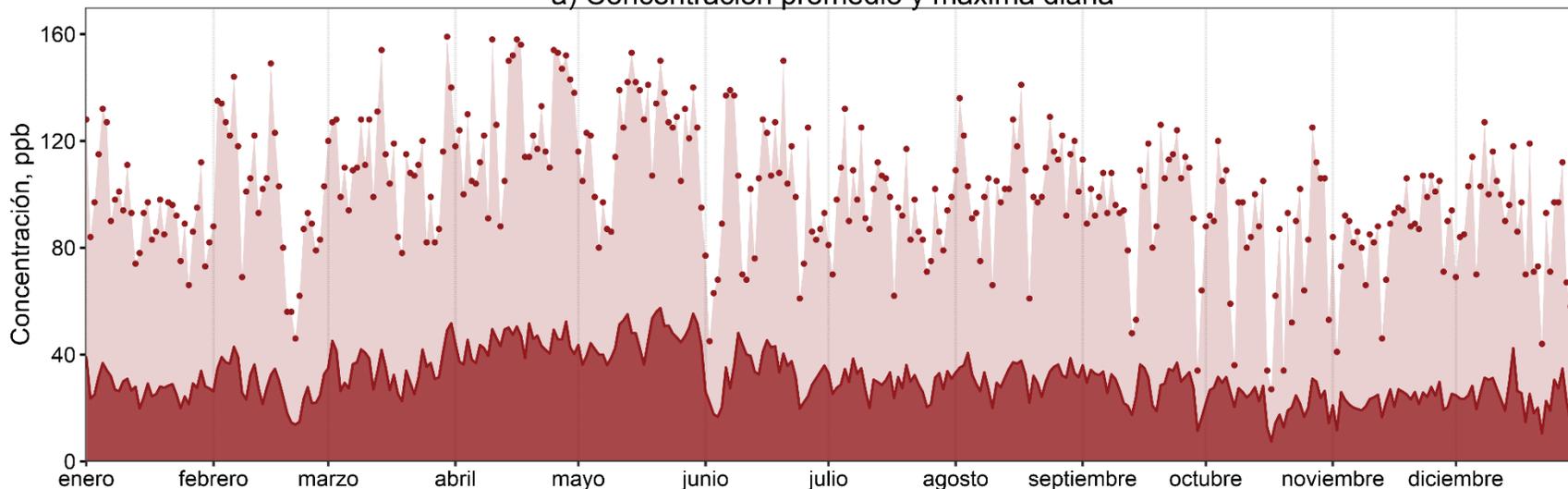


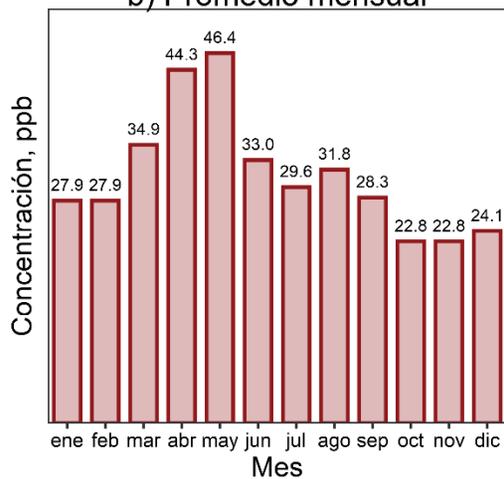
Figura 3.7. Número de horas con concentración horaria de $O_3 > 95$ ppb por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del número de horas y **b)** las gráficas de barras corresponden al conteo dividido por entidad.

OZONO

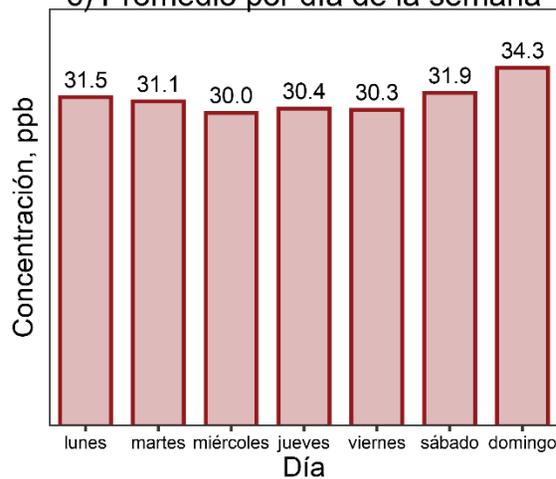
a) Concentración promedio y máxima diaria



b) Promedio mensual



c) Promedio por día de la semana



d) Perfil horario

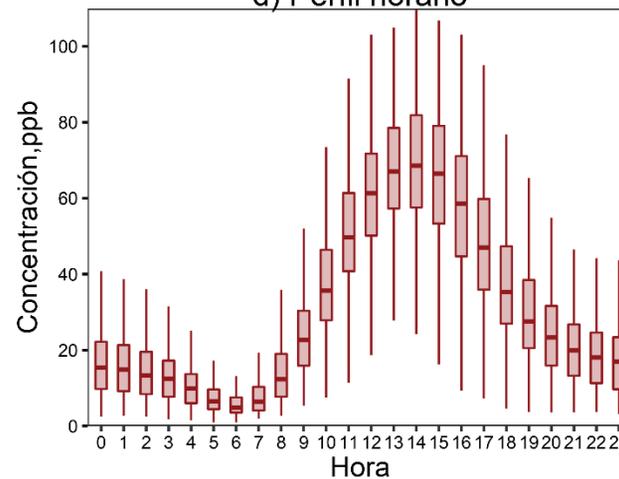


Figura 3.8. Distribución temporal del O₃ en 2019. **a)** El promedio diario es el área sombreada fuerte, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea dentro de la caja indica el percentil 50 (mediana), el tamaño de la caja es el intervalo intercuartil (IQR) y los bigotes corresponden a 1.5 veces el IQR.

PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

La importancia y efecto de las partículas suspendidas en la calidad del aire depende de su proceso de formación, la ubicación geográfica, así como de la mezcla de las emisiones que determinan su composición y de la química atmosférica. Las partículas están presentes en los humos de los escapes, en las chimeneas de incineradores, industrias, etc., así como, en fuentes naturales como el polvo del suelo, el polen, la brisa marina, erupciones volcánicas e incendios forestales.

El comportamiento y manejo de los incendios forestales es una situación compleja. El humo proveniente de los incendios forestales contiene miles de compuestos, que incluyen partículas (PM), dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos y otros compuestos orgánicos, así como óxidos de nitrógeno (NOx) y minerales traza. Los incendios forestales sin control pueden llegar a zonas urbanas, quemando casas y estructuras, es decir, consumiendo materiales hechos por el hombre, además de los combustibles naturales. Las características de los incendios forestales, como la intensidad (leves o severos) y la velocidad de propagación (lenta o rápida) dependen del tipo de combustible y de las condiciones climáticas. Los incendios forestales pueden durar semanas o meses y usualmente, son los que ocasionan impactos en la calidad del aire de mayor gravedad y duración.

Los niveles de humo en áreas pobladas pueden ser difíciles de predecir (US EPA, 2021) y se requiere de mayor investigación para comprender y mitigar los impactos en la salud ocasionados por respirar esta mezcla compleja de emisiones provenientes de la quema de materiales naturales y artificiales. Como se mencionó, uno de los contaminantes principales de los incendios son las partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}), las cuales ocasionan un daño importante en la salud, ya que cuando son inhaladas, alcanzan la zona más profunda de los pulmones, también pueden ingresar al torrente sanguíneo y dañar órganos vitales.

La cantidad de emisiones provenientes de incendios pueden combinarse con los niveles de concentración de PM_{2.5} que se registran comúnmente en el aire ambiente, esto deteriora la calidad del aire en poco tiempo y la población se expone a niveles nocivos y puede presentar consecuencias importantes en su salud, como exacerbar problemas respiratorios y cardiovasculares. En un estudio elaborado por Aguilera et al. (2021), se estimó un incremento de hasta el 10 % en hospitalizaciones por síntomas respiratorios ocasionados por los incendios forestales en California, EE. UU.

Algunos equipos del monitoreo automático del SIMAT, miden las partículas en las fracciones: $PM_{2.5}$, $PM_{10-2.5}$ conocidas como partículas finas y gruesas, mientras que la suma de estas fracciones representa las PM_{10} . Como ya se ha mencionado, en 2019 se presentó un evento de alta concentración de partículas que prevaleció por una semana (11 al 16 de mayo) en la ZMCM, esto fue consecuencia de los incendios que se presentaron en el suroeste y centro del país. Para analizar el comportamiento de las partículas suspendidas durante el evento de incendios, se realizó el promedio de los valores horarios para la semana con incendios y para el resto del mes.

El promedio en los días de mayo (sin incendios) se presenta en la **Figura 3.9a** y muestra la proporción normal de partículas congruente con los datos anuales anteriores ya que, en 2019, la proporción general de la fracción gruesa y fina de las partículas fue del 52% de $PM_{2.5}$ y 48% a $PM_{10-2.5}$, similar a lo observado en 2018. Sin embargo, en la comparación de los promedios se encontró que durante la semana de incendios hubo un incremento de casi el 20% en las concentraciones de la fracción de $PM_{2.5}$ y una reducción del 47% en las concentraciones de $PM_{10-2.5}$. La gráfica muestra la distribución de las $PM_{10-2.5}$ y las $PM_{2.5}$ en las fechas consideradas, mostrando el cambio en la proporción de las partículas (**Figura 3.9b**).

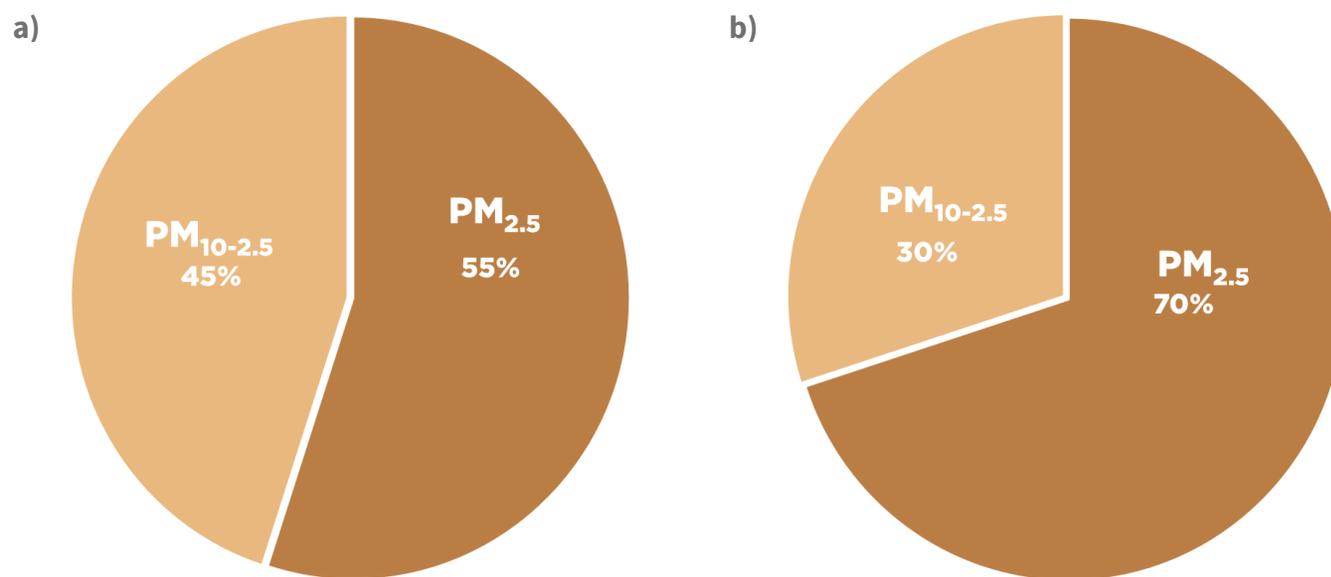


Figura 3.9. Contribución de las partículas $PM_{2.5}$ y $PM_{10-2.5}$ a la masa total de las PM_{10} , **a)** Promedio con todos los días de mayo, excepto la semana de incendios. **b)** Promedio en el evento de incendios del 11 al 16 de mayo de 2019.

Los promedios anuales del monitoreo continuo (RAMA) durante 2019 fueron de $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} , $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{10-2.5}$ para toda la zona metropolitana. Por otro lado, en la Ciudad de México, el promedio anual fue $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} ; $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{10-2.5}$, las tres fracciones registraron el máximo en los sitios CAM y MER. Los máximos del promedio de 24 horas reportados para cada fracción fueron $237 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} (el 1 de diciembre en Villa de las Flores, VIF); $132 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ (el 1 de diciembre en NEZ) y en la semana de incendios en mayo el máximo fue de $101 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (14 de mayo en NEZ), donde cuatro estaciones superaron el valor de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$; finalmente, la fracción $\text{PM}_{10-2.5}$ registró su máximo el 22 de enero en XAL con $294 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Este año, el impacto de la pirotecnia en las celebraciones de fin de año y los incendios de mayo, ocasionaron niveles altos de partículas en el ambiente. Para el análisis de la distribución espacial de las diferentes fracciones, en la **Figura 3.10** se observa que la mayor concentración de las PM_{10} está en los sitios al oriente desde Acolman (ACO) hasta Chalco (CHO); en las partículas gruesas (**Figura 3.11**), se presentó una influencia importante de las emisiones locales relacionadas con el tránsito vehicular cercano a las estaciones como es el caso de Xalostoc (XAL), San Agustín (SAG), Tlalnepantla (TLA), Camarones (CAM) y Merced (MER). En las $\text{PM}_{2.5}$ (**Figura 3.12**) existe homogeneidad en todas las estaciones y solamente las que están ubicadas al suroeste presentaron una concentración menor a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como Ajusco Medio (AJM),

Instituto de Investigaciones Nucleares (INN), Benito Juárez (BJU), Pedregal (PED) y Santa Fe (SFE).

Las PM_{10} tienen un comportamiento estacional característico, ya que presentan su concentración más alta en la temporada seca fría y la mínima durante el periodo de lluvias, esto es debido a que la precipitación remueve eficientemente las partículas (**Figura 3.13a**). En los promedios por mes (**Figura 3.13b**), mayo reportó el máximo con un promedio de $60.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ esto fue consecuencia directa de la semana de incendios, mientras que el mínimo mensual fue en octubre con un valor de $26.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este mes fue el único que presentó anomalías positivas de lluvia con respecto a la climatología de 1981-2010. En los promedios por día de la semana, PM_{10} tiene un comportamiento acumulativo, en donde el domingo fue el día más limpio y el martes el más contaminado (**Figura 3.13c**). El patrón horario del contaminante presenta dos picos, uno matutino y otro vespertino, ambos asociados con las horas de mayor tránsito vehicular (**Figura 3.13d**).

En la Ciudad de México, las partículas gruesas $\text{PM}_{10-2.5}$ representan menos del 50% de la masa total de las PM_{10} , la mayor parte de estas partículas son de origen primario, es decir, se emiten de forma directa y sus niveles están asociados con el tránsito vehicular, el desgaste de frenos y neumáticos en los vehículos, así como el polvo de las carreteras, además de que también están relacionadas con las actividades de construcción y trituración de materiales en las obras.

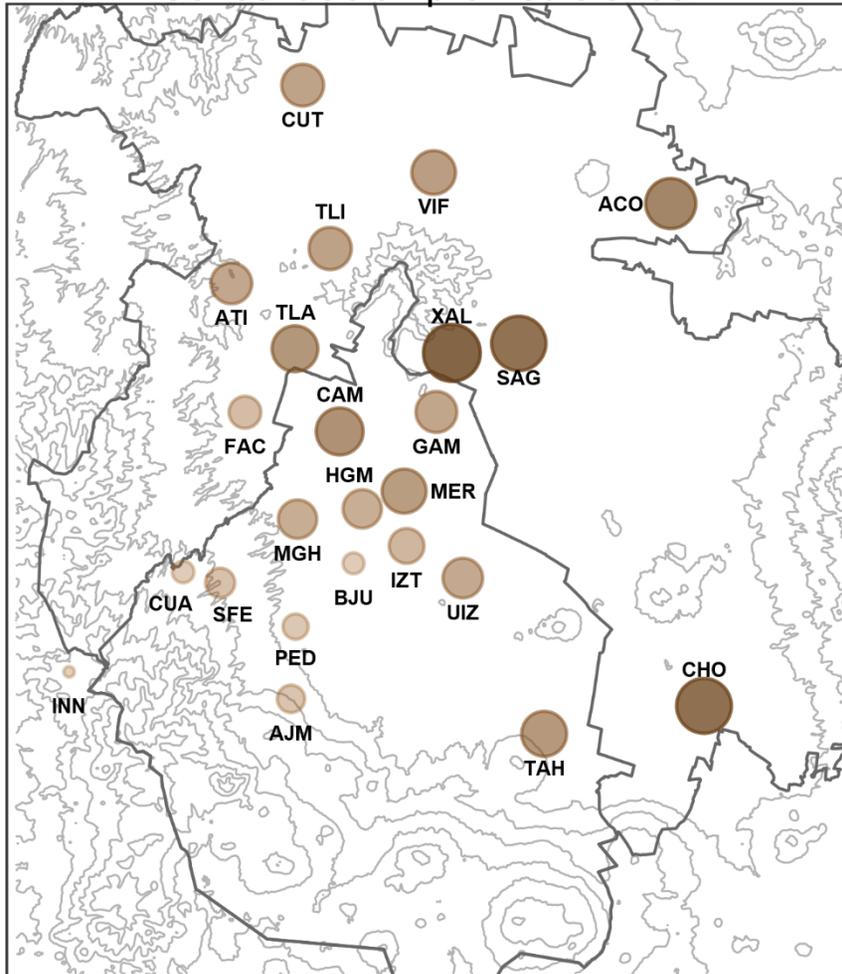
Las $PM_{10-2.5}$ tienen una estacionalidad marcada, con sus máximos en la temporada seca fría y los mínimos durante el periodo de lluvia (**Figura 3.14a**). En el promedio mensual (**Figura 3.14b**), el máximo se registró en marzo con $26.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el mínimo fue en octubre con un valor de $12.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En los promedios por día de la semana (**Figura 3.14c**), las $PM_{10-2.5}$ presentan un efecto acumulativo y el domingo fue el día más limpio con $17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que los jueves y viernes fueron los más contaminados. El patrón horario del contaminante es similar a las PM_{10} con dos picos asociados al mayor tránsito vehicular del día (**Figura 3.14d**).

En el caso de las $PM_{2.5}$, estas representan un poco más del 50% de la masa total de las PM_{10} y en su mayoría son de origen secundario, es decir, se forman por medio de reacciones químicas en la atmósfera a partir de otros contaminantes gaseosos o líquidos, en su composición predominan los productos de estas reacciones (p. e. nitratos y sulfatos), además de metales pesados, compuestos orgánicos secundarios y carbono negro. Este contaminante es uno de los más peligrosos para la salud humana ya que, debido a su tamaño, ingresan profundamente en el sistema respiratorio y pueden causar daños pulmonares y cardiovasculares como infartos, arritmias, hipertensión y arterosclerosis, entre otros (Du et al, 2016).

Las $PM_{2.5}$ también tienen un comportamiento característico en un año normal, con los máximos en los meses de invierno y mínimos en la temporada de lluvia; sin embargo, en este año el comportamiento cambió debido a los incendios, esto se puede observar en la serie de tiempo en la **Figura 3.15a**. En consecuencia, mayo registró el máximo del promedio mensual con $38.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el mínimo fue en octubre con $15.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Figura 3.15b**).

Los promedios por día de la semana muestran que el mínimo fue en viernes con $22.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el máximo en los martes, miércoles, jueves y sábado, los cuales estuvieron influenciados por los incendios, pero prácticamente es homogéneo todos los días, ya que la diferencia es mínima (**Figura 3.15c**). En el transcurso del día, las $PM_{2.5}$ tienen un comportamiento característico, con un máximo entre las 11:00 y las 13:00 h, este patrón es distinto al observado en otros contaminantes y es ocasionado por la variación diurna de la contribución individual de los componentes primarios y secundarios. Sin embargo, en sitios cercanos a vialidades altamente transitadas, en donde predomina la contribución de partículas primarias, las concentraciones máximas se registran entre las 07:00 y las 09:00 h (**Figura 3.15d**).

a) PARTÍCULAS MENORES A 10 μm (PM₁₀)
Concentración promedio anual



b) Promedio anual por estación

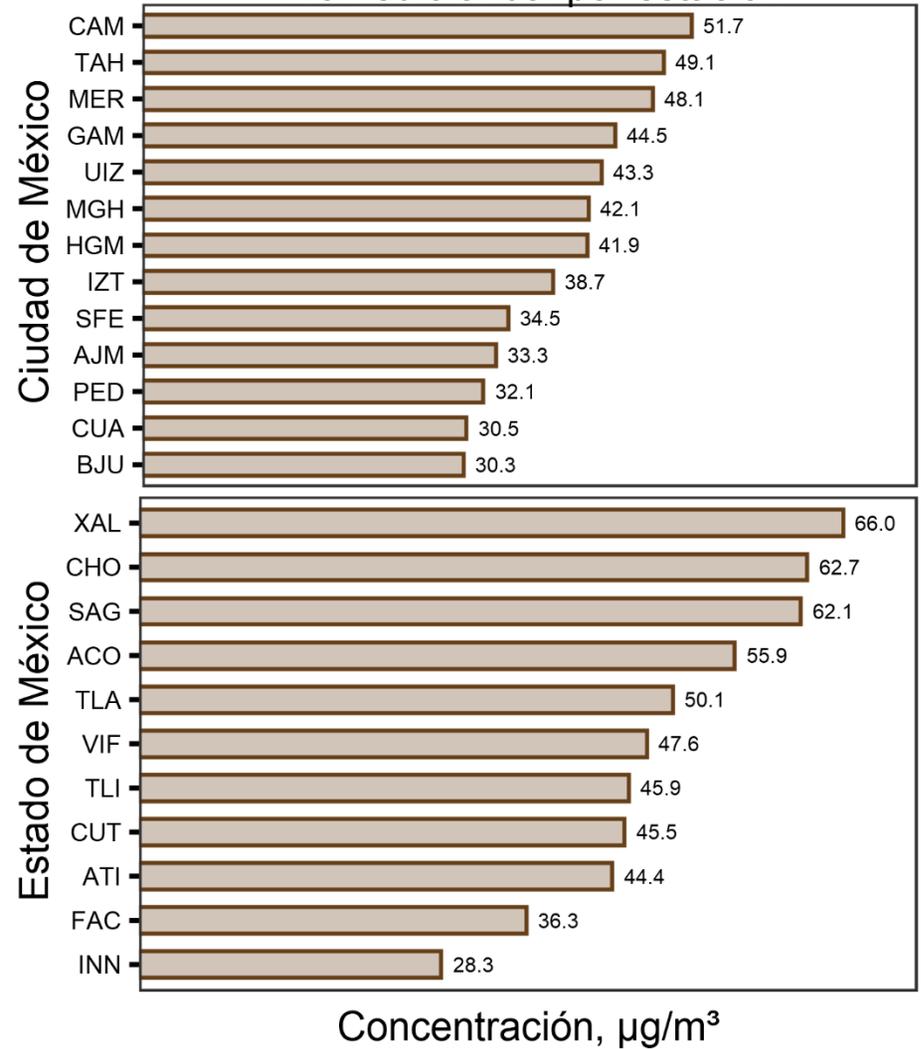
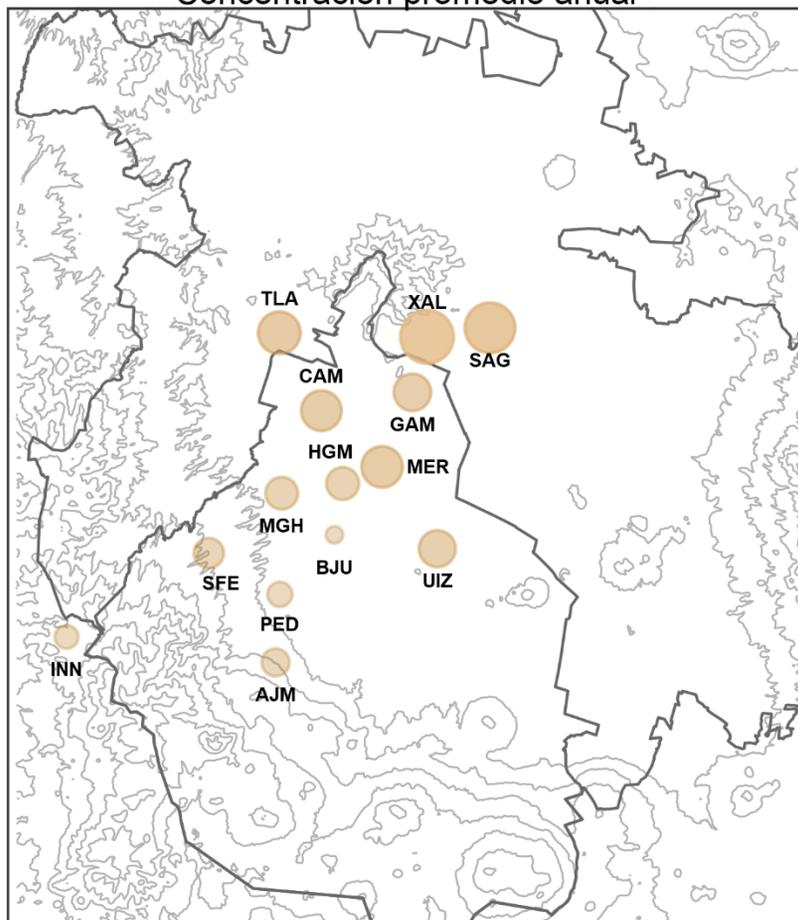


Figura 3.10. Promedio anual de PM₁₀ por sitio de monitoreo. a) En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y b) las gráficas de barras corresponden al valor anual dividido por entidad.

a) MATERIAL PARTICULADO GRUESO (PM_{10-2.5})
Concentración promedio anual



b) Promedio anual por estación

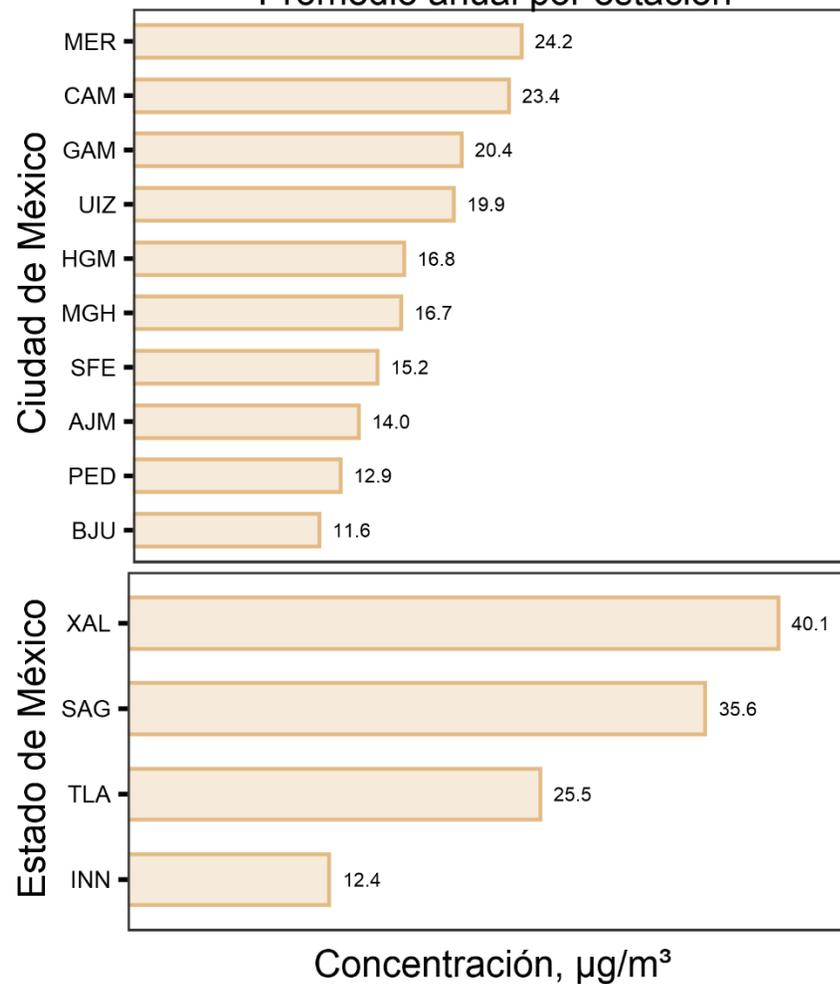
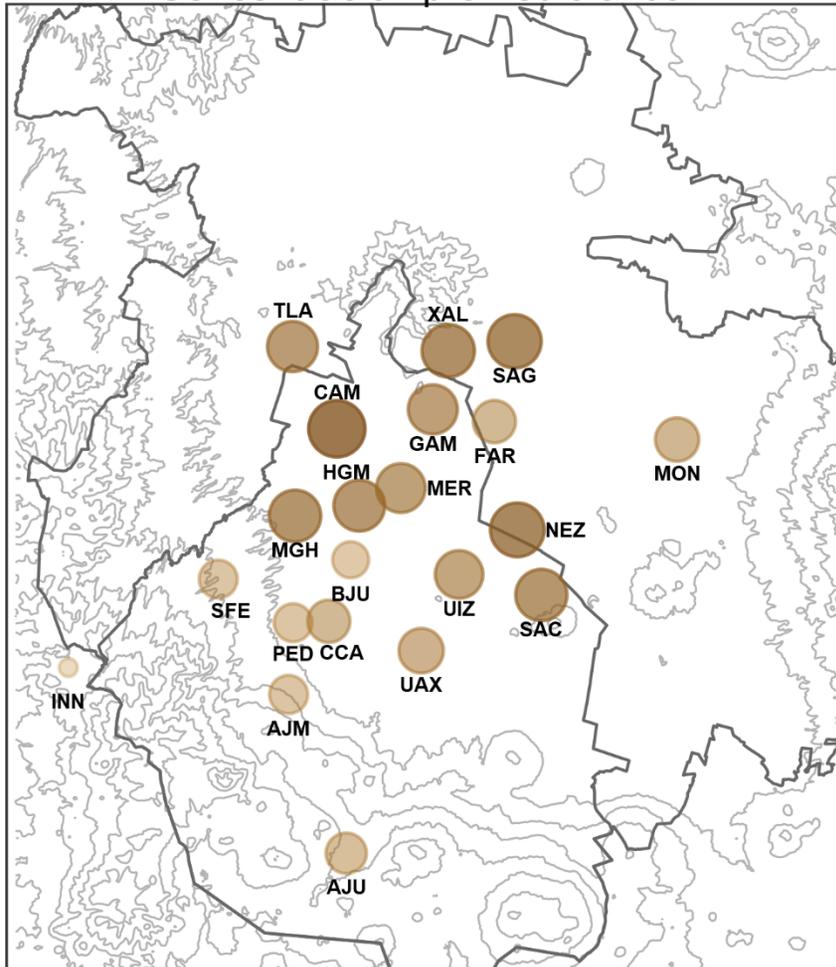


Figura 3.11. Promedio anual de PM_{10-2.5} por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras corresponden al valor anual dividido por entidad.

a) **PARTÍCULAS MENORES A 2.5 μm (PM_{2.5})**
 Concentración promedio anual



b) **Promedio anual por estación**

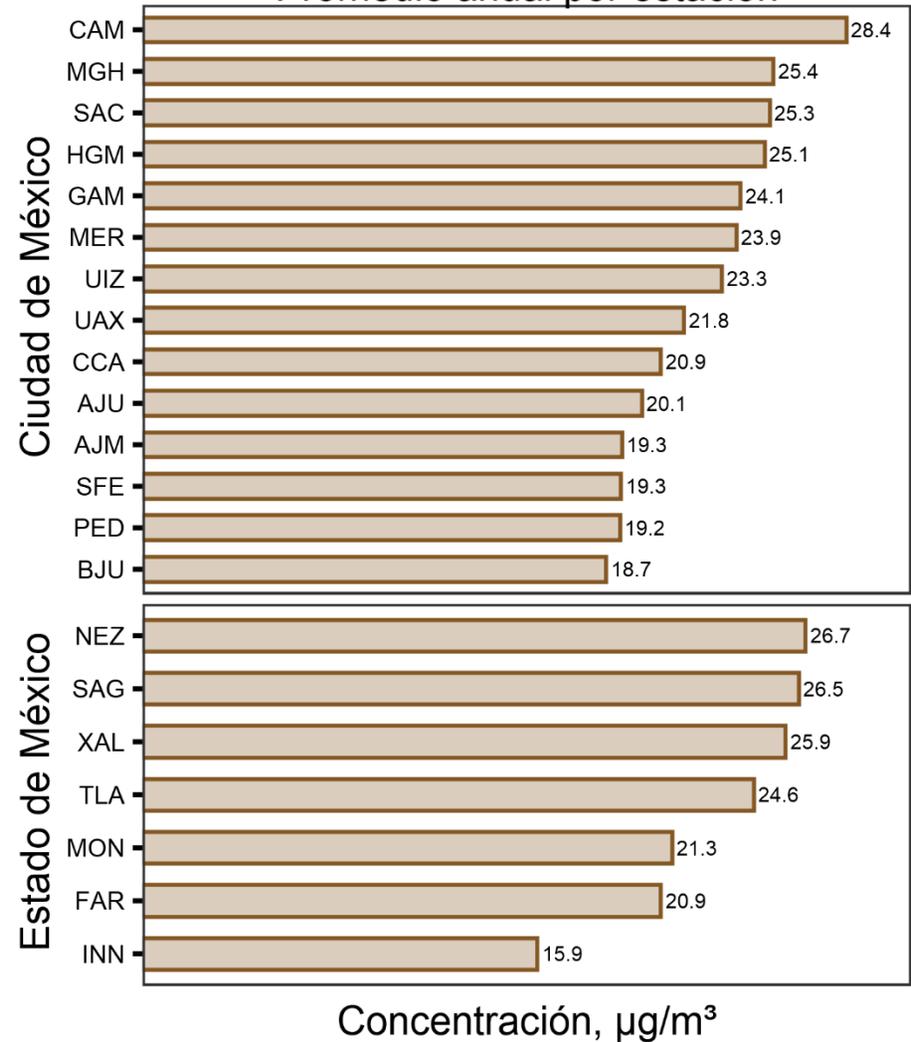
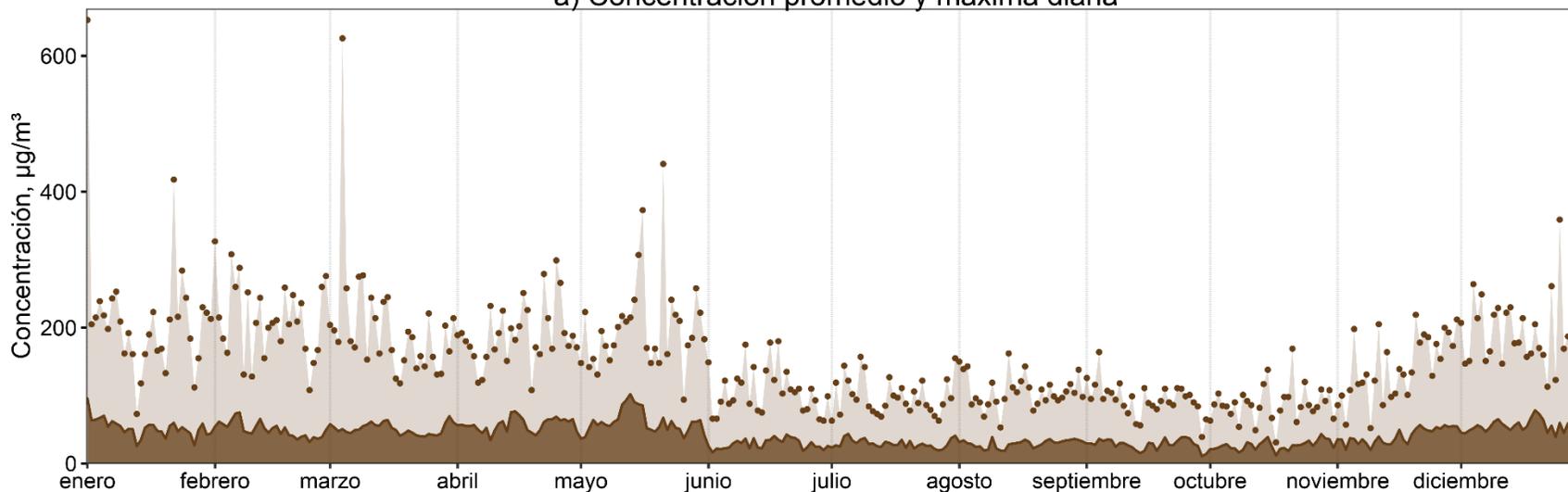


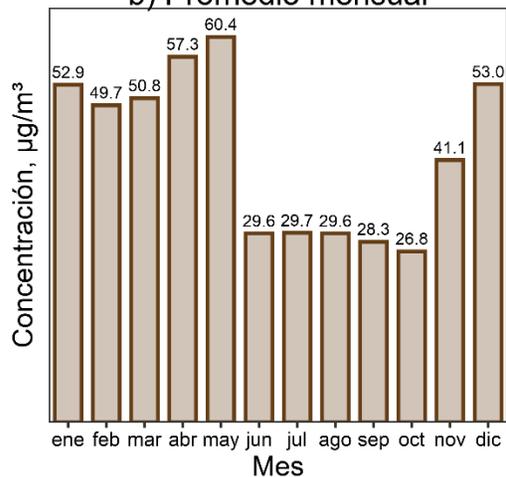
Figura 3.12. Promedio anual de PM_{2.5} por sitio de monitoreo. **a)** En el mapa se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y **b)** las gráficas de barras corresponden al valor anual dividido por entidad.

PARTÍCULAS MENORES A 10 μm (PM10)

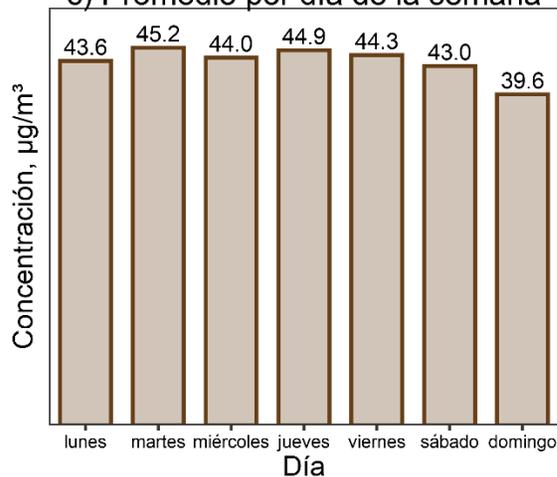
a) Concentración promedio y máxima diaria



b) Promedio mensual



c) Promedio por día de la semana



d) Perfil horario

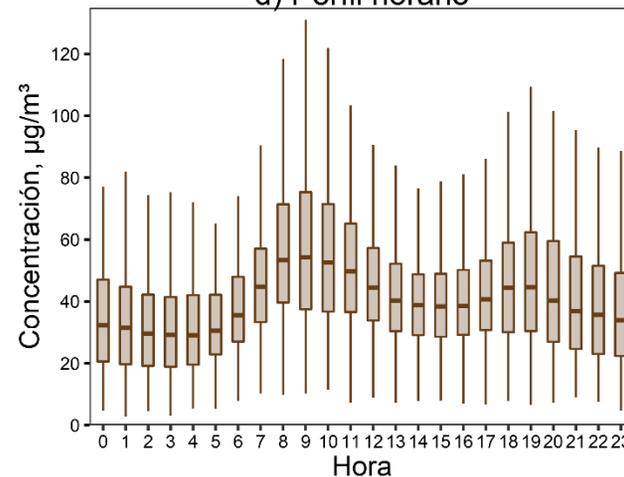
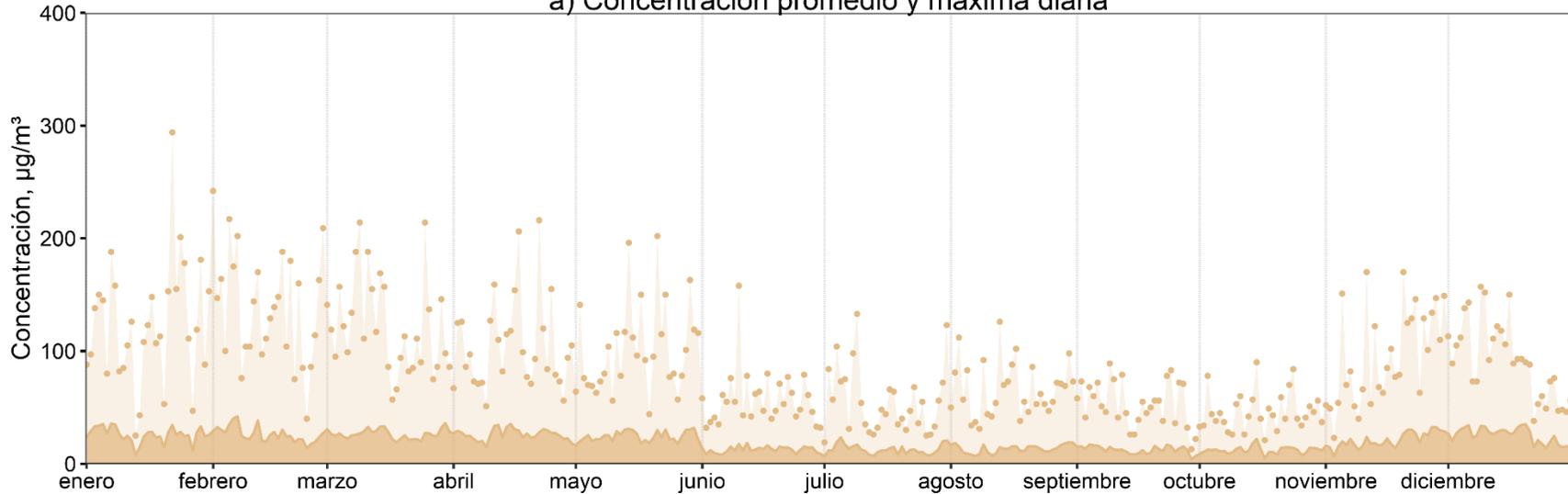


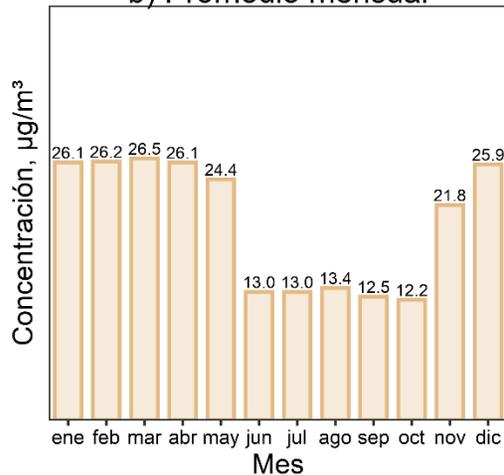
Figura 3.13. Distribución temporal del PM₁₀ en 2019. **a)** El promedio diario es el área sombreada fuerte, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea dentro de la caja indica el percentil 50 (mediana), el tamaño de la caja es el intervalo intercuartil (IQR) y los bigotes corresponden a 1.5 veces el IQR.

MATERIAL PARTICULADO GRUESO (PM10-2.5)

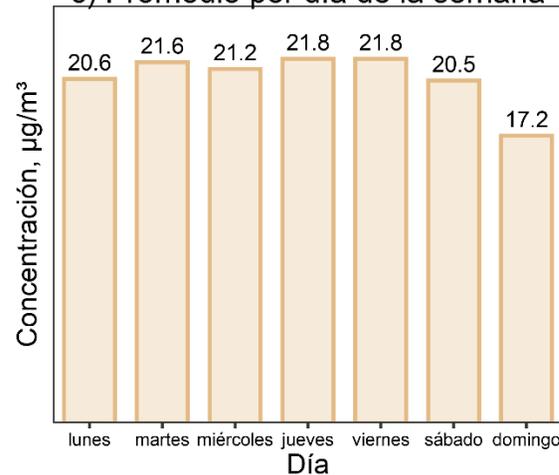
a) Concentración promedio y máxima diaria



b) Promedio mensual



c) Promedio por día de la semana



d) Perfil horario

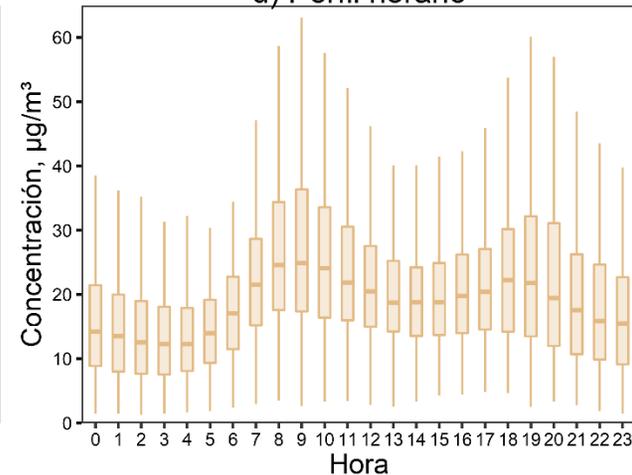
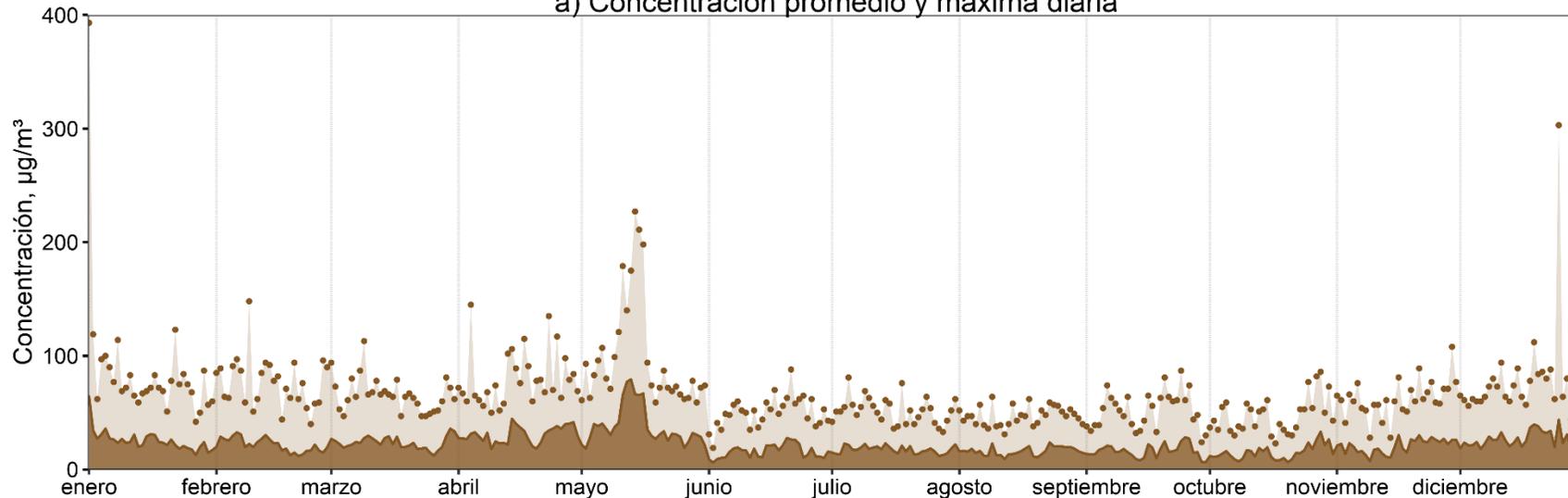


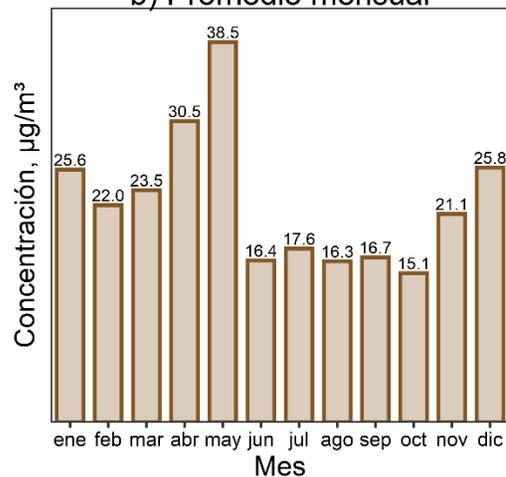
Figura 3.14. Distribución temporal del PM_{10-2.5} en 2019. **a)** El promedio diario es el área sombreada fuerte, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea dentro de la caja indica el percentil 50 (mediana), el tamaño de la caja es el intervalo intercuartil (IQR) y los bigotes corresponden a 1.5 veces el IQR.

PARTÍCULAS MENORES A 2.5 μm (PM_{2.5})

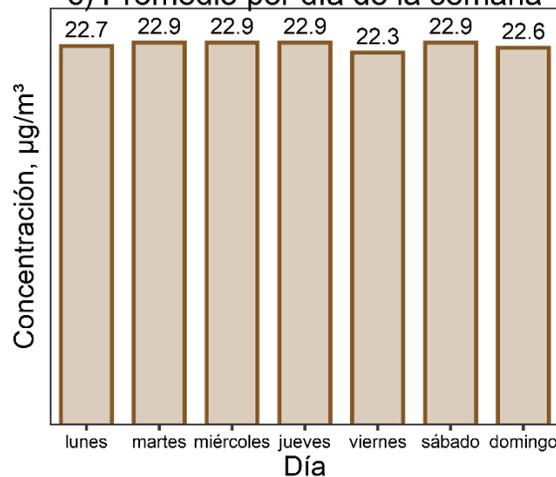
a) Concentración promedio y máxima diaria



b) Promedio mensual



c) Promedio por día de la semana



d) Perfil horario

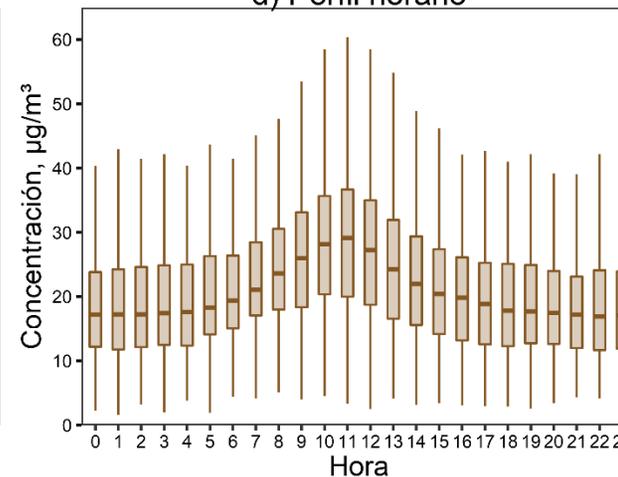


Figura 3.15. Distribución temporal del PM_{2.5} en 2019. **a)** El promedio diario es el área sombreada fuerte, los puntos y el área sombreada clara corresponden a la concentración horaria máxima por día. **b)** Promedios mensuales. **c)** Promedio por día de la semana. **d)** Perfil de los promedios horarios, la línea dentro de la caja indica el percentil 50 (mediana), el tamaño de la caja es el intervalo intercuartil (IQR) y los bigotes corresponden a 1.5 veces el IQR.

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE

En 1986, empezó la difusión oficial del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA); sin embargo, antes de 2006, no se había elaborado un documento oficial que definiera el significado y la utilidad del IMECA, así como los lineamientos para su generación, uso y difusión, lo que ocasionó una falta de homologación de sus procedimientos entre distintos usuarios. Por lo anterior, la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (SEDEMA) elaboró y publicó en la Gaceta Oficial del Distrito Federal del 29 de noviembre del 2006, la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF009-AIRE-2006, que establece los lineamientos que debe cumplir el IMECA, con el objetivo de que fuera usado como una herramienta veraz, sencilla y oportuna de protección a la salud, con información sobre el riesgo por la exposición a los contaminantes del aire y las acciones de protección que se pueden realizar. Esto permite que la población tenga un mejor conocimiento del grado de deterioro en la calidad del aire, así como sus efectos en la salud.

En los últimos años, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) fueron modificadas con base en los hallazgos científicos más recientes. En 2010, se actualizó la “NOM-022-SSA1-2010, salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al dióxido de azufre. Valor permisible para la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población”; y en 2014 se

modificó la “NOM-020-SSA1-2014, Salud Ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación”, así como la “NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas totales, las partículas menores de 10 micrómetros y las partículas menores de 2.5 micrómetros”.

En estas actualizaciones de las NOM, los valores límites se redujeron y se integraron nuevos indicadores. En consecuencia, fue necesario realizar las modificaciones pertinentes a la norma del IMECA, por lo tanto, la actualización de la Norma Ambiental **NADF-009-AIRE-2017** establece nuevos lineamientos para la generación, uso y difusión del **Índice de Calidad del Aire** (sustituyendo el término IMECA) y en esta nueva norma, se utiliza un algoritmo general y flexible que se adapta a los cambios en los límites permisibles para los contaminantes criterio, además, se agrega un nivel de riesgo con la categoría “Peligrosa”, que se identifica con el color granate, en el cual se propone la suspensión de toda actividad al aire libre al superar los 301 puntos del Índice (**Tabla 3.1**). Las modificaciones a esta Norma consideraron las experiencias adquiridas desde su entrada en vigor, así como las recomendaciones elaboradas por investigadores y funcionarios especializados en el tema, motivo por el cual se acordó que el Índice de Calidad del Aire se debe obtener mediante un proceso transparente, de forma numérica con base en un algoritmo de cálculo; que use como

referencia los límites de NOM vigentes y valores asociados a riesgos en salud. En general, el objetivo es comunicar a la población el estado de la calidad del aire y los riesgos asociados. El índice de calidad del aire es un instrumento de difusión que evita el uso de unidades e intervalos de tiempo que pueden ser confusos para la población en general, por lo que utiliza una escala normalizada de 0 a 500, donde el valor 0 corresponde a la ausencia de contaminantes y el 100 se asigna a los límites establecidos en las NOM. Entre más alto es el índice, mayor es la concentración del contaminante y, por lo tanto, el riesgo para la salud. Cuando el índice es menor a 100, se tiene una calidad del aire favorable, pero si se superan

ya existe riesgo para la salud de los grupos más sensibles de la población, mientras que cuando rebasa los 150 puntos, el riesgo se generaliza para toda la población. En el caso del ozono, el índice se calcula con el valor máximo de cada hora, mientras que para partículas se usa el máximo del promedio móvil de 24 horas, esto se realiza considerando todas las estaciones de monitoreo excepto las de transporte (ACO, AJU, INN, MPA y MON). En 2019, se registraron 204 días con una calidad del aire MALA para ozono (>100 puntos), dentro de los cuales, en cuatro ocasiones, se alcanzó la categoría MUY MALA (>150 puntos). En términos del número de horas, se registró un total de 727 horas (~8% del total de horas al año) con un índice de calidad del aire superior a 100 puntos (**Figura 3.16**).

Tabla 3.1. Índice de calidad del aire, mensajes de riesgo a la salud y recomendaciones asociados al color de la calidad del aire.

Categoría	Intervalo	Riesgo a la salud	Recomendaciones
BUENA	0 - 50	Bajo: Existe poco o ningún riesgo	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre
REGULAR	51 - 100	Moderado: grupos susceptibles pueden presentar síntomas	Las personas extremadamente susceptibles a la contaminación deben considerar limitar la exposición al aire libre
MALA	101 - 150	Alto: Los grupos susceptibles presentan efectos a la salud	Los niños, adultos mayores, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares deben limitar la exposición al aire libre
MUY MALA	151 - 200	Muy alto: Todos pueden presentar efectos en la salud, los grupos susceptibles experimentan efectos graves	Los niños, adultos mayores, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares deben evitar la exposición al aire libre. Toda la población debe limitar la exposición al aire libre
EXTREMADAMENTE MALA	201 - 300	Extremadamente alto: Toda la población tiene probabilidad de experimentar efectos graves en la salud	Toda la población debe evitar la exposición al aire libre
PELIGROSA	301 - 500	Peligro: Toda la población experimenta efectos graves en la salud	Suspensión de actividades al aire libre

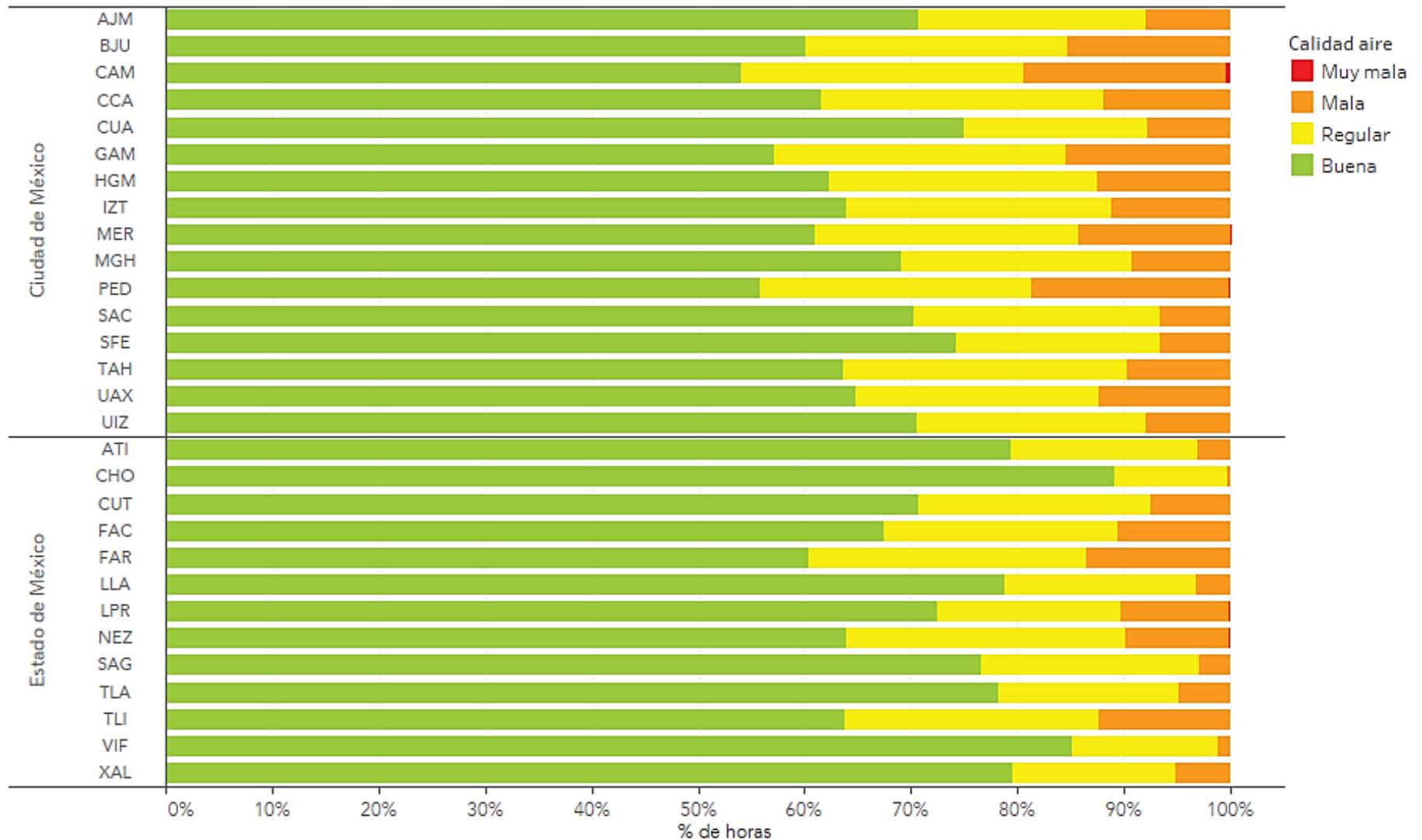


Figura 3.16. Porcentaje de horas en cada categoría del índice de calidad del aire calculado por estación.

El análisis del Índice de Calidad del Aire en 2019 (**Figura 3.17**), considerando los tres contaminantes: $O_3+PM_{10}+PM_{2.5}$, muestra que se registraron 94 días limpios, en los cuales ningún contaminante superó 100 puntos; sin embargo, la mayoría del año se presentó MALA calidad del aire, con 271 días en los que se superaron los 100 puntos en alguno de los tres contaminantes. Se registraron 12 eventos con calidad del aire MUY MALA, es decir, con valores del índice mayores a 150 puntos, de los cuales cuatro fueron por O_3 , dos por PM_{10} , siete de $PM_{2.5}$ y uno combinado de $PM_{2.5} + O_3$. El comportamiento mensual del Índice muestra que octubre tuvo mejor calidad del aire, con solo 12 días en la categoría MALA.

En lo individual, el ozono presentó mayor número de días con MALA calidad del aire con un total de 204, mientras que PM_{10} fueron 175 y 55 días en $PM_{2.5}$ (**Figura 3.18**). El índice de $PM_{2.5}$ se mantuvo en calidad del aire REGULAR en la mayoría del año; sin embargo, durante enero, abril, mayo y diciembre, se presentaron valores dentro del rango de MALA y alcanzaron niveles de la categoría MUY MALA del 1 al 2 de enero, lo cual se asocia con el uso de pirotecnia en las festividades del fin de año; del 13 al 16 de mayo que estuvo relacionado con los incendios del sureste del país; y del 25 al 26 de diciembre, debido al uso de pirotecnia por la navidad. En comparación con el 2018 (**Tabla 3.2**), la CDMX tuvo un decremento de 6 días (3.1%) en la categoría MALA calidad del aire y en las partículas en el Estado de México, hubo una reducción de 13 días (7.0%) en PM_{10} y 8 días (14.5%) en $PM_{2.5}$. En la CDMX se observó un

incremento de 10 días (31.3%) en las $PM_{2.5}$ y de 6 días (8.3%) en las PM_{10} lo cual se relaciona con los incendios que registrados durante la época seca caliente que resultaron en un aumento de los días con MALA y MUY MALA calidad del aire.

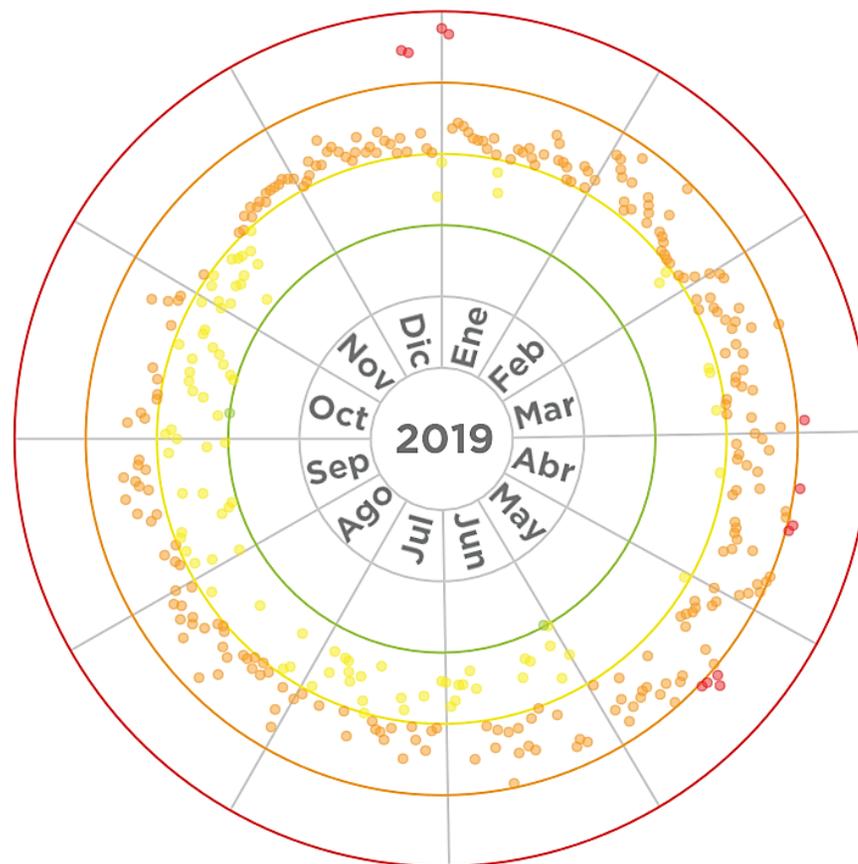


Figura 3.17. Comportamiento del Índice de Calidad del Aire para 2019, considerando todos los contaminantes.

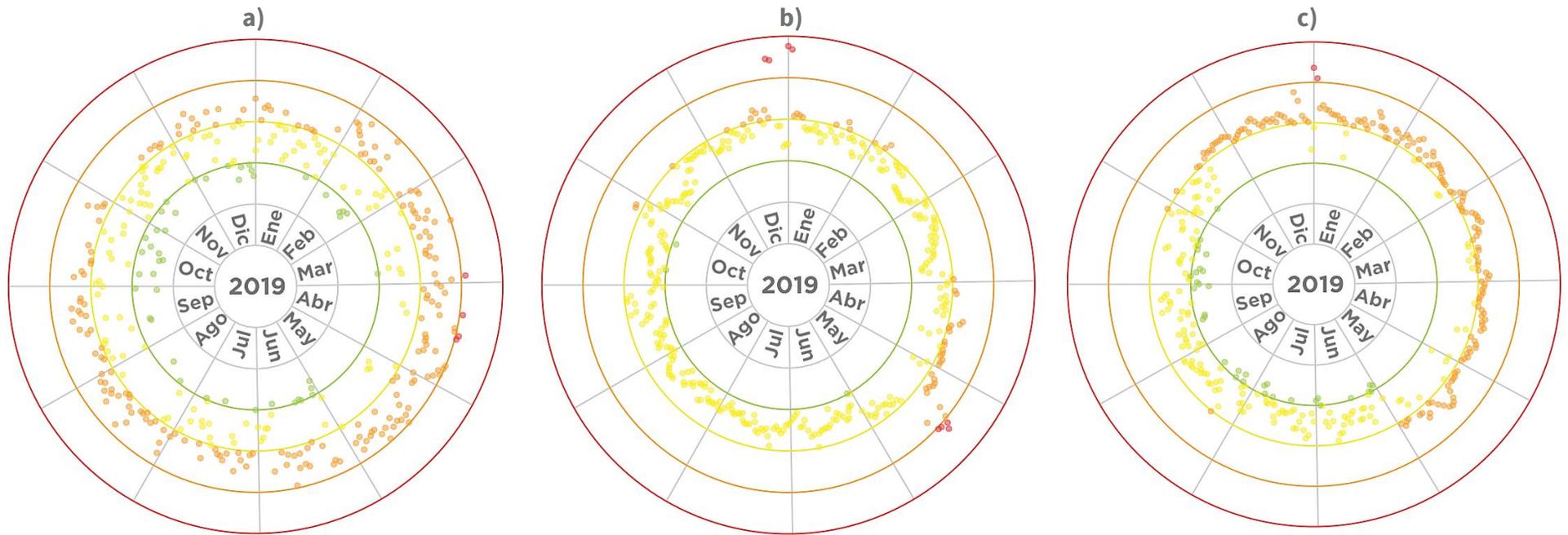


Figura 3.18. Comportamiento del Índice de Calidad del aire por contaminante: **a)** O₃, **b)** PM_{2.5} y **c)** PM₁₀.

Tabla 3.2. Comparación del número de días con índice mayor a 100 puntos del 2018 al 2019 por contaminante y entidad

Contaminante	Entidad	Número de días con calidad del aire MALA		Diferencia de días (2019-2018)	Porcentaje de cambio (%)
		2018	2019		
Ozono (O ₃)	CDMX	194	188	-6	-3 ↓
	Edo. de Méx.	131	137	6	5 ↑
PM ₁₀	CDMX	72	78	6	8 ↑
	Edo. de Méx.	186	173	-13	-7 ↓
PM _{2.5}	CDMX	32	42	10	31 ↑
	Edo. de Méx.	55	47	-8	-15 ↓

CARBONO NEGRO

Los aerosoles son partículas extremadamente pequeñas o gotas líquidas suspendidas en la atmósfera que normalmente están constituidas por compuestos sulfurosos, productos carbonosos de la combustión (p. ej.: carbono negro), materiales de la corteza terrestre (p. ej.: arena) y otros contaminantes de origen antropogénico. Los aerosoles afectan la capacidad de la atmósfera para absorber la radiación (p. ej.: causan dispersión de la luz solar entrante, o en el caso del carbón negro, absorbe la luz solar), pueden alterar la formación y el tiempo de vida de las nubes, así como su forzamiento radiativo y patrones de precipitación. El conocimiento sobre el comportamiento de los aerosoles ha incrementado en los últimos años; sin embargo, todavía permanece la incertidumbre de su contribución al balance de energía global (US EPA, 2017; IPCC, 2014).

Una fracción significativa de los aerosoles troposféricos es de origen antropogénico, los cuales contienen sulfato, amonio, nitrato, sodio, cloruro, metales traza, materiales carbonosos, elementos de la corteza terrestre y agua. La fracción carbonosa de los aerosoles consiste en dos partes: carbón elemental (EC por sus siglas en inglés) y carbono orgánico (OC por sus siglas en inglés). El carbono elemental (EC), también llamado carbono negro (CN) o black carbon, carbón gráfico, u hollín, la mayor parte del CN está en el rango de las

partículas finas, con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 μg ($\text{PM}_{2.5}$) y es emitido directamente a la atmósfera, principalmente por procesos de combustión. El carbono orgánico (OC) es emitido directamente de las fuentes o puede resultar de la condensación atmosférica de gases orgánicos de baja volatilidad. En el último siglo, las emisiones antropogénicas han incrementado la concentración de los aerosoles atmosféricos de forma exponencial y han sido relacionados con efectos en la salud humana (Dockery et al., 1993), en la reducción de la visibilidad en áreas regionales y urbanas, en la deposición ácida y en la perturbación del balance de la radiación.

El carbono negro tiene gran importancia en la composición de las partículas; por esto, desde el 2013, el Gobierno de la Ciudad de México, a través del SIMAT, ha realizado una serie de estudios para determinar la composición de las partículas y medir la contribución del carbono negro. La primera campaña se realizó en la estación de Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) al norte de la ciudad, de noviembre de 2013 hasta abril de 2014. En los resultados se determinó que el aporte del carbono negro fue del 8% en la masa total de las $\text{PM}_{2.5}$ (Guerrero et al., 2017). En un estudio realizado en marzo del 2015, se muestra que los aerosoles secundarios tienen una gran variabilidad espacial, que requiere más investigación (Cady-Pereira et al., 2017). Así mismo, en un análisis realizado durante la navidad de 2013, se encontró que el uso de la

pirotecnia tiene una emisión importante de óxido nitroso (HONO) y carbono negro (Retama et al., 2019). El estudio realizado por Retama et al. (2015) demostró que existe una relación significativa del carbono negro con NOx y CO, emisiones de las fuentes móviles, lo cual se confirma en los análisis elaborados de los informes anuales de calidad del aire desde 2015 (SEDEMA, 2016, 2017, 2018, 2021).

En esta sección se muestran los resultados del análisis de carbono negro en las PM_{2.5} durante 2019. Las muestras de 24 horas se colectaron cada seis días de acuerdo con el calendario de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA). Se utiliza el término carbono negro equivalente (CNe) para reportar la concentración de acuerdo con lo recomendado por Petzold et al. (2013), para mediciones con métodos ópticos. Los resultados se reportan en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las condiciones locales de presión y temperatura.

La concentración promedio del CNe determinado en las muestras de PM_{2.5} fue de $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana = $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este promedio fue menor por $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al registrado en 2018 de $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El máximo del promedio anual se registró en la estación Xalostoc (XAL) con un valor de $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este sitio también reportó la concentración máxima en el promedio de 24 horas con $10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 3 de enero, cercano a las festividades de fin de año donde se acostumbra la quema de pirotecnia.

La estación Pedregal (PED), localizada al sur de la Ciudad de México, reportó el mínimo del promedio anual con $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 3.19). El análisis de CNe se realizó como se describe en la sección correspondiente del Informe Anual de Calidad del Aire 2015 (SEDEMA, 2016).

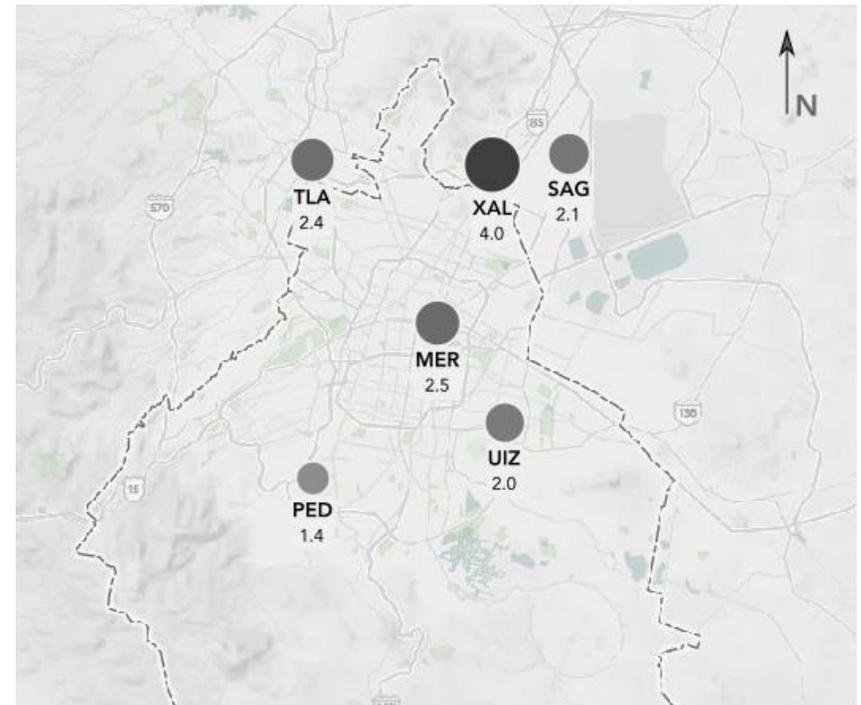


Figura 3.19 Distribución espacial del promedio anual de la concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de carbono negro equivalente (CNe) por estación de monitoreo durante 2019.

En el análisis de la distribución de la concentración por sitio de monitoreo (**Figura 3.20**) se observó que la estación Xalostoc (XAL) registró los valores más altos, lo que ha sido constante desde 2015, mientras que Merced (MER) y Tlalnepantla (TLA) tuvieron una concentración similar, la característica en común de estos tres sitios es que se localizan cerca de vialidades de alto tránsito con todo tipo de vehículos. La estación San Agustín (SAG) presentó una concentración

menor, a pesar de su cercanía con XAL, debido a que se ubica en una zona residencial mientras que los sitios UAM-Iztapalapa (UIZ) y Pedregal (PED), reportaron los mínimos de concentración. La estación XAL ubicada en el corredor industrial de Ecatepec, también presentó la mayor variabilidad en sus registros con un rango intercuartil de $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la menor dispersión la presenta PED con $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

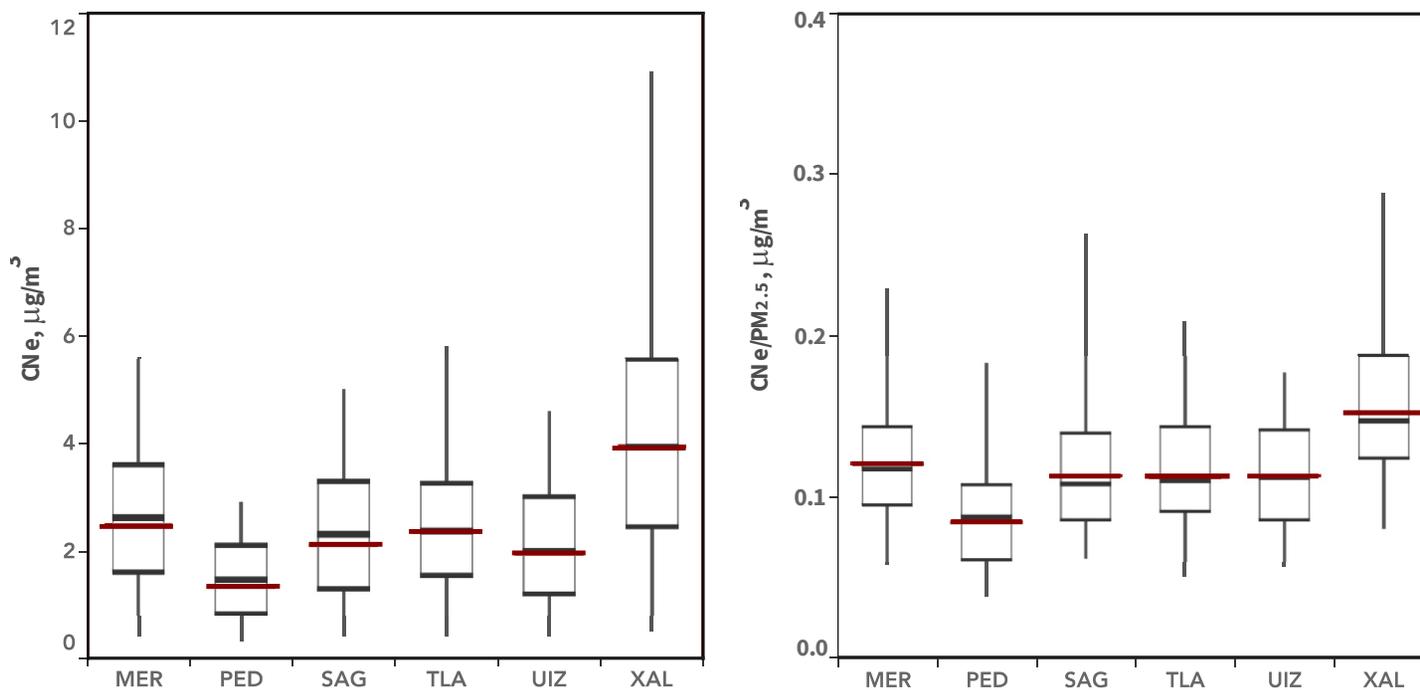


Figura 3.20 Distribución de las concentraciones de 24 h de carbono negro. **a)** CNe y **b)** Proporción de CNe/PM_{2.5}, por sitio de monitoreo. La línea roja representa el promedio aritmético, la caja corresponde al percentil 75 y 25, la línea negra es la mediana, los bigotes representan el mínimo y el máximo.

En las series de tiempo para CNe, $PM_{2.5}$ y del cociente $CNe/PM_{2.5}$ (**Figura 3.21**) se observa un patrón estacional con la concentración más alta en la temporada seca y los valores mínimos en el periodo de lluvia (julio-octubre) y el mes de agosto tuvo la menor concentración de CNe y $PM_{2.5}$. Para la relación de $CNe/PM_{2.5}$ no se observa una diferencia clara durante los diferentes meses.

La concentración de CNe aumenta durante la temporada seca fría (noviembre a febrero) debido a las condiciones meteorológicas como la disminución en la altura de la capa de mezcla y el aumento en la frecuencia e intensidad de las inversiones térmicas de superficie, estos factores contribuyen a la acumulación e incremento de la concentración de los contaminantes primarios como el CNe. Durante los meses de junio a octubre se presentó la concentración promedio más baja con un rango de $1.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (agosto) a $1.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (junio), este periodo corresponde a la época de lluvias y también se incrementan las ondas tropicales y los huracanes, lo que resulta en una disminución significativa de CNe, similar a los demás contaminantes atmosféricos. En abril y mayo, se observaron algunos muestreos con datos altos de concentración que se pueden relacionar con fuentes regionales, como la contribución en las emisiones de los incendios forestales ocurridos en el oeste y sur del país durante la semana del 10 al 17 de mayo.

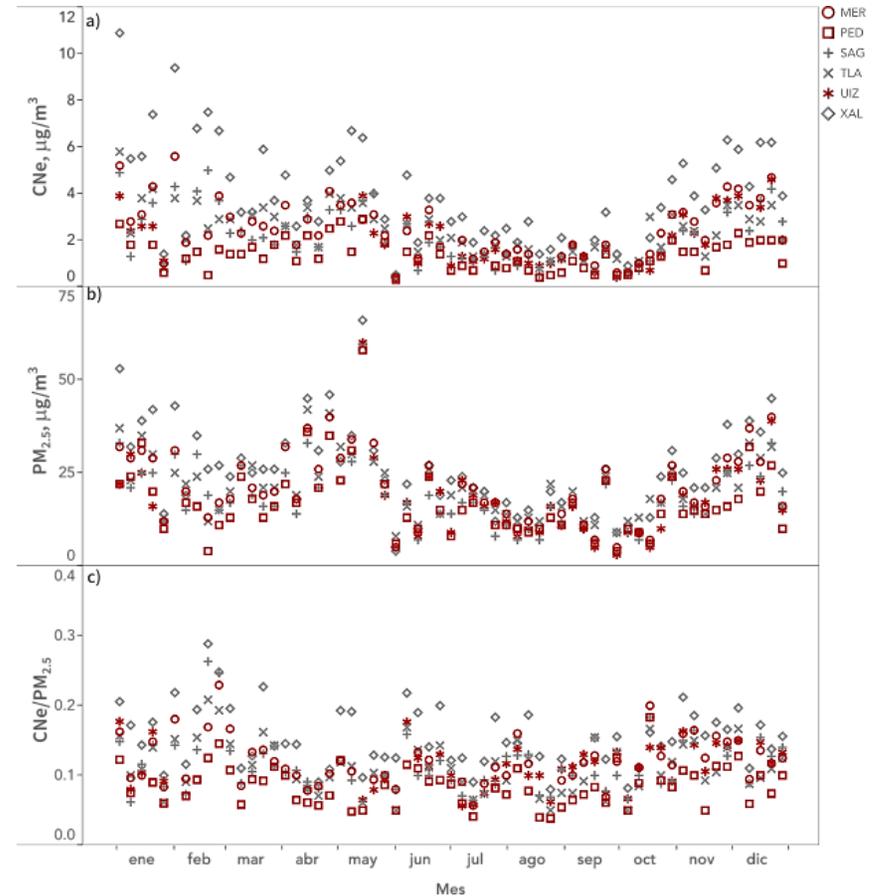


Figura 3.21 Serie de tiempo de los promedios de 24 horas de la concentración de: **a)** CNe, **b)** $PM_{2.5}$ y **c)** la proporción de $CNe/PM_{2.5}$; por estación de monitoreo. El color rojo corresponde a las estaciones ubicadas en la CDMX y las grises son aquellas localizadas en la zona conurbada del Estado de México.

La proporción de la concentración de CNe y $PM_{2.5}$ ($[CNe]/[PM_{2.5}]$), corresponde a la contribución del carbono negro a la masa total de partículas finas $PM_{2.5}$. El promedio de esta contribución ha variado poco ya que de acuerdo con lo reportado en 2015 fue del 11%; 12% en 2016; durante 2017 fue del 12%, en 2018 y 2019 con el 11%, esto es congruente con lo reportado en las campañas realizadas en la ciudad durante 2003 y 2006. En la fracción $[CNe]/[PM_{2.5}]$ por estación (**Figura 3.22**), se determinó que el mayor aporte fue en XAL con 13% y el menor en PED con el 7%, en SAG fue del 11%, seguida de los sitios TLA, MER y UIZ con el 10%.

Se observa que la mayor fracción fue en el noreste de la CDMX en la estación XAL, que se encuentra dentro del corredor industrial Xalostoc, cerca de la vía Morelos y la Autopista México-Pachuca, en las que se tiene alto tránsito durante todo el día, principalmente de vehículos de carga y transporte público que utilizan diésel y la quema incompleta de este combustible emite carbono negro por lo que es lógico que en dicha estación se registre la mayor proporción de CNe con respecto a las $PM_{2.5}$. Por el contrario, la estación SAG, aunque está cerca de XAL, tiene una proporción $[CNe]/[PM_{2.5}]$ diferente porque SAG se localiza en una zona residencial.

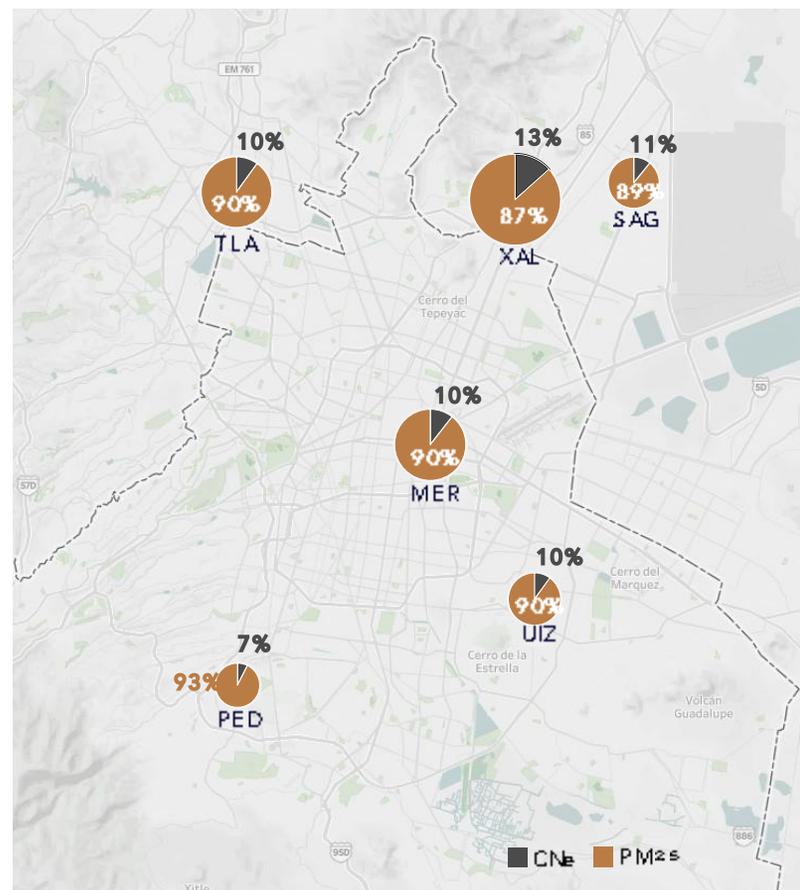


Figura 3.22 Distribución espacial de la contribución promedio anual del carbono negro equivalente (CNe) a la concentración total de $PM_{2.5}$, por estación de monitoreo.

En las estaciones que miden contaminantes gaseosos y partículas, se realizó un análisis de correlación para determinar el nivel de asociación del CNe con los demás contaminantes e identificar las fuentes de emisión en común. La fuente principal del CNe son los procesos de combustión relacionados con emisiones móviles, por lo que se correlacionó con el monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx). Las correlaciones del promedio de CNe (**Figura 3.23**) con el promedio de 24 horas del CO ($R^2=0.66$) y de los NOx ($R^2=0.74$) presentaron una fuerte asociación, esto

confirma que las principales fuentes de emisión del CNe son vehiculares. En este año, los máximos de CNe se registraron en la estación XAL el 3 de enero ($10.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el 2 de febrero ($9.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en este caso no se registran datos atípicos debido a que los muestreos de cada 6 días no coincidieron con fechas festivas de fin de año, mientras que en mayo los valores altos se relacionaron con los incendios forestales, que, al compararlo con el promedio de mayo de 2018, se observa un incremento notable del 43% en la concentración del CNe.

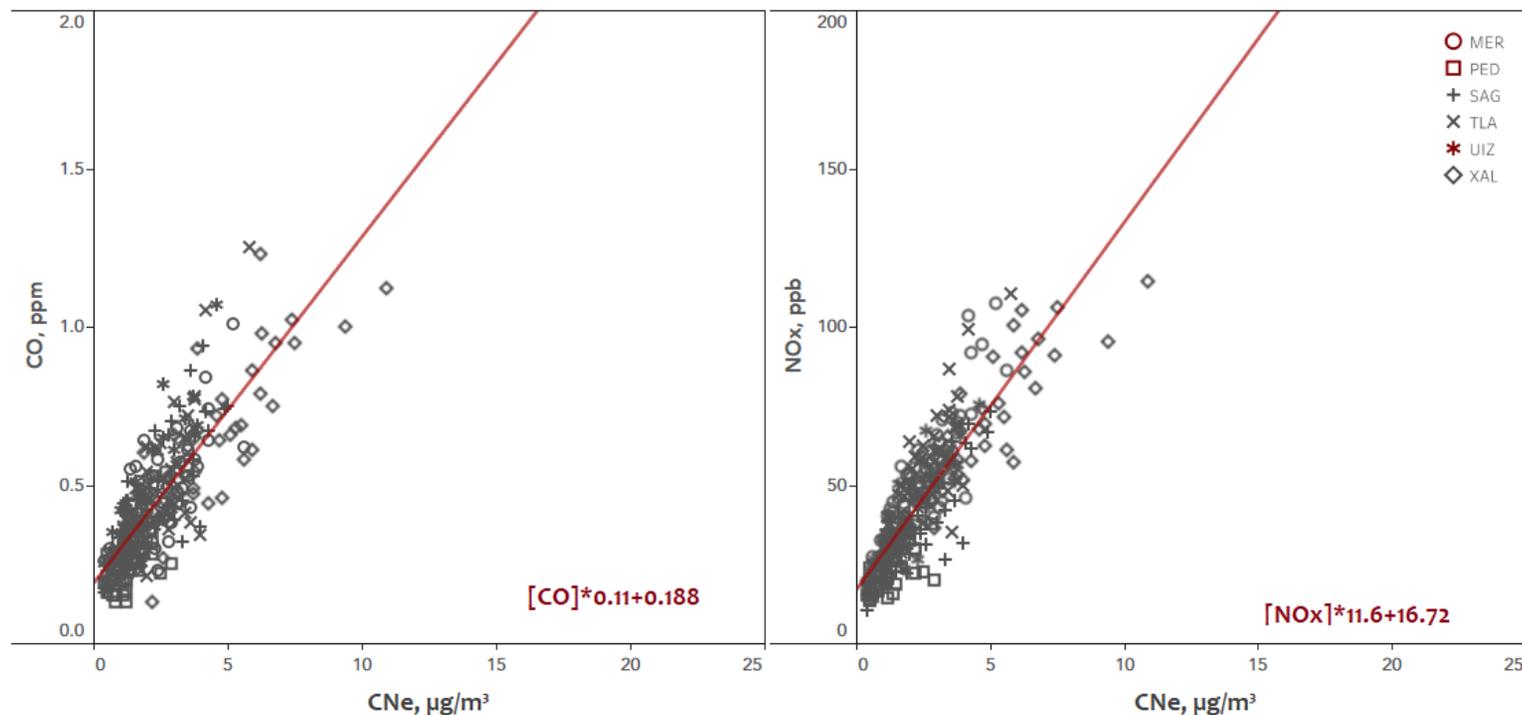


Figura 3.23 Correlación entre la concentración de CNe y el promedio de 24 horas de **a)** monóxido de carbono (CO) y **b)** óxidos de nitrógeno (NOx) para las diferentes estaciones de monitoreo.

TENDENCIAS

El monitoreo atmosférico es muy importante en la gestión de la calidad del aire de la Ciudad de México y la zona conurbada del Estado de México para observar la evolución a largo plazo de la contaminación del aire, a través del análisis de su tendencia, especialmente para relacionar esta evolución con los esfuerzos realizados para mitigar la emisión de los contaminantes e identificar la eficacia de las políticas de calidad del aire. Esta herramienta proporciona información a los tomadores de decisiones para implementar y mejorar las políticas ambientales que conlleven a la reducción de contaminantes atmosféricos y así, poder alcanzar los límites establecidos en la normatividad mexicana y proteger la salud de la población.

Para analizar si la concentración de los contaminantes en la ZMCM está cerca de cumplir con la normatividad mexicana, se calculó un porcentaje de la diferencia con el respectivo límite de las NOM para cada contaminante en periodo 1990 a 2019. El porcentaje se calculó con el valor máximo de la ZMCM de cada contaminante e indicador establecido en las diferentes NOM de salud ambiental (**Figura 3.24**). Adicionalmente, se realizó un análisis por década para determinar la evolución de los contaminantes a través del tiempo (**Tabla 3.3**), esto también se calculó con respecto a los límites de las NOM vigentes en 2019.

Se puede observar que todos los contaminantes tienen un decremento, excepto en la última década para PM_{2.5}, ya que desde 2017 se ha presentado un ligero incremento. Por otro lado, NO₂, SO₂ y CO, tienen una disminución por debajo de los valores límite de sus respectivas NOM, con una reducción del 48%, 72% y 75%, respectivamente.

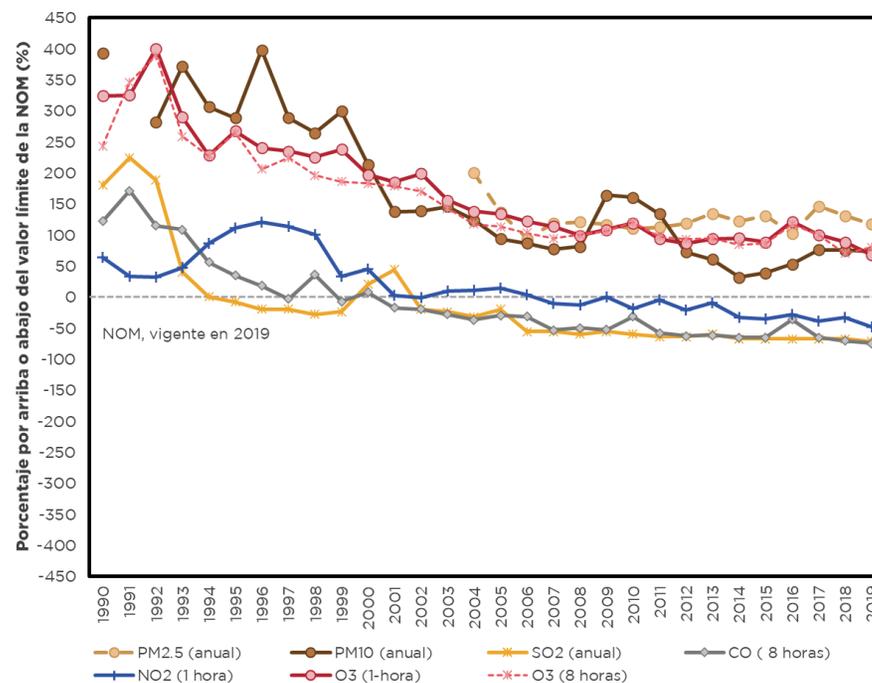


Figura 3.24 Porcentaje por año de la diferencia de la concentración con respecto al valor límite de las NOM vigentes en 2019 de diferentes contaminantes.

Tabla 3.3. Porcentajes de cambio por década con respecto al límite de las NOM vigentes en 2019.

Contaminante	1990 vs 2019	2000 vs 2019	2010 vs 2019
PM _{2.5} (anual)*	--	-8	+3
PM ₁₀ (anual)	-65	-45	-34
O ₃ (1 hora)	-61	-44	-24
O ₃ (8 horas)	-48	-36	-18
SO ₂ (anual)	-90	-77	-30
CO (8 horas)	-89	-76	-63
NO ₂ (1 hora)	-68	-64	-36

*PM_{2.5} comenzó mediciones en 2004

Nota: Los valores están en porcentaje

En las series de tiempo históricas (**Figuras 3.25 a 3.32**) se presentan los promedios mensuales de cada contaminante de 1995 a 2019, la desviación estándar y la línea del ajuste de tendencia que utiliza el método LOESS la cual es una técnica no paramétrica de regresión ponderada para ajustar una curva suave a través de puntos de un diagrama de dispersión. La línea de ajuste LOESS muestra que, prácticamente todos los contaminantes con excepción de CO, presentan una tendencia estable en los últimos años.

Se puede observar que la tendencia decreciente ha sido consistente con la aplicación de medidas de reducción de emisiones y programas de calidad del aire, ya que, desde finales de los noventa, hay reducciones en la mayoría de los contaminantes.

A partir del año 2010, SO₂ se muestra una tendencia constante con decrementos ligeros, en cuanto a NO_x y NO₂, en los primeros cinco años se ve una ligera tendencia decreciente; sin embargo, a partir de 2010 se observan ligeras reducciones año con año. Para el CO, se observa que desde el 1995 hay una tendencia decreciente que continúa hasta el 2019. En ozono, de 1995 a 2007 se presentó una ligera reducción, que a partir de 2008 se estabiliza sin cambios significativos, esto es debido a que la formación de este contaminante secundario está mayormente influenciada por factores meteorológicos.

La tendencia de las partículas suspendidas totales (PST), como contaminante primario, muestra que en 1998 hay un incremento debido a la gran cantidad de incendios forestales que se presentaron en ese año, posteriormente a 1998, se han reducido paulatinamente y en 2009 se presentó un ligero incremento que se relacionó con las mega obras que se realizaron en la Ciudad de México y posterior a esto, vuelve a una tendencia decreciente. Este mismo comportamiento se observa en las PM₁₀, con un incremento en 2011 debido a una gran cantidad de incendios forestales que se presentaron en ese año. Por último, las PM_{2.5} prácticamente se han mantenido constantes con un decremento en los primeros años y de 2017 a 2019, hay un ligero incremento que en el último año esta influenciado por los incendios forestales de la época seca-caliente.

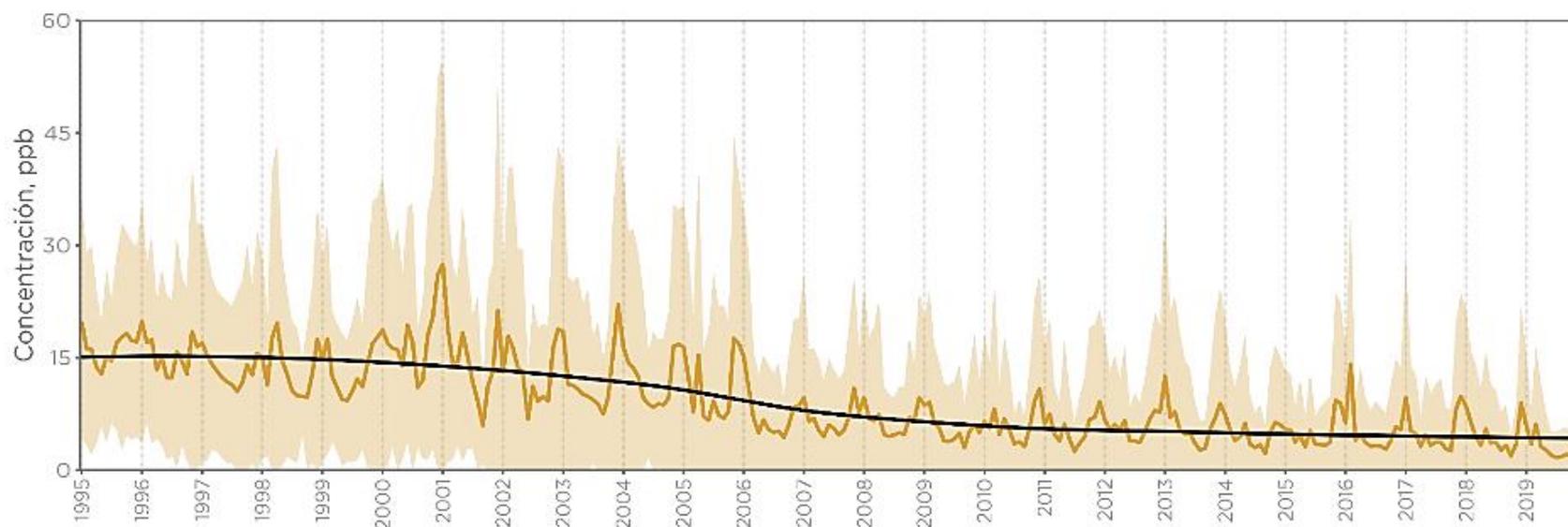


Figura 3.25 Serie de tiempo con los promedios mensuales de SO_2 para el período 1995-2019. La línea amarilla corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en amarillo indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

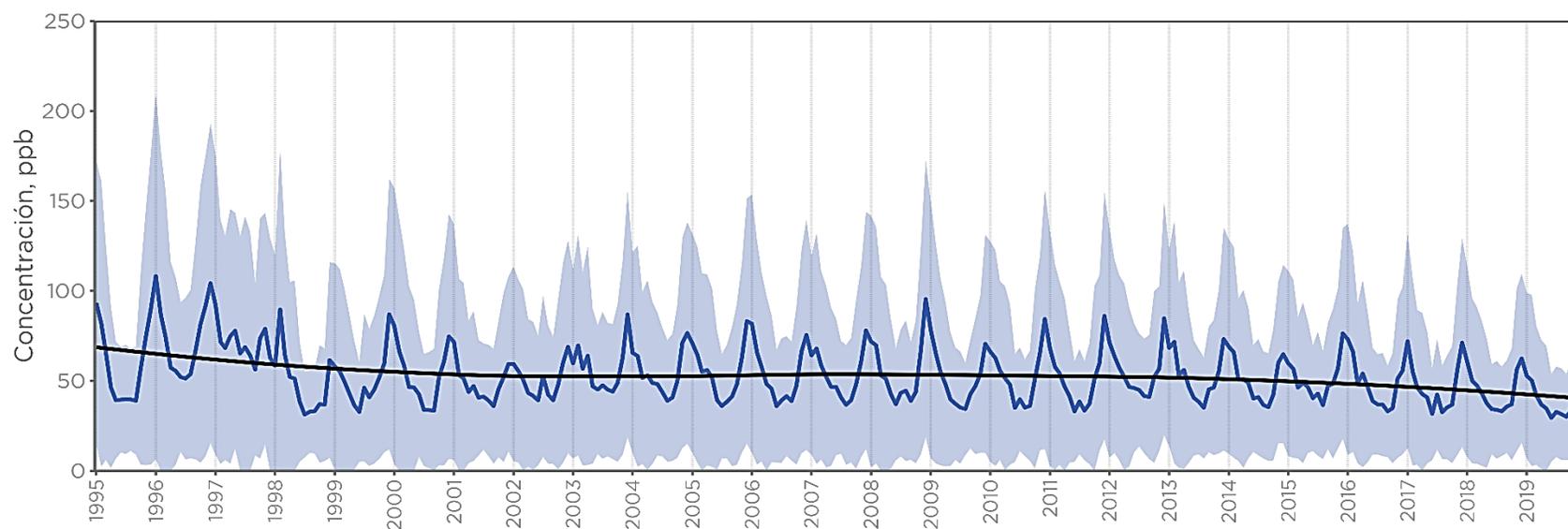


Figura 3.26. Serie de tiempo con los promedios mensuales de los NO_x para el período 1995-2019. La línea azul oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en azul indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

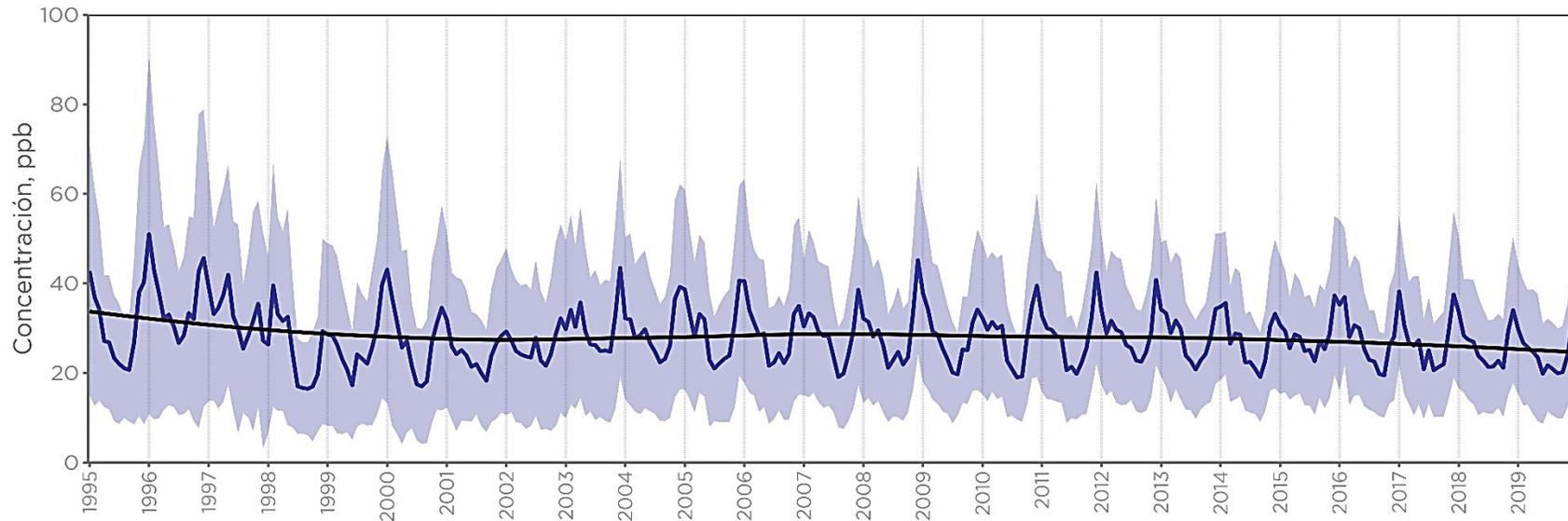


Figura 3.27. Serie de tiempo con los promedios mensuales de NO₂ para el período 1995-2019. La línea azul oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en azul indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

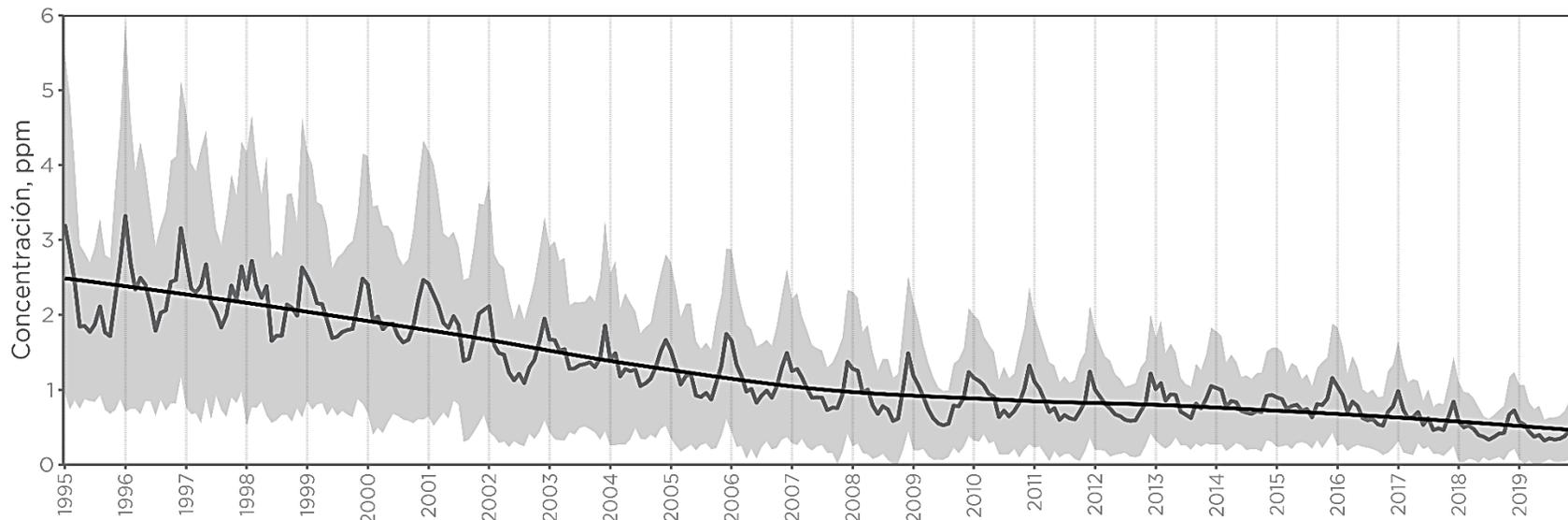


Figura 3.28. Serie de tiempo con los promedios mensuales del CO para el período 1995-2019. La línea gris oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en gris indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

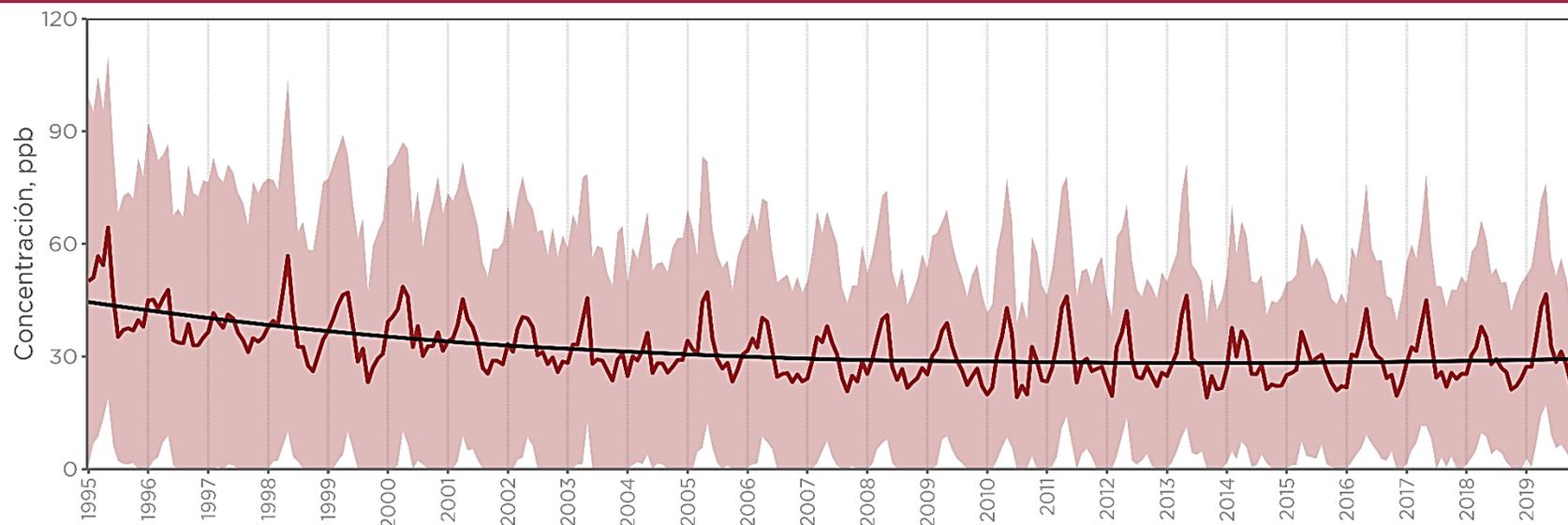


Figura 3.29. Serie de tiempo con los promedios mensuales de O₃ para el período 1995-2019. La línea roja corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en rojo indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

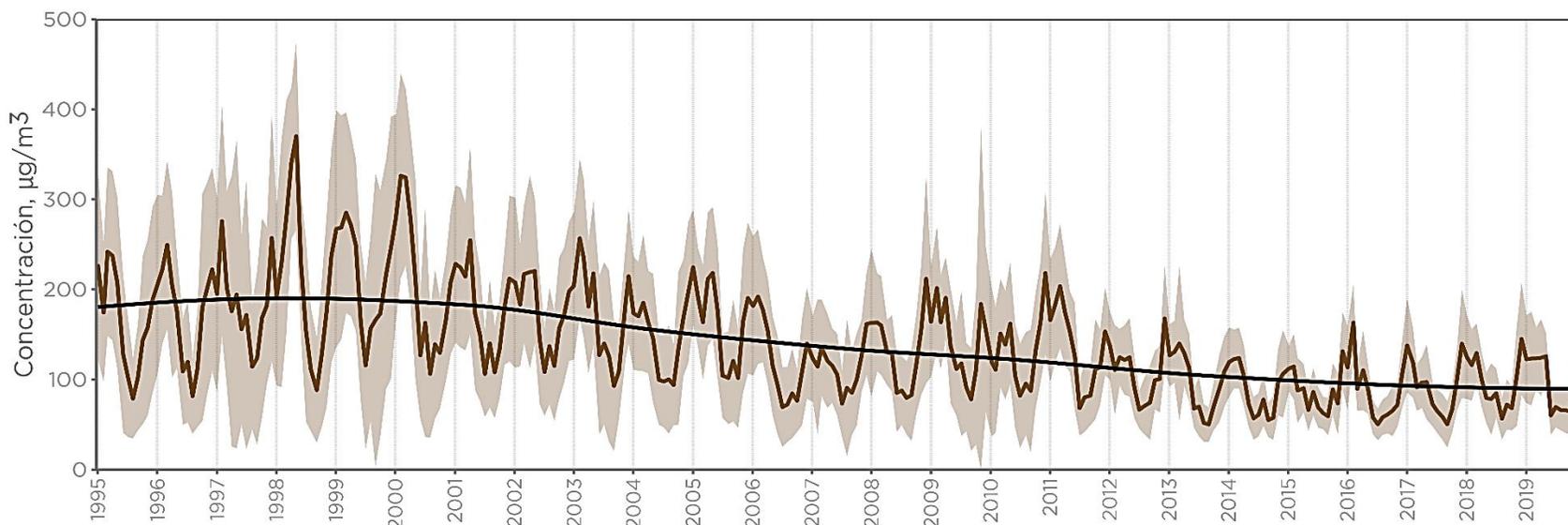


Figura 3.30. Serie de tiempo con los promedios mensuales de PST para el período 1995-2019. La línea café oscuro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en café indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

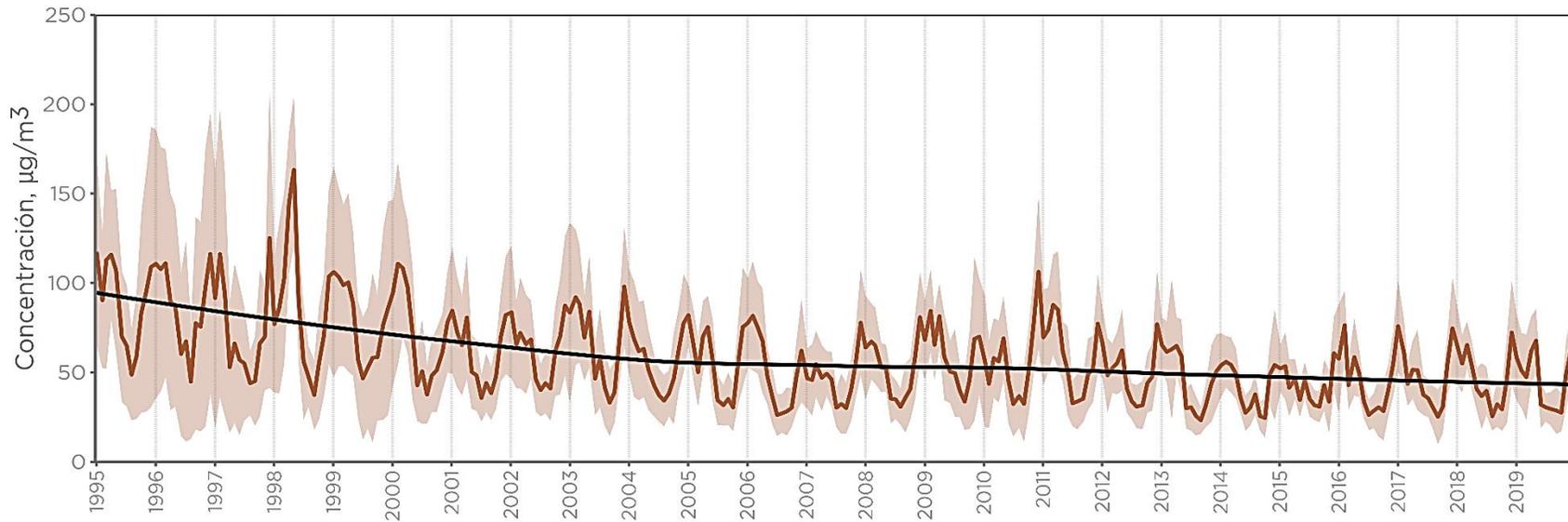


Figura 3.31. Serie de tiempo con los promedios mensuales de PM_{10} para el período 1995-2019. La línea café corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en café indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

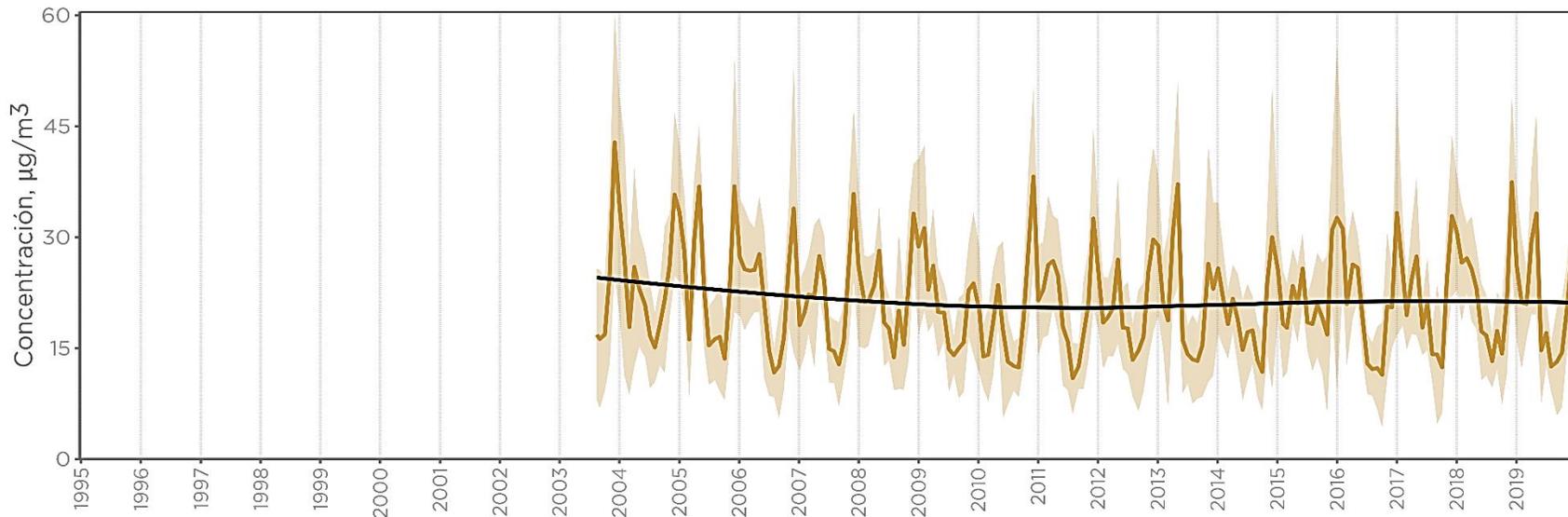


Figura 3.32. Serie de tiempo con los promedios mensuales de $PM_{2.5}$ para el período 2004-2019. La línea café claro corresponde a la concentración promedio de todas las estaciones de monitoreo, la región sombreada en café claro indica una desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.



CAPÍTULO 4

EVENTOS DE CONTINGENCIAS
AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS

Un programa de contingencia es la respuesta inmediata para una situación de emergencia y en el caso de la contaminación atmosférica, se refiere al conjunto de acciones que se implementan para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera en un evento atípico de alta concentración, ocasionado por factores meteorológicos y aumento drástico de emisiones.

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA), se activa cuando la concentración de O_3 , PM_{10} o $PM_{2.5}$ alcanza una concentración equivalente a 151 puntos del índice de calidad del aire (NADF-009-AIRE-2017) y en este momento se comunican las medidas preventivas a la población, junto con las acciones para reducir la emisión de contaminantes, esto contribuye a la mejora de la calidad del aire.

El PCAA ha evolucionado con el tiempo junto con la necesidad de proteger la salud; es por esto que desde que se implementó el primer plan de contingencia en 1986, se ha buscado disminuir los umbrales de activación con el fin de que los avisos de contingencia se realicen en una concentración menor y así, proporcionar una mayor protección de la población y disminuir la exposición a la contaminación. Uno de los cambios más importantes desde su implementación fue la incorporación de la Fase de Pre-Contingencia en 1998 y

su posterior eliminación en 2016 fue debido a la reducción del umbral en la Fase I (FI) a 151 puntos del índice (valor anterior de la Fase de Pre-Contingencia) para O_3 y PM_{10} , antes de esto, la FI se decretaba 181 para O_3 y 176 puntos para PM_{10} .

Durante 2019, también hubo cambios relevantes en el PCAA, los cuales se derivaron de un episodio extraordinario durante mayo, ocasionado por incendios masivos en el centro y sur del país, así como condiciones meteorológicas adversas que propiciaron el transporte de $PM_{2.5}$ hacia la cuenca de México y se superaron los 150 puntos del índice de calidad del aire durante varios días consecutivos, esto aunado a los valores altos de O_3 propios de la temporada. Aunque el O_3 no alcanzó niveles de contingencia, se consideró importante adicionar una fase de activación, en la cual se contempla la combinación de partículas y O_3 .

Adicionalmente a la Fase combinada, se agrega la Fase preventiva, la cual considera el resultado del pronóstico del modelo de calidad del aire y la probabilidad de un evento atípico de O_3 . A partir de esta modificación se le llama Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México (PPRECAA) y los valores de activación de cada una de las fases se presenta en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1. Fases de activación en el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA).

a) FASE PREVENTIVA

CONTAMINANTE	ACTIVACIÓN	SUSPENSIÓN
Ozono	Pronóstico $O_3 > 140$ puntos (142 ppb) Probabilidad de ocurrencia del 70 %.	Al día siguiente a las 19:00 h o con la activación de Fase de contingencia.
Partículas	$PM_{10} > 135$ puntos (172 $\mu g/m^3$) o $PM_{2.5} > 135$ puntos (81.4 $\mu g/m^3$) Será regional cuando se presente en una estación y en una de las cinco zonas de la ZMVM.	$PM_{10} < 135$ puntos o $PM_{2.5} < 135$ puntos Con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente o con la activación de Fase de contingencia

b) FASES DE CONTINGENCIA

CONTINGENCIA	ACTIVACIÓN			SUSPENSIÓN		
	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$
FASE I	> 150 puntos (> 154 ppb)	> 150 puntos (> 214 $\mu g/m^3$)	> 150 puntos (> 97.4 $\mu g/m^3$)	≤ 150 puntos con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente		
FASE II	> 200 puntos (> 204 ppb)	> 200 puntos (> 354 $\mu g/m^3$)	> 200 puntos (> 150.4 $\mu g/m^3$)			
FASE COMBINADA	$O_3 > 150$ puntos (154 ppb) + $PM_{10} > 140$ puntos (186 $\mu g/m^3$) o $PM_{2.5} > 140$ puntos (86.7 $\mu g/m^3$) $O_3 > 140$ puntos (142 ppb) + $PM_{10} > 150$ puntos (214 $\mu g/m^3$) o $PM_{2.5} > 150$ puntos (97.4 $\mu g/m^3$)			≤ 150 y ≤ 140 puntos dependiendo del contaminante y con pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		

Notas:

- Las unidades están en puntos del índice de Calidad del Aire y en concentración de cada contaminante de acuerdo con la NADF-009-AIRE-2017.
- El indicador para O_3 es el máximo del promedio horario y en partículas es el máximo del promedio móvil de 24 h.
- El PPRECCA es vigente a partir del 29 de mayo de 2019.

EVENTOS DE CONTINGENCIA

Es importante mencionar que, en 2019, se observó un incremento notable del número de contingencias en comparación con el año anterior (2018 tuvo dos eventos), esto ocurrió debido a cambios en los patrones climáticos en diversas partes del mundo ya que de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la NOAA, se observó un incremento notable de la temperatura global en 2019 (OMM, 2020; NOAA, 2020). Este año también estuvo influenciado por la presencia de El Niño, que ocasionó temperaturas contrastantes en México, con frío en el noreste-norte y calor en el resto del país.

En Estados Unidos de América (EUA), se reportó un incremento en los incendios forestales atribuidos a una fuerte “Ola de Calor”, este fenómeno también afectó la parte central de México y se registraron temperaturas cálidas a pesar de la temporada invernal. En el año 2019 se presentaron seis episodios de contingencia, la Fase I se activó en una ocasión por partículas PM_{10} , tres para O_3 , una contingencia “extraordinaria” con la combinación $PM_{2.5} + O_3$ y finalmente, un episodio por $PM_{2.5}$ (Figura 4.1).

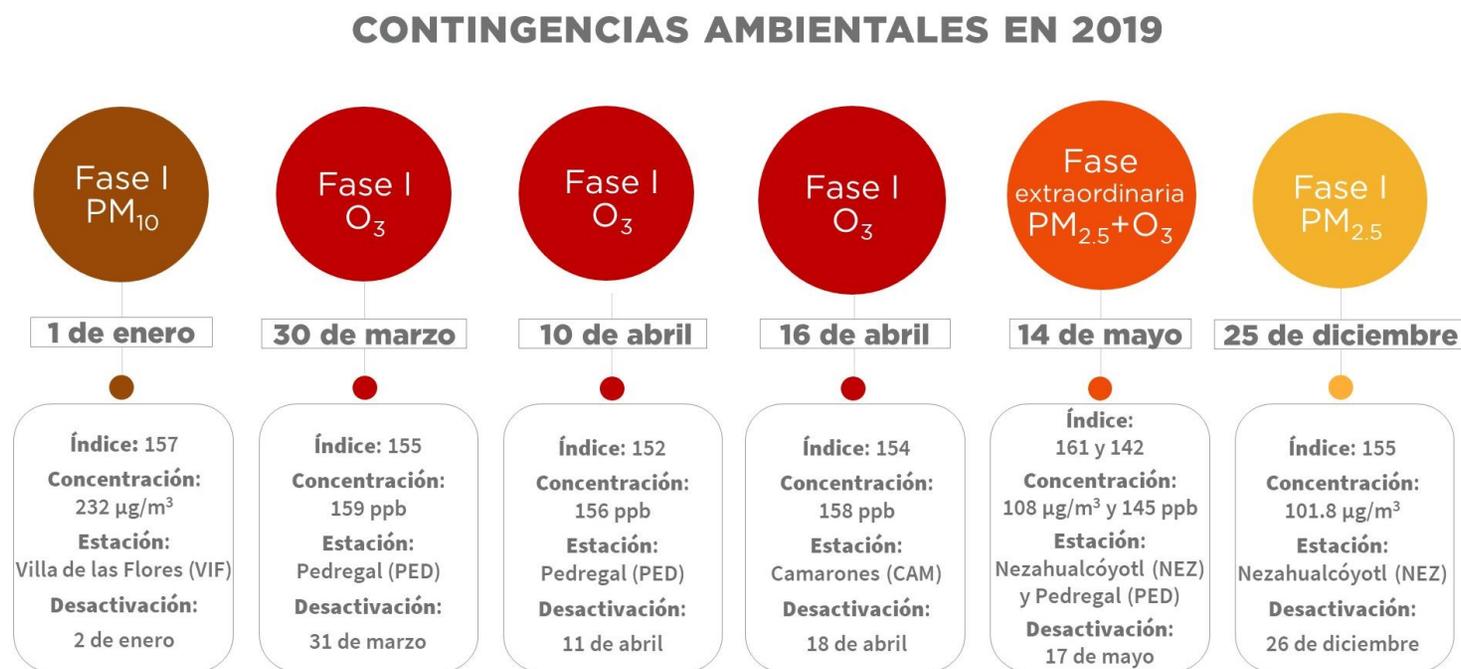


Figura 4.1. Cronología de la activación de contingencias ambientales atmosféricas durante 2019.

ACTIVACIÓN FASE I REGIONAL PM₁₀ : 1 DE ENERO

Durante los festejos de año nuevo se incrementa la concentración de partículas debido al uso excesivo de pirotecnia, la cual libera ácido nitroso (HONO) que reacciona en la atmósfera para formar de aerosoles y partículas suspendidas (Retama et al., 2019). En la madrugada del 1 de enero del 2019, se presentaron emisiones por pirotecnia, fogatas y quemas al aire libre, que incrementaron los niveles de partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) en el noreste de la ZMVM. Adicionalmente, se registró inversión térmica y un sistema de alta presión que afectó el centro del país durante varios días, esto favoreció el estancamiento de los contaminantes.

La concentración horaria de PM₁₀ incrementó desde las 22:00 h del 31 de diciembre del 2018 y a la 01:00 h del 1 de enero, se registró un valor horario de 270 µg/m³ en la estación Villa de las Flores (VIF), en la que se alcanzó el máximo horario a las 06:00 h con 653 µg/m³ (**Figura 4.2**). En la **Figura 4.3** se presenta el mapa con el máximo de PM₁₀ y el índice de calidad del aire por estación, también se observa que se registraron vientos débiles (< 2 m/s) durante la madrugada del 1 de enero y esto favoreció el estancamiento de contaminantes en la zona noreste y centro. El índice de calidad del aire de PM₁₀, que tiene como base el promedio móvil de 24 h, alcanzó la categoría MUY MALA Calidad del Aire a las 09:00 h del 1 de

enero con un valor de 157 puntos (231 µg/m³) y debido a la persistencia de condiciones adversas, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) declaró la Fase I Regional por PM₁₀ en la zona noreste. El índice superó los 150 puntos durante la mayor parte del 1 de enero e inicios del siguiente día. A las 10:00 h del 2 de enero, el índice máximo fue 105 puntos (87 µg/m³) en la estación Merced (MER) y con dicho valor, la CAME suspende la Fase I Regional por PM₁₀.

Es importante mencionar que la concentración de PM_{2.5} también se elevó durante este día; sin embargo, el índice de calidad del aire para PM_{2.5}, se publicó oficialmente el 1ro de enero de 2019, con la actualización de la Norma NADF-009-AIRE-2017, por lo que todavía no se consideraba este contaminante dentro del PCAA vigente al momento. En la **Figura 4.4**, se observa la serie de tiempo de PM_{2.5} en las cuatro estaciones que registraron los máximos horarios, así como el índice de calidad del aire correspondiente al máximo del promedio móvil de 24 h. En el caso de PM_{2.5}, el máximo horario se registró a las 08:00 h en Nezahualcóyotl (NEZ) con 393 µg/m³ y el índice de calidad del aire superó los 150 puntos a las 09:00 h; posteriormente, a las 16:00 h, se alcanzó el máximo con 185 puntos (134 µg/m³) en el noreste de la ZMVM.

Evento de alta concentración PM₁₀ 2019-01-01

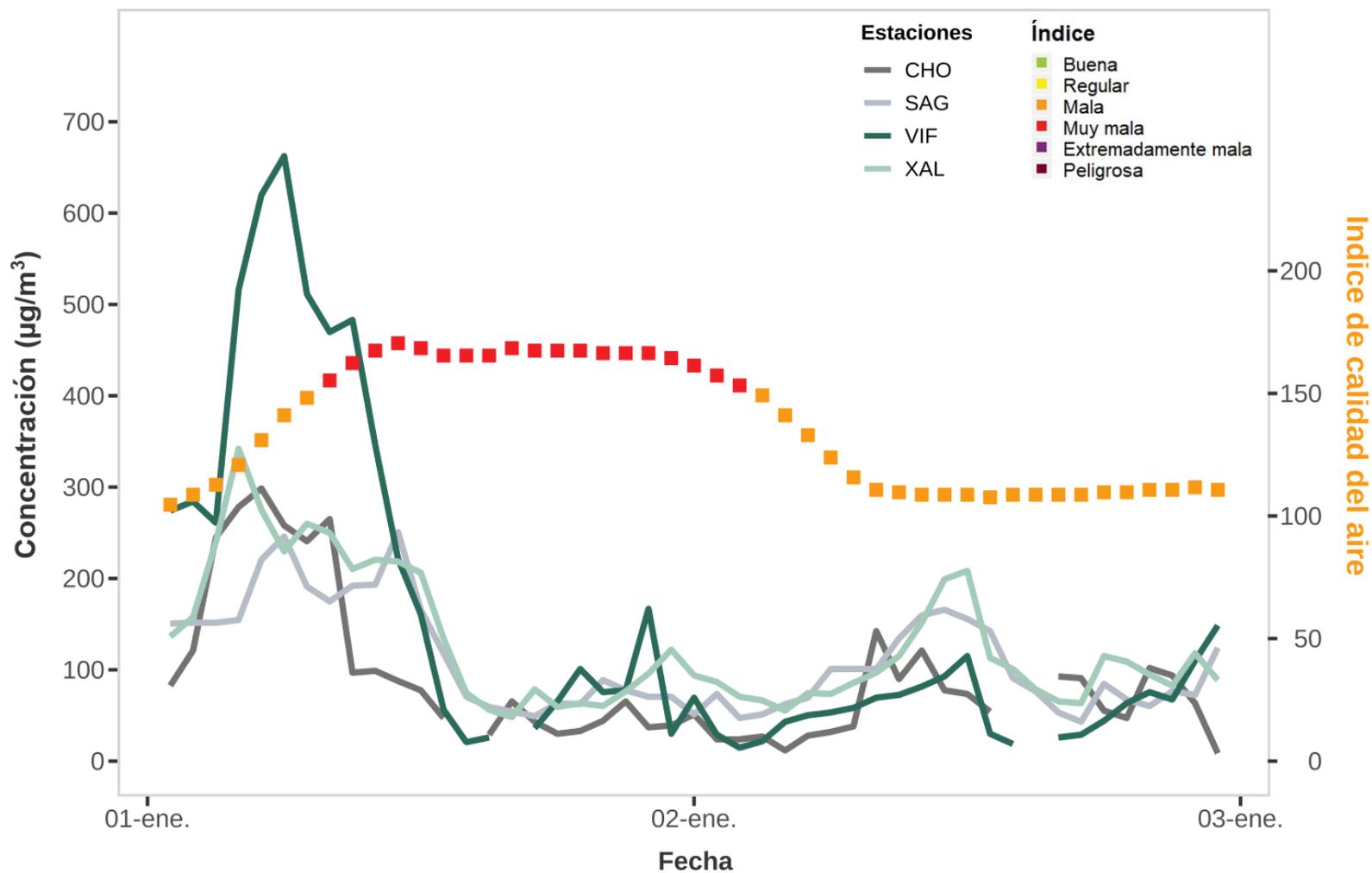


Figura 4.2. Comportamiento de PM₁₀ del 1 al 2 de enero. Las líneas corresponden a las cuatro estaciones con los máximos de concentración horaria, los cuadros de colores representan el valor y categoría del índice de calidad del aire con base en el promedio móvil de 24 h.

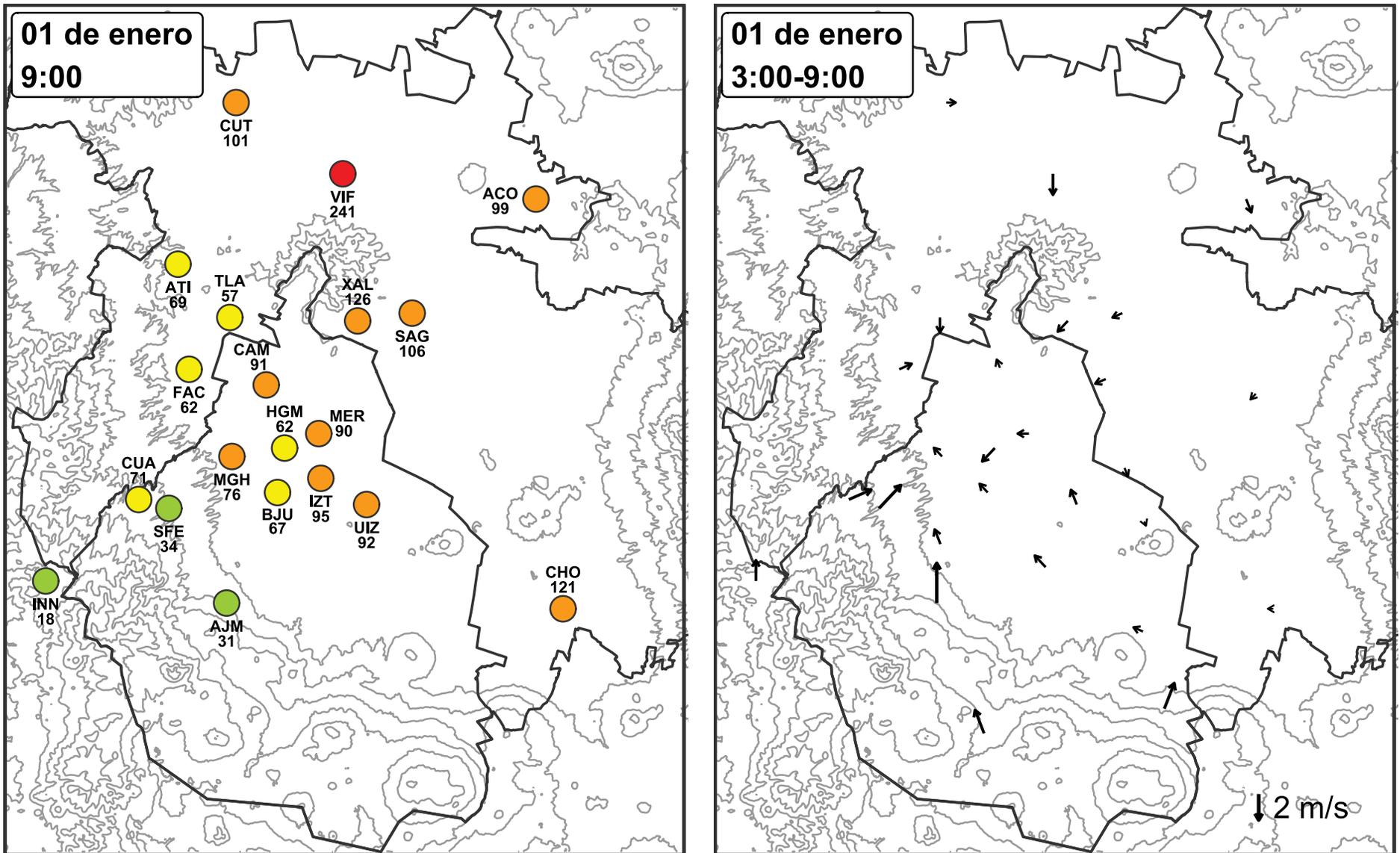


Figura 4.3. Índice de calidad del aire para PM₁₀ y campos de viento durante el 01 de enero. El mapa de la izquierda se presenta la categoría del índice (color) y la concentración promedio móvil de 24 h en µg/m³ a las 09:00 h. El mapa de la derecha es el vector promedio de viento entre las 03:00 y 09:00 h.

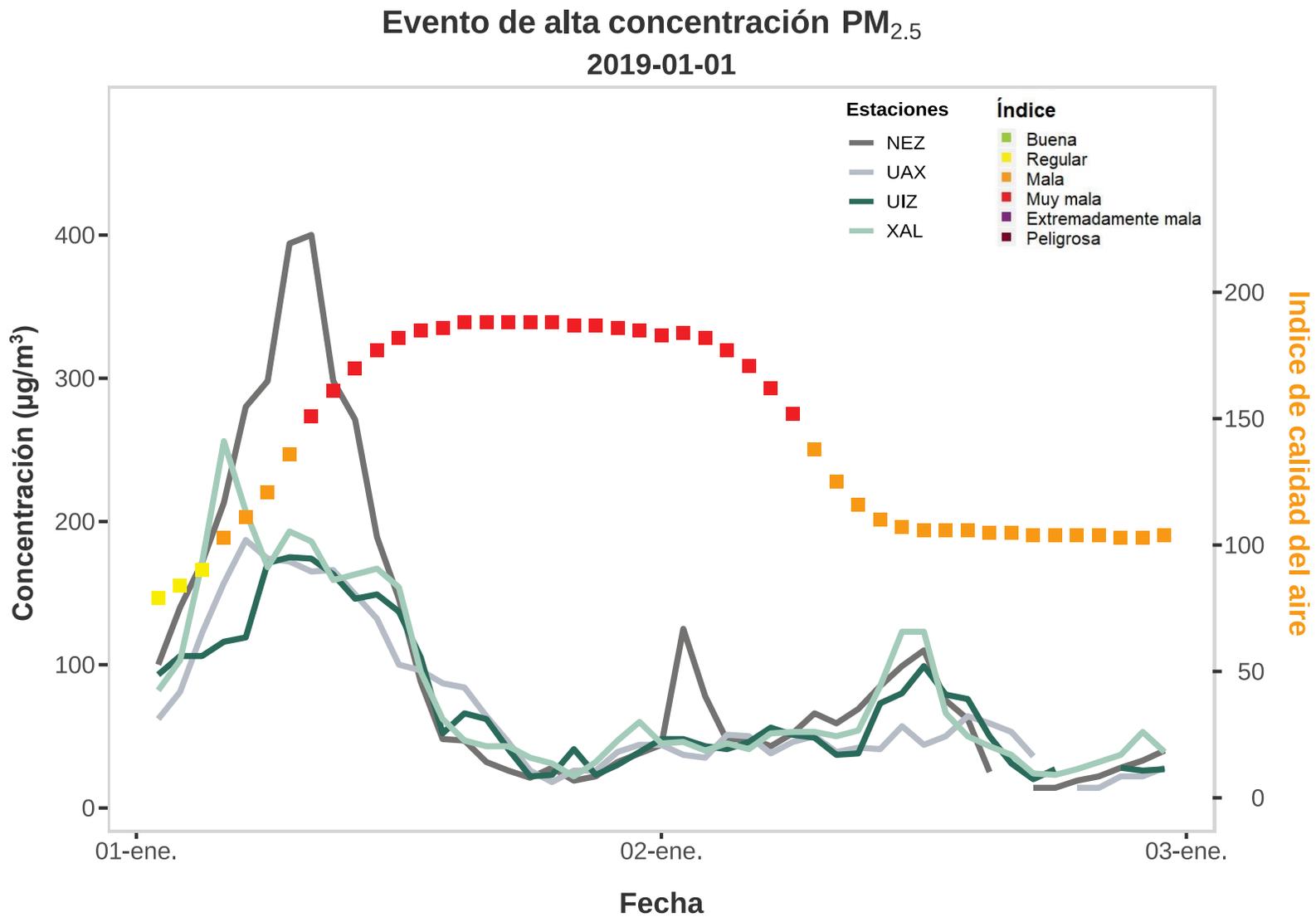


Figura 4.4. Comportamiento de PM_{2.5} del 1 al 2 de enero. Las líneas corresponden a las cuatro estaciones con los máximos de concentración horaria, los cuadros de colores representan el valor y categoría del índice de calidad del aire con base en el promedio móvil de 24 h.

ACTIVACIÓN DE FASE I O₃ : 30 DE MARZO

La combinación de estabilidad atmosférica, radiación solar alta y el incremento en la producción de O₃ inducido por el efecto de fin de semana (Stephens et al., 2009), resultó en un evento con valores del índice superiores a 150 puntos durante el sábado 30 de marzo, que fue la primera contingencia de O₃ en el año y durante la temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio). El 30 de marzo de 2019 a las 15:00 h se activó la FI del PCAA con los máximos del Índice de Calidad del Aire de 155 (159 ppb) y 151 (155 ppb) en las estaciones Pedregal (PED) y Camarones (CAM), respectivamente.

En el comportamiento horario del O₃ (**Figura 4.5**) se observó que desde las 13:00 h se registró MALA calidad del aire (>100 puntos o 95 ppb) en 11 estaciones, con un índice máximo de 119 (118 ppb) en CAM. En la siguiente hora, 21 sitios tuvieron MALA calidad del aire, con un máximo de 142 puntos (145 ppb) en PED y de 15:00 a 16:00 h, se superó el umbral de la Fase I (FI>150 puntos) con valores del índice de 155 (159 ppb) en PED y 151 (155 ppb) en CAM. En este momento, la CAME activó la FI del PCAA debido a que se presentaron condiciones meteorológicas adversas para la dispersión de contaminantes. Posteriormente, la concentración de O₃ comenzó a descender y finalmente, a las 18:00 h, la calidad del aire fue REGULAR, es decir, ninguna estación superó 95 ppb.

En el análisis de los vientos en horas previas al máximo de O₃ (09:00 a 15:00 h), se observó que fueron provenientes del sur, sureste y norte (**Figura 4.6**), esto ocasionó zonas de convergencia¹⁶ en el sur-sureste (SSE) y, debido a la barrera natural de montañas al sur, hubo acumulación e incremento de O₃ en la región. En la meteorología a escala regional, durante el 29 y 30 de marzo, un sistema de circulación anticiclónica afectó las regiones centro y sureste del país, en niveles altos y bajos de la troposfera. En consecuencia, el campo de viento en la superficie generó poco transporte de humedad hacia el centro del país y Valle de México, además hubo temperaturas altas, estabilidad atmosférica moderada por la mañana y tarde, así como cielo despejado.

El 31 de marzo, el sistema de alta presión se transportó hacia el sur del país y en el norte se presentó una elongación de baja presión que afectó la región central. La combinación de estos sistemas provocó el transporte de aire con humedad moderada hacia el Valle de México, condiciones de estabilidad y temperaturas cálidas; en superficie, el viento fue moderado, con cielo despejado a medio nublado. Con estas condiciones, el 31 de marzo se registró un índice máximo de 138 puntos (140 ppb) en PED con el cual la CAME desactivó la Fase I del PCAA.

¹⁶**Zona de convergencia:** es una región en la atmósfera donde dos corrientes predominantes de viento se encuentran e interactúan, por lo general resulta en condiciones meteorológicas distintivas. Esta zona puede ser de escala local o de gran escala. En regiones urbanas, las zonas de convergencia ocasionan estancamiento y acumulación de contaminantes.

Evento de alta concentración O₃ 2019-03-30

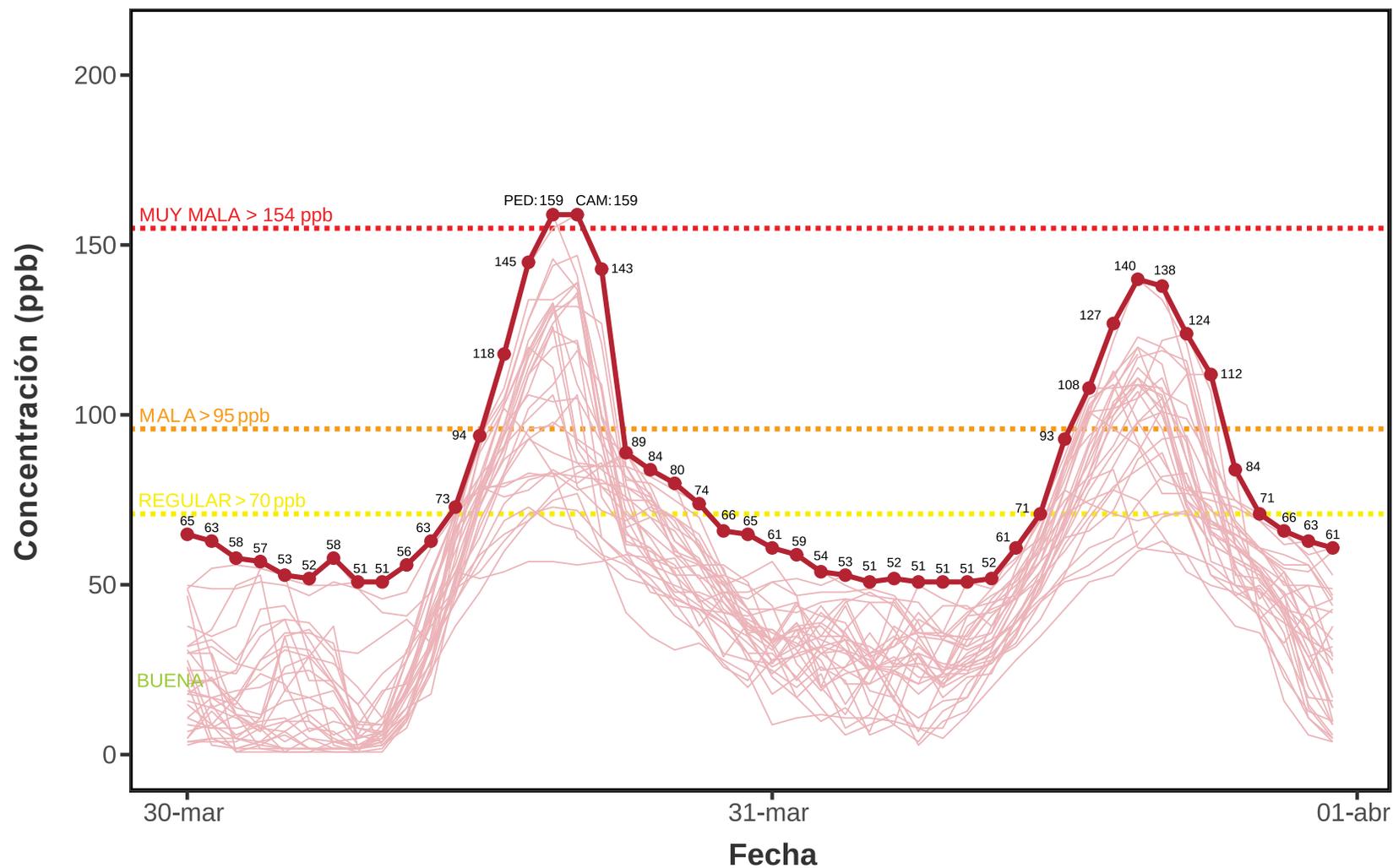


Figura 4.5. Concentración de O₃ del 30 al 31 de marzo. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación, la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son las categorías del índice de calidad del aire.

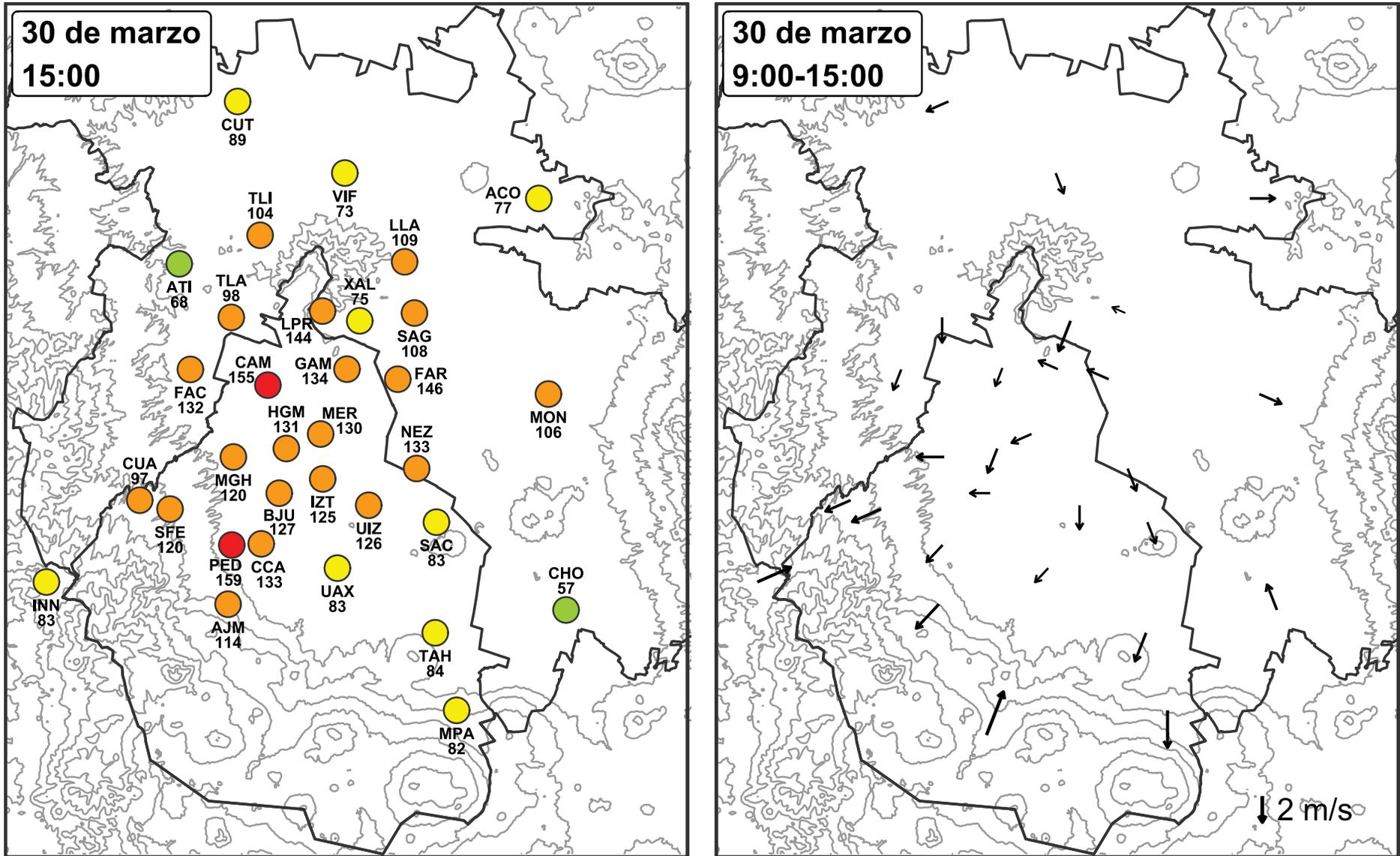


Figura 4.6. Índice de calidad del aire para O₃ y campos de viento durante el 30 de marzo. El mapa de la izquierda se presenta la categoría del índice (color) y la concentración horaria en ppb a las 15:00 h. El mapa de la derecha es el vector promedio de viento entre las 09:00 y 15:00 h.

ACTIVACIÓN DE FASE I O₃ : 10 DE ABRIL

El 10 de abril a las 16:00 h se activó la Fase I del PCAA por O₃, con un índice de 152 (156 ppb) y 151 (155 ppb) en las estaciones Pedregal (PED) y Merced (MER), respectivamente. Los vientos predominantes fueron del noreste hacia el suroeste y se observó que los niveles altos de O₃ comenzaron en sitios como FES Aragón (FAR) y Nezahualcóyotl (NEZ), al noreste, y posteriormente, se formaron zonas de convergencia que favorecieron la acumulación de O₃ en el centro y suroeste.

En la **Figura 4.7** se presenta el comportamiento horario de la concentración durante el 10 y 11 de abril. El 10 de abril a las 13:00 h, cinco estaciones registraron MALA calidad del aire con el máximo en FAR con 109 puntos (106 ppb). A las 15:00 h, 24 sitios estuvieron en la categoría MALA con el máximo en PED con un índice de 142 puntos (144 ppb) y FAR con 141 (143 ppb). En la hora siguiente se superó el umbral de la FI y la CAME activó el PCAA debido a las condiciones meteorológicas adversas para la dispersión; en este momento 25 sitios superaron 100 puntos, con un índice máximo de 152 (156 ppb) en PED y 151 (155 ppb) en MER. Los niveles altos se mantuvieron y a las 17:00 h, todavía se tenía MALA calidad del aire en 23 sitios con un máximo de 154 puntos (158 ppb) en NEZ. A las 18:00 h, los niveles de O₃ disminuyeron y se registró un máximo de 146 puntos (149 ppb) en Camarones (CAM).

Finalmente, a las 19:00 h todos los sitios tuvieron calidad del aire REGULAR y el máximo fue en Tultitlán (TLI) con un índice de 92 puntos (91 ppb). Los vientos en las horas previas al máximo de O₃ (10:00 a 16:00 h) fueron predominantes del noreste y suroeste (**Figura 4.8**), esto generó zonas de convergencia en el centro – sur y ocasionó el aumento de O₃.

En la meteorología a escala regional, desde el 9 de abril hubo un sistema de alta presión en el noroeste y centro del país, en consecuencia, se registró poco transporte de humedad, cielo despejado y estabilidad atmosférica ligera. Al día siguiente, el sistema de alta presión se trasladó al suroeste y aumentó de intensidad en niveles bajos y medios de la troposfera. A nivel local, desde el 9 de abril se registró viento débil (3 m/s) en la mayor parte del día. El 10 de abril, se presentó un incremento de temperatura y hubo vientos débiles de 06:00 a 18:00 h, esto favoreció el incremento de O₃. A las 19:00 h, la velocidad del viento fue mayor y hubo dispersión del contaminante; sin embargo, el sistema permaneció en el centro del país por lo que se mantuvo la FI del PCAA. El 11 de abril, la temperatura fue similar, pero la velocidad del viento aumentó desde las 14:00 h con un promedio de 4 m/s, esto evitó la acumulación de O₃ y el índice máximo fue de 126 puntos (126 ppb) en CAM. Debido a las condiciones favorables, la CAME desactivó la Fase I del PCAA.

**Evento de alta concentración O₃
 2019-04-10**

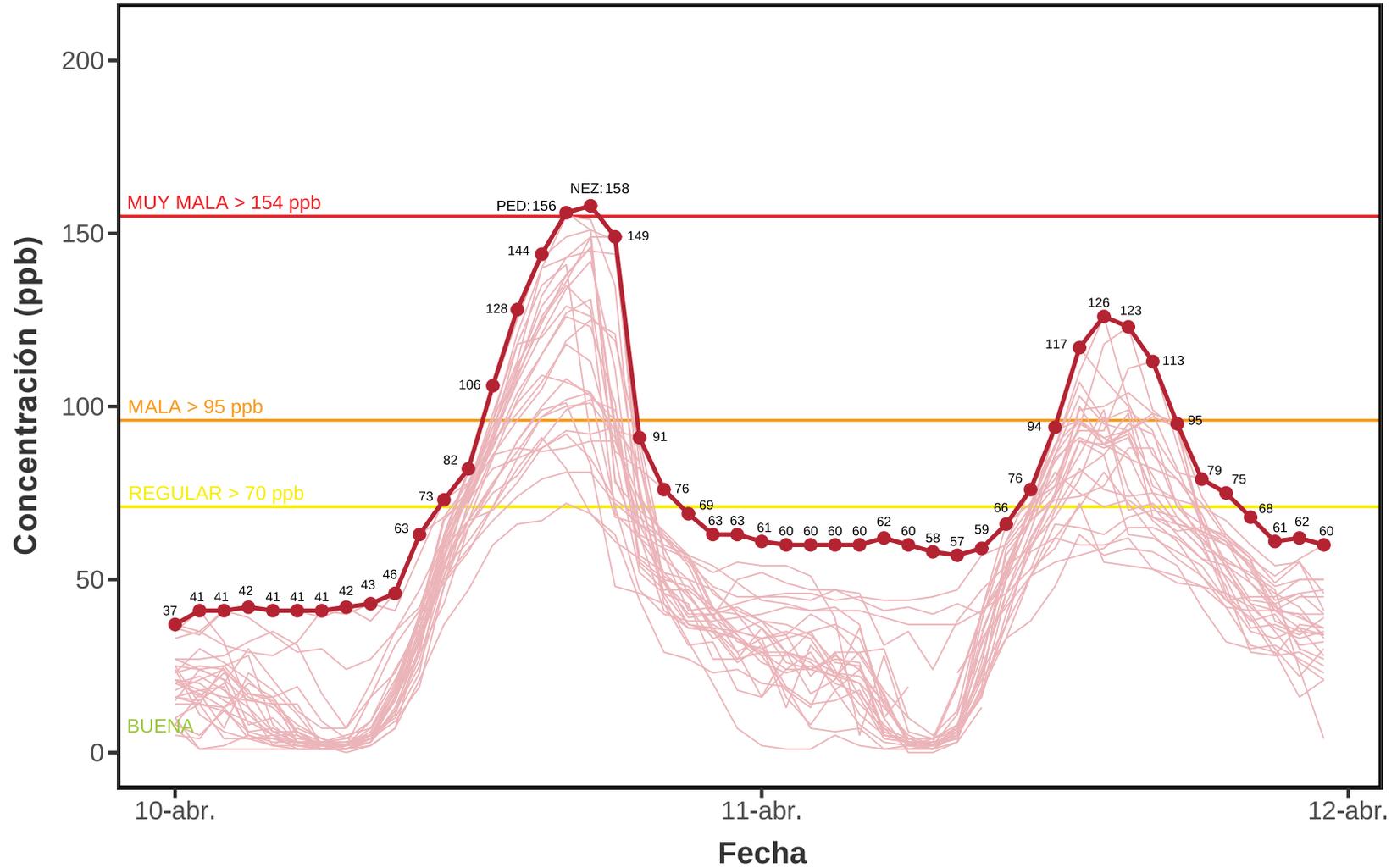


Figura 4.7. Concentración de O₃ del 10 al 11 de abril. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación, la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales representan las categorías del índice de calidad del aire.

EVENTOS DE CONTINGENCIA

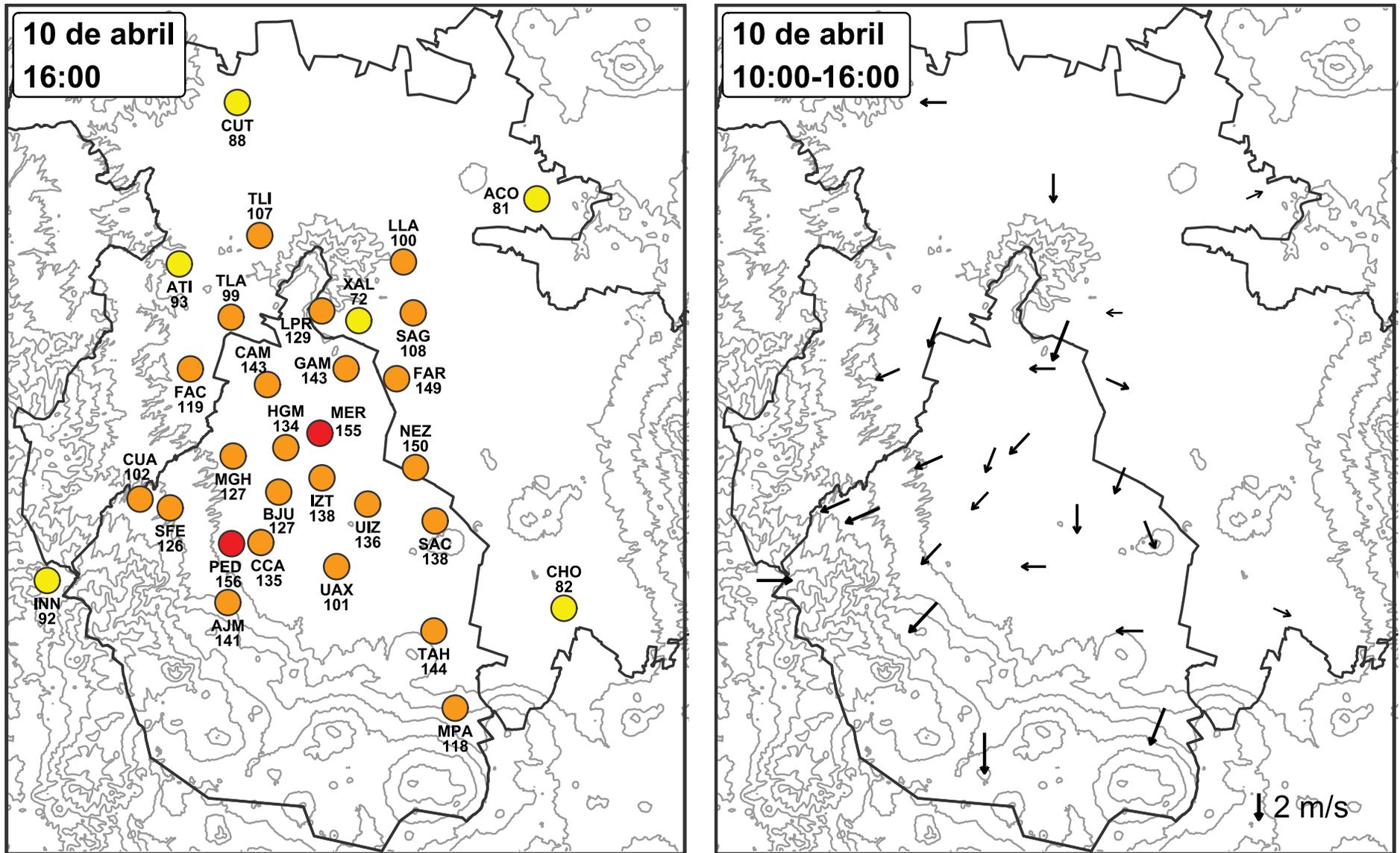


Figura 4.8. Índice de calidad del aire para O₃ y campos de viento durante el 10 de abril. En el mapa de la izquierda se presenta la categoría del índice (color) y la concentración horaria en ppb a las 16:00 h. El mapa de la derecha es el vector promedio de viento entre las 10:00 y 16:00 h.

ACTIVACIÓN DE FASE I O₃ : 16 DE ABRIL

El 16 de abril se activó la FI de O₃ por tercera vez y tuvo una duración de dos días, el 16 y 17 de abril, en los que se superó el umbral de la FI (**Figura 4.9**). El 16 de abril desde las 12:00 h comenzó el incremento de O₃ y dos sitios registraron MALA Calidad del Aire, el máximo fue en Pedregal (PED) con 109 puntos (105 ppb). En la siguiente hora, 14 estaciones superaron 100 puntos con el máximo de 135 (137 ppb) en Tultitlán (TLI). A las 16:00 h, el índice máximo fue de 154 (158 ppb) en Camarones (CAM) y en este momento, la CAME activó la FI debido a las condiciones meteorológicas adversas. Los niveles de O₃ descendieron a las 18:00 h con el incremento de la velocidad del viento que favoreció la dispersión y solo cuatro sitios superaron 100 puntos con el máximo en Cuautitlán (CUT) con 110 (107 ppb). A las 19:00 h, la calidad del aire en la ZMCM fue REGULAR, con el índice máximo en Milpa Alta (MPA) y Tláhuac (TAH) con 53 (72 ppb). El 17 de abril, la concentración incrementó desde las 12:00 h y cuatro sitios superaron 100 puntos con el máximo en Gustavo A. Madero (GAM) con 105 (101 ppb). A las 14:00 h, el índice máximo fue 152 (156 ppb) en LPR y nuevamente se superó el umbral de FI. A partir de las 16:00 h, el O₃ disminuyó gradualmente y a las 19:00 h se tuvo categoría REGULAR con el máximo en GAM con 76 (83 ppb); sin embargo, debido al pronóstico de condiciones meteorológicas adversas, la CAME mantuvo la FI hasta el 18 de abril.

Los vientos en horas previas al máximo de O₃ (10:00 a 16:00 h) durante el 16 de abril fueron provenientes del sur y sureste hacia el norte (**Figura 4.10**), esto generó zonas de convergencia en el centro y noroeste, donde ocurrieron los máximos de O₃. El 17 de abril (**Figura 4.11**) también se registraron vientos débiles y zonas de convergencia, los máximos de O₃ fueron en el centro y noreste de la ZMVM.

En la meteorología a escala regional, en días previos al 16 de abril se observó un sistema de alta presión en el suroeste del país que se extendió hacia el centro. En los días siguientes, el sistema se trasladó al sureste y afectó la región central. Esto ocasionó poca humedad, cielo despejado, estabilidad atmosférica, viento débil y alta radiación solar que favoreció la formación de O₃. En la escala local, el viento fue débil (1 a 1.5 m/s) desde el 14 de abril y fue similar en los siguientes 4 días (14 - 17 de abril), en los que persistieron las condiciones adversas. La temperatura fue alta desde el 16 de abril con un máximo de 32.1 °C e incrementó en los siguientes días; el 18 de abril se registró un máximo de 33.6 °C, pero la velocidad del viento aumentó y el índice máximo fue 114 (111 ppb) en Nezahualcóyotl (NEZ). Debido a estas condiciones favorables, el 18 de abril, la CAME desactivó la FI del PCAA.

Evento de alta concentración O₃ 2019-04-16

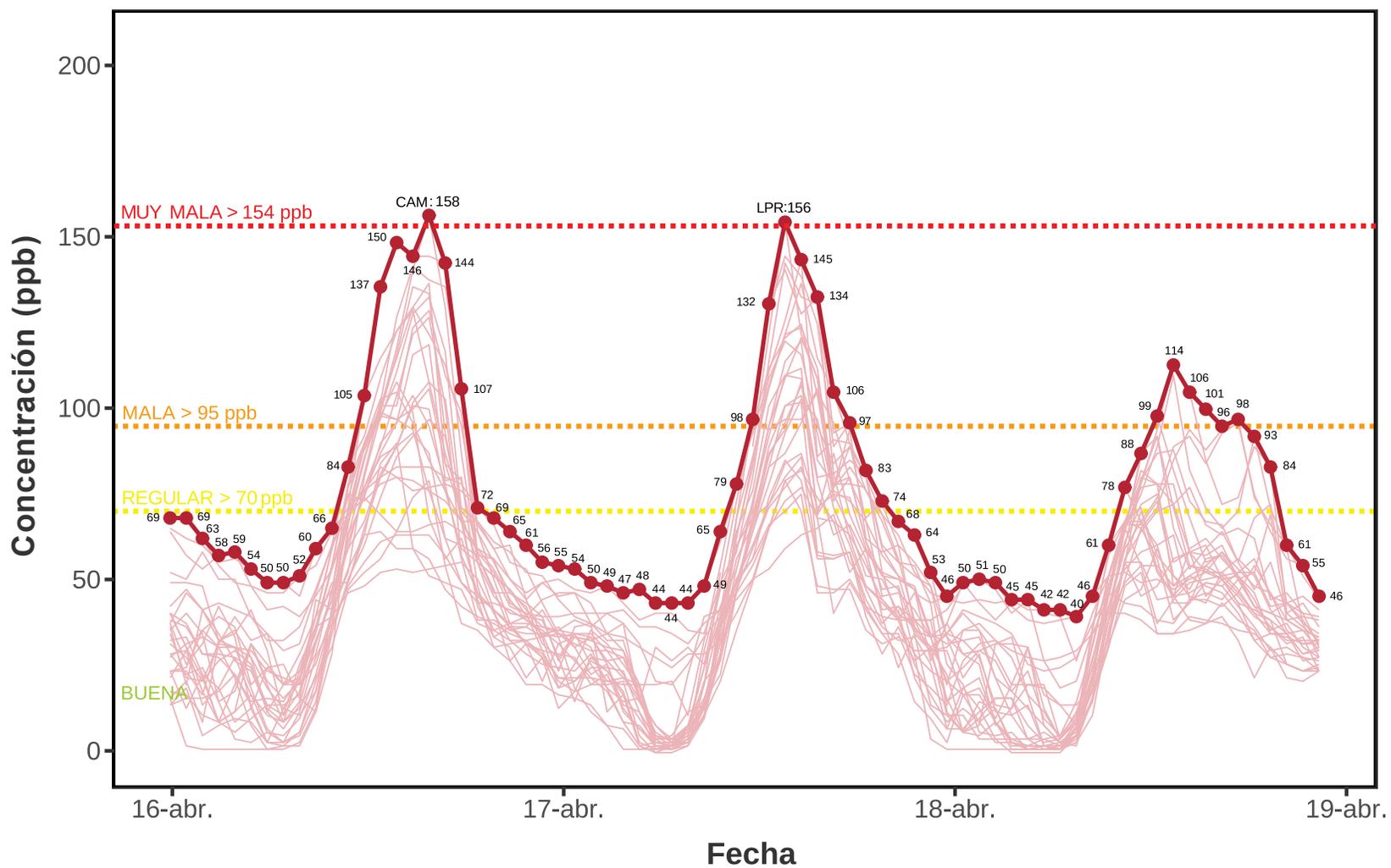


Figura 4.9. Concentración de O₃ del 16 al 18 de abril. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación, la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales representan las categorías del índice de calidad del aire.

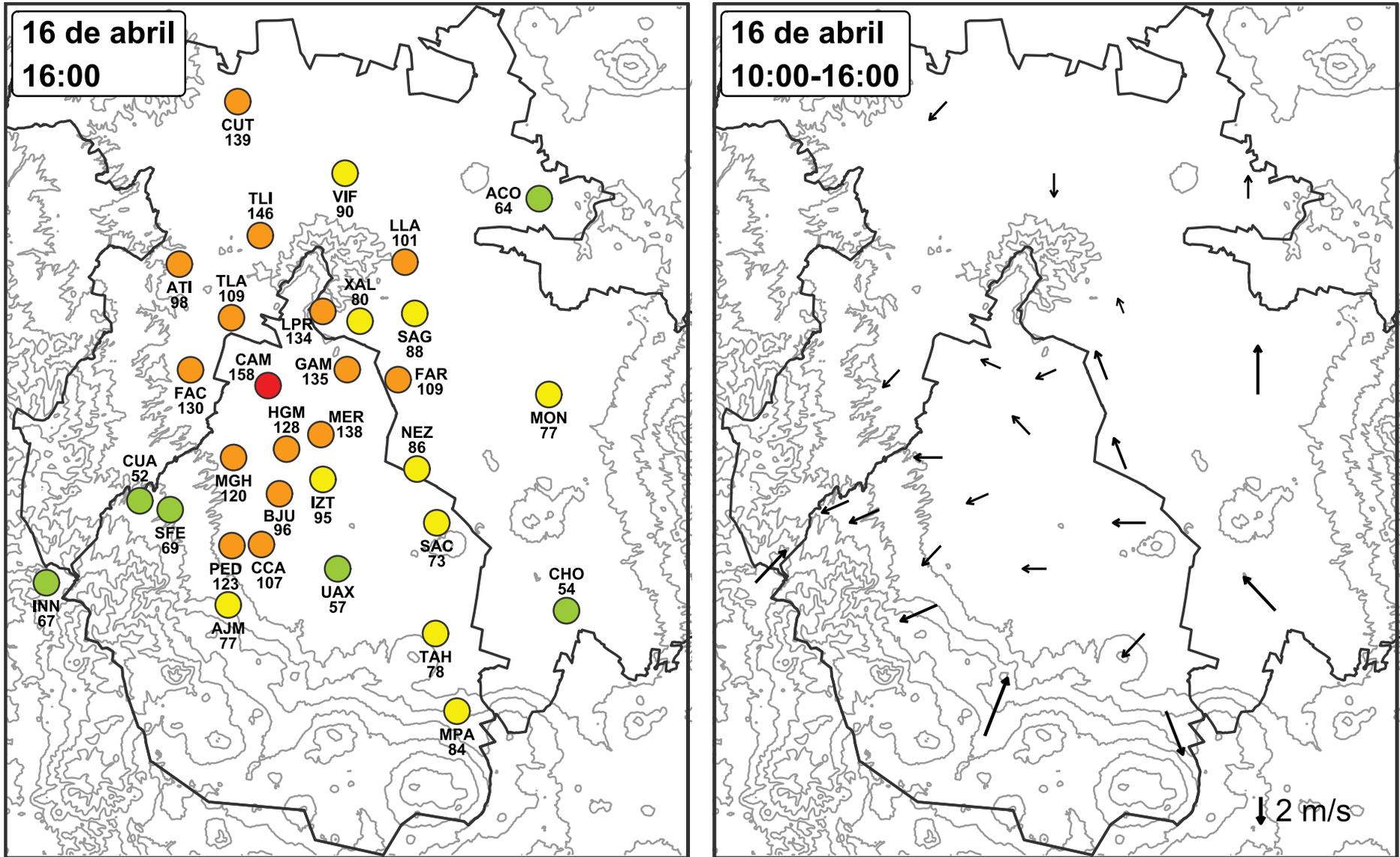


Figura 4.10. Índice de calidad del aire para O₃ y campos de viento durante el 16 de abril. En el mapa de la izquierda se presenta la categoría del índice (color) y la concentración horaria en ppb a las 16:00 h. El mapa de la derecha es el vector promedio de viento entre las 10:00 y 16:00 h

EVENTOS DE CONTINGENCIA

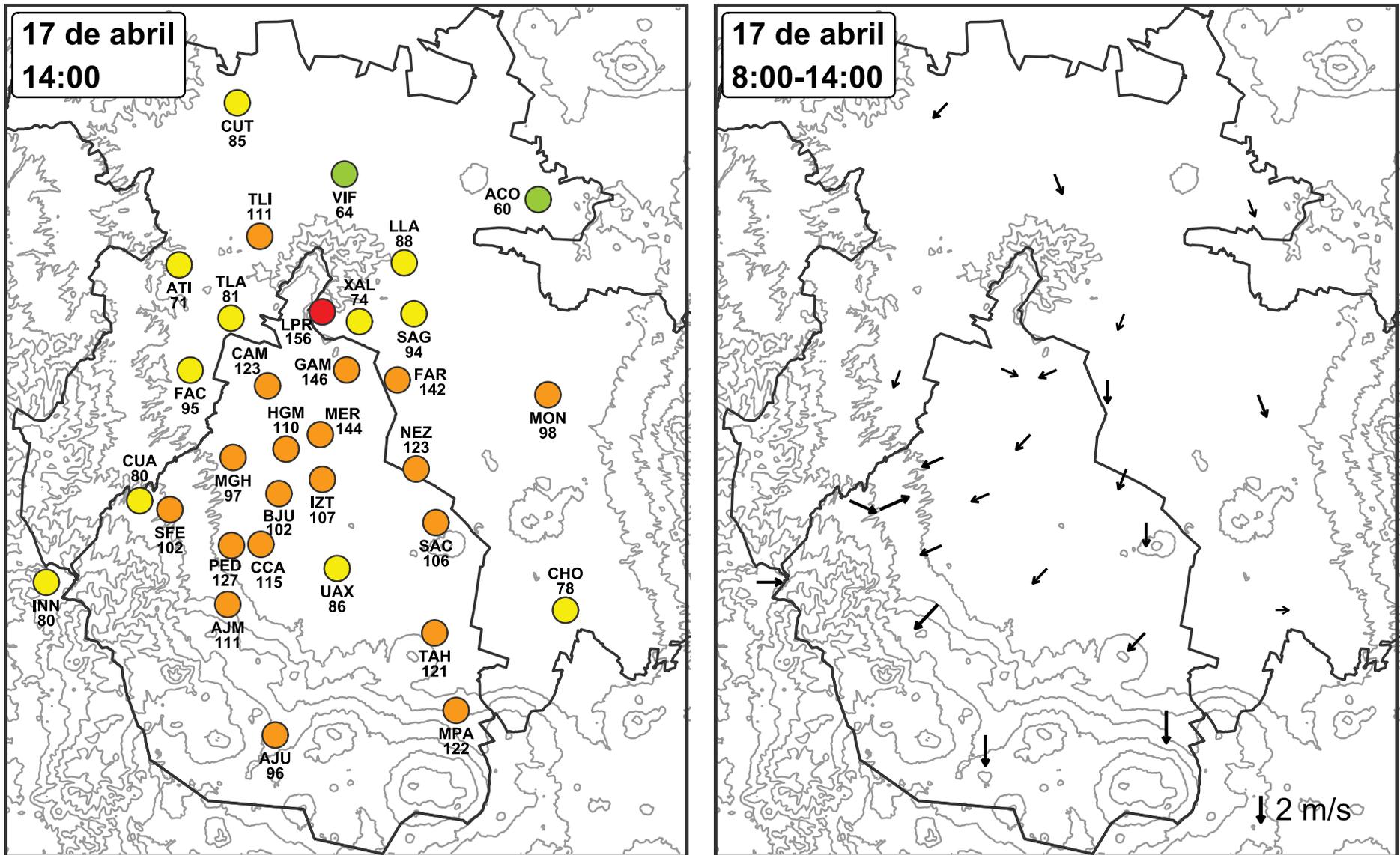


Figura 4.11. Índice de calidad del aire para O₃ y viento durante el 17 de abril. En el mapa de la izquierda se presenta la categoría del índice (color) y la concentración horaria en ppb a las 14:00 h. El mapa de la derecha es el vector promedio de viento entre las 08:00 y 14:00 h

CONTINGENCIA EXTRAORDINARIA POR PM_{2.5} + O₃ : 10 AL 17 DE MAYO

Durante mayo ocurrieron incendios masivos en México, especialmente en el centro y sur del país, los cuales fueron más intensos del 10 al 14 de mayo. En la **Figura 4.12** se presenta el acumulado de incendios con retro trayectorias de 48 h y se estimó que provinieron del suroeste hacia el centro, donde está la ZMVM. En el conteo de incendios por día (**Figura 4.13**) se observó que el 10 de mayo tuvo el máximo de incendios en la Megalópolis¹⁷ con 423; de los cuales 35 fueron en la ZMVM y específicamente, 17 en la Ciudad de México.

El 11 de mayo se registró el máximo de incendios para la CDMX con 25, este día ocurrieron otros 6 en municipios conurbados del Estado de México y 75 incendios en el resto de la Megalópolis, la mayoría en municipios del Estado de México fuera de la ZMVM, Hidalgo y Puebla. El 13 de mayo, hubo 36 incendios en la ZMVM, de los cuales 18 fueron en la CDMX. Estos eventos, dentro y fuera de la Megalópolis, contribuyeron a la mala calidad del aire, en la Ciudad de México y la parte centro y sur del país.

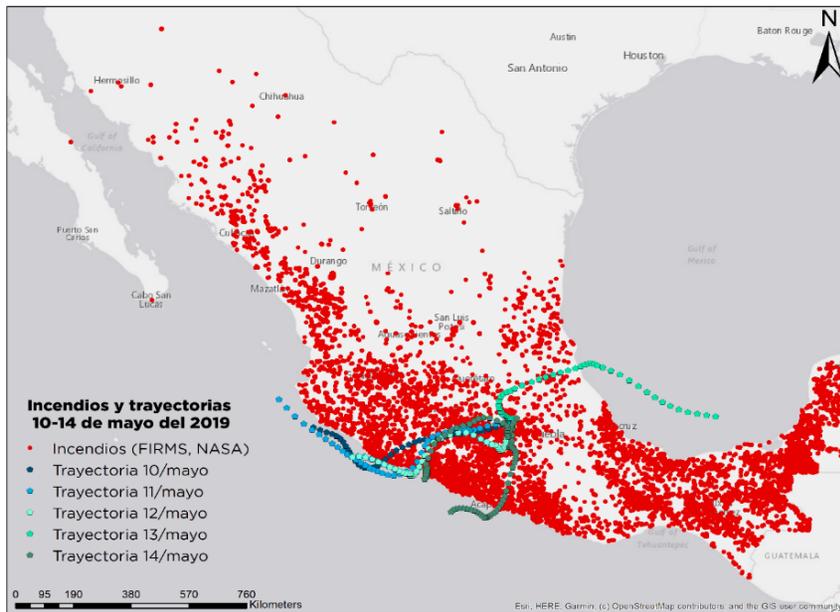


Figura 4.12. Incendios y retro trayectorias (10 - 14 de mayo). Los puntos rojos son incendios acumulados (NASA) y las retro trayectorias se realizaron con HYSPLIT (NOAA).

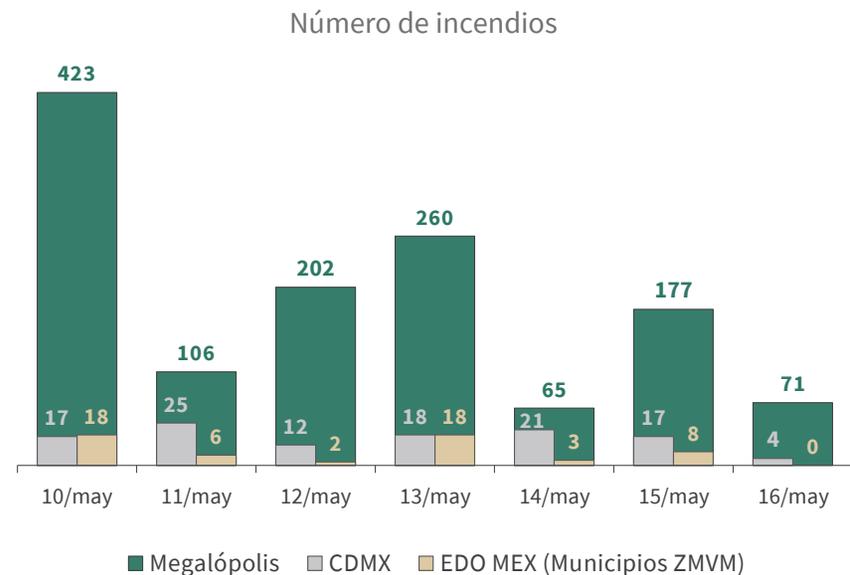


Figura 4.13. Conteo de incendios registrados en la Megalópolis del 10 al 16 de mayo (CONABIO, CONAFOR, 2020).

¹⁷Megalópolis: área conformada por la Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Morelos, Querétaro y Puebla.

EVENTOS DE CONTINGENCIA

En la **Figura 4.14** se presenta un resumen de la cronología de la contingencia extraordinaria, se resalta el máximo del índice de calidad del aire que se registró por día y el contaminante, con las acciones más importantes implementadas por las autoridades para minimizar el daño a la salud. Desde el 12 de mayo, la CAME emitió comunicados que advertían la situación de mala calidad del aire en la ZMVM ocasionada por los numerosos incendios en el centro y sur del país. En total se registraron cuatro días consecutivos con un índice de calidad

del aire superior a 151 puntos para $PM_{2.5}$, mientras que el máximo alcanzado para O_3 fue 147 (150 ppb). En la **Figura 4.15** se puede observar el comportamiento horario de $PM_{2.5}$, así como del índice de calidad del aire de $PM_{2.5}$ y O_3 ; es importante mencionar que el O_3 no superó el umbral de FI, sin embargo, la concentración fue considerablemente alta (> 140 ppb) y las condiciones meteorológicas eran adversas, por lo que había riesgo de que el O_3 incrementara.



Figura 4.14. Cronología de eventos antes y durante la Contingencia Extraordinaria 2019.

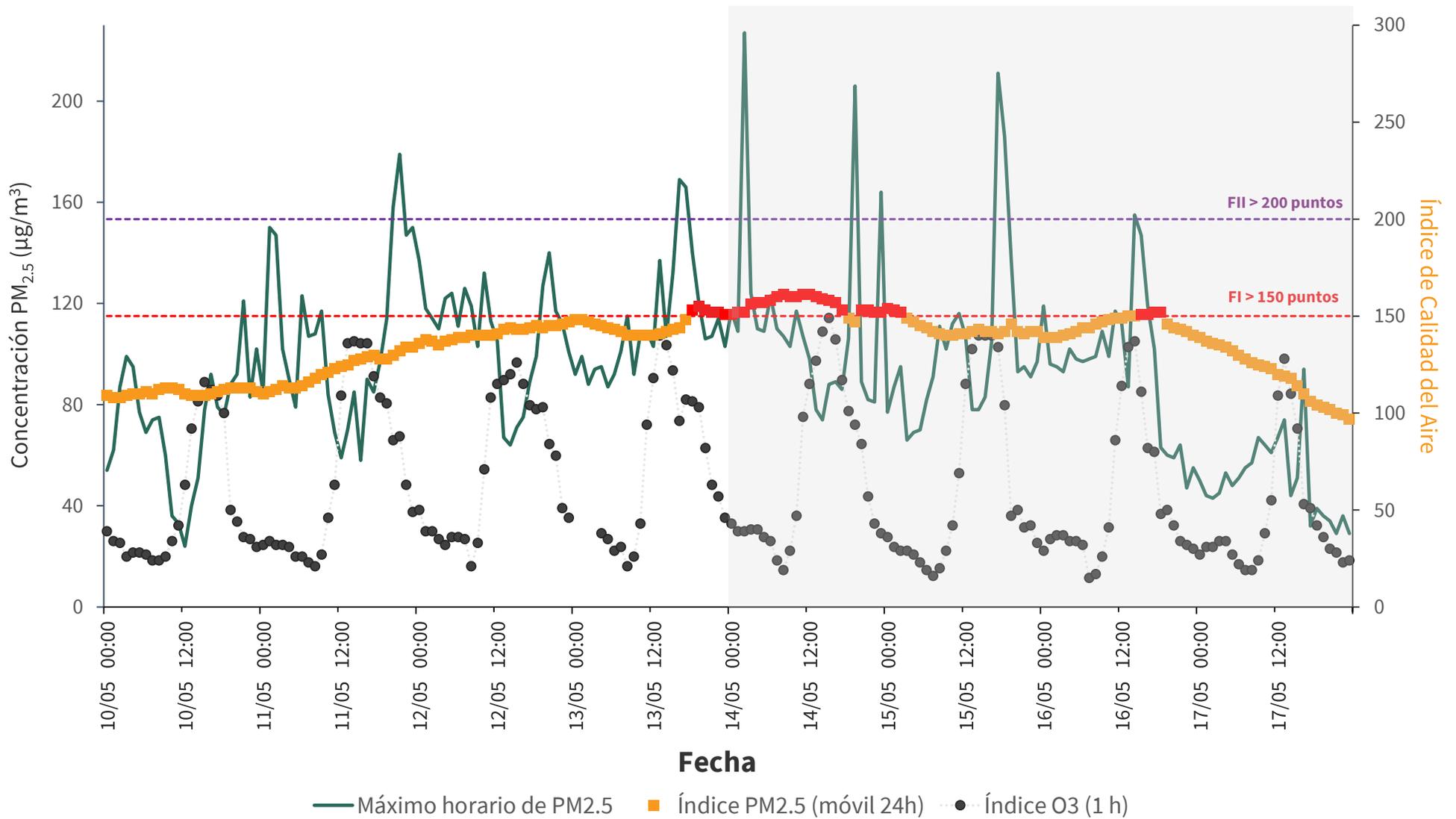


Figura 4.15. Comportamiento del máximo de la concentración horaria de PM_{2.5}, Índice de Calidad del Aire para O₃ y PM_{2.5} del 10 al 17 de mayo. La zona sombreada es la duración de la Fase Extraordinaria.

DESCRIPCIÓN DE LOS DÍAS PREVIOS A LA CONTINGENCIA: 10 AL 13 DE MAYO

Durante el 10 de mayo, se registró mala calidad del aire en la ZMVM en los tres contaminantes; O_3 presentó el índice máximo con 116 (114 ppb); $PM_{2.5}$ y PM_{10} con 113 ($50.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 110 ($90 \mu\text{g}/\text{m}^3$), respectivamente. Los máximos se presentaron al sur; sin embargo, estos niveles son frecuentes en la temporada de O_3 , además se registró inversión térmica y estabilidad atmosférica, lo que favoreció la mala calidad del aire en los tres contaminantes. El 11 de mayo tuvo mala calidad del aire con los valores más altos en el sur y oriente de la CDMX. El O_3 presentó los máximos del índice con 137 (139 ppb) en Gustavo A. Madero (GAM) y 136 (137 ppb) en UAM Xochimilco (UAX). En $PM_{2.5}$ el máximo fue 135 ($81.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y PM_{10} con 112 puntos ($107 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este día, la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (SGIRPC), publicó una nota informativa sobre la “Percepción de Humo en la Ciudad de México”, en la que se menciona que las estaciones del SIMAT que miden PM_{10} y $PM_{2.5}$ registraron mala calidad del aire.

Para el 12 de mayo, la calidad del aire empeoró y las $PM_{2.5}$ presentaron los valores más altos, la CAME emitió un comunicado a la población para advertir sobre los incendios en la ZMVM y sus alrededores. El índice máximo de $PM_{2.5}$ fue 147 ($94.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en el noreste y sureste; en el centro y suroeste

se registraron valores de 144 ($91.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 141 ($87.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), respectivamente. El índice máximo en PM_{10} fue 120 ($129 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y de 126 puntos (126 ppb) para O_3 . Las condiciones meteorológicas de este día fueron desfavorables para la dispersión, esto debido a sistemas de alta presión que causaron estabilidad atmosférica, poca humedad y cielo despejado.

Durante el 13 de mayo, las $PM_{2.5}$ alcanzaron un índice máximo de 155 puntos; sin embargo, el PCAA todavía no incluía un protocolo para FI de $PM_{2.5}$, ya que su índice de calidad del aire había sido implementado a inicios del 2019. El índice máximo de O_3 fue 140 (142 ppb) al noreste de la ciudad, mientras que otras zonas presentaron valores mayores a 130 puntos (> 132 ppb) y las PM_{10} alcanzaron un índice de 124 ($141 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En este día, la CAME emitió acciones preventivas para proteger la salud y minimizar el impacto de la contaminación ocasionada por incendios. Las condiciones meteorológicas en este día también fueron desfavorables para la dispersión debido a la persistencia de un sistema de alta presión al suroeste del país, con estabilidad atmosférica en la horizontal y vertical. En estados como Guerrero, Michoacán y Oaxaca también hubo incendios del 10 al 13 de mayo, estos contribuyeron al transporte de contaminantes hacia la ZMVM (**Figura 4.16**).

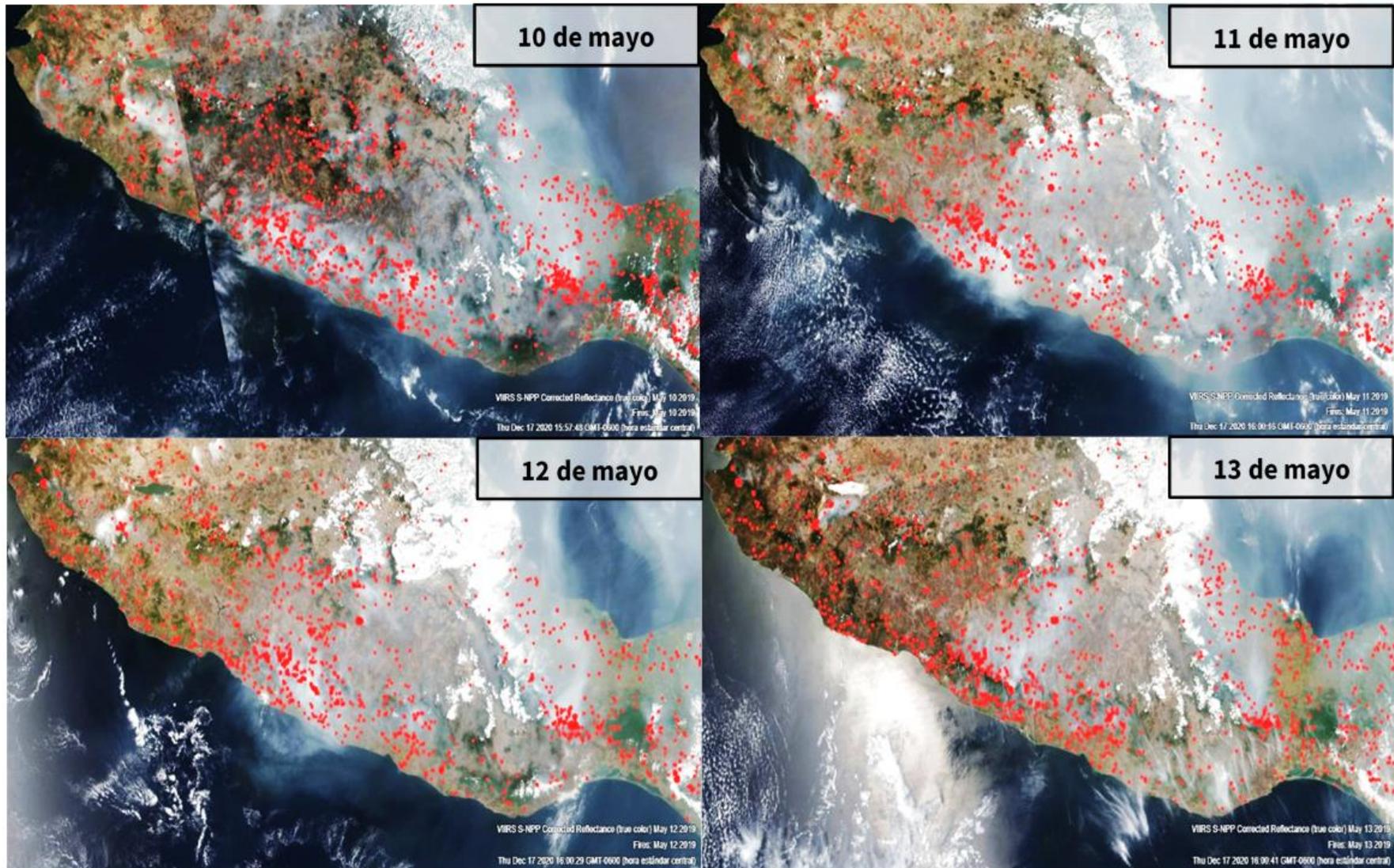


Figura 4.16. Imagen satelital por día (10 al 13 de mayo) del centro y sur de México. Fuente: Fire Information for Resource Management System (FIRMS), Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS).

ACTIVACIÓN DE LA CONTINGENCIA EXTRAORDINARIA : 14 AL 17 DE MAYO

Durante estos días, el número de incendios disminuyó; sin embargo, debido a las condiciones de estabilidad atmosférica persistente y baja dispersión de contaminantes, la calidad del aire en la ZMVM se deterioró considerablemente. En la **Figura 4.17** se presenta la evolución de la concentración horaria, así como el índice de calidad del aire de $PM_{2.5}$ durante todo el periodo del 13 al 17 de mayo y se observa que el oriente fue la región más afectada por partículas ya que los máximos persistieron en estaciones al sureste y noreste.

En este momento, el PCAA no consideraba umbral para declarar contingencia de $PM_{2.5}$, ni fases combinadas para dos contaminantes. Sin embargo, debido a las condiciones meteorológicas adversas, la Coordinación Ejecutiva de la CAME decidió implementar la contingencia extraordinaria y así, en la mañana del 14 de mayo se activó la contingencia extraordinaria de $PM_{2.5}$ con un índice de 158 ($105.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en Nezahualcóyotl (NEZ) y en la tarde de este mismo día, se emitió otro comunicado que ya incluía O_3 en la contingencia, así como restricciones vehiculares para mitigar la emisión de precursores de partículas y O_3 . Durante el día, el índice de $PM_{2.5}$ fue mayor a 150 puntos y de 09:00 a 13:00 h se alcanzó el máximo de 161 ($108.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que, la concentración horaria alcanzó $206 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en NEZ a las 19:00 h.

Para O_3 , se registró MALA calidad del aire desde las 13:00 h con un índice de 115 (113 ppb) en UAM Xochimilco (UAX) y a las 16:00 h se alcanzó el máximo en Tultitlán (TLI) con 149 puntos (153 ppb). En el análisis de los vientos se observó que tuvieron intensidad débil de 08:00 a 14:00 h, especialmente en el centro y noreste de la ZMVM; en el suroeste se formaron zonas de convergencia y acumulación de los contaminantes (**Figura 4.18**). Las condiciones adversas prevalecieron y a las 20:00 h, la CAME informó que la contingencia extraordinaria de $PM_{2.5}$ y O_3 se mantenía.

El 15 de mayo a las 10:00 h, la contingencia extraordinaria continuó debido al incremento de $PM_{2.5}$, ocasionado por 24 incendios en la ZMVM y 152 en el resto de la Megalópolis. El índice para $PM_{2.5}$ fue superior al umbral de FI desde las 01:00 h con 154 puntos ($100.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Durante el día, las $PM_{2.5}$ tuvieron valores de MALA calidad del aire, especialmente en sitios del oriente como Santiago Acahualtepec (SAC) y NEZ. El máximo de la concentración horaria fue en SAC con $211 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 17:00 h. Para O_3 , el índice fue superior a 100 puntos desde las 12:00 h, con un máximo de 115 (112 ppb) en el sitio Gustavo A. Madero (GAM). La concentración aumentó y el máximo del día se alcanzó a las 14:00 h en Camarones (CAM) con 140 puntos (142 ppb), este valor se mantuvo por tres horas consecutivas.

La combinación de $PM_{2.5}$ y O_3 es un riesgo para la salud de población susceptible como embarazadas, niños, adultos mayores y personas con padecimientos respiratorios o cardiovasculares; es por esto que la CAME informó la suspensión de clases para el 16 de mayo en escuelas de nivel básico.

El 16 de mayo se registraron cuatro incendios en la Ciudad de México y 67 en el resto de la Megalópolis, en consecuencia, el índice de $PM_{2.5}$ fue mayor a 140 puntos durante el día. El índice de $PM_{2.5}$ alcanzó el umbral de FI a las 16:00 h y se mantuvo por cuatro horas consecutivas. El máximo del índice fue 152 puntos ($98.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en el noreste de la ZMVM y se registró de 18:00 a 19:00 h. En O_3 , se observó MALA calidad del aire desde las 12:00 h con un índice de 114 (111 ppb) en UAX y su valor máximo se alcanzó a las 14:00 h en Pedregal (PED) con 137 puntos (139 ppb). Posteriormente, la concentración disminuyó y a las 17:00 h, el índice para O_3 fue REGULAR. Las condiciones meteorológicas del 16 de mayo presentaron un sistema de alta presión persistente en el centro del país y ocasionó estabilidad atmosférica, por la tarde la nubosidad incrementó y se registraron lluvias, esto favoreció la disminución de contaminación durante la noche; sin embargo, la mala calidad del aire continuó y la CAME, informó que la suspensión de clases continuaba para el 17 de mayo, así como las acciones para reducir emisiones.

El 17 de mayo, el índice de $PM_{2.5}$ fue de 139 puntos ($85.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a la 01:00 h; más tarde se observó una disminución y estuvo en el rango de 86 a 137 puntos con los máximos en el noreste de la ZMVM, por lo que ya no se presentaron valores en el umbral de FI para $PM_{2.5}$. La calidad del aire para O_3 fue MALA desde el mediodía y a las 13:00 h se alcanzó el índice máximo con 128 puntos (128 ppb) en la estación GAM, posteriormente la concentración disminuyó después de las 16:00 h y la calidad del aire para ozono fue REGULAR. Las condiciones meteorológicas indicaron que el sistema de alta presión se debilitó durante el 17 de mayo y además se presentó lluvia en la ZMVM, estos factores contribuyeron a la disminución de los contaminantes. A las 19:00 h, la CAME suspendió la contingencia extraordinaria ya que las condiciones meteorológicas pronosticadas ya eran favorables para la dispersión de los contaminantes. De esta manera concluyó el evento de contaminación que comenzó el 10 de mayo provocado por los incendios registrados en el centro del país.

En respuesta a esta contingencia extraordinaria, el 28 de mayo del 2019 se actualizó el PCAA con el objetivo de incluir un protocolo de FI para $PM_{2.5}$, así como la Fase Preventiva y Combinada que considera valores altos de ozono y partículas. A partir de estos cambios se le denominó **Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México (PPRECAA)**.

Evento de alta concentración PM_{2.5} 2019-05-13

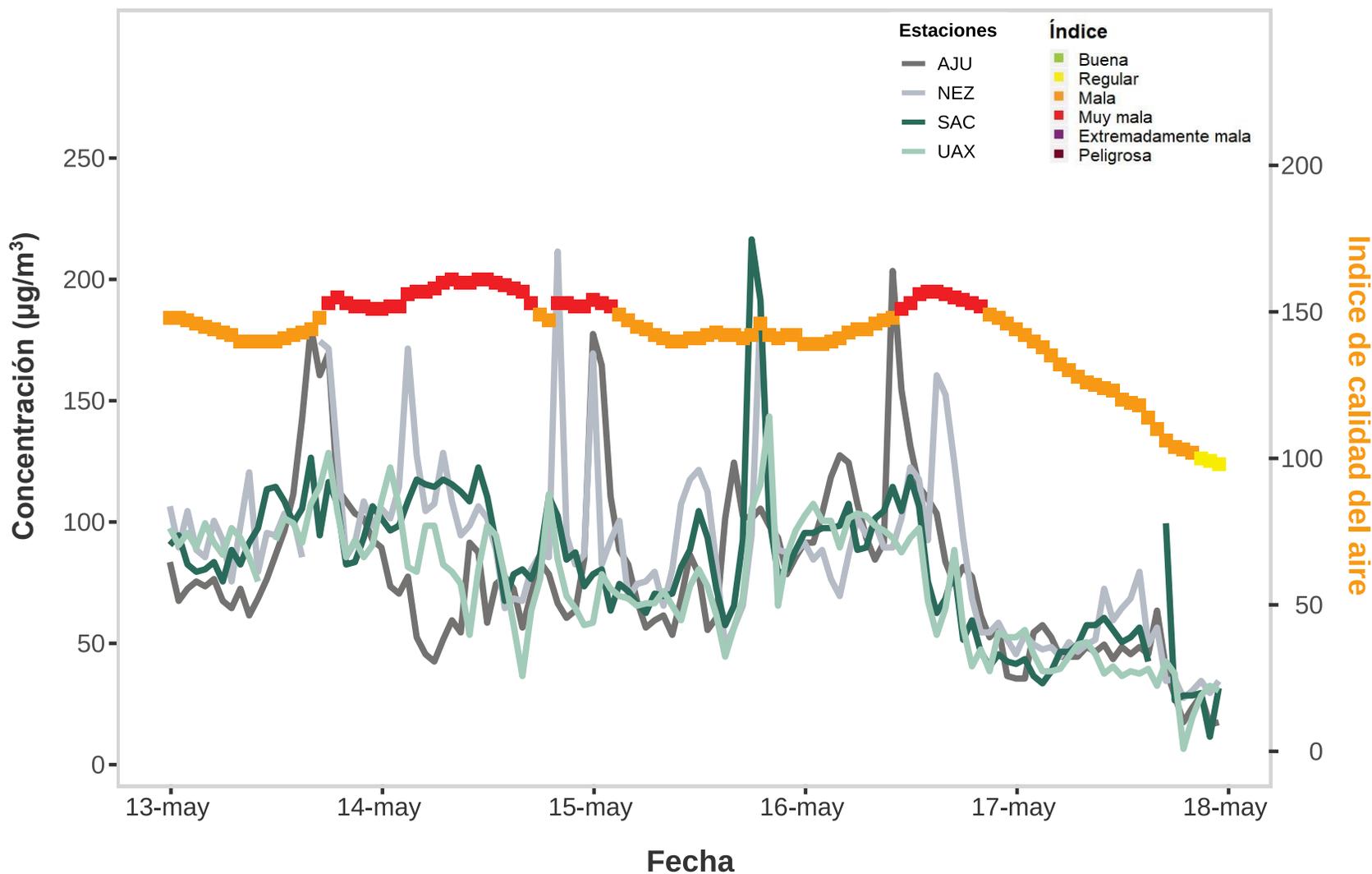


Figura 4.17. Comportamiento de PM_{2.5} del 13 al 17 de mayo. Las líneas corresponden a las cuatro estaciones con los máximos de concentración horaria, los cuadros de colores representan el valor y categoría del índice de calidad del aire con base en el promedio móvil de 24 h.

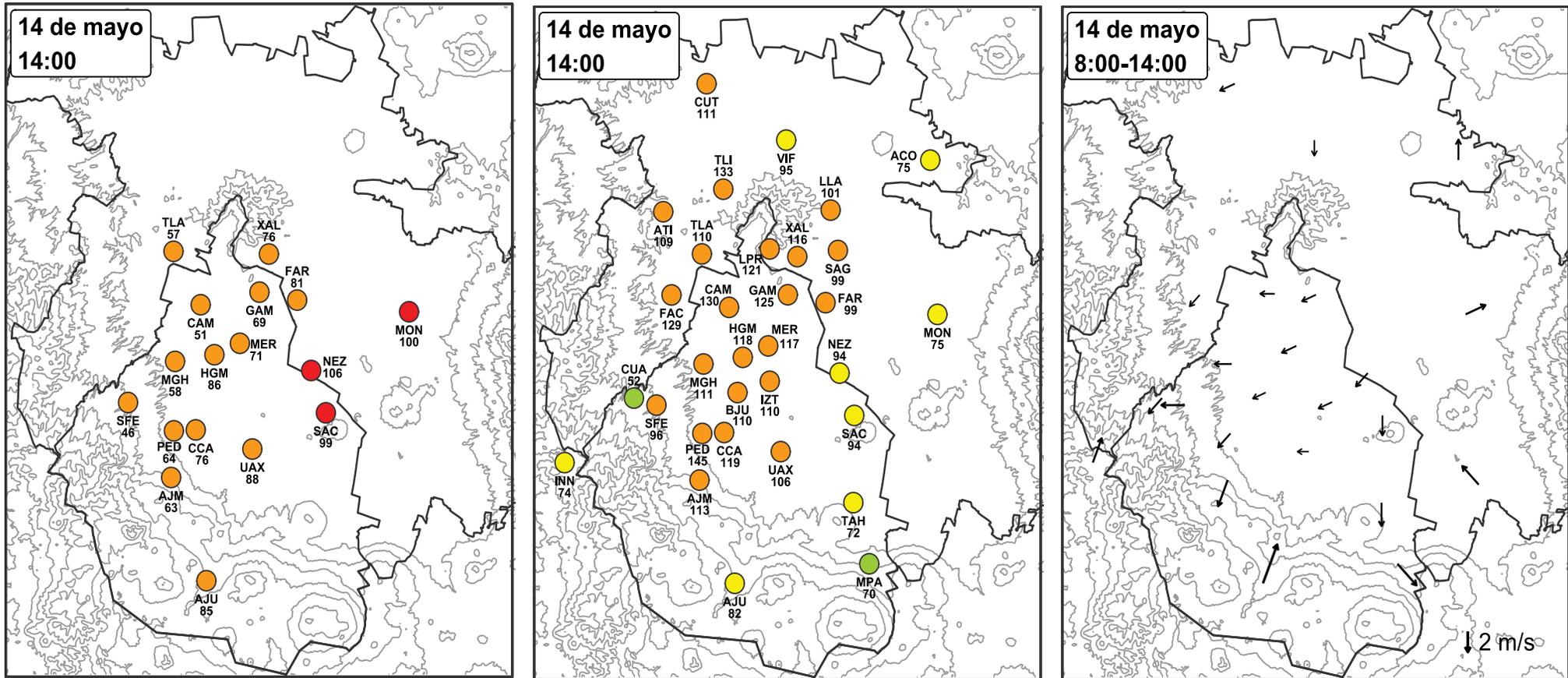


Figura 4.18. Índice de calidad del aire ($PM_{2.5}$, O_3) y campo de vientos para el 14 de mayo. Los mapas de la izquierda y centro representan la categoría del índice (color) así como la concentración para $PM_{2.5}$ (promedio móvil 24 h en $\mu g/m^3$) y O_3 (promedio horario en ppb) a las 14:00 h. En el mapa de la derecha se presenta el vector promedio de viento entre las 08:00 y 14:00 h.

ACTIVACIÓN DE FASE I PM_{2.5} : 25 DE DICIEMBRE

En diciembre es común que la concentración de partículas sea alta debido a las constantes inversiones térmicas, aunado al incremento de emisiones durante los festejos de navidad. En la noche del 24 y la madrugada del 25 de diciembre, se presentaron emisiones elevadas provenientes de la pirotecnia, fogatas y quemas al aire libre, esto incrementó las PM_{2.5} en el noreste de la ZMVM. Adicionalmente se presentó inversión térmica y un sistema de alta presión que afectó el centro del país durante varios días, lo cual favoreció el estancamiento de contaminantes.

La concentración horaria de PM_{2.5} incrementó desde las 23:00h del 24 de diciembre y a las 05:00h del 25 de diciembre se registró el valor horario de 236 µg/m³ en FES Aragón (FAR). En las siguientes horas, la concentración de PM_{2.5} continuó en ascenso y se registró un máximo de 303 µg/m³ a las 11:00 h, en la estación Nezahualcóyotl (NEZ) al noreste de la ZMVM (**Figura 4.19**). El índice de calidad del aire para PM_{2.5}, calculado con el promedio móvil de 24 h, alcanzó la categoría de muy mala calidad del aire también a las 11:00 h con 155 puntos (101.8 µg/m³) en NEZ. Debido a las condiciones meteorológicas adversas, la CAME activó las medidas regionales complementarias para coadyuvar a reducir la contaminación por PM_{2.5} en la región noreste de la ZMVM.

En este caso, no se activó la FI del PPRECAA debido a que se encontraba en suspensión por el juicio de amparo 937/2019 (05/07/2019); sin embargo, como parte de la responsabilidad hacia la salud de la población, se implementaron medidas para la reducción y control de las emisiones de PM_{2.5}. El índice máximo para PM_{2.5} fue 174 puntos (122.3 µg/m³) a las 23:00 h del 25 de diciembre, al noreste de la ZMVM. El índice de PM_{2.5} se mantuvo en MUY MALA Calidad del Aire (>150 puntos) hasta las 06:00 h del 26 de diciembre, por lo que el evento de partículas tuvo una duración total de 20 horas con niveles superiores a los 150 puntos.

En la **Figura 4.20** se puede observar que el patrón de los vientos durante la madrugada del 25 de diciembre fue predominante del sur y suroeste; pero se registraron vientos débiles y zonas de convergencia en el norte y centro de la ZMVM, lo cual favoreció la acumulación de las partículas en la región. Finalmente, el 26 de diciembre se presentaron condiciones favorables para la dispersión debido al incremento de la velocidad del viento y a las 10:00 h, con un valor del índice de 116 puntos (61.6 µg/m³) en la estación NEZ, la CAME suspendió las medidas para reducir la contaminación por PM_{2.5} en la ZMVM.

**Evento de alta concentración PM_{2.5}
 2019-12-25**

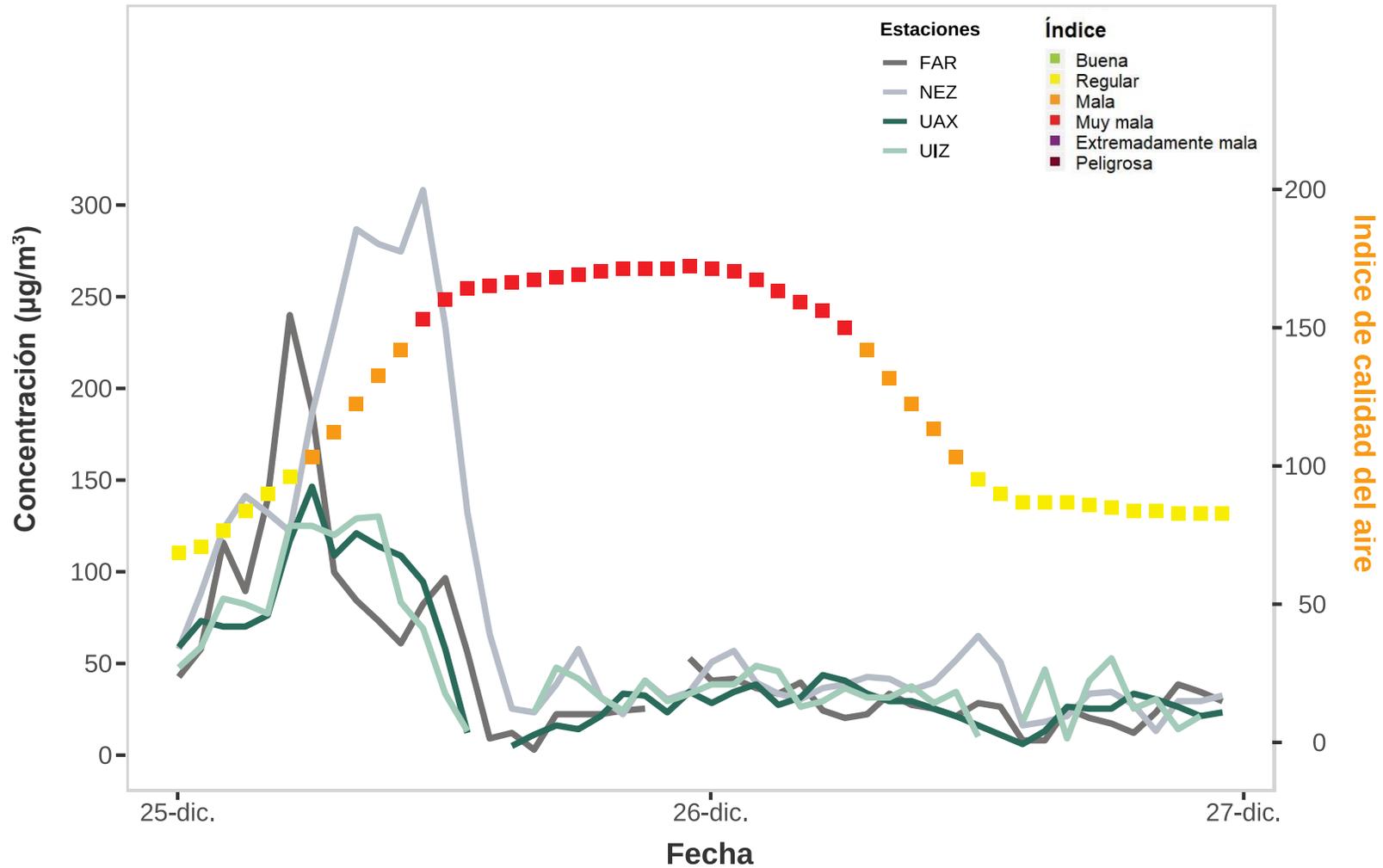


Figura 4.19. Comportamiento de PM_{2.5} del 25 al 26 de diciembre. Las líneas corresponden a las cuatro estaciones con los máximos de concentración horaria, los cuadros de colores representan el valor y categoría del índice de calidad del aire con base en el promedio móvil de 24 h.

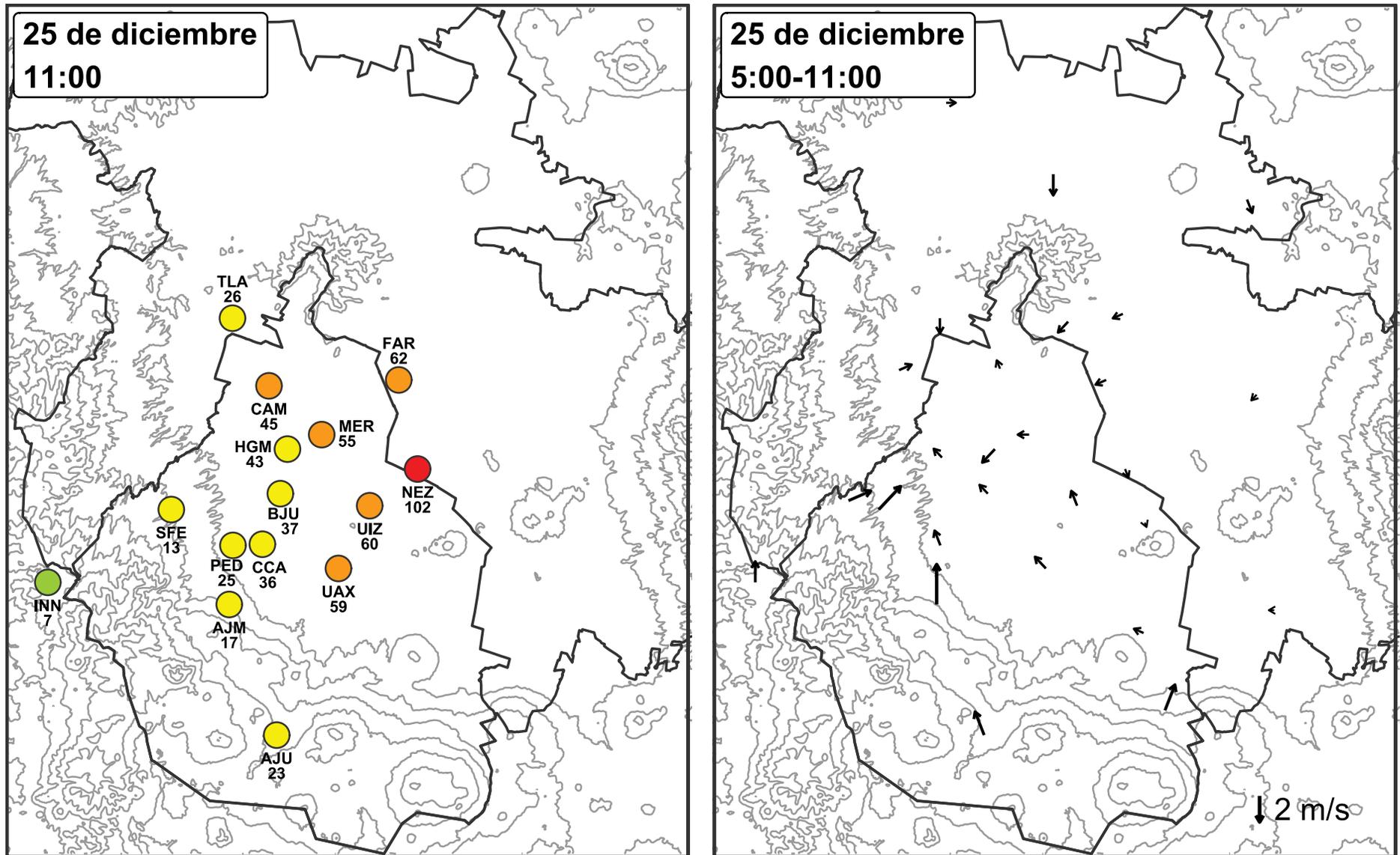


Figura 4.20. Índice de calidad del aire para PM_{2.5} y campos de viento durante el 25 de diciembre. En el mapa de la izquierda se presenta la categoría del índice (color) y la concentración promedio móvil de 24h en µg/m³ a las 11:00 h. El mapa de la derecha es el vector promedio de viento entre las 05:00 y 11:00 h.



CAPÍTULO 5

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y LLUVIA ÁCIDA

Los contaminantes atmosféricos tienen efectos negativos incluso en zonas alejadas del punto de emisión, un ejemplo es el fenómeno del depósito atmosférico, que se divide en depósito seco y húmedo. El **depósito seco** ocurre cuando hay poca humedad en el ambiente y los contaminantes descienden casi con las mismas características que cuando están en la atmósfera y el **depósito húmedo** es cuando hay alta humedad y los contaminantes gaseosos reaccionan para formar ácidos (Gérard, 2003) que después llegan a suelos y mantos acuíferos por medio de lluvia, granizo, nieve o neblina.

El agua de lluvia es ligeramente ácida con pH^{18} de 5.6, debido a reacciones en la atmósfera como la formación de ácido carbónico a partir de dióxido de carbono, CO_2 (Pallé, 2018). Las fuentes naturales de emisiones que contribuyen al pH de la lluvia son volcanes, incendios forestales y descargas eléctricas de tormentas. El pH es menor a 5.6 en presencia de ácido sulfúrico y nítrico, que tienen como precursores el SO_2 y los NO_x , respectivamente. El SO_2 se oxida en la atmósfera y forma trióxido de azufre (SO_3) que es muy reactivo con el agua y produce ácido sulfúrico (H_2SO_4). En el caso de los NO_x , es el NO_2 que reacciona para formar ácido nítrico, HNO_3 (Granados et al., 2010).

Ambos compuestos, H_2SO_4 y HNO_3 , son considerados ácidos fuertes ya que se disocian fácilmente en agua y liberan iones H^+ (Petrucci et al., 2003), esto reduce el pH hasta niveles nocivos. La lluvia ácida tiene efectos negativos en plantas y cultivos, lo cual ha sido estudiado en ambientes artificiales controlados donde comparan el riego con agua de lluvia acidificada y sin acidificar, los resultados indicaron que en el largo plazo las plantas sufren cambios en sus características anatómicas y bioquímicas, hay incremento del estrés oxidativo y disminución de fertilidad de las semillas; esto ocurre con pH igual o menor a 3 (Ramlall et al., 2014).

El efecto de la lluvia ácida puede variar con la especie y características de las plantas, en un estudio con lluvia ácida simulada (SAR, por sus siglas en inglés) se determinó que especies de árboles endémicos en la costa de Campeche son más sensibles a la lluvia ácida y podrían ser usados como bioindicadores de contaminación atmosférica (Cerón, 2009). La lluvia ácida también causa daños en la dinámica de los ecosistemas, acidifica cuerpos de agua, provoca pérdida de nutrientes del suelo y desgaste en estructuras urbanas. Por esto es importante monitorear la composición química de la lluvia y así analizar la contaminación por depósito atmosférico en zonas urbanas y reservas ecológicas.

¹⁸**Potencial de hidrógeno (pH):** medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa. La escala numérica del pH es 1 al 14 donde: los valores de 1 a 6 son ácidos, el 7 es neutro y del 8 al 14 son alcalinos. Se calcula con $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$; donde $[\text{H}^+]$ es la concentración de iones hidronio.

RESULTADOS DE LA CAMPAÑA REDDA 2019

En la Ciudad de México y su zona conurbada (ZMCM), la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) se encarga de monitorear los eventos de lluvia ácida y realizar su caracterización fisicoquímica. En el muestreo de depósito húmedo, el análisis químico y la interpretación de los datos, se utilizan las recomendaciones del Programa Nacional de Depósito Atmosférico (NADP, por sus siglas en inglés) de la US EPA y de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés).

El muestreo se realiza cada 7 días, de mayo a octubre, durante la temporada de lluvias en la ZMCM. En 2019, la mayoría de las estaciones cumplió con la suficiencia de información¹⁹, excepto en los sitios Cerro del Tepeyac (TEC) con 69%, Montecillo (MON) y Xalostoc (XAL) con 70%, así como Tlalnepantla (TLA) con 73%.

El promedio anual de precipitación acumulada en 2019 fue el valor más bajo de los últimos años con 762 mm de lluvia (2018: 961 mm de lluvia y 2017: 815 mm de lluvia). A nivel estación, los valores mínimos son Montecillo (MON) con 365 mm y CORENA (COR) con 435 mm. Los máximos de precipitación acumulada se registraron en Ex Convento Desierto de los Leones (EDL) con 1139 mm, Ajusco (AJU) con 1048 mm y San

Nicolás Totolapan (SNT) con 1040 m. Estas últimas tres estaciones son de tipo rural, están ubicadas en suelo de conservación y pertenecen a la región sur de la ZMCM; sin embargo, en los resultados generales, los sitios catalogados como rurales tuvieron un total acumulado de precipitación menor (5,446 mm) que en las estaciones ubicadas en zonas urbanas (5,808 mm). Es importante mencionar que, aunque se presentó un acumulado mayor en los meses de junio a octubre, en ocasiones no hubo muestra debido a falta de lluvia. Esto se refleja en la **Figura 5.1** como barras faltantes o espacios, en meses como mayo y octubre.

En la distribución espacial de la precipitación acumulada (**Figura 5.2**), de acuerdo con las mediciones de REDDA, se puede observar que la zona suroeste es la que registra mayor cantidad de precipitación mientras que los mínimos se encuentran en el sureste y norte, esto es consistente con la tendencia que se ha observado en la Ciudad de México en los años pasados.

¹⁹**Suficiencia:** cantidad necesaria de datos para considerar válido un indicador. La cantidad necesaria requiere al menos 75% de datos válidos, en el caso de la REDDA es al menos 75% de los muestreos semanales con volumen suficiente de lluvia (mm de lluvia) para determinar los iones

DEPÓSITO ATMOSFÉRICO

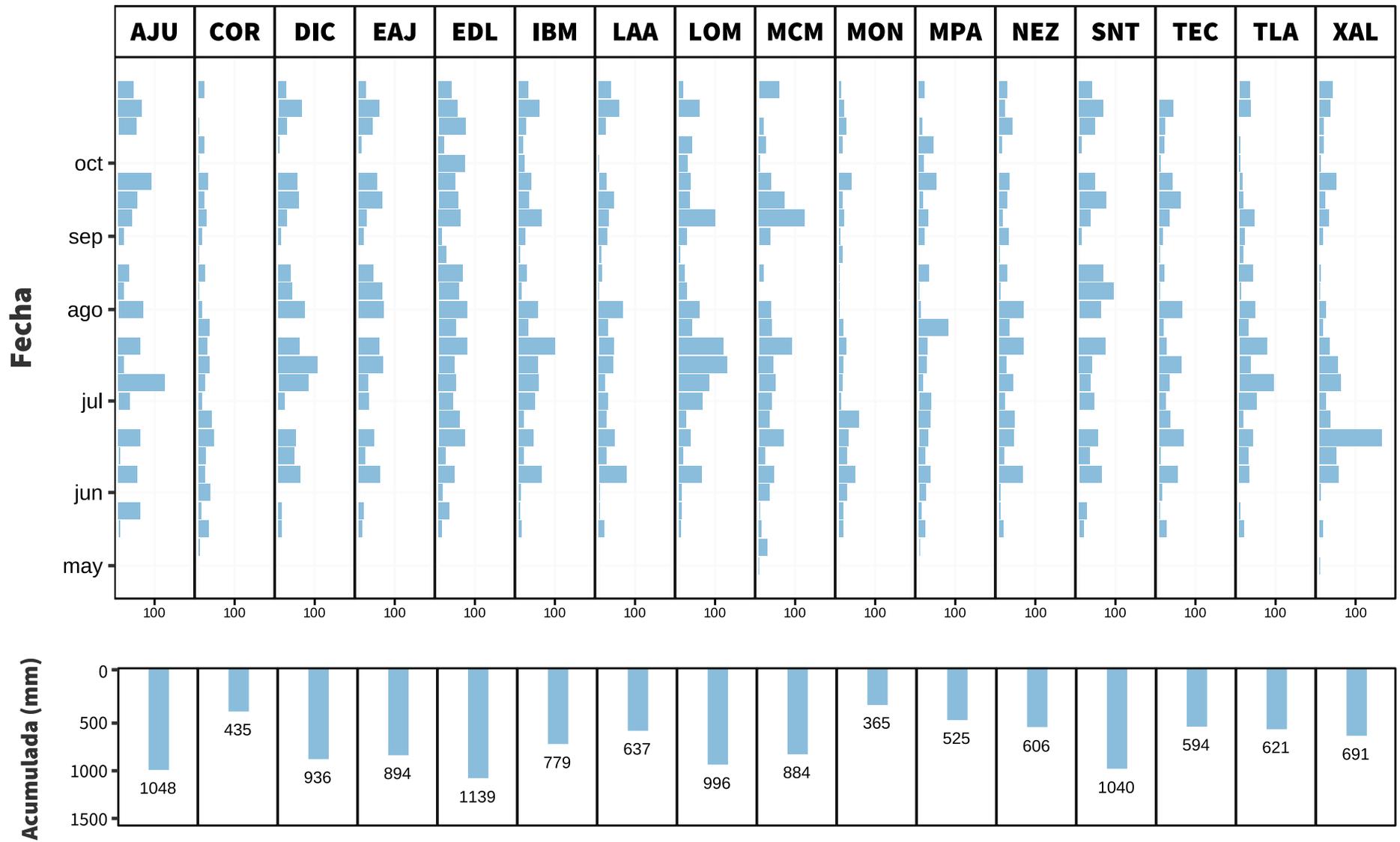


Figura 5.1. Precipitación acumulada semanal y total (mm) por estación de la REDDA durante la temporada de lluvia 2019

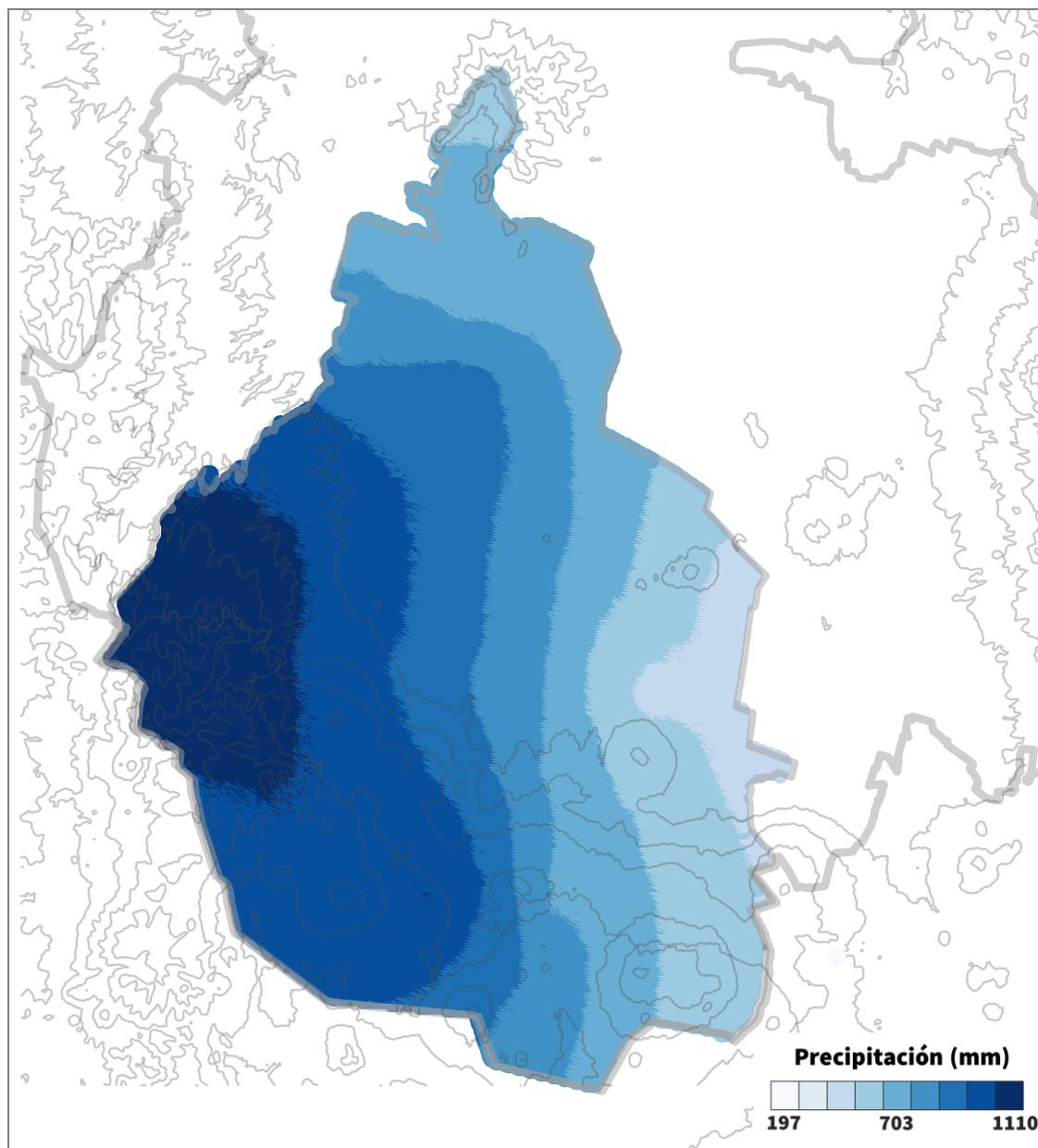


Figura 5.2. Distribución espacial de la lluvia en la Ciudad de México durante 2019.

La acidez de la lluvia se determina mediante la escala de pH (de 1 a 14) donde los valores por debajo del 5.6 se les considerarán ácidos, mientras que superiores a este valor serán de lluvia no ácida.

En total se obtuvieron 363 muestras, de las cuales 67 se consideraron ácidas, ya que registraron pH menor a 5.6, esta cantidad de muestras representa el 18.5% del total en la campaña 2019. El sitio Xalostoc (XAL) fue la única estación sin muestras ácidas, su pH mínimo fue de 6.1; por el contrario, Ajusco (AJU) obtuvo el máximo de muestras ácidas con un total de 10, en las cuales se registró un pH mínimo de 4.2 y este valor corresponde a la muestra más ácida reportada durante toda la campaña 2019.

En la distribución espacial de muestras ácidas, se observó que la mayoría se registró en la zona sur (**Figura 5.3**), lo cual ha sido constante a través de los años, especialmente en las estaciones que se encuentran en el suelo de conservación de la ZMCM como son Ex Convento Desierto de los Leones (EDL), San Nicolás Totolapan (SNT), Eco guardas Ajusco (EAJ), Milpa Alta (MPA) y Ajusco (AJU).

Se clasificaron y analizaron las muestras de REDDA de acuerdo con la escala de pH (**Figura 5.4**) y se encontró que, en 2019, el número de muestras con pH superior a 5.6 se incrementó en comparación con los años 2017 y 2018. Esto se observa especialmente en las muestras que están en el intervalo de pH de 7 – 7.9, ya que en 2019 representaron el 15 %, lo cual triplica lo observado en 2017 (4.9 %).

Es importante mencionar que en 2019 también se encontraron valores de pH iguales o mayores a 8, lo cual no se había registrado en años anteriores. Esto puede ser indicio de que las muestras presentan valores cada vez más alcalinos, lo cual también tiene consecuencias en los nutrientes del suelo y el rendimiento de cultivos (Day et al, 1993).

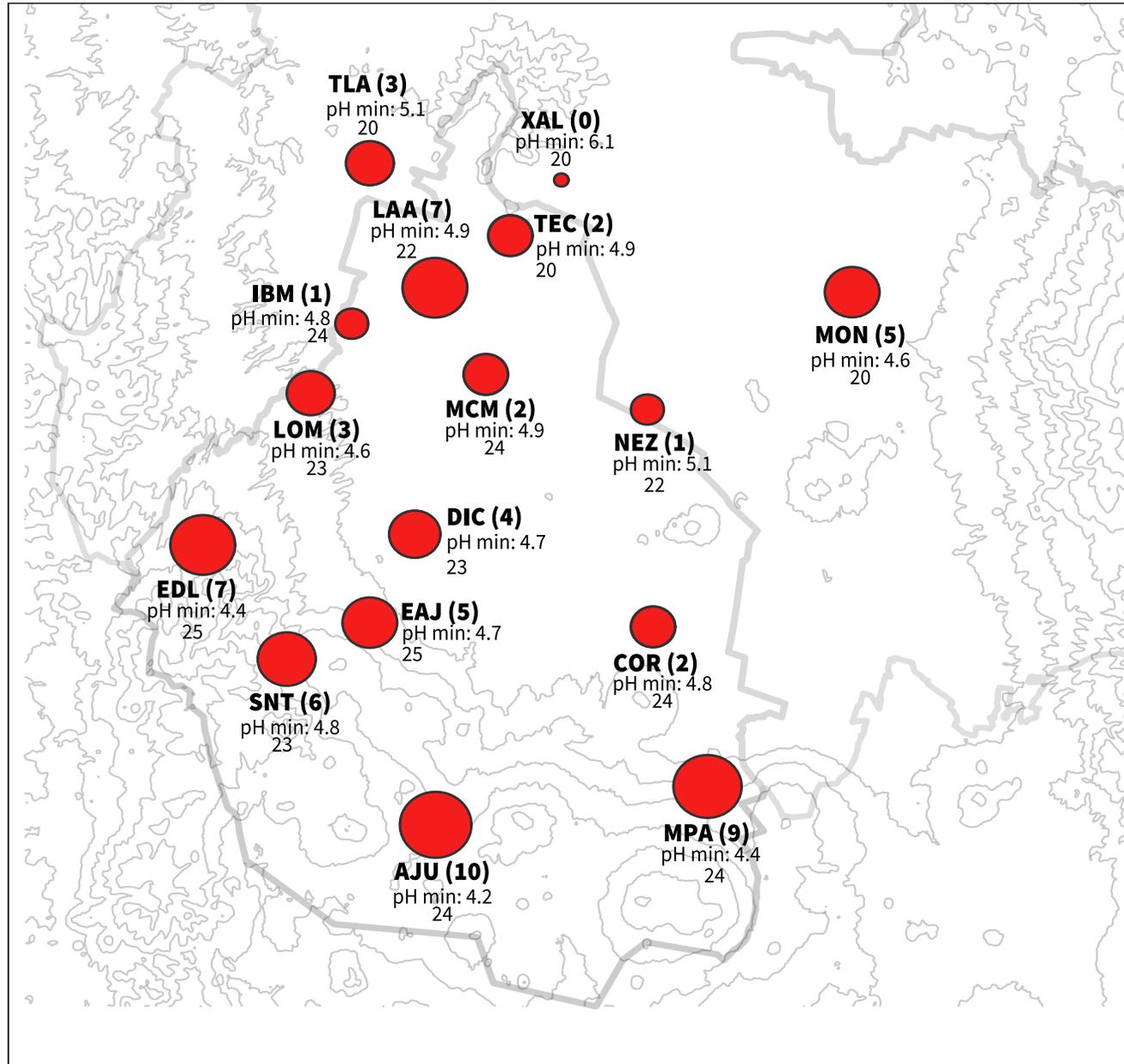


Figura 5.3. Muestras ácidas por estación de REDDA (en negrita). El tamaño del círculo representa el número de muestras ácidas (pH < 5.6). El pH min, es el valor mínimo de pH obtenido y debajo se encuentra el total de muestras por sitio.

Porcentaje de muestras (%)

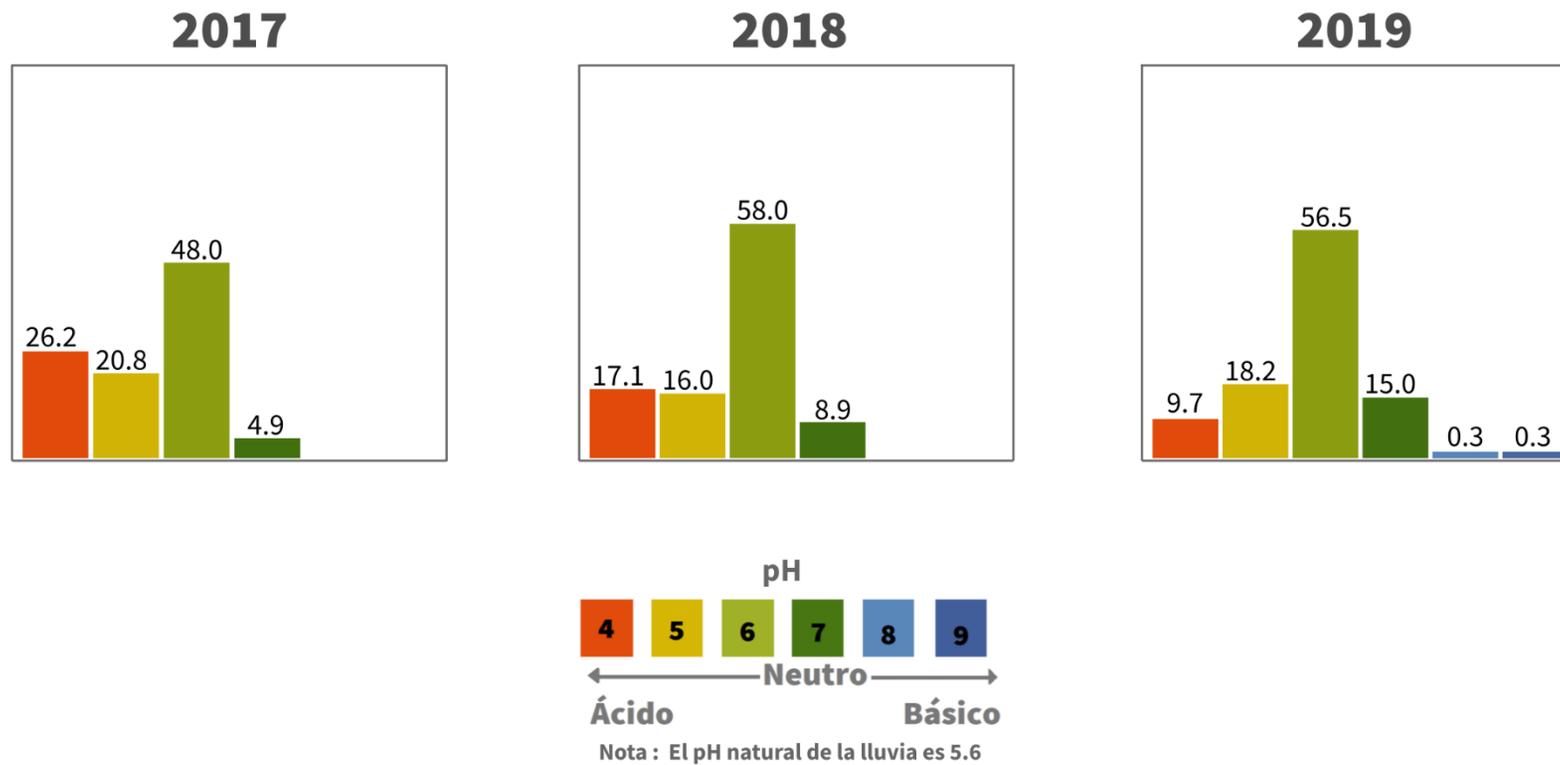


Figura 5.4. Comparativo de la proporción de datos contabilizados para cada valor en la escala de pH (2017 al 2019).

La distribución general de los iones más abundantes en las muestras fue similar que en años pasados. En 2019, el amonio (NH_4^+) se encontró en mayor cantidad y representó el 35.4% del total, seguido del sulfato (SO_4^{2-}) y calcio (Ca^{2+}) con 22.6 y 19%, respectivamente. Por lo tanto, el 77% del total de iones en las muestras analizadas son estas 3 especies (**Figura 5.5**).

A nivel estación, la distribución registró la misma tendencia que los porcentajes anuales mencionados anteriormente, en cuanto al orden de abundancia por especie iónica. Sin embargo, en el análisis por sitio se observó que el amonio (NH_4^+) representó el 40% en Montecillo (MON), mientras que en San Nicolás Totolapan (SNT) y Nezahualcóyotl (NEZ) fue el 39 % y 38 %, respectivamente. En Cerro del Tepeyac (TEC) se registró mayor cantidad de calcio (Ca^{2+}) en sus muestreos con el 28%. En el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) se observa que el sodio (Na^+) representa el 3% del total, mientras que, en Milpa Alta (MPA) y Ajusco (AJU), el cloruro (Cl^-) tiene mayor presencia que en el resto de las estaciones con el 4% y 3%, respectivamente. En Tlalnepantla (TLA) ocurre algo similar con el sulfato (SO_4^{2-}) que representó el 26% de los iones en la estación, lo cual se puede relacionar con la ubicación de la estación que se encuentra en la trayectoria de las emisiones de la zona industrial, la termoeléctrica y refinería de Tula, en Hidalgo.

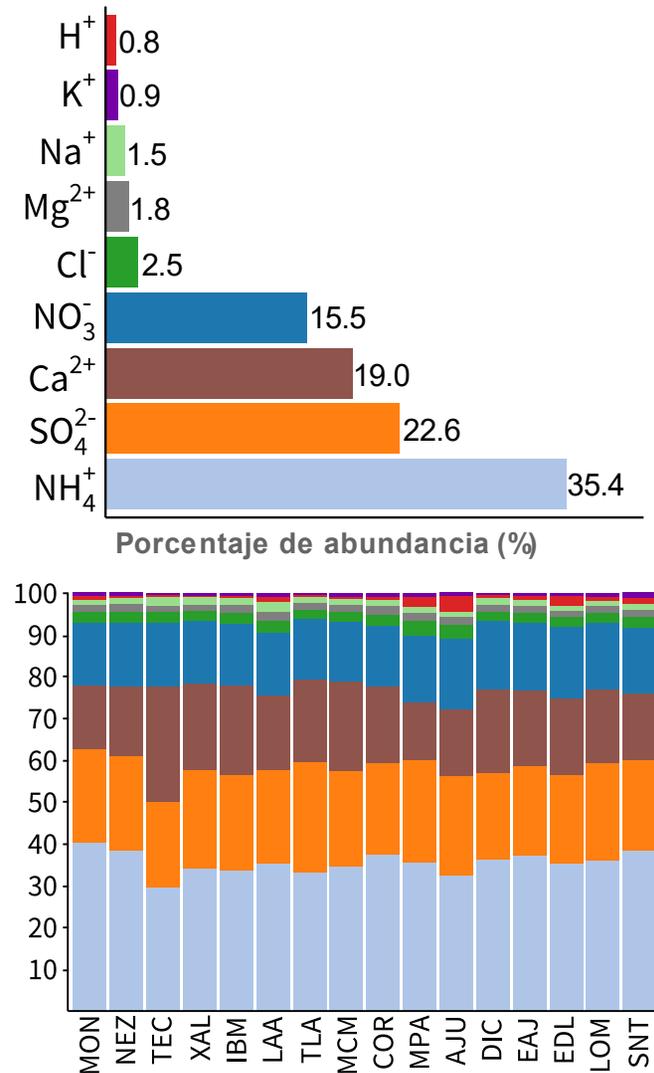


Figura 5.5. Abundancia de iones en campaña REDDA 2019. Porcentaje general de iones (arriba). Distribución de iones por estación (abajo). El cálculo fue con la concentración en $\mu\text{eq/L}$.

Durante la temporada de lluvia 2019, el SO_4^{2-} registró el mayor depósito ya que obtuvo un acumulado promedio de 20.5 kilogramos por hectárea (kg/ha), con un máximo de 28.2 kg/ha en el sitio Lomas (LOM) y un mínimo de 10.8 kg/ha en Montecillo (MON). El nitrato (NO_3^-), obtuvo un promedio de 18 kg/ha, con un máximo de 27.9 kg/ha en LOM y un mínimo de 8.9 kg/ha en MON. El NH_4^+ presentó un comportamiento similar, con su máximo en LOM y el mínimo en MON, con un promedio anual de 12.1 kg/ha (**Tabla 5.1**).

Los máximos por estación de los iones H^+ , magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+), sodio (Na^+), cloruro (Cl^-) y calcio (Ca^{2+}), se presentaron en sitios como Ajusco (AJU), Diconsa (DIC), San Nicolás Totolapan (SNT), Legaria (IBM) y Museo de la Ciudad de México (MCM). El mínimo del H^+ corresponde a Xalostoc (XAL), mientras que Montecillo (MON) es la estación que registró los mínimos de depósito en todos los iones (**Figura 5.6**). Se observa que algunos de los iones que confieren acidez a los suelos, como SO_4^{2-} , NO_3^- e H^+ , presentan mayor deposición en estaciones ubicadas en la zona noroeste, centro y suroeste. Las especies iónicas NH_4^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , los cuales proporcionan características básicas al suelo, se concentraron en estaciones del centro y noroeste de la ZMCM.

Tabla 5.1. Promedio de concentración y depósito acumulado por ion

ION	Concentración promedio ($\mu\text{eq/L}$)	Depósito acumulado promedio (kg/ha)
Hidronio (H^+)	2.98	0.02
Magnesio (Mg^{2+})	6.19	0.40
Potasio (K^+)	2.57	0.40
Sodio (Na^+)	4.82	0.50
Cloruro (Cl^-)	8.27	1.50
Calcio (Ca^{2+})	60.86	5.50
Amonio (NH_4^+)	113.04	12.10
Nitrato (NO_3^-)	50.36	18.00
Sulfato (SO_4^{2-})	72.27	20.50

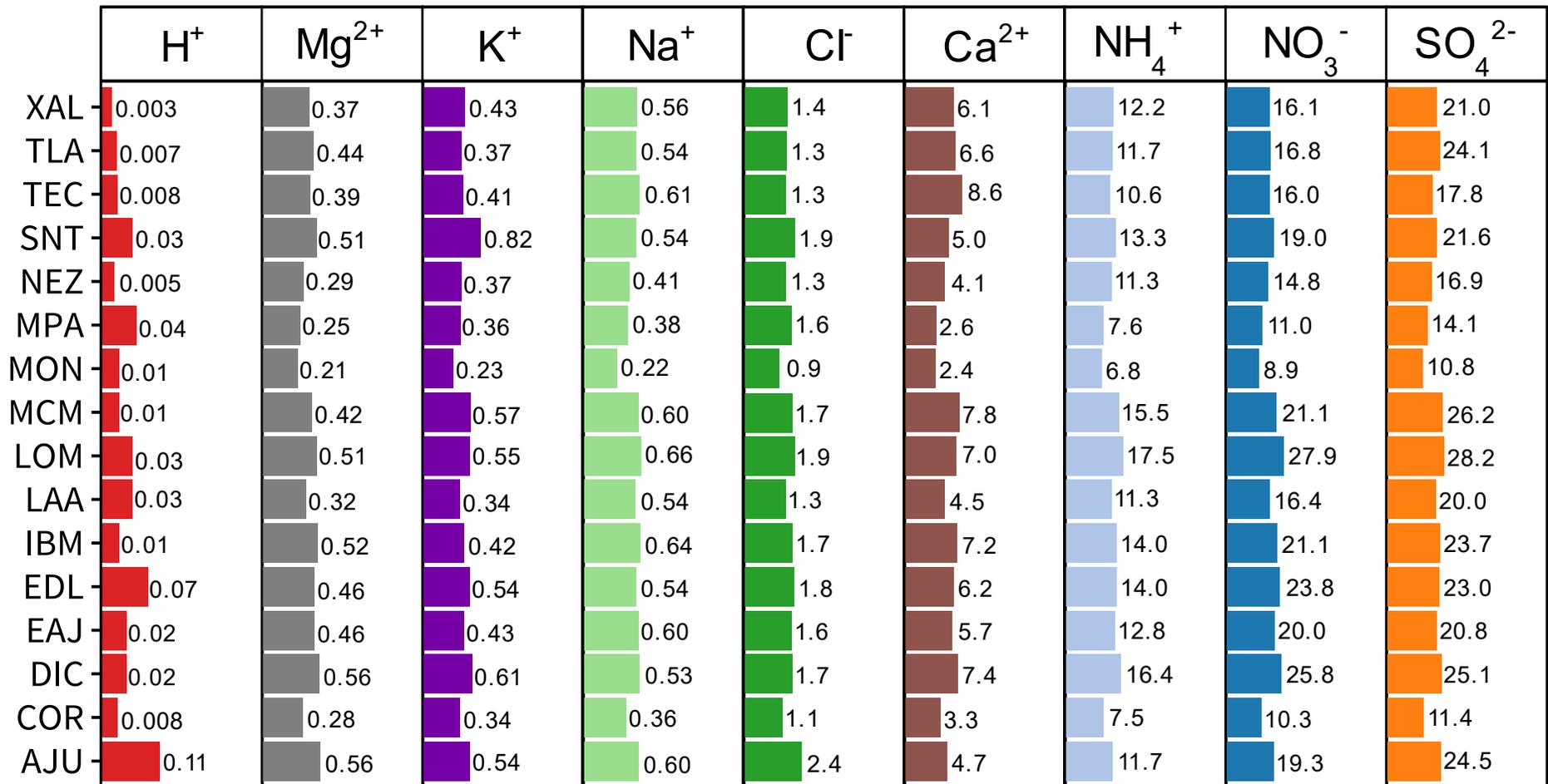


Figura 5.6. Depósito acumulado (kg/ha) por especie iónica y estación durante la campaña 2019.



CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE OZONO

Los modelos de calidad del aire son herramientas para la toma de decisiones, sirven para entender la contaminación atmosférica, estudiar el comportamiento de contaminantes (gases, partículas, etc.), estimar la contribución de fuentes de emisión, así como analizar fenómenos meteorológicos y su efecto en la calidad del aire. Estos modelos han sido creados para cumplir una variedad de objetivos como es el pronóstico de calidad del aire o la evaluación de escenarios de emisión.

Las entradas del modelo son el factor más relevante en el desempeño de cualquier pronóstico. Es importante entender las limitaciones que tienen todos los modelos de calidad del aire ya que en ningún caso podrían ser ideales o exactos por las siguientes razones (Karroum et al., 2020):

- a) Los datos observados son el resultado de la ocurrencia de un evento individual dentro de un conjunto infinito de casos que se dan en las mismas condiciones, mientras que un modelo sólo representa una estimación promedio y teórica del conjunto de posibles casos.
- b) La incertidumbre en las predicciones es consecuencia de las diferentes fuentes de datos, como la estimación de emisiones, turbulencias aleatorias en las capas atmosféricas, errores de datos de entrada o incertidumbre en la física del modelo, entre otros factores.

La evaluación de los modelos de calidad del aire con datos observados es para conocer la precisión del pronóstico en la zona de estudio y que sus resultados sean utilizados con confianza para la toma de decisiones en la gestión de la calidad del aire. En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación estadística de los máximos de ozono (O_3) obtenidos del sistema de pronóstico de calidad del aire de la Ciudad de México (AQFS-MexDF, SEDEMA, 2017), este sistema tiene tres modelos: meteorológico, emisiones y químico. El AQFS-MexDF inició en 2017 y sus resultados han sido utilizados en diversos análisis, así como en la aplicación de postprocesos estadísticos para mejorar las salidas del pronóstico. El análisis se realizó para la temporada de ozono 2019 (15/febrero a 15/junio), se usaron 12 estaciones para presentar, de manera resumida, los resultados de la evaluación con estadísticos discretos y algunos gráficos. Las estaciones son: Gustavo A. Madero (GAM), Los Laureles (LLA), Nezahualcóyotl (NEZ), FES Acatlán (FAC), Tultitlán (TLI), Benito Juárez (BJU), Merced (MER), Ajusco Medio (AJM), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Santa Fe (SFE), Santiago Acahualtepec (SAC) y Tláhuac (TAH); las cuales fueron elegidas con los criterios:

- a) Suficiencia $\geq 85\%$, para hacer una mejor comparación.
- b) Cada zona fue representada con dos o más estaciones.
- c) Los sitios deben estar distribuidos en la ZMCM.

EVALUACIÓN CON ESTADÍSTICOS DISCRETOS

Los estadísticos discretos se usan para determinar la cercanía entre los datos del modelo y observados. Para esto, se usan métricas que evalúan el pronóstico desde diferentes perspectivas. La **Tabla 6.1** contiene las métricas usadas en este capítulo con una breve explicación.

Una descripción más detallada de las métricas, del Diagrama de Taylor (Taylor, 2001) y el Diagrama de Cuantiles Condicionales, se encuentran en el Informe Anual de Calidad del Aire 2017 (SEDEMA, 2018).

Tabla 6.1. Estadísticos discretos para la evaluación del pronóstico de ozono.

Métrica	Descripción	Fórmula
Sesgo promedio (Mean Bias, MB)	Un MB positivo indica que el modelo sobrestima y si es negativo, subestima.	$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i - O_i$
Error absoluto promedio (Mean Gross Error, MGE)	Diferencia entre pronosticados y observados, independientemente si el modelo sobrestima o subestima.	$MGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i - O_i $
Raíz del error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE)	Indica la desviación estándar de los errores del modelo, mide la dispersión de residuos.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}$
Coefficiente de correlación (r)	Un $r \approx \pm 1$, indica mayor relación (positiva o negativa) entre las variables y un $r = 0$ no hay asociación. Identifica si el modelo sigue el patrón de observados.	$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i - \bar{M}}{\sigma_M} \right) \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\sigma_O} \right)$
Coefficiente de eficiencia (Coefficient of Efficiency, COE)	Mide rendimiento del modelo. $COE < 0$ no es buen pronóstico. $0 > COE \leq 0.5$ sigue el patrón, pero no la magnitud. $0.5 > COE \leq 1$ es buen pronóstico.	$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n M_i - O_i }{\sum_{i=1}^n O_i - \bar{O} }$
Índice de coincidencia (Index of Agreement, IOA; Willmott et al., 2012)	Tiene valores de -1 a 1, $IOA \approx 1$ es un modelo con buen desempeño; $IOA = 0$ el error es igual a la desviación observada, $IOA = -1$ es una mala estimación.	$IOA = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n M_i - O_i }{c \sum_{i=1}^n O_i - \bar{O} } & \text{Cuando } \sum_{i=1}^n M_i - O_i \leq c \sum_{i=1}^n O_i - \bar{O} \\ \frac{c \sum_{i=1}^n O_i - \bar{O} }{\sum_{i=1}^n M_i - O_i } - 1 & \text{Cuando } \sum_{i=1}^n M_i - O_i > c \sum_{i=1}^n O_i - \bar{O} \end{cases}$

EVALUACIÓN CATEGÓRICA

Se realiza con una gráfica de dispersión observados vs. pronósticos dividida en cuatro cuadrantes delimitados por el umbral de 95 ppb de acuerdo con la NOM de O₃ vigente en 2019. En la **Tabla 6.2** están las métricas utilizadas y que se obtienen con los conteos de observaciones-pronósticos en cada cuadrante. En el Informe Anual de Calidad del Aire 2017 (SEDEMA, 2018) se hace la descripción detallada de métricas para la evaluación categórica. Las características de cada cuadrante de la gráfica de dispersión se describen a continuación:

- Los **falsos positivos (sobrestimaciones)** son datos pronosticados > 95 ppb cuando las observaciones fueron menores al umbral (cuadrante a).
- Los **verdaderos positivos** son pronósticos correctos de valores > 95 ppb (cuadrante b).
- Los **verdaderos negativos** son pronósticos correctos de valores ≤ 95 ppb (cuadrante c).
- Los **falsos negativos (subestimaciones)** son datos pronosticados ≤ 95 ppb cuando las observaciones fueron mayores al umbral (cuadrante d).

Tabla 6.2. Estadísticos categóricos para la evaluación del pronóstico de ozono.

Métrica	Descripción	Fórmula
Exactitud (Accuracy, A)	Porcentaje de pronosticados correctamente que están por debajo y arriba del umbral.	$A = \left(\frac{b + c}{a + b + c + d} \right) \times 100\%$
Precisión (Precision, Pr)	Porcentaje de pronosticados correctamente con valores > 95 ppb. Es la probabilidad de acierto del modelo para datos mayores al umbral.	$Pr = \left(\frac{b}{a + b} \right) \times 100\%$
Sesgo (Bias, B)	Grado de subestimación o sobrestimación del pronóstico. B = 1 sin sesgo, B < 1 subestimación y B > 1 sobrestimación.	$B = \left(\frac{a + b}{b + d} \right)$
Índice de falsa alarma (False Alarm Ratio, FAR)	Porcentaje de pronósticos incorrectos con valores > 95 ppb. FAR = 0 sin falsas alarmas y en FAR = 100% todos los pronósticos > 95 ppb, no fueron observados.	$FAR = \left(\frac{a}{a + b} \right) \times 100\%$
Índice de éxito crítico (Critical Success Index, CSI)	Grado de buen pronóstico para datos > 95 ppb con respecto al total de excedencias, pronosticadas y observadas	$CSI = \left(\frac{b}{a + b + d} \right) \times 100\%$
Tasa de aciertos (Hit Rate, H)	Porcentaje de observaciones > 95 ppb que se pronosticaron correctamente . Es la probabilidad de que una observación > 95 ppb, sea pronosticada.	$H = \left(\frac{b}{b + d} \right) \times 100\%$

RESULTADOS

En la temporada de ozono del 2019, el 75% de los días (91 de 121) presentaron máximos superiores a 95 ppb, dentro de los cuales ocurrieron tres eventos de contingencia (FI >154 ppb), del 30 al 31 de marzo, del 10 al 11 y 16 al 18 de abril; los cuales se describen en el **capítulo 4** de este informe.

En la serie de tiempo de la **Figura 6.1** se presenta el máximo diario registrado en la ZMCM, así como su pronóstico de 24 y 48 h, se puede notar que el modelo es capaz de reproducir y seguir el patrón de la concentración máxima diaria en la mayoría de los casos. En algunos días que se alcanzaron niveles de contingencia, el modelo pronosticó valores cercanos, por ejemplo, en las contingencias de finales de marzo y mediados de abril, en esta última, el pronóstico de 24 h (línea azul) indicó que se superaría el umbral de la FI desde el 14 de abril; sin embargo, en otros casos como la contingencia del 10 de abril, los máximos del 26 al 29 de abril, 20 al 22 de mayo y 6 al 8 de junio, el **modelo subestimó** considerablemente; esto puede ocurrir cuando el modelo meteorológico simula vientos más intensos que los observados. Por el contrario, en los días que el **pronóstico sobrestimó**, puede ser debido a que, durante el día hubo formación de nubosidad que el modelo no alcanzó a detectar, por lo tanto, estimó valores más altos de ozono.

Para determinar la habilidad del AQFS-Mex para predecir el pico de ozono, primero se calculó la diferencia porcentual entre el **máximo diario** observado y pronosticado, con la siguiente fórmula:

$$Diferencia = \left(\frac{máx. obs. - máx. modelo}{máx. obs.} \right) \times 100\%$$

El resultado de esta diferencia, se utilizó para calificar el pronóstico de cada día con los siguientes criterios:

- **Bueno** si la diferencia entre máximos es menor o igual al $\pm 10\%$
- **Regular** si la diferencia está entre ± 11 y $\pm 20\%$
- **Malo** si la diferencia es mayor al $\pm 20\%$.

Posteriormente, se suman aquellos días en los que el pronóstico fue bueno y regular, esto se divide entre el total de días simulados para obtener el **rendimiento general del modelo** en el año. En 2019, el rendimiento fue del 71% para el pronóstico de 24 h y 70% para el de 48 h (**Tabla 6.3**), esto indica un desempeño óptimo para simular los máximos de O₃ en el periodo de estudio.

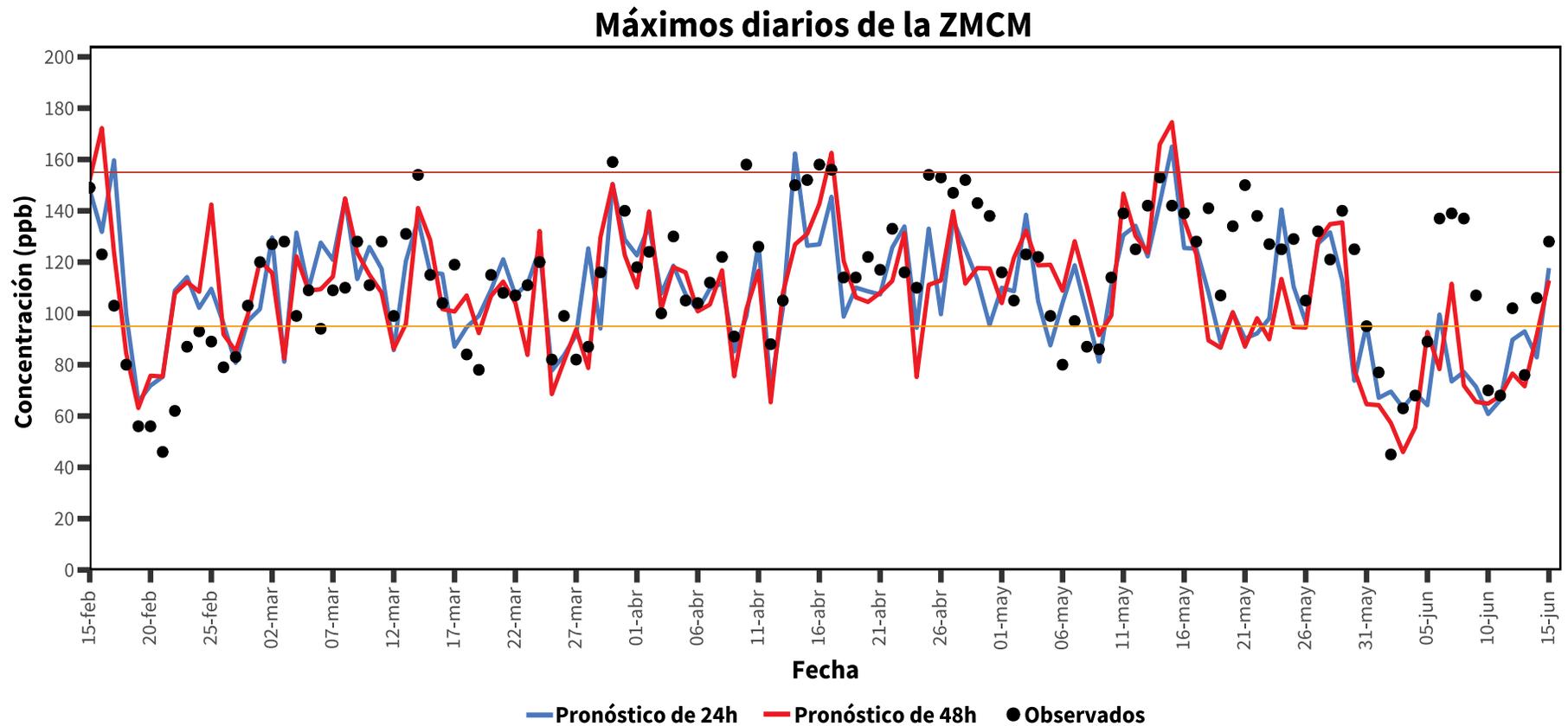


Figura 6.1. Máximo diario de la concentración horaria de O₃, su pronóstico de 24 y 48 h (15/febrero al 15/ junio). La línea amarilla es la NOM (95 ppb) y la línea roja es la Fase I de contingencia (154 ppb).

Tabla 6.3. Conteo de días en cada categoría del pronóstico y rendimiento general del modelo.

Pronóstico	Total	Buenos	Regulares	Malos	% (Buenos + Regulares)
24 h	121	51	35	35	71%
48 h	121	50	35	36	70%

En los resultados generales de estadísticos discretos para cada pronóstico (**Tabla 6.4**) se observa un sesgo promedio (MB) positivo, esto indica que tienden a sobrestimar. El coeficiente de correlación (r) fue similar con valores relativamente altos ($r_{24h} = 0.81$ y $r_{48h} = 0.80$), por lo que existe una buena asociación entre observados y pronósticos.

Tabla 6.4. Estadísticos discretos **generales** en pronósticos de 24 y 48 h.

Pronóstico	MB	MGE	RMSE	r	COE	IOA
24 h	1.90	13.3	17.3	0.81	0.45	0.72
48 h	2.04	13.6	17.7	0.80	0.43	0.71

En los estadísticos para cada uno de los sitios seleccionados (**Tabla 6.5**) se obtuvo un MB positivo en 7 de 12 estaciones, esto confirma la tendencia a sobrestimar, el MB máximo fue en SFE (11.3 ppb) y el mínimo en FAC con -4.9 ppb lo que indica subestimación del máximo, estas diferencias pueden relacionarse con incertidumbre de las emisiones de precursores y del modelo meteorológico que simula el patrón de vientos. El coeficiente de correlación (r), fue relativamente alto con resultados de 0.76 a 0.85, lo que denota una buena asociación entre observaciones y pronosticados, principalmente en sitios al norte y centro. El Coeficiente de Eficiencia (COE) fue menor o igual a 0.5, solamente en GAM (0.51) y MER (0.52) fue ligeramente superior; esto indica que el modelo identificó los patrones de variabilidad diurna y, en algunas estaciones, la concentración máxima. Los mínimos

del COE fueron en AJM (0.36) y SFE (0.21), por lo que tuvieron un menor desempeño para reproducir la variabilidad diurna. Los resultados del índice de coincidencia (IOA) fueron similares, con valores de 0.61 a 0.76, esto significa que el modelo simuló correctamente la concentración máxima y patrones de O_3 en todos los sitios, incluyendo las que tuvieron un COE bajo.

En el perfil horario general (**Figura 6.2**), se observa que se reproduce el patrón entre las 09:00 y las 20:00 h; sin embargo, de las 21:00 a las 08:00 h (periodo nocturno) sobrestimó la concentración en ambos pronósticos. Las sobrestimaciones nocturnas se han reportado en estudios previos de modelación en la ZMVM (Li et al., 2011) y pueden ser causadas por las dificultades de los modelos, meteorológico y químico, para simular la evolución de la PBL nocturna (Lei et al., 2007; Fast et al., 2009) y la eficiencia de la dispersión de los contaminantes (Zhang et al., 2009), lo que implica una dificultad para simular la destrucción nocturna del O_3 por medio de NO (Mao et al., 2010). A nivel estación (**Figura 6.3**) el modelo simula la variabilidad diurna con mejor concordancia en BJU, AJM y CCA. En GAM, NEZ, TLI, FAC y MER, subestimó en las horas del máximo, mientras que en SFE sobrestimó en la mayoría de horas. En el pronóstico operativo, estos errores sistemáticos se reducen con el filtro de Kalman, que es un postproceso estadístico que ajusta y corrige la salida del modelo con observaciones.

EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE OZONO

Tabla 6.5. Estadísticos discretos para el pronóstico de 24 h por estación.

Zona	Estación	MB	MGE	RMSE	r	COE	IOA
NE	GAM	-4.0	13.7	18.2	0.85	0.51	0.76
	LLA	8.5	13.7	17.3	0.82	0.39	0.69
	NEZ	-1.7	13.3	17.2	0.83	0.48	0.74
NO	FAC	-4.9	12.3	16.3	0.84	0.47	0.73
	TLI	4.3	14.1	17.8	0.84	0.46	0.73
CE	BJU	0.01	12.4	16.5	0.83	0.48	0.74
	MER	-3.5	12.6	17.2	0.85	0.52	0.76
SO	AJM	3.1	12.2	15.8	0.78	0.36	0.68
	CCA	2.8	12.6	16.7	0.83	0.47	0.74
	SFE	11.3	15.6	19.7	0.76	0.21	0.61
SE	SAC	2.5	12.7	16.4	0.81	0.44	0.72
	TAH	3.8	14.5	18.2	0.79	0.40	0.70

Zonas: NE – Noreste, NO – Noroeste, CE – Centro, SO – Suroeste, SE – Sureste.

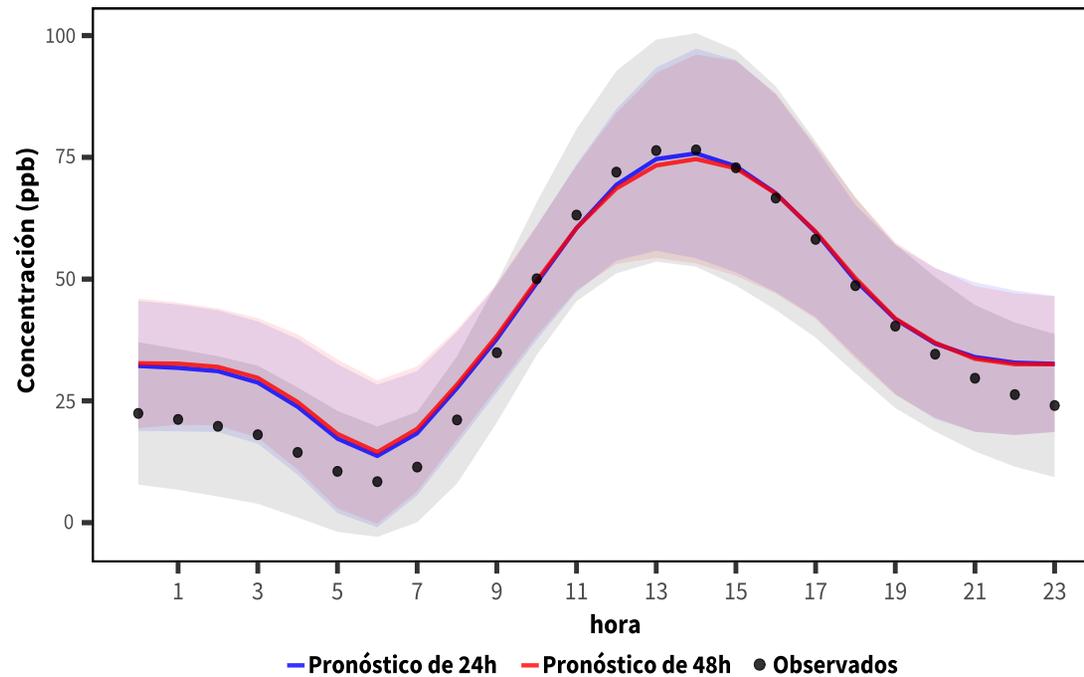


Figura 6.2. Perfil horario de O₃ general (observado y pronóstico) con todas las estaciones del SIMAT. El sombreado corresponde a la desviación estándar.

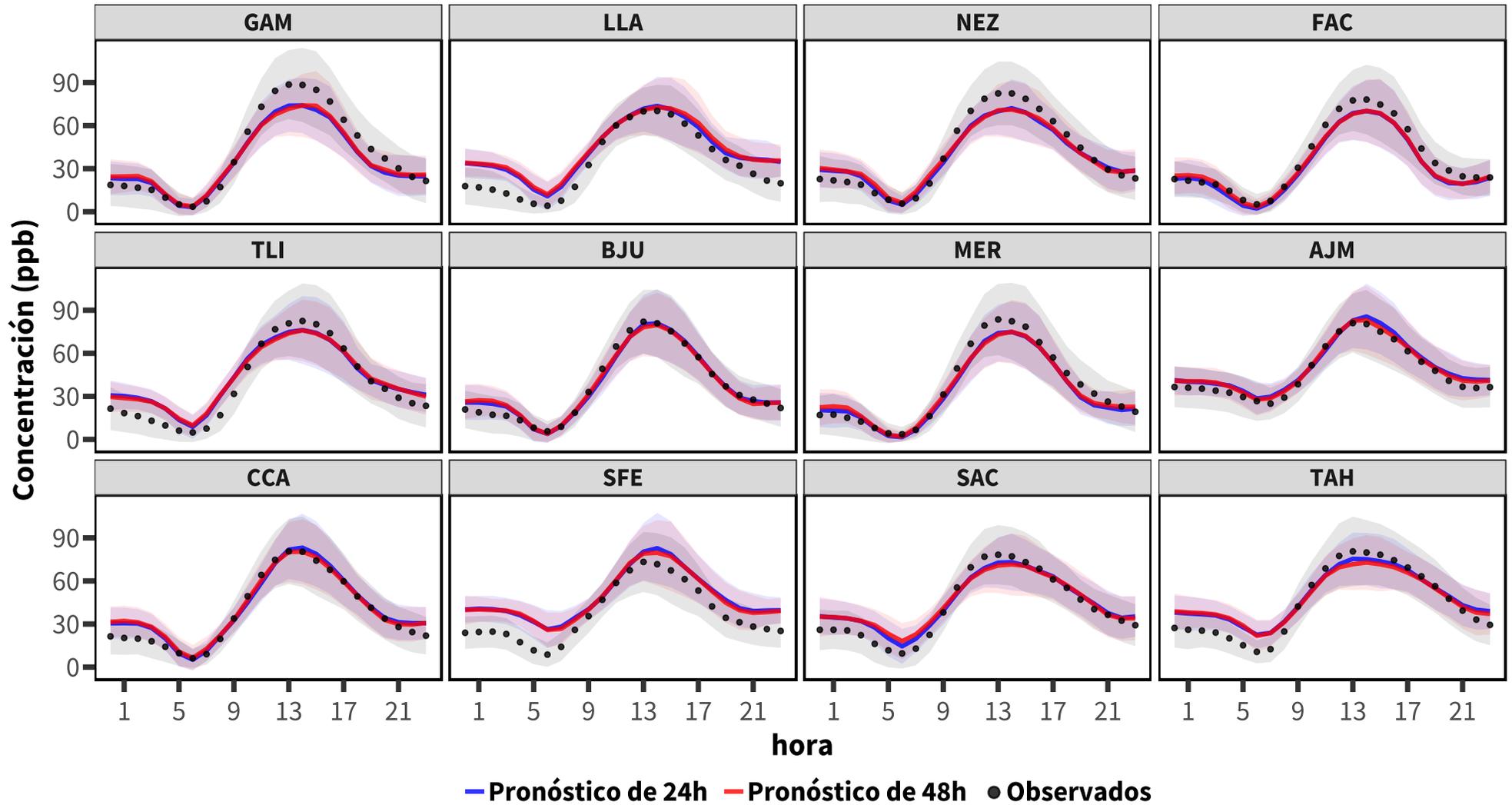


Figura 6.3. Perfil horario de O₃ (observado y pronosticado) por sitio seleccionado. El sombreado corresponde a la desviación estándar.

En los diagramas de Taylor para los pronósticos de 24 y 48 h (**Figura 6.4**), en los que se resume la cercanía entre el modelo y observados con la visualización gráfica del coeficiente de correlación de Pearson, RMSE y desviación estándar (Taylor, 2001), hay algunas estaciones que se localizan cerca de la línea negra punteada de los valores observados, mientras que los puntos que están por encima de esta línea corresponden a los 7 sitios donde el modelo sobrestimó el máximo de ozono (MB positivo). En ambos diagramas de los pronósticos, se observa que las estaciones analizadas están muy cercanas entre sí, lo cual indica que obtuvieron valores similares en las métricas del RMSE y del coeficiente de correlación (r) que se representa en la escala radial del diagrama, esto confirma que el modelo tuvo un desempeño óptimo en ambos pronósticos durante la temporada de ozono 2019.

En los diagramas de cuantiles condicionales de la **Figura 6.5** se observa que, en la mayoría de las estaciones de monitoreo la mediana del pronóstico (línea roja) siguió la tendencia del modelo perfecto (línea azul), especialmente para los máximos de O_3 menores o iguales a 100 ppb, además las áreas de los percentiles 25/75 y 10/90, no están muy extendidas o dispersas, lo cual es indicativo de un desempeño óptimo del modelo.

En algunas estaciones como SFE, LLA y TLI, el modelo sobrestimó los datos de concentración observada menores a 50 ppb, ya que la mediana del pronóstico (línea roja) tiende a alejarse de la mediana del modelo perfecto (línea azul) hacia los pronósticos más altos, es decir, hacia la derecha. Es importante mencionar que estos datos de menor concentración corresponden al periodo nocturno, esto se puede observar en los perfiles horarios ya que ambos pronósticos tienden a sobrestimar en dicho periodo del día. La mayor concordancia de observados con el modelo se obtuvo en valores medios y aumenta su variabilidad en los datos más altos de concentración, esto también es consistente con el patrón de los perfiles horarios.

En sitios como FAC, TLI, GAM al norte y MER en el centro, su mediana sigue la tendencia del modelo perfecto en datos de concentración superiores a 120 ppb; sin embargo, en GAM, NEZ y FAC, se subestiman los valores intermedios, ya que su mediana está ligeramente desviada hacia la izquierda de la del modelo perfecto. En SFE, al suroeste, tuvo un menor desempeño debido a que su mediana está alejada del modelo ideal en la mayoría de los valores.

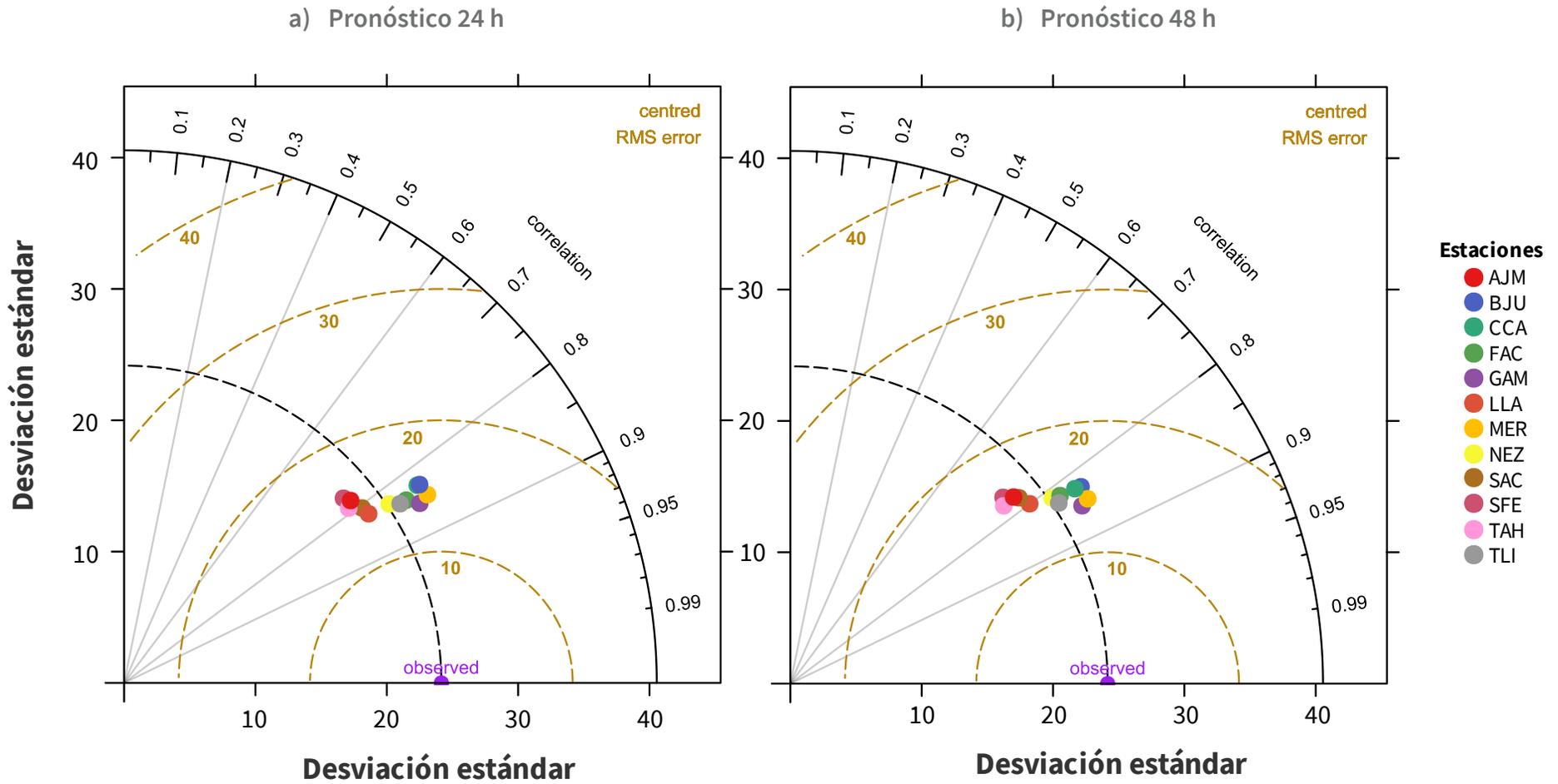
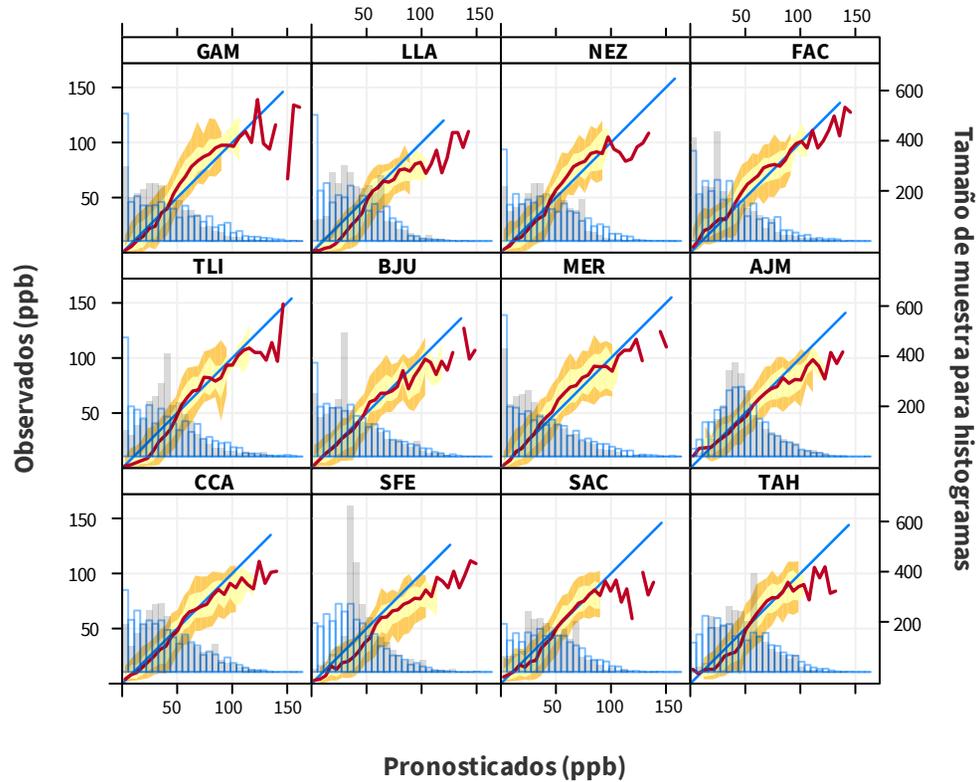


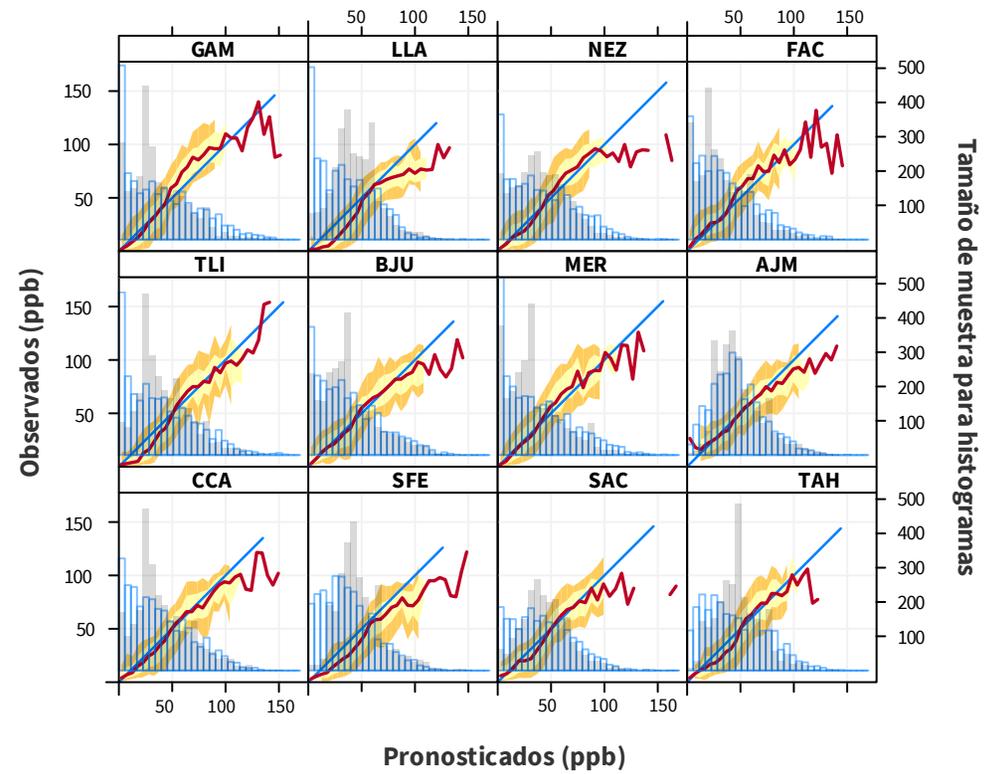
Figura 6.4. Diagrama de Taylor en los 12 sitios seleccionados. a) Pronóstico de 24 h. b) Pronóstico 48 h.

EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE OZONO

a) Pronóstico 24 h



b) Pronóstico 48 h



Percentil 25/75
 Percentil 10/90
 Mediana
 Modelo perfecto

Percentil 25/75
 Percentil 10/90
 Mediana
 Modelo perfecto

Figura 6.5. Diagrama de cuantiles condicionales en los sitios seleccionados. **a)** Pronóstico de 24 h. **b)** Pronóstico 48 h. Los histogramas corresponden a la distribución de los observados en líneas azules y pronosticados en barras grises.

En la evaluación categórica, se realizaron los gráficos de dispersión de observados y pronósticos (24, 48 h) con los máximos diarios del 15 de febrero al 15 de junio en todas las estaciones de monitoreo del SIMAT (**Figura 6.6**) y los resultados de las métricas categóricas se encuentran en la **Tabla 6.6**.

El cálculo de la exactitud (A) obtuvo valores mayores al 70% para ambos pronósticos, lo cual indica que el sistema logra simular correctamente cuando hay datos observados mayores (cuadrante b) y menores a 95 ppb (cuadrante c), ya que esta métrica evalúa que tan cercano fue el pronóstico a la diagonal que representa el modelo ideal (línea punteada).

La precisión (Pr) indica la probabilidad de que el pronóstico sea correcto en máximos superiores al umbral (cuadrante b) y en los resultados obtienen valores superiores al 85%. El sesgo (B) es cercano a 1 lo cual es indicativo de que el modelo tiene buen desempeño en los valores mayores a 95 ppb. La tasa de aciertos (H), que se interpreta como la probabilidad de que un máximo observado mayor a 95 ppb pueda ser pronosticado correctamente, obtuvo un 81.8% para el modelo de 24 h y 80.5% en el de 48 h.

En el caso del índice de falsa alarma (FAR) se obtuvieron valores bajos, con 14.3 % y 10.3 % para el pronóstico de 24 y 48 h, respectivamente. Esta métrica es de gran aporte ya que nos indica que hay pocos pronósticos incorrectos en datos superiores al umbral de la NOM.

Los valores del índice de éxito crítico (CSI) fueron del 72% para el pronóstico de 24 h y 74 % para de 48 h, estos resultados confirman el buen desempeño del modelo ya que el CSI califica si se tuvo un pronóstico óptimo de todas las excedencias (observadas y simuladas), es decir, todos los máximos de O₃ superiores a 95 ppb.

En términos generales, los resultados de la evaluación categórica confirman el desempeño óptimo del pronóstico en máximos de O₃ superiores a 95 ppb, lo cual es de gran importancia durante la temporada de ozono, ya que es cuando el contaminante presenta sus valores más altos y el pronóstico puede servir para alertar a la población sobre la superación del límite de la NOM en el día actual o siguiente.

EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE OZONO

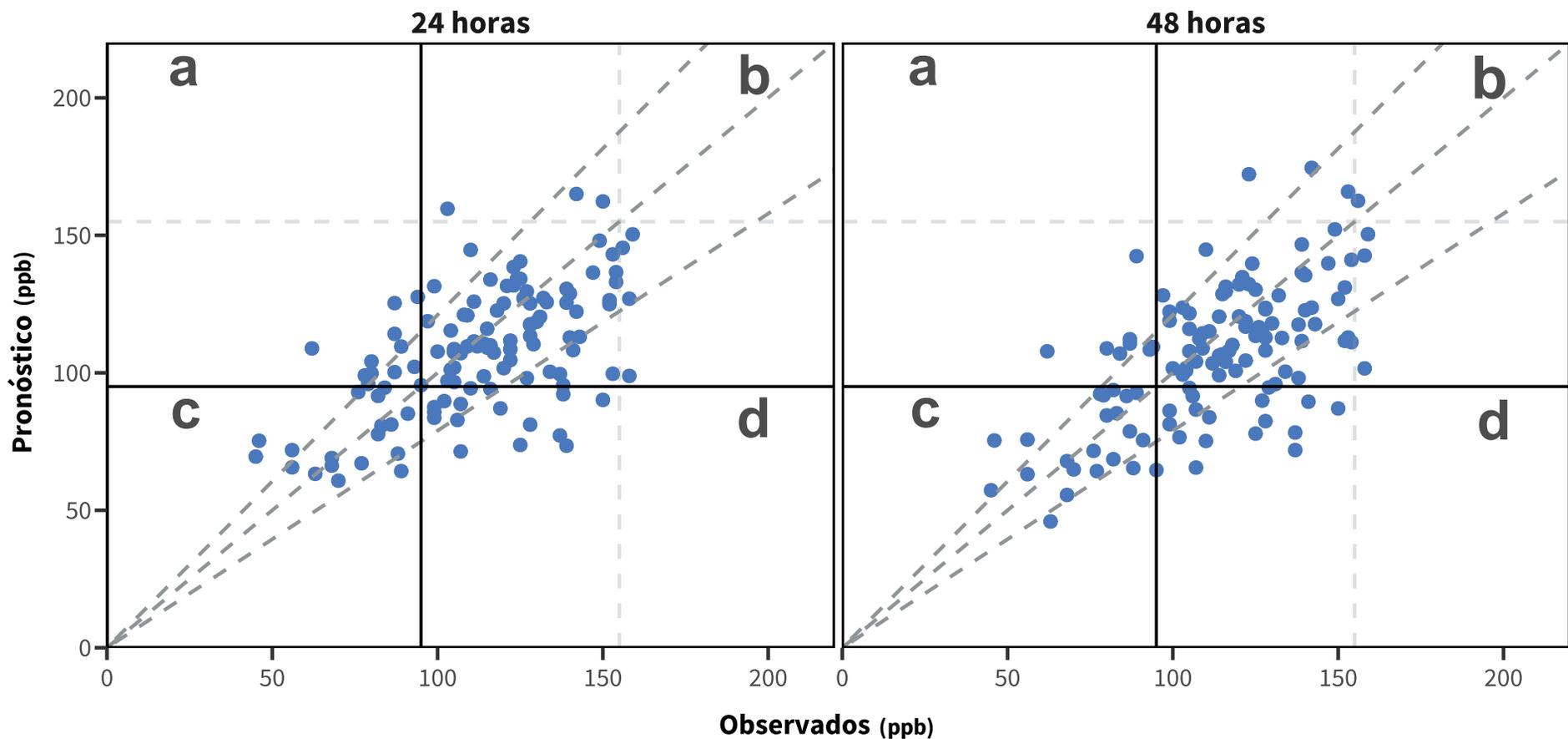


Figura 6.6. Gráfica de dispersión del máximo diario de O₃ observado y pronosticado para 24 h (derecha) y 48 h (izquierda). Los datos corresponden a todas las estaciones del SIMAT.

Tabla 6.6. Resumen de la estadística categórica en el pronóstico de 24h y 48 h del máximo diario de O₃.

Pronóstico	A (%)	Pr (%)	B	H (%)	FAR (%)	CSI (%)	a	b	c	d
24 h	76.3	85.7	0.95	81.8	14.3	72.0	12	72	18	16
48 h	78.7	89.7	0.90	80.5	10.3	73.7	8	70	22	17



CAPÍTULO 7

ESPECIACIÓN QUÍMICA HORARIA DE
AEROSOLES ORGÁNICOS ATMOSFÉRICOS

COMPUESTOS ORGÁNICOS MARCADORES DE LA QUEMA DE BIOMASA. RESULTADOS DE LA CAMPAÑA EQAA2.

Elaborado por: Amador-Muñoz Omar*, Martínez-Domínguez Y. Margarita, García-Ibarra Alberto, Lira-González Erika, Hernández-López A.-Enrique. *Grupo de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos, ICAyCC-UNAM, *oam@atmosfera.unam.mx*

INTRODUCCIÓN

El aerosol atmosférico es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en un gas (Baron y Willeke, 2001). La concentración en masa de las PM₁₀ y PM_{2.5} es la única variable regulada en la NOM-025-SSA1-2021. Sin embargo, los efectos en la salud humana dependen principalmente de su composición química (Cassee et al., 2013; Miller, 2020). Es fundamental incrementar el conocimiento sobre su composición para comprender mejor a las especies relacionadas con enfermedades específicas, como las de tipo crónico degenerativas. Además, proporciona información sobre el tipo de fuente de emisión y los procesos de transformación que conllevan a la formación de nuevas especies que integran parte de la masa regulada.

La combustión de biomasa incluye incendios forestales, tala y quemas controladas de bosques para uso agrícola, así como la combustión de residuos agrícolas al aire libre, el uso de

madera como combustible para cocinar y calefacción. Estos procesos son una fuente importante de contaminación del aire, de gases – incluidos los de efecto invernadero – y de partículas con una composición compleja principalmente a base de carbono. La quema de biomasa se presenta durante la mayor parte del año y se ha reportado que es una fuente importante de carbono negro y material orgánico con diferentes estados de oxidación (Diapouli et al., 2017; Achad et al., 2018).

De acuerdo con lo reportado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2022), durante el 2019 se registraron 7,410 incendios en el territorio nacional. El 67 % de ellos afectó superficie herbácea, el 28 % arbustiva y el 5 % arbórea. Además, el 60 % del total de incendios registrados en 2019 ocurrieron en 6 estados del país: Estado de México (20 %), Jalisco (11 %), Michoacán (10 %), Ciudad de México (10 %), Chiapas (5 %) y Guerrero (4 %).

La **Figura 7.1** muestra imágenes satelitales correspondientes a tres periodos de incendios de diferente intensidad que sucedieron durante la campaña de medición en 2019: 1 al 6 de mayo, 10 al 16 de mayo y del 24 de mayo al 1 de junio. Además de la información satelital, que es una herramienta clave para

ubicar y observar la trayectoria e intensidad de los incendios (Hawbaker et al., 2008), el conocimiento de la composición química del aerosol es fundamental para asignar correctamente las fuentes de emisión debido a la asociación de marcadores específicos con fuentes únicas. Por ello, se han investigado diversas especies marcadoras de quema de biomasa, por ejemplo: potasio (Hernández-López et al., 2020); compuestos fenólicos (Zhang et al., 2013a); reteno (Amador-Muñoz et al., 2020a) y frecuentemente, levoglucosan (Bhattarai et al., 2019), el cual se ha seleccionado debido a su abundancia y estabilidad en el ambiente. El levoglucosan y sus isómeros (manosa y galactosa) funcionan como marcadores de quema de biomasa, doméstica y de incendios, ya que se emiten por pirólisis de celulosa cuando la temperatura es mayor a 300°C.

Para determinar marcadores que integran el perfil de emisión de la quema de biomasa, se necesitan técnicas de análisis específicas. Debido a esto, se han desarrollado equipos como el Termodesorbedor de Aerosoles Orgánicos acoplado al Cromatógrafo de Gases – Espectrómetro de Masas (TAG-GC-MS, por sus siglas en inglés), que permite obtener información acerca de la composición química de las partículas en el aire de forma específica y, además, con alta resolución temporal. Este equipo fue adquirido por la SEDEMA en 2018 con el objetivo de caracterizar en tiempo casi real, la composición y las fuentes de emisión de las partículas en la Ciudad de

México. La información proporcionada por el TAG-GC-MS se puede usar para monitorear el comportamiento de diferentes compuestos de origen primario y secundario presentes en las partículas suspendidas del aerosol, así como su evolución y transporte (Amador-Muñoz et al., 2020a; Martínez-Domínguez, 2020; García-Ibarra, 2022).

Anteriormente se mencionó que durante mayo del 2019 ocurrieron diversos incendios en el país. Esto afectó la calidad del aire en la Ciudad de México y se registró un incremento importante de $PM_{2.5}$, aunado a los valores altos de ozono (**Figura 7.2**), esto detonó una contingencia extraordinaria por ambos contaminantes durante el 14 de mayo. La concentración de las $PM_{2.5}$ disminuyó a partir del día 17 y los máximos de O_3 fueron superiores al límite de la NOM para el indicador de una hora (95 ppb), lo que ocurre frecuentemente en la temporada de ozono.

Este capítulo describe los marcadores orgánicos asociados con la quema de biomasa y las emisiones vehiculares, así como resaltar la capacidad analítica que tiene el TAG-GC-MS para diferenciar las fuentes de emisión. Además, sobresale la importancia que tiene el conocer la composición molecular de las $PM_{2.5}$ durante la activación de contingencias ambientales bajo un escenario por quema de biomasa.

ESPECIACIÓN DEL AEROSOL ORGÁNICO ATMOSFÉRICO



Figura 7.1. Imágenes satelitales obtenidas de Terra (MOD14) y Aqua (MYD14) correspondientes a la quema de biomasa del 1 al 6 de mayo (izquierda), 10 al 16 de mayo (centro) y 24 de mayo al 1 de junio (derecha). Los puntos rojos son incendios acumulados. La resolución espacial y temporal del sensor es de 1 km y diaria, respectivamente. Fuente: “Información de incendios para el sistema de gestión de recursos” (FIRMS), NASA.

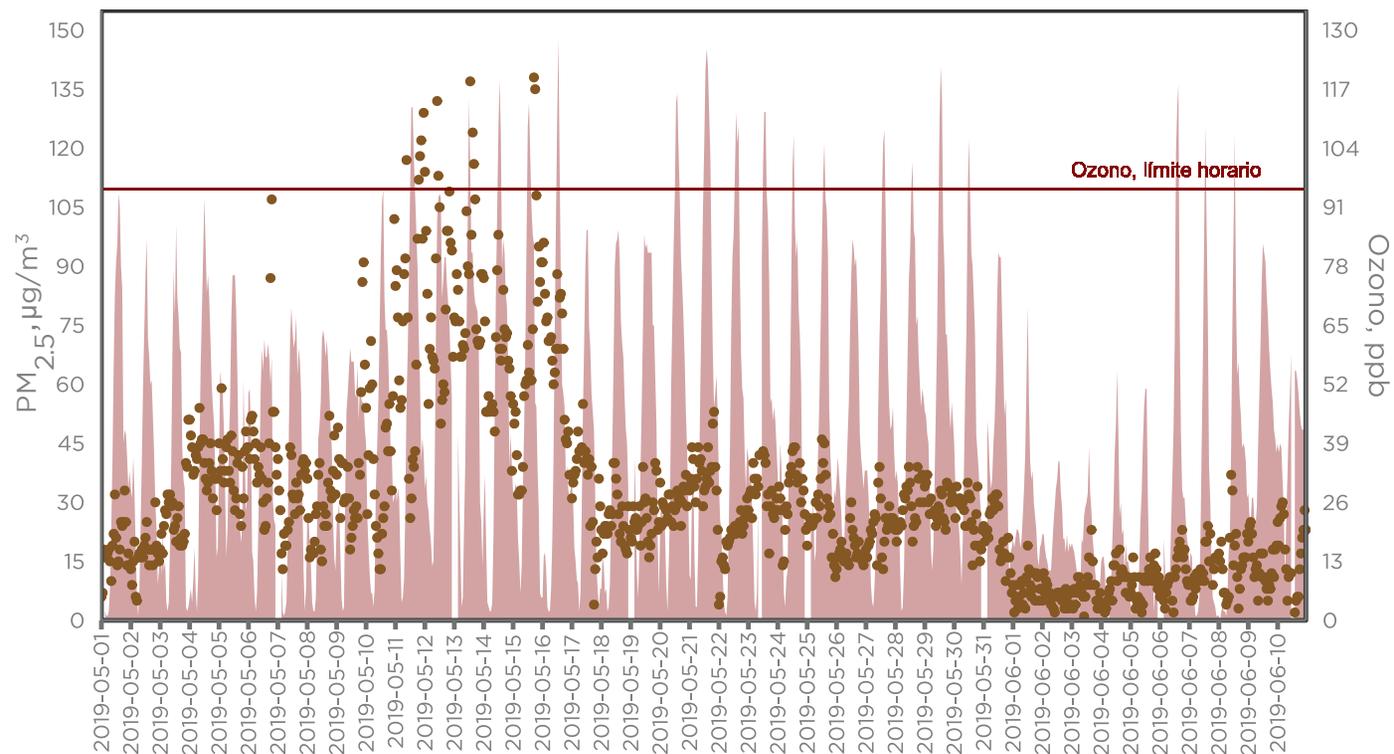


Figura 7.2. Serie de tiempo de $PM_{2.5}$ y O_3 con resolución horaria de las observaciones del 01/mayo al 10/junio de 2019. Datos de la estación de monitoreo CCA del SIMAT. El sombreado rojo corresponde a ozono y los círculos cafés son las $PM_{2.5}$

MÉTODO

La segunda campaña de medición para la Especiación Química de Aerosoles Atmosféricos (EQAA2) se llevó a cabo entre el 1 de mayo y el 10 junio del 2019. Este periodo corresponde a la época seca caliente, también llamada temporada de ozono. El muestreo de $PM_{2.5}$ se realizó con el TAG-GC-MS (Aerodyne TAG-005, Agilent Technologies 7890B/5977B) (Amador-Muñoz et al., 2020a).

Las mediciones se realizaron al suroeste de la Ciudad de México, en las instalaciones del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM (ICAyCC-UNAM), ubicado en 19°19'34.11" N, 99°10'33.89" W, considerado sitio receptor de contaminantes atmosféricos. Los muestreos de $PM_{2.5}$ fueron de 60 min a 10 L/min.

Los compuestos orgánicos en las partículas, se termodesorbieron y transfirieron a 300°C hacia una trampa de enfoque a 30°C (~16 min), para ser nuevamente termodesorbidos y transferidos a 300°C a la columna cromatográfica en el GC a 40°C (~10 min) (Martínez-Domínguez 2020). Durante la primera termodesorción, los compuestos con el grupo funcional -OH se derivatizaron con N-metil-N-(trimetilsilil) trifluoroacetamida (MSTFA).

La separación se llevó a cabo en una columna capilar DB35 ms de 60 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno, 0.25 μ m de grosor de fase. El tiempo del análisis cromatográfico y espectrométrico fue de 50 min. La ionización fue electrónica a 70 eV, en scan de 30-450 uma. La identificación de los compuestos orgánicos se realizó con los tiempos de retención relativos a seis hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) fluorados como estándares internos, mientras que, para la cuantificación, se utilizó el método de dilución isotópica con respecto a sus homólogos deuterados (Martínez-Domínguez 2020).

La integración de las señales fue con el software data analysis MSD Chemstation. El análisis estadístico se realizó con el paquete Statistica 13 (TIBCO Software Inc.). Las medianas se compararon con la prueba de Kruskal-Wallis (KW) y las correlaciones se evaluaron con el coeficiente de correlación de rangos ordenados de Spearman.

RESULTADOS

El levoglucosan es un azúcar anhidra producido por la pirólisis de la celulosa (Zhang et al., 2013b), el reteno (1-metil-7-isopropil fenantreno) es un HAP generado por la pirólisis de árboles de coníferas e indicador de incendios forestales (Ramdahl 1983), mientras que los HAPs de masa molecular ≥ 228 g/mol, como benzo[*a*]antraceno (BaA), criseno (Cris), indeno[123-*cd*]pireno (carcinogénicos para el humano [IARC 1983, 2010]) y el benzo[*ghi*]perileno (BghiP), estos se emiten en la Ciudad de México principalmente por la combustión incompleta de la gasolina quemada por los automotores (Amador-Muñoz et al., 2020b, 2022).

La **Figura 7.3** presenta la serie de tiempo de PM_{2.5}, levoglucosan, reteno y BaA. Las primeras tres variables mostraron incremento significativo (Mann-Whitney [MW], $p < 0.05$) a partir del 10 de mayo y su disminución después del 16 de mayo, sobre todo del reteno. Con estos marcadores fue posible precisar la agrupación de los tres periodos previamente observados con la información satelital (**Figura 7.1**) y el comportamiento de las PM_{2.5} (**Figura 7.2**): el primero comprendido entre 1 y el 9 de mayo, el segundo entre el 10 y el 16 de mayo y el tercero entre el 17 de mayo al 10 de junio.

Las concentraciones (medianas) de PM_{2.5}, levoglucosan y reteno del 10 al 16 de mayo fueron 2.3, 5.4 y 7.3 veces más abundantes con respecto al periodo del 1 al 9 de mayo, respectivamente (KW, $p < 0.05$). De manera similar, proporciones de 3.1, 3.8 y 9.2 veces, respectivamente (KW, $p < 0.05$) se observaron con respecto al periodo del 17 de mayo al 10 de junio (**Figura 7.4a**).

Esto significa que la cantidad de partículas introducidas al Valle por un evento de quema de biomasa fue al menos el doble de la concentración habitualmente observada en el suroeste de la ciudad, con máximos horarios de hasta ~ 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, las partículas generadas por este tipo de eventos contienen en su composición una carga adicional de compuestos que exacerban los efectos adversos en la salud (de Oliveira-Galvao et al., 2018; Karanasiou et al., 2021), decrementan la calidad del aire y alteran el forzamiento del clima (Laskin et al., 2015; Retama et al., 2022).

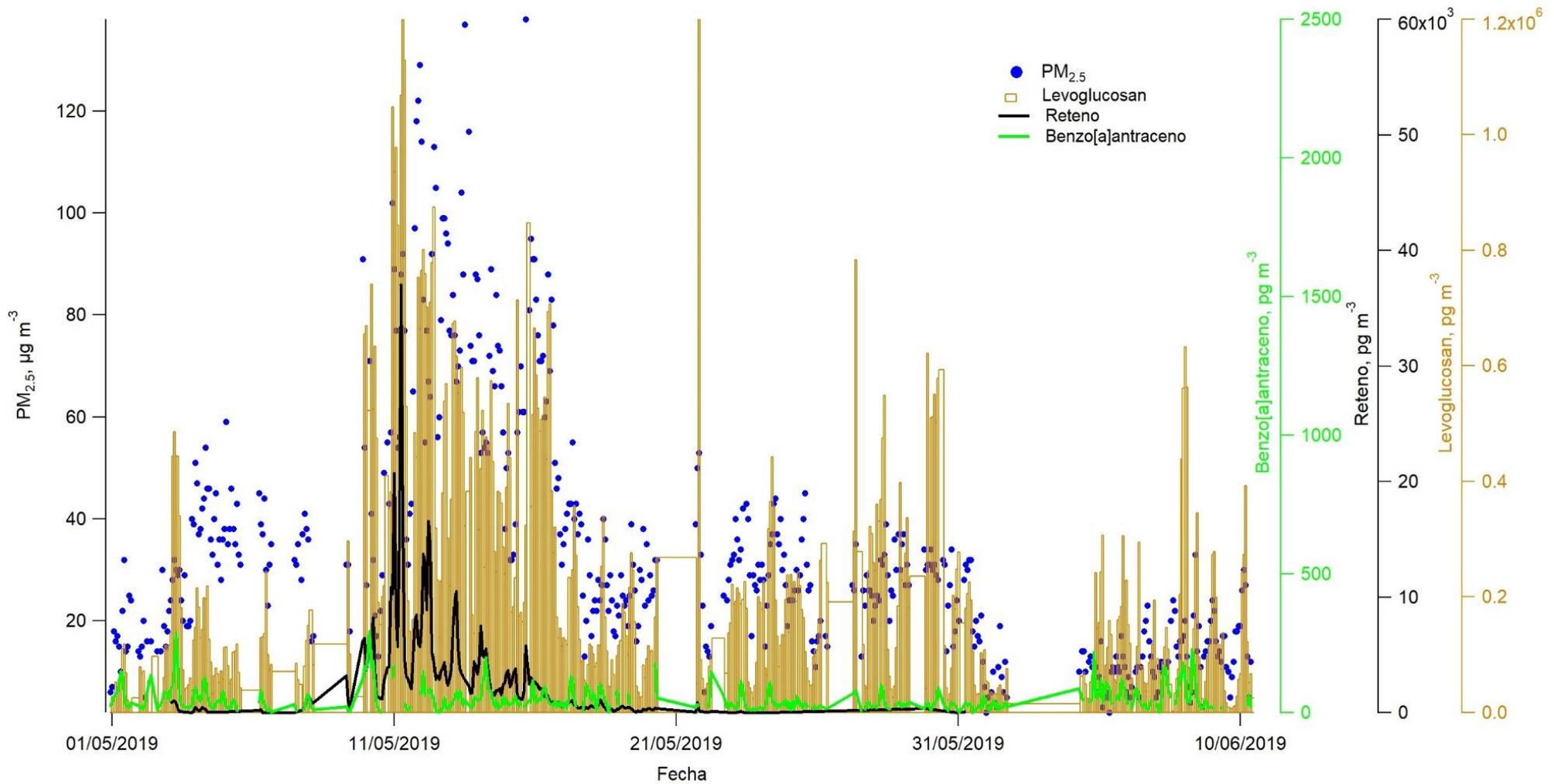


Figura 7.3. Serie de tiempo de PM_{2.5}, levoglucosan, reteno y benzo[a]antraceno.

ESPECIACIÓN DEL AEROSOL ORGÁNICO ATMOSFÉRICO

Por otra parte, las concentraciones (medianas) de BaA, Cris, I123cdP y BghiP en el periodo del 10 al 16 de mayo respecto del 1 al 9 de mayo, fueron similares (MW, $p > 0.05$), con tasas de 1.2, 1.2, 0.9 y 1.0, respectivamente (**Figura 7.4b**). Las mediciones del I123cdP y BghiP mostraron suficiencia de información hasta el 18 de mayo, por ello no se incluye el tercer periodo. Los resultados de las **Figuras 7.3 y 7.4** indican que la generación de partículas con HAP por la quema de

combustibles fósiles no contribuyó al incremento de las $PM_{2.5}$. Por lo tanto, se concluye que los vehículos no tuvieron un aporte significativo en las emisiones totales de quema de biomasa durante la contingencia extraordinaria por partículas y que totalmente fue provocada por los incendios forestales ocurridos en el periodo.

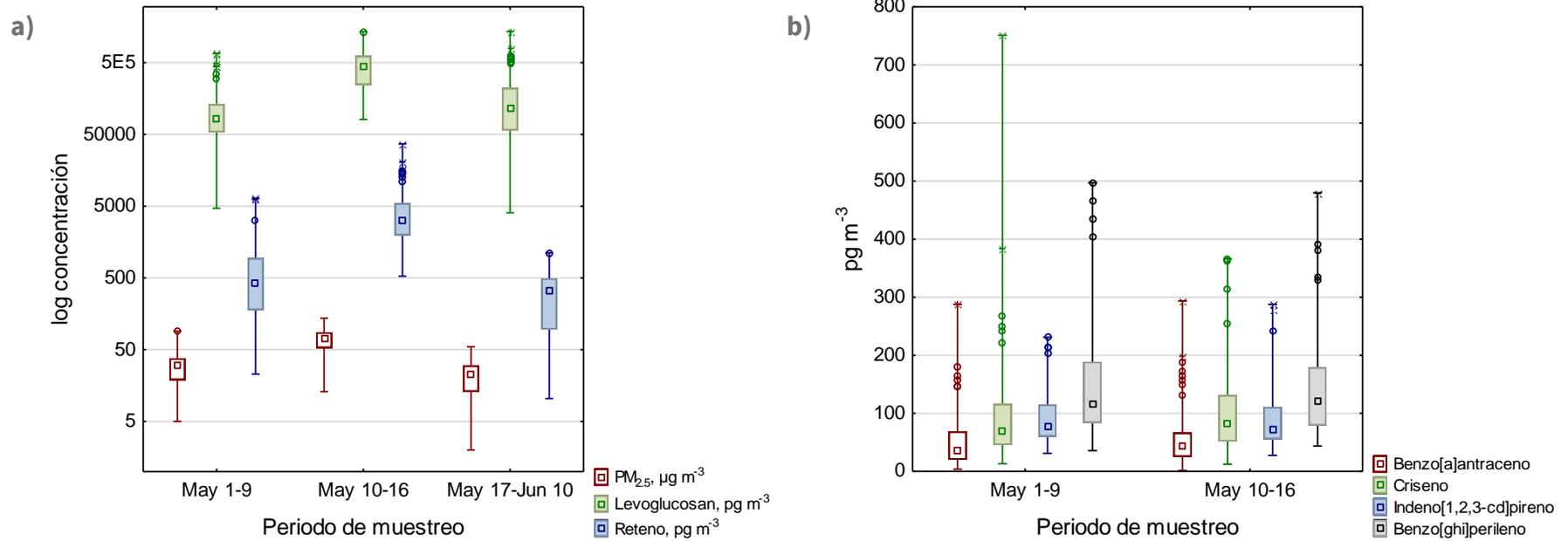
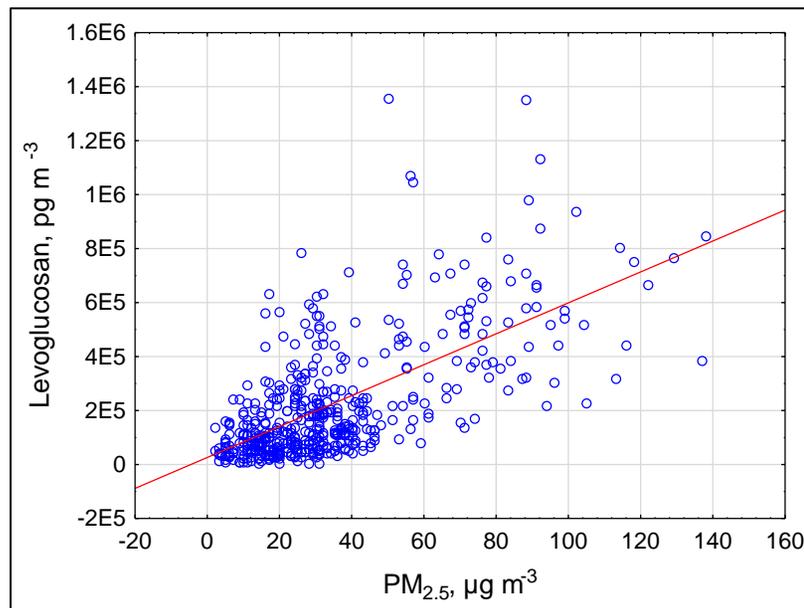


Figura 7.4. Comparación de medianas entre diferentes periodos con suficiencia de datos $>75\%$. a) $PM_{2.5}$ y marcadores de quema de biomasa en tres periodos. Medianas diferentes (KW, $p < 0.05$). b) HAP marcadores de la quema de gasolina por vehículos en dos periodos. Medianas no diferentes (KW, $p > 0.05$). Medianas – cuadros internos, 25-75% - cajas, min-max – barras, “outliers” – círculos, asteriscos – valores extremos.

Las gráficas de dispersión (**Figura 7.5**) muestran las correlaciones de Spearman entre $PM_{2.5}$ con levoglucosan ($R=0.75$, $p<0.05$) y reteno ($R=0.51$, $p<0.05$), en todo el periodo de muestreo. Esto confirma a la quema de biomasa como la fuente principal de $PM_{2.5}$. Por el contrario, las correlaciones entre $PM_{2.5}$ vs. BaA, Cris, I123cdP y BghiP, considerados marcadores de origen vehicular, fueron débiles ($R<0.4$). Lo que indica nuevamente, que las fuentes vehiculares no fueron la principal fuente de $PM_{2.5}$.

De hecho, los HAPs originados por la quema de combustibles fósiles de los vehículos, generalmente muestran correlaciones débiles con las $PM_{2.5}$, ya que éstos se generan localmente (Amador-Muñoz et al., 2020b, 2022), mientras que las $PM_{2.5}$ provienen principalmente de sitios más lejanos al suroeste de la Ciudad de México (Beristain-Montiel et al., 2020).

a)



b)

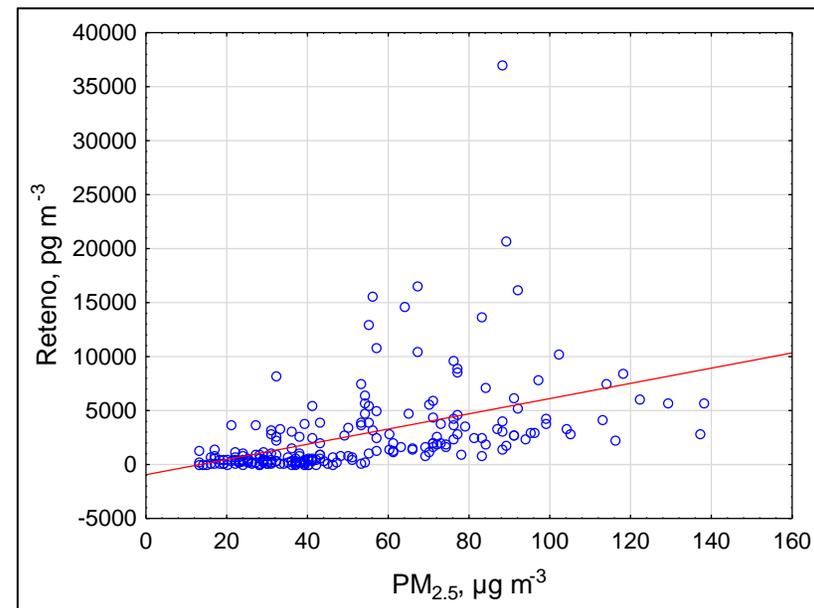


Figura 7.5. Correlación entre $PM_{2.5}$ y marcadores de quema de biomasa. Mediciones entre el 1° de mayo y el 10 de junio del 2019. Izquierda con levoglucosan, $R = 0.75$ ($p<0.05$). Derecha con reteno, $R = 0.51$ ($p<0.05$).

ESPECIACIÓN DEL AEROSOL ORGÁNICO ATMOSFÉRICO

Los resultados de las **Figuras 7.3 y 7.4** indican que la concentración de las $PM_{2.5}$ no depende de su composición química. Estas observaciones concuerdan con lo descrito recientemente por Amador-Muñoz et al., (2022) donde se demostró la reducción del $34 \pm 9 \%$ de HAPs cancerígenos en $PM_{2.5}$ al comparar las concentraciones de 2006 vs. 2016-2017, a pesar de que la concentración de $PM_{2.5}$ fue casi constante, con ligero decremento $\leq 5 \%$ en la misma década (SEDEMA, 2018). Sin embargo, tener la misma masa de partículas con un contenido menos tóxico, al menos por contaminantes orgánicos emitidos por fuentes vehiculares, es un logro que se debe reconocer debido a las correctas y eficientes políticas públicas implementadas en las últimas décadas.

El origen de los marcadores de quema de biomasa y de gasolina por los vehículos, se aprecia con mayor claridad en las gráficas polares bivariadas (GPB) de la **Figura 7.6**. Las concentraciones más altas de los marcadores de quema de biomasa, así como de $PM_{2.5}$ se observaron al suroeste del sitio de muestreo. La **Figura 4.12** en el capítulo 4 de este informe, confirma estos resultados, ya que las retro trayectorias de 48 h sugieren que las emisiones de los incendios provinieron del suroeste hacia el centro del país. La **Figura 7.6** también muestra que las concentraciones más abundantes de $PM_{2.5}$ se observaron cuando la velocidad del viento aumentó (Jones et al., 2010), lo que indica su transporte hacia el valle.

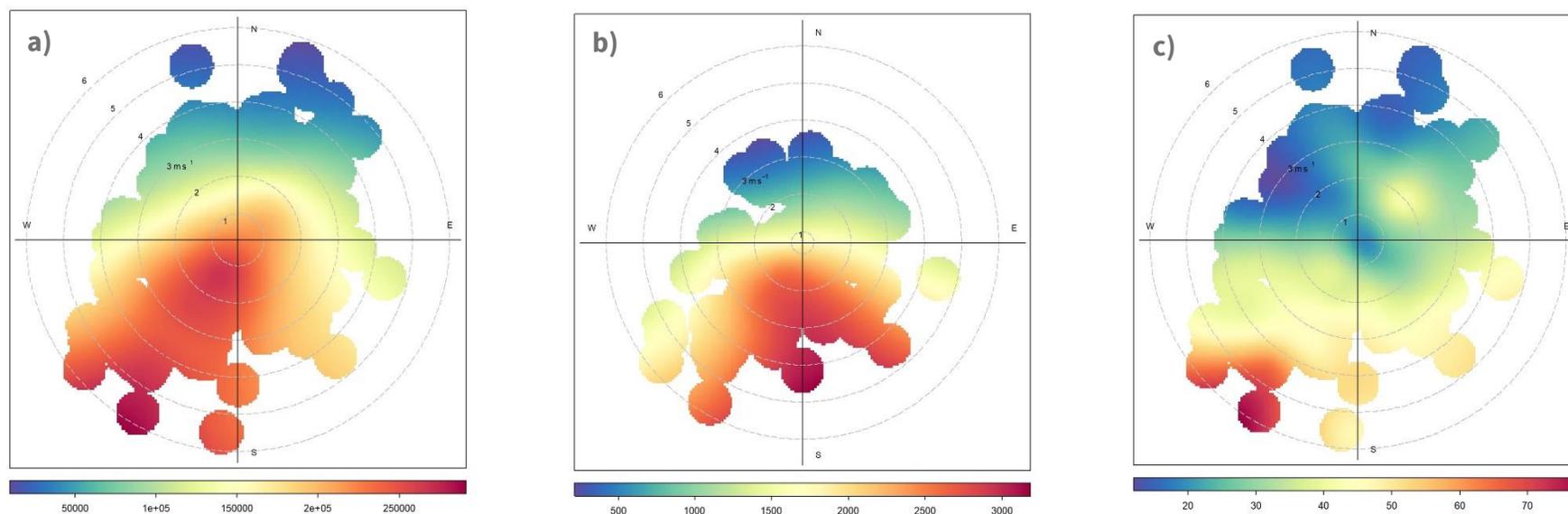


Figura 7.6. Gráficas polares bivariadas de la concentración promedio de: **a)** Levoglucosan ($pg\ m^{-3}$), **b)** reteno ($pg\ m^{-3}$), **c)** $PM_{2.5}$ ($\mu g\ m^{-3}$).

No obstante, en el caso de levoglucosan y de reteno, se observaron altas concentraciones en todo el intervalo de velocidades con dirección predominante del sursuroeste (SSO), lo que sugiere su emisión tanto en los alrededores al sitio de colecta, como generadas a mayores distancias, transportadas e introducidas al Valle de México.

La **Figura 7.7** muestra las GPB para los HAP y a diferencia de los marcadores de quema de biomasa, la concentración de los marcadores de la emisión vehicular por combustión de gasolina fue máxima en velocidades del viento mínima (< 3 m/s), esto sugiere que su emisión se origina alrededor del sitio de muestreo (Carslaw y Beevers 2013), con ligera influencia de

emisiones provenientes del suroeste para BaA y Cris, y del noreste para I123cdP y BghiP. Estos resultados concuerdan con lo encontrado previamente por Amador-Muñoz et al. (2011, 2020b).

La variación horaria del levoglucosan (**Figura 7.8**) presentó concentraciones (medianas) máximas entre las 06:00 y 08:00 h (KW, $p < 0.001$), que corresponden a los máximos de las gráficas polares. En el caso del reteno, el comportamiento fue asintótico, sin variación durante las 24 h (KW, $p > 0.05$). Ambos marcadores, mostraron considerable número de observaciones con valores extremos por la llegada de plumas de aire con partículas emitidas de los incendios.

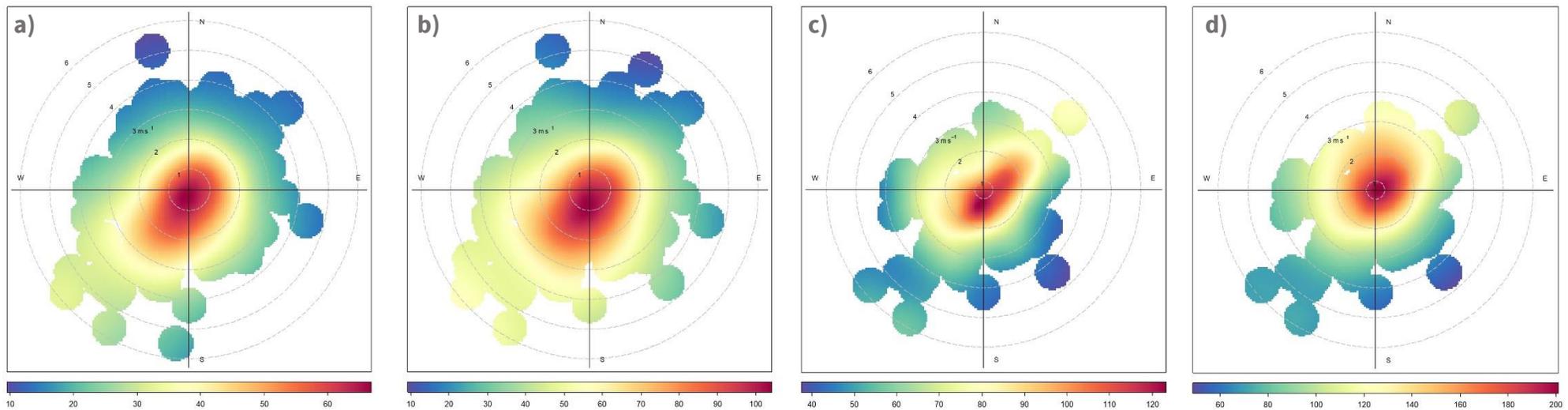


Figura 7.7. Gráficas polares bivariadas de la concentración promedio (pg/m^3) de : **a)** Benzo[*a*]antraceno, **b)** Criseno, **c.** Indeno[*1,2,3-cd*]pireno], **d)** Benzo[*ghi*]perileno.

ESPECIACIÓN DEL AEROSOL ORGÁNICO ATMOSFÉRICO

La distribución horaria de los HAP emitidos por los vehículos, presentó concentraciones máximas entre las 06:00 y 08:00 h, y un segundo máximo con menor intensidad entre las 21:00 y 23:00 h, esta distribución es similar a la descrita en el informe de calidad del aire del 2018 (SEDEMA, 2020). Se observó un comportamiento horario semejante entre el levoglucosan y los HAP, probablemente relacionada con el constante aporte

de emisiones de levoglucosan al valle y el efecto de la altura de capa de mezcla, la cual es menor en las horas más frías y mayor en los periodos más cálidos, lo que concentra y diluye los contaminantes, respectivamente. Esto no ocurrió con el reteno, probablemente porque su aporte al valle no fue constante, como se observa en la **Figura 7.3**

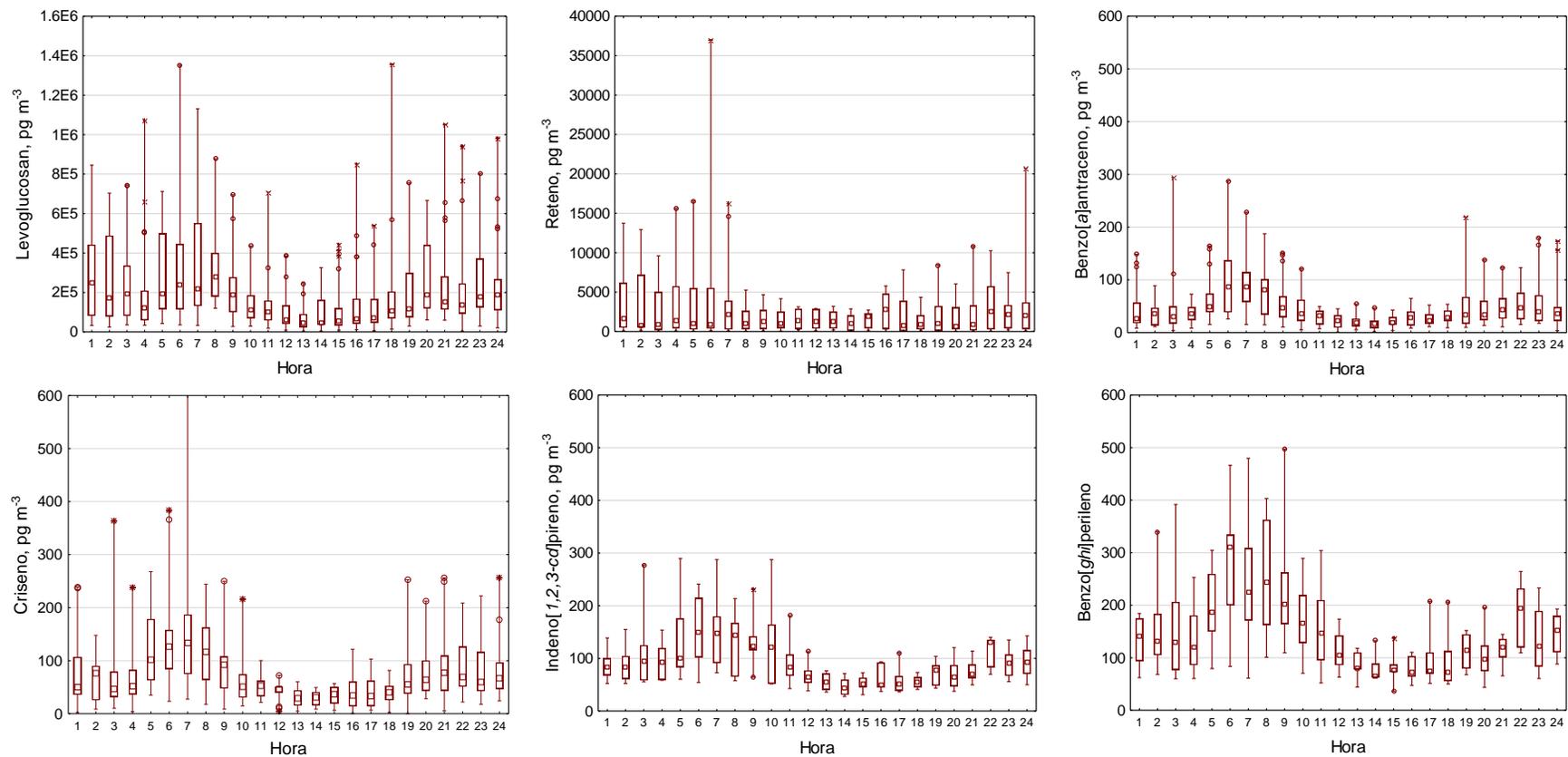


Figura 7.8. Variabilidad horaria de los marcadores de quema de biomasa y de combustible fósil, determinados en $PM_{2.5}$ al suroeste de la Ciudad de México en el periodo del estudio. Medianas – cuadros internos, 25-75% - cajas, mín.-máx. – barras, “outliers” – círculos, asteriscos – valores extremos. Las horas consideraron el comienzo de la toma de muestra, si la colecta comenzaba antes de los 30 min de cada hora, se asignó la hora inmediata anterior, en caso contrario, la posterior.

CONCLUSIONES

Este capítulo muestra que la concentración de las $PM_{2.5}$ es independiente de su composición química. Describe los marcadores orgánicos asociados con la quema de biomasa y proporciona evidencia de la capacidad analítica que tiene el TAG-GC-MS para diferenciar marcadores orgánicos de otras fuentes, como las emisiones vehiculares. Confirma que la contingencia extraordinaria del 14 al 17 de mayo del 2019 por $PM_{2.5}$ se debió a los incendios forestales y agrícolas originados al suroeste del sitio de medición principalmente fuera del valle. A diferencia de los marcadores vehiculares que se emitieron en las inmediaciones al sitio de colecta.

AGRADECIMIENTOS

Soporte técnico: Abraham Lara, Manuel García, Wilfrido Gutiérrez (q.e.p.d.), y Alfredo Rodríguez. Apoyo editorial y bibliográfico: Claudio Amescua, Saúl Armendariz y Pietro Villalobos. Financiamiento: Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), UNAM No. IN102519 y UC MEXUS-CONACyT CN-1987.



CAPÍTULO 8

ÍNDICE DE RIESGO PARA PERSONAS
SUSCEPTIBLES (IRPS)

ÍNDICE DE RIESGO PARA PERSONAS SUSCEPTIBLES (IRPS)

La SEDEMA y el Instituto Marrón de Gestión Urbana de la Universidad de Nueva York, desarrollaron un indicador que identifica la relación entre la contaminación del aire y los efectos en salud en la Ciudad de México (CDMX). El indicador se realizó con información de los contaminantes criterio y datos de salud registrados dentro de la CDMX, por lo que solo es aplicable en dicha entidad, también se consideraron los efectos en salud que se presentan con retraso de algunos días (Cromar et al., 2021). El producto de esta colaboración fue una herramienta cuantitativa, práctica e intuitiva que sirve para mejorar la comunicación del riesgo en salud de acuerdo con la calidad del aire. Los resultados conllevaron a la implementación del Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (**IRPS**), el cual está dirigido especialmente a población vulnerable (niños, adultos mayores, mujeres embarazadas, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, entre otras) la cual puede presentar síntomas incluso a niveles bajos de contaminación.

El **IRPS** provee un solo valor al día para toda la CDMX asociado directamente al riesgo en salud por la exposición a tres contaminantes combinados: O_3 , $PM_{2.5}$ y NO_2 , esto es representativo de la mezcla compleja del aire en la CDMX. Es importante mencionar que **el IRPS complementa y no sustituye a otros índices.**

La construcción del IRPS tiene semejanza con el método del índice canadiense AQHI (Air Quality Health Index): ambos utilizan una escala del 1 al 10+, donde 1 representa el menor riesgo y el 10+ es un “riesgo muy alto”; son índices **multicontaminante** y ambos se calculan con datos del pronóstico de calidad del aire con el objetivo de informar a la población con un día de anticipación para que tengan tiempo de planear sus actividades al aire libre y así, reduzcan su exposición a corto plazo. Sin embargo, se presentan varias diferencias con el AQHI, ya que para el desarrollo del IRPS se consideraron los riesgos a la salud observables en la población de la CDMX, esto a partir del análisis de series de tiempo con la relación entre datos de salud y de calidad del aire dentro del periodo 2010 - 2015; se utilizaron datos de morbilidad respiratoria (visitas a salas de emergencias) y no de mortalidad como el AQHI; además, se consideraron los efectos de la contaminación atmosférica desde el día cero hasta tres días posteriores a la exposición y los coeficientes utilizados para el cálculo del IRPS son particulares de la CDMX.

Es importante mencionar que, en Canadá, checar el AQHI seguir sus recomendaciones y atender sus alertas de calidad del aire, están relacionadas con la reducción en las visitas a salas de emergencias ocasionadas por síntomas de asma (Chen et al., 2018; Cromar et al., 2021).

CONSTRUCCIÓN Y CÁLCULO DEL IRPS

Las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX (SIMAT) que fueron seleccionadas para este análisis presentaron el menor número de días sin datos (al menos 70% de los días con datos válidos) y con la mayor representación espacial dentro de la ciudad. Se utilizaron los datos de calidad del aire en las métricas relevantes para salud: promedio de 24 horas en $PM_{2.5}$; máximo del promedio móvil de 8 horas para O_3 y máximo horario del NO_2 . En los datos de salud se consideraron los eventos de **morbilidad respiratoria**, para esto se utilizó el número de visitas a salas de emergencias en 40 establecimientos de salud que tuvieron como diagnóstico primario alguna de las siguientes enfermedades: infecciones de las vías respiratorias superiores (códigos J00-06 de la CIE-10), asma (J45-J46), enfermedad pulmonar obstructiva crónica EPOC (J44), neumonía (J12-J18), infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores (J20-J22), enfermedad crónica de las vías respiratorias inferiores (J40-J42, J47) y otras enfermedades respiratorias (J30-J39). Se utilizó un modelo lineal generalizado (GLM) con distribución Poisson para evaluar la relación entre la contaminación del aire y la morbilidad respiratoria. En el modelo, las variables como los días de la semana, el periodo de estudio, las ventanas de tiempo (número de días desde la exposición hasta la respuesta), la temperatura y la humedad relativa fueron incluidas como “spline” natural (variables de ajuste).

Para cada “spline” se modificaron los grados de libertad y se seleccionó el mejor modelo con base en el indicador estadístico Akaike. Además, se realizaron variaciones utilizando diferentes coeficientes, así como modelos de un solo contaminante o multicontaminante y finalmente, se seleccionó el modelo que obtuvo menor error.

En la difusión del IRPS, se eligió la escala temporal diaria ya que el modelo se basa en la exposición acumulada por día, es decir, el modelo GLM se construyó con datos diarios, por lo que el IRPS también es consistente con esta escala temporal. En la escala espacial, se decidió que se calcularía un IRPS para toda la CDMX debido a que cuando se realizó el análisis de datos de contaminantes con grupos de estaciones para determinar su representatividad, se observó que los grupos no tenían diferencias significativas y, por lo tanto, es válido usar un IRPS para toda la ciudad. Este índice es útil cuando se presentan niveles altos y bajos de contaminación atmosférica, lo cual es importante porque considera los riesgos a la salud que presentan las personas susceptibles cuando se exponen al aire contaminado. Esto es una limitante en índices utilizados en otros países; sin embargo, es importante considerarlo porque existe evidencia sobre los efectos a la salud atribuibles a niveles de contaminación del aire por debajo de los límites establecidos en las regulaciones.

El índice resultante fue evaluado y ajustado para cumplir con tres criterios clave para su éxito:

- ❖ El índice debe ser predictivo de la morbilidad respiratoria en dos grupos: niños y adultos. Los contaminantes afectan a los grupos de edad en diferentes grados; por lo que un índice exitoso debe ser adecuado para ambos grupos.
- ❖ El índice debe contener al menos tres contaminantes. Los índices que se basan en un solo contaminante pueden no capturar con precisión el riesgo general de salud para una población que diariamente está expuesta a múltiples contaminantes.
- ❖ El índice debe dar como resultado una distribución [generalmente] normal para permitir una comunicación efectiva de los riesgos, particularmente a niveles relativamente bajos de contaminación. Un índice con una distribución asimétrica o sesgada, crea desafíos de comunicación.

El IRPS tiene una escala sencilla de colores (azul, blanco, café) y numérica (1 al 10+), la cual no interfiere con los valores y colores, ni con la comunicación de otros índices de calidad del aire.

La escala con el gradiente de color, que inicia en azul oscuro cuando hay valores bajos y termina en café oscuro para los niveles altos, hace una analogía de un cielo despejado a uno contaminado (**Figura 8.1**). El gradiente continuo de colores trata de comunicar la idea de que hay una continuidad en el riesgo a la salud relacionado con la exposición y que no existe un nivel seguro, ya que como se ha mencionado, algunas personas presentan síntomas incluso con valores bajos de la concentración de contaminantes.

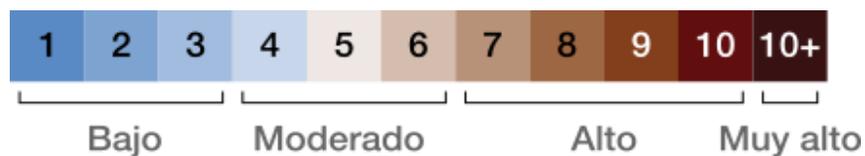


Figura 8.1. Escala cromática y numérica del IRPS.

Es importante mencionar que, debido a la heterogeneidad de las personas, algunas son más sensibles a la contaminación del aire, uno de los objetivos del IRPS es que cada persona defina su nivel de riesgo (“**Conoce tu número**”) de acuerdo con su propia sensibilidad y, con base en éste, modifique su comportamiento para reducir su exposición.

En la definición de los calificativos de riesgo (bajo, moderado, alto y muy alto) del IRPS, se consideraron los límites permisibles establecidos en las NOM de salud ambiental vigentes en 2019 y los valores recomendados en las Guías de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005). Se utilizaron los datos históricos de contaminación, de los valores máximos y mínimos que se han registrado en la CDMX de 1990 a 2016, con esto se construyeron escenarios de todas las posibles combinaciones de concentración para O₃, PM_{2.5} y NO₂.

Se determinó que, considerando los límites de exposición aguda en las NOM, el calificativo de “Riesgo bajo” incluía los valores 1 al 4 del IRPS, mientras que, al utilizar los niveles recomendados por la OMS, el “Riesgo bajo” incluía los valores del 1 a 3. Con estos resultados se decidió utilizar como “**Riesgo bajo**” los valores del 1 al 3, obtenidos de las guías OMS, debido a que el IRPS está dirigido a población vulnerable y su objetivo es la mayor protección a la salud. En el caso del nivel de **Riesgo Moderado** (IRPS de 4 a 6) y **Alto** (7 a 10), se observó que generalmente se alcanza cuando al menos dos contaminantes superan las guías OMS, o bien, cuando un solo contaminante registra concentraciones muy altas. Para el **Riesgo Alto** (7 a 10) a **Muy alto** (10+), éste se determinó con el valor máximo de riesgo total (suma del riesgo de los tres contaminantes) obtenido de los datos en el periodo de estudio utilizado para desarrollar el modelo (2010 a 2015). Es importante señalar que dentro de los años del estudio no se identificó un caso con

riesgo mayor al definido como “**Alto**”; sin embargo, en la realidad es posible que suceda y por eso se agregó otro nivel (“**Muy Alto**”). La publicación del IRPS, similar al AQHI, tiene el valor del índice junto con mensajes centrales de acuerdo con los niveles de riesgo definidos (bajo, moderado, alto y muy alto), estos mensajes consisten en recomendaciones básicas para que la población pueda proteger su salud, están dirigidos a personas susceptibles y población en general. El objetivo de es que conforme se incrementan los niveles de contaminación en el aire, las personas reduzcan la intensidad y duración de sus actividades en exteriores (**Tabla 8.1**).

Tabla 8.1. Recomendaciones a la población para reducir su exposición de acuerdo con el valor del IRPS.

Valor IRPS	Nivel de riesgo para la salud	Mensajes de salud para población susceptible*
1 2 3	Bajo	Disfruta de tus actividades normales al aire libre
4 5 6	Moderado	Considera reducir o reprogramar las actividades al aire libre que requieran esfuerzo físico si presentas síntomas.
7 8 9 10	Alto	Reduce o reprograma las actividades al aire libre que requieren esfuerzo físico o mantente en interiores
10+	Muy Alto	Evita realizar actividades al aire libre

*Los niños, adultos mayores, mujeres embarazadas, así como las personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, presentan mayor riesgo. Siga los consejos habituales de su médico acerca del ejercicio y del control de su enfermedad

El comportamiento del IRPS en 2019, detectó los días donde se registraron concentraciones máximas como son el primero de enero, los días de contingencia por ozono en marzo y abril, así como la semana de los incendios de mayo y los niveles altos registrados en las festividades de diciembre (Figura 8.2). También se puede observar que octubre presentó los valores más bajos del IRPS, en concordancia con el Índice de calidad del aire.

El índice de calidad del aire que representa la combinación de ambos contaminantes confirma lo que ocurre con el IRPS, y refleja correctamente el impacto que tiene la contaminación alta durante esos días.

Este índice puede ser consultado en:

<http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/>

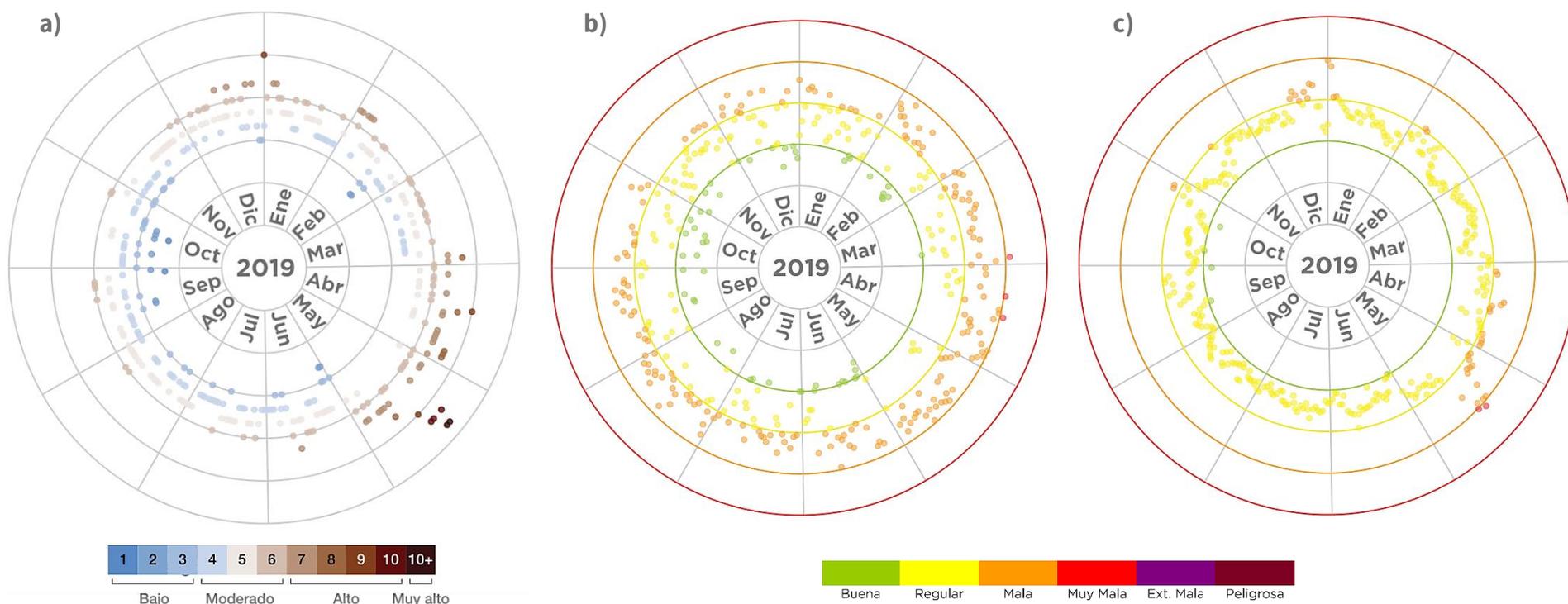


Figura 8.2. Comparación de los índices en 2019. a) IRPS, b) índice de calidad del aire para O₃, c) índice de calidad del aire de PM_{2.5}

Para mayor detalle en la metodología se puede consultar en el siguiente enlace:
http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/descargas/reporte_indice_de_riesgo_espanol.pdf



REFERENCIAS

- Achad, M., Caumo, S., de Castro Vasconcellos, P., Bajano, H., Gómez, D., & Smichowski, P. (2018). Chemical markers of biomass burning: Determination of levoglucosan, and potassium in size-classified atmospheric aerosols collected in Buenos Aires, Argentina by different analytical techniques. *Microchemical Journal, Devoted to the Application of Microtechniques in All Branches of Science*, 139, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.02.016>
- Aguilera, R., Corringham, T., Gershunov, A. et al. Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nat Commun* 12, 1493 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0>
- Amador-Muñoz O., González-Ramírez A.E. & Villalobos-Pietrini R. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in the Metropolitan Zone of Mexico Valley: Impact of air quality management programmes. *Urban Climate* 42, 101096. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101096>
- Amador-Muñoz O., Martínez-Domínguez Y. M., Reyes-Gutiérrez J. A., Franco-Hernández A. I. (2020a). Caso de estudio: Análisis de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en PM_{2.5}. Resultados de la campaña EQAA1, 2018. SEDEMA. Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018. Capítulo 6, pp. 117-132. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2018.pdf>
- Amador-Muñoz, O., Martínez-Domínguez, Y. M., Gómez-Arroyo, S., & Peralta, O. (2020b). Current situation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in PM_{2.5} in a receptor site in Mexico City and estimation of carcinogenic PAH by combining non-real-time and real-time measurement techniques. *The Science of the Total Environment*, 703(134526), 134526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134526>
- Amador-Muñoz, O., Villalobos-Pietrini, R., Miranda, J., & Vera-Avila, L. E. (2011). Organic compounds of PM_{2.5} in Mexico Valley: spatial and temporal patterns, behavior and sources. *The Science of the Total Environment*, 409(8), 1453–1465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.026>
- Bååth, E., Lundgren, B., & Söderström, B. (1979). Effects of artificial acid rain on microbial activity and biomass. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 23(1), 737–740. <https://doi.org/10.1007/bf01770034>
- Baron, P. A., & Willeke, K. (Eds.). (2001). *Aerosol measurement: Principles, techniques, and applications* (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Beristain-Montiel, E., Villalobos-Pietrini, R., Nuñez-Vilchis, A., Arias-Loaiza, G. E., Hernández-Paniagua, I. Y., & Amador-Muñoz, O. (2020). Polybrominated diphenyl ethers and organochloride pesticides in the organic matter of air suspended particles in Mexico valley: A diagnostic to evaluate public policies. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 267(115637), 115637. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115637>
- Bhattarai, H., Saikawa, E., Wan, X., Zhu, H., Ram, K., Gao, S., Kang, S., Zhang, Q., Zhang, Y., Wu, G., Wang, X., Kawamura, K., Fu, P., & Cong, Z. (2019). Levoglucosan as a tracer of biomass burning: Recent progress and perspectives. *Atmospheric Research*, 220, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.004>

- Cady-Pereira, K. E., Payne, V. H., Neu, J. L., Bowman, K. W., Miyazaki, K., Marais, E. A., Kulawik, S., Tzompa-Sosa, Z. A., & Hegarty, J. D. (2017). Seasonal and spatial changes in trace gases over megacities from Aura TES observations: two case studies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(15), 9379–9398. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9379-2017>
- Carslaw, D. C., & Beevers, S. D. (2013). Characterising and understanding emission sources using bivariate polar plots and k-means clustering. *Environmental Modelling & Software: With Environment Data News*, 40, 325–329. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.005>
- Cassee, F. R., Héroux, M.-E., Gerlofs-Nijland, M. E., & Kelly, F. J. (2013). Particulate matter beyond mass: recent health evidence on the role of fractions, chemical constituents and sources of emission. *Inhalation Toxicology*, 25(14), 802–812. <https://doi.org/10.3109/08958378.2013.850127>
- Cerón, R. M., Cerón, J. G., Guerra, J. J., López, E., Endañu, E., Ramírez, M., García, M., Sánchez, R., & Mendoza, S. (2009). Effects of simulated acid rain on tropical trees of the coastal zone of Campeche, Mexico. *Coastal Processes*, 126, 259–270.
- Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1–3). <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0070-7>
- Charlson, R. J., & Rodhe, H. (1982). Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature*, 295(5851), 683–685. <https://doi.org/10.1038/295683a0>
- Chen, H., Li, Q., Kaufman, J. S., Wang, J., Copes, R., Su, Y., & Benmarhnia, T. (2018). Effect of air quality alerts on human health: a regression discontinuity analysis in Toronto, Canada. *The Lancet. Planetary Health*, 2(1), e19–e26. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30185-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30185-7)
- Comisión Nacional Forestal CONAFOR, Gerencia del Manejo del Fuego. (2022). Número de incendios forestales [Data set]. En Reporte de resultados de incendios forestales. [CONAFOR](https://conafor.gob.mx/)
- Comisión Nacional para el Conocimiento de la Biodiversidad, CONABIO. (2021). Sistema de Alerta Temprana de Incendios Forestales (SATIF) para México y Centroamérica. En <http://incendios-beta.conabio.gob.mx/>
- Cromar, K., Gladson, L., Jaimes Palomera, M., & Perlmutter, L. (2021). Development of a health-based index to identify the association between air pollution and health effects in Mexico City. *Atmosphere*, 12(3), 372. <https://doi.org/10.3390/atmos12030372>
- Day, A. D., & Ludeke, K. L. (1993). Soil Acidity. En *Plant Nutrients in Desert Environments* (pp. 31–33). Springer. Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77652-6_8
- de Foy, B., Krotkov, N. A., Bei, N., Herndon, S. C., Huey, L. G., Martínez, A.-P., Ruiz-Suárez, L. G., Wood, E. C., Zavala, M., & Molina, L. T. (2009). Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO₂ retrievals during the MILAGRO field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(24), 9599–9617. <https://doi.org/10.5194/acp-9-9599-2009>

- de Oliveira Galvão, M. F., de Oliveira Alves, N., Ferreira, P. A., Caumo, S., de Castro Vasconcellos, P., Artaxo, P., de Souza Hacon, S., Roubicek, D. A., & Batistuzzo de Medeiros, S. R. (2018). Biomass burning particles in the Brazilian Amazon region: Mutagenic effects of nitro and oxy-PAHs and assessment of health risks. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 233, 960–970. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.068>
- Diapouli, E., Kalogridis, A.-C., Markantonaki, C., Vratolis, S., Fetfatzis, P., Colombi, C., & Eleftheriadis, K. (2017). Annual variability of black carbon concentrations originating from biomass and fossil fuel combustion for the suburban aerosol in Athens, Greece. *Atmosphere*, 8(12), 234. <https://doi.org/10.3390/atmos8120234>
- Dockery DW, Pope CA 3rd, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG Jr, Speizer FE. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N Engl J Med*. 1993 Dec 9;329(24):1753-9. doi: 10.1056/NEJM199312093292401. PMID: 8179653.
- Donaldson, K., Gilmour, M. I., & MacNee, W. (2000). Asthma and PM₁₀. *Respiratory Research*, 1(1), 12–15. <https://doi.org/10.1186/rr5>
- Du, Y., Xu, X., Chu, M., Guo, Y., & Wang, J. (2016). Air particulate matter and cardiovascular disease: the epidemiological, biomedical and clinical evidence. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E8–E19. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37>
- Fast, J. D., de Foy, B., Acevedo Rosas, F., Caetano, E., Carmichael, G., Emmons, L., McKenna, D., Mena, M., Skamarock, W., Tie, X., Coulter, R. L., Barnard, J. C., Wiedinmyer, C., & Madronich, S. (2007). A meteorological overview of the MILAGRO field campaigns. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions: ACPD*, 7(1), 2037–2089. <https://doi.org/10.5194/acpd-7-2037-2007>
- García Ibarra, A. (2022). Contaminantes orgánicos atmosféricos detectados con alta resolución temporal durante el periodo COVID-19 vs No-COVID-19 [Universidad Nacional Autónoma de México]. [Tesis UNAM](#)
- Gérard. (2003). l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Qualité de l'eau et assainissement en France (rapport No. 215). <https://www.senat.fr/rap/l02-215-1/l02-215-1.html>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2016). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2016: Aviso por el que se da a conocer el Programa Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México. <https://cutt.ly/fgp88oH>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2018). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2018: Aviso por el que se da a conocer la norma ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2017, que establece los requisitos para elaborar el Índice de Calidad del Aire en la Ciudad de México. <https://cutt.ly/MfBrOD4>

- Gobierno de la Ciudad de México. (2019). Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2019: Aviso por el que se da a conocer el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México. [Gaceta 2019](#).
- Granados Sánchez, D., López Ríos, G. F., & Hernández García, M. Á. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(2), 187-206. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.022>
- Guerrero, F., Alvarez-Ospina, H., Retama, A., López-Medina, A., Castro, T., & Salcedo, D. (2017). Seasonal changes in the PM1 chemical composition north of Mexico City. *Atmósfera*, 30(3), 243–258. <https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.05>
- Hawbaker, T. J., Radeloff, V. C., Syphard, A. D., Zhu, Z., & Stewart, S. I. (2008). Detection rates of the MODIS active fire product in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2656–2664. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.008>
- Hernández-López, A. E., Miranda Martín del Campo, J., Mugica-Álvarez, V., Hernández-Valle, B. L., Mejía-Ponce, L. V., Pineda-Santamaría, J. C., Reynoso-Cruces, S., Mendoza-Flores, J. A., & Rozanes-Valenzuela, D. (2020). A study of PM_{2.5} elemental composition in southwest Mexico City and development of receptor models with positive matrix factorization. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37. <https://doi.org/10.20937/rica.54066>
- IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. (1983). Polynuclear aromatic compounds, Part 1, Chemical, environmental and experimental data. 32, 1–453. PMID:6586639.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2010). Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 92, 1–853. PMID:21141735.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2007). Combined estrogen-progestogen contraceptives and combined estrogen-progestogen menopausal therapy. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 91, 1–528. PMID:18756632.
- IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- International Research Institute for Climate and Society (2020). IRI/CPC ENSO Forecast 2019. Columbia University Earth Institute. <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/2019-January-quick-look/>
- Jacobson, M. Z. (2012). *Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139109444.0020>
- James, Gareth, Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: With applications in R* (2013a ed.). Springer.

- Jones, A. M., Harrison, R. M., & Baker, J. (2010). The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x. *Atmospheric Environment* (Oxford, England: 1994), 44(13), 1682–1690. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.007>
- Karanasiou, A., Alastuey, A., Amato, F., Renzi, M., Stafoggia, M., Tobias, A., Reche, C., Forastiere, F., Gumy, S., Mudu, P., & Querol, X. (2021). Short-term health effects from outdoor exposure to biomass burning emissions: A review. *The Science of the Total Environment*, 781(146739), 146739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146739>
- Karroum, K., Lin, Y., Chiang, Y.-Y., Ben Maissa, Y., El Haziti, M., Sokolov, A., & Delbarre, H. (2020). A review of air quality modeling. *Mapan*, 35(2), 287–300. <https://doi.org/10.1007/s12647-020-00371-8>
- Kubat, M. (2017). *An introduction to machine learning* (2a ed.). Springer International Publishing.
- Laskin, A., Laskin, J., & Nizkorodov, S. A. (2015). Chemistry of atmospheric brown carbon. *Chemical Reviews*, 115(10), 4335–4382. <https://doi.org/10.1021/cr5006167>
- Lei, W., de Foy, B., Zavala, M., Volkamer, R., & Molina, L. T. (2006). Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model. <https://doi.org/10.5194/acpd-6-7959-2006>
- Li, G., Zavala, M., Lei, W., Tsimpidi, A. P., Karydis, V. A., Pandis, S. N., Canagaratna, M. R., & Molina, L. T. (2011). Simulations of organic aerosol concentrations in Mexico City using the WRF-CHEM model during the MCMA-2006/MILAGRO campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(8), 3789–3809. <https://doi.org/10.5194/acp-11-3789-2011>
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(5), 702–708. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<0702:doadoi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<0702:doadoi>2.0.co;2)
- Madden, R. A., & Julian, P. R. (1994). Observations of the 40–50-day tropical oscillation—A review. *Monthly Weather Review*, 122(5), 814–837. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0814:ootdto>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0814:ootdto>2.0.co;2)
- Mao, H., Chen, M., Hegarty, J. D., Talbot, R. W., Koermer, J. P., Thompson, A. M., & Avery, M. A. (2010). A comprehensive evaluation of seasonal simulations of ozone in the northeastern US during summers of 2001–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(1), 9–27. <https://doi.org/10.5194/acp-10-9-2010>
- Martínez Domínguez, Y. M. (2020). *Especiación química del aerosol orgánico con alta resolución temporal (TAG-CG-EM)* [Universidad Nacional Autónoma de México]. [Tesis UNAM](https://doi.org/10.24068/tesis.unam).
- Miller, M. R. (2020). Oxidative stress and the cardiovascular effects of air pollution. *Free Radical Biology & Medicine*, 151, 69–87. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.01.004>

MODIS Collection 61 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL distributed from NASA FIRMS. <https://earthdata.nasa.gov/firms>. doi:10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061

Molina, L. T., Kolb, C. E., de Foy, B., Lamb, B. K., Brune, W. H., Jimenez, J. L., Ramos-Villegas, R., Sarmiento, J., Paramo-Figueroa, V. H., Cardenas, B., Gutierrez-Avedoy, V., and Molina, M. J. (2007). Air quality in North America's most populous city – overview of the MCMA-2003 campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2447-2473. <https://doi.org/10.5194/acp-7-2447-2007>

Molina, L. T., Madronich, S., Gaffney, J. S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J. L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A. R., Russell, P., Schauer, J. J., Stevens, P. S., Volkamer, R., and Zavala, M. (2010). An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 8697-8760. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8697-2010>

National Atmospheric Deposition Program, NADP (2022). Quality Assurance Support for the NADP <https://nadp.slh.wisc.edu/quality-assurance/>

NOAA National Centers for Environmental Information. (2020). State of the Climate: Monthly Global Climate Report for Annual 2019, published online January 2020. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201913>

NRT VIIRS 375 m Active Fire product VJ114IMGTDL_NRT distributed from NASA FIRMS. Available on-line <https://earthdata.nasa.gov/firms>. doi:10.5067/FIRMS/VIIRS/VJ114IMGT_NRT.002

Organización Mundial de la Salud, OMS (2021). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Mundial de Meteorología, OMM. (2020). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2019. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10215

Pallé, C. (2018). El dióxido de carbono como forma sostenible de reducir el pH del agua. [Reporte Tecnoagua](#).

Petrucci, R. H., Harwood, W. S., Geoffrey Herring, F., García-Pumarino, C. P., & Cabo, N. I. (2009). *Química general* (8a ed.). Prentice Hall.

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

Quintar, S., Gonzalez, S. P., Almeida, C. A., Oliva González, M. S., & Mallea, M. A. (2010). Lluvia ácida. Universidad Nacional de San Luis. Facultad de Ciencias Humanas; Anuario Latinoamericano de Química, 25, 12-2010, 180-184. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/100262>

- Ramdahl, T. (1983). Retene—a molecular marker of wood combustion in ambient air. *Nature*, 306(5943), 580–582. <https://doi.org/10.1038/306580a0>
- Ramlall, C., Varghese, B., Ramdhani, S., Pammenter, N. W., Bhatt, A., Berjak, P., & Sershen. (2015). Effects of simulated acid rain on germination, seedling growth and oxidative metabolism of recalcitrant-seeded *Trichilia dregeana* grown in its natural seed bank. *Physiologia Plantarum*, 153(1), 149–160. <https://doi.org/10.1111/ppl.12230>
- Retama, A., Baumgardner, D., Raga, G. B., McMeeking, G. R., & Walker, J. W. (2015). Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(16), 9693–9709. <https://doi.org/10.5194/acp-15-9693-2015>
- Retama, A., Neria Hernández, A., Jaimes Palomera, M., Rivera Hernández, O., Sánchez Rodríguez, M., López-Medina, A., & Velasco, E. (2019). Fireworks: A major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico City. *Atmospheric Environment: X*, 2, 100013. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100013>
- Retama, A., Ramos-Cerón, M., Rivera-Hernández, O., Allen, G., & Velasco, E. (2022). Aerosol optical properties and brown carbon in Mexico City. *Environmental Science: Atmospheres*, 2(3), 315–334. <https://doi.org/10.1039/d2ea00006g>
- Rolph, G., Stein, A., and Stunder, B., (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA (2001). Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2000. Red de depósito atmosférico (REDDA). [Informe anual 2001](#).
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA (2016). Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2015. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. [Informe anual 2015](#).
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA (2017). Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2016. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. [Informe anual 2016](#).
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA (2018). Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2017. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. [Informe anual 2017](#).
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA (2020). Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. [Informe anual 2018](#).
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA (2021). Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. [Inventario de emisiones 2018](#).
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2019a). Reporte del clima en México: Reporte anual 2019. Reporte del Clima en México (conagua.gob.mx)

- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2019b). Reporte del clima en México: Reporte mensual diciembre 2019. Reporte mensual del Clima en México (conagua.gob.mx) - Diciembre 2019
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México, SACMEX (2020). Base de datos de precipitación en estaciones pluviales de la CDMX, año 2019.
- Stein, A.F., Draxler, R.R, Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, Bull. Amer. Meteor. Soc., 96, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110>
- Stephens, S., Madronich, S., Wu, F., Olson, J. B., Ramos, R., Retama, A., & Muñoz, R. (2008). Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO, NO_x, PM₁₀ and O₃ during 1986–2007. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(17), 5313–5325. <https://doi.org/10.5194/acp-8-5313-2008>
- Taylor, K. E. (2001), Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, J. Geophys. Res., 106 (D7), 7183– 7192, doi:10.1029/2000JD900719
- Turco, R. P. (2002). Earth under siege: From air pollution to global change (2a ed.). Oxford University Press. ISBN: 978-0195142747.
- United States Environmental Protection Agency. US EPA. (2017). Inventory of U.S: Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2015 (Final Report, 2017). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 430-P-17-001. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-02/documents/2017_complete_report.pdf
- United States Environmental Protection Agency. US EPA. (2019). Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, 2019). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-19/188, 2019. Available at <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534>.
- United States Environmental Protection Agency. US EPA. (2020). Annual report 2019: Our Nation's Air. <https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2020/#home>
- United States Environmental Protection Agency. US EPA. (2021). NAAQS Table. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- United States Environmental Protection Agency. US EPA. (2021). Wildfire Smoke, A guide for Public Health Officials, Revises 2019. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA-452/R-21-901, September 2021. https://www.airnow.gov/sites/default/files/2021-09/wildfire-smoke-guide-forward_0.pdf
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 32(13), 2088–2094. <https://doi.org/10.1002/joc.2419>

- World Health Organization, United Nations Environment Programme & International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2002). Índice UV solar mundial : guía práctica. Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42633>
- World Health Organization. Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future (2017). Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2017.
- World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre : actualización mundial 2005. Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69478>
- Zhang, C. (2005). Madden-Julian oscillation: Madden-Julian oscillation. Reviews of Geophysics (Washington, D.C.: 1985), 43(2). <https://doi.org/10.1029/2004rg000158>
- Zhang, X., Yang, W., & Dong, C. (2013). Levoglucosan formation mechanisms during cellulose pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 104, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.09.015>
- Zhang, Y., Dubey, M. K., Olsen, S. C., Zheng, J., & Zhang, R. (2009). Comparisons of WRF/Chem simulations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the 2006-MILAGRO. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(11), 3777–3798. <https://doi.org/10.5194/acp-9-3777-2009>
- Zhang, Y., Obrist, D., Zielinska, B., & Gertler, A. (2013a). Particulate emissions from different types of biomass burning. Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994), 72, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.026>



ANEXO I

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

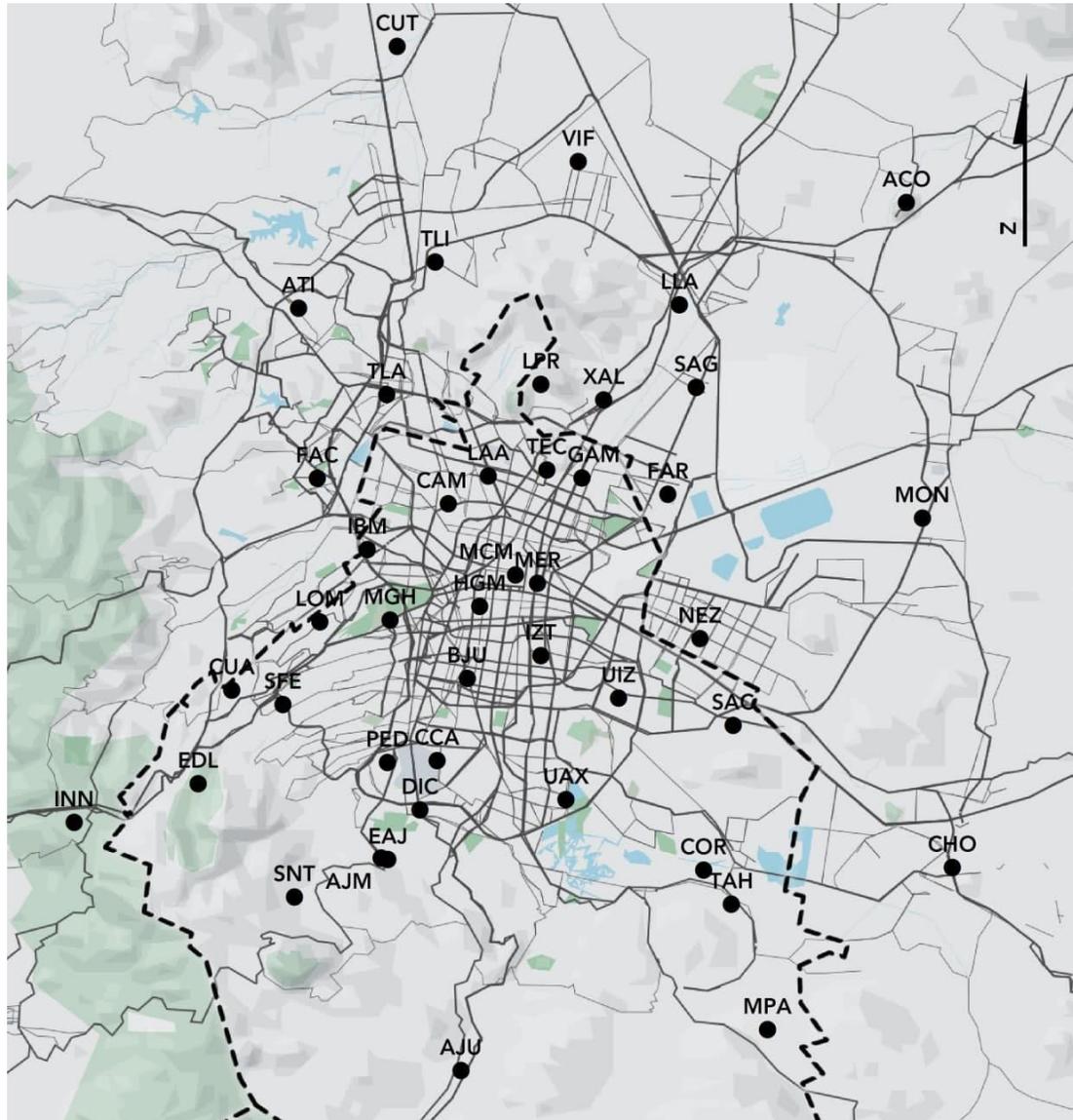


Figura A.I.1. Distribución de los sitios del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)

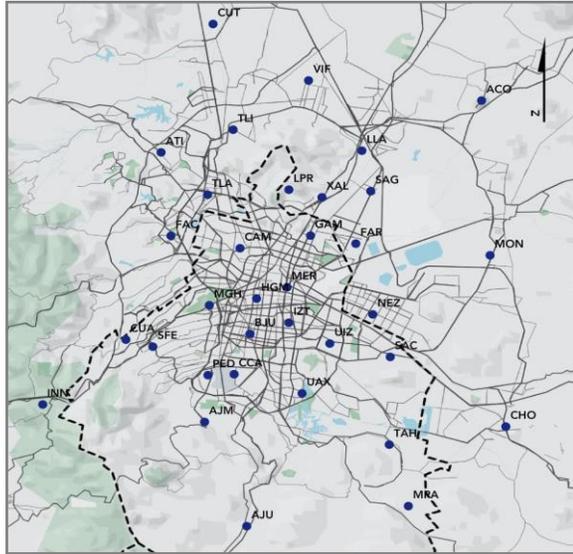


Figura A.I.2. Estaciones de la RAMA en operación durante 2019.

Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)

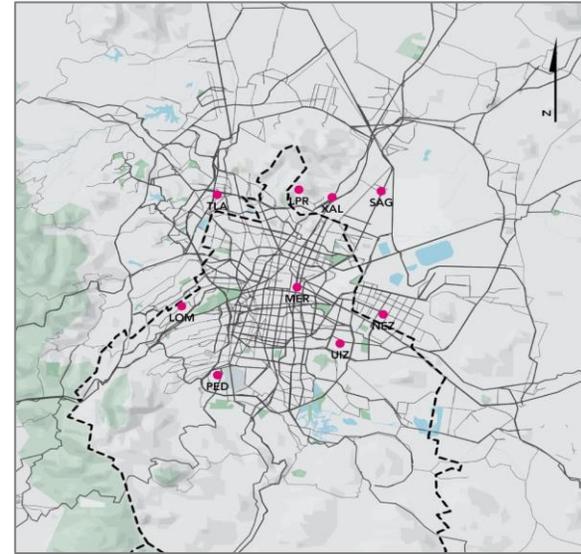


Figura A.I.3. Estaciones de la REDMA en operación durante 2019.

Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

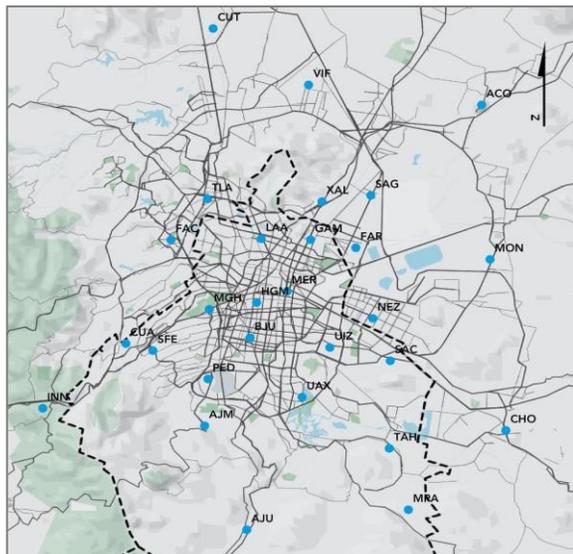


Figura A.I.4. Estaciones de REDMET en operación durante 2019.

Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

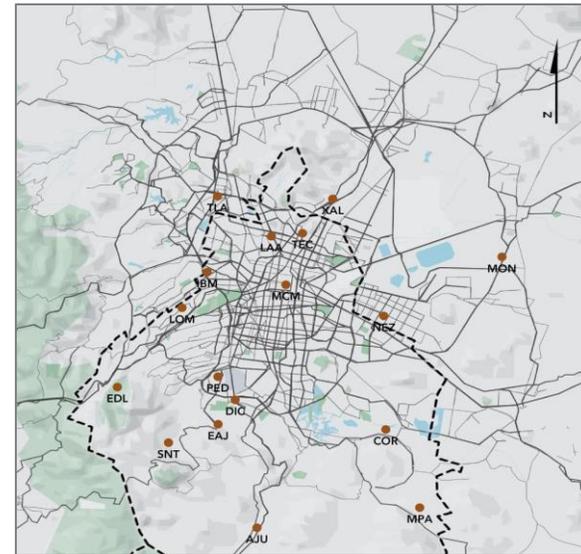


Figura A.I.5. Estaciones de la REDDA en operación durante 2019.

Tabla A.I.1. Estaciones que integran la RAMA.

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	Parámetros									
					O ₃	NOx	NO ₂	NO	CO	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	
Ciudad de México	A. Obregón	Pedregal	PED	Ene - 1986										
	Azcapotzalco	Camarones	CAM	Ago - 2003										
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago - 2015										
	Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	Ago - 2014										
		UAM Xochimilco	UAX	Feb - 2012										
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Nov - 1993										
		Santa Fe	SFE	Feb - 2012										
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb - 2012										
	G. A. Madero	G. A. Madero	GAM	Dic - 2015										
	Iztacalco	Iztacalco	IZT	Jul - 2007										
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene - 1986										
		Santiago Acahualtepec	SAC	Mar-2019										
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Ene - 2015										
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene - 2016										
	Tlalpan	Ajusco	AJU	Ene - 2015										
Ajusco Medio		AJM	Ene - 2015											
V. Carranza	Merced	MER	Ene - 1986											
Xochimilco	Tláhuac	TAH	Nov - 1993											

Tabla A.I.1. Estaciones que integran la RAMA (continuación).

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	Parámetros									
					O ₃	NOx	NO ₂	NO	CO	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{10-2.5}	
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul - 2007										
	Atizapán	Atizapán	ATI	Nov - 1993										
	Chalco	Chalco	CHO	Jul - 2007										
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Nov - 1993										
	Ecatepec	Los Laureles	LLA	Feb - 1986										
		San Agustín	SAG	Feb - 1986										
		Xalostoc	XAL	Ene - 1986										
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene - 1986										
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul - 2011										
		FES Aragón	FAR	Mar-2019										
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Ago - 2015										
	Tepotzotlán	Cuautitlán	CUT	Feb - 2012										
	Texcoco	Montecillo	MON	Nov - 1993										
	Tlalnepantla	La Presa	LPR	Ene - 1986										
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene - 1986										
Tultitlán	Tultitlán	TLI	Nov - 1993											

Tabla A.I.2. Estaciones que integran la REDMA.

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de Operación	Parámetros				
					PST	PM _{1.0}	PM _{2.5}	Pb-PST	Pb-PM _{1.0}
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene - 1989					
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene - 1989					
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	Ene - 1989					
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene - 1989					
Estado de México	Ecatepec	San Agustín	SAG	Ago - 2003					
		Xalostoc	XAL	Ene - 1989					
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Ene - 1989					
	Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene - 1989					
		La Presa	LPR	Ene - 1989					

Tabla A.I.3. Estaciones que integran la REDDA.

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

Tabla A.I.4. Estaciones que integran la REDMET.

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros								
					WSP	WDR	TMP	RH	RUV-	RUV-	RADG	PA	
Ciudad de México	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene - 1986									
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago - 2015									
	Coyoacán	UAM Xochimilco	UAX	Abr - 2015									
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Jun - 2000									
		Santa Fe	SFE	Feb - 2012									
	Cauhtémoc	Hospital General México	HGM	Feb - 2012									
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic - 2015									
		Laboratorio Análisis Ambiental	LAA	Ene - 2016									
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Abr - 2014									
		Santiago Acahualtepec	SAC	Mar-- 2019									
	Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	Feb - 2015									
	Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	Ene - 2016									
	Tlalpan	Ajusco	AJU	May - 2015									
		Ajusco Medio	AJM	Ene - 2015									
Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene - 1986										
Xochimilco	Tláhuac	TAH	Jun - 2000										

Tabla A.I.4. Estaciones que integran la REDMET (continuación).

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros							
					WSP	WDR	TMP	RH	RUV-	RUV-	RADG	PA
Estado de México	Acolman	Acolman	ACO	Jul - 2011								
	Chalco	Chalco	CHO	Jul - 2011								
	Coacalco	Villa de las Flores	VIF	Jun - 2000								
	Ecatepec	San Agustín	SAG	Feb - 1986								
		Xalostoc	XAL	Ene - 1986								
	Naucalpan	FES Acatlán	FAC	Ene - 1986								
	Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	Jul - 2011								
		FES Aragón	FAR	Mar-- 2019								
	Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	Sep - 2015								
	Tepotztlán	Cuautitlán	CUT	Feb - 2012								
Texcoco	Montecillo	MON	Jun - 2000									
Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene - 1986									



ANEXO II

OPERACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

Tabla A.II.1. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en estaciones de monitoreo ubicadas en la CDMX, durante

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Álvaro Obregón	Pedregal	PED	RAMA	CO	21/05/2019	21:00	06/06/2019	04:00	Problemas equipo de aire acondicionado
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	09/01/2019	01:00	21/03/2019	01:00	Obra en alrededores del sitio
				O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	01/06/2019	01:00	13/09/2019	01:00	Obra en los alrededores del sitio
Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	RAMA	SO ₂	13/02/2019	01:00	12/07/2019	04:00	Mantenimiento en laboratorio
				NO ₂	13/02/2019	01:00	29/03/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	10/01/2019	02:00	04/06/2019	18:00	Equipo en prueba
				O ₃ , NO ₂ , CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	11/10/2019	01:00	01/12/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
Coyoacán	UAM-Xochimilco	UAX	REDMET	RH	12/09/2013	12:00	01/11/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
			RAMA	PM _{2.5}	11/10/2019	02:00	13/11/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM _{2.5}	22/02/2019	01:00	07/05/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM _{2.5}	11/10/2019	01:00	20/11/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				CO	01/04/2019	01:00	07/05/2019	04:00	Huelga en instalaciones, sin acceso al sitio
Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	RAMA	PM ₁₀	02/05/2019	01:00	05/06/2019	15:00	Falta de refacciones o insumos
				CO	02/02/2019	24:00	14/03/2019	04:00	Mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO, SO ₂	20/05/2019	01:00	07/06/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO	08/31/2019	19:00	14/11/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
	Santa Fe	SFE	REDMET	RH	01/01/2019	01:00	22/02/2019	01:00	Falla del sensor
				UVA, UVB	23/04/2019	01:00	07/06/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
			RAMA	O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	18/07/2019	12:00	17/08/2019	02:00	Falta de refacciones o insumos
				CO	18/07/2019	12:00	05/09/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	REDMET	TMP, RH, WSP, WDR, Pba	11/04/2019	24:00	10/07/2019	14:00	Falla en el sistema de comunicación
			RAMA	NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	12/08/2019	12:00	14/09/2019	01:00	Falla en el sistema de comunicación
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	17/10/2019	02:00	14/11/2019	02:00	Retiro para mantenimiento en laboratorio
Gustavo A. Madero	G. A. Madero	GAM	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	15/02/2019	18:00	15/03/2019	02:00	Problemas equipo de aire acondicionado
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	23/06/2019	13:00	13/07/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				CO, SO ₂	23/06/2019	24:00	13/07/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				CO	23/08/2019	01:00	17/09/2019	01:00	Problemas de energía

Tabla A.II.1. Continuación

Alcaldía	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Iztapalapa	UAM-Iztapalapa	UIZ	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	07/04/2019	24:00	18/05/2019	02:00	Problemas equipo de aire acondicionado
				O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	10/04/2019	23:00	18/05/2019	01:00	Problemas equipo de aire acondicionado
				O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	28/06/2019	22:00	08/07/2019	01:00	Problemas equipo de aire acondicionado
			REDMET	TMP, WSP, WDR	10/04/2019	23:00	18/05/2019	01:00	Problemas equipo de aire acondicionado
	Santiago Acahualtepec	SAC	RAMA	PM _{2.5}	06/12/2019	02:00	31/12/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
			O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM _{2.5}	01/01/2019	01:00	01/03/2019	01:00	Inició operaciones (01/03/2019)	
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	04/06/2019	09:00	31/12/2019	23:00	Mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO	13/08/2019	09:00	31/12/2019	23:00	Mantenimiento en laboratorio
Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	RAMA	CO	01/10/2019	01:00	21/12/2019	04:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	UVA, UVB	01/01/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Mantenimiento en laboratorio
Tlalpan	Ajusco	AJU	RAMA	O ₃ , PM _{2.5}	07/01/2019	01:00	26/01/2019	01:00	Problemas equipo de aire acondicionado
				O ₃	20/02/2019	12:00	17/04/2019	21:00	Problemas equipo de aire acondicionado
				PM _{2.5}	20/02/2019	01:00	01/05/2019	02:00	Problemas equipo de aire acondicionado
				PM _{2.5}	01/08/2019	02:00	20/09/2019	05:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM _{2.5}	29/09/2019	01:00	22/10/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				O ₃	14/08/2019	23:00	02/09/2019	01:00	Problemas de comunicación
	Ajusco Medio	AJM	REDMET	WSP, WDR	03/06/2019	01:00	24/07/2019	24:00	Mantenimiento en laboratorio
				TMP	01/01/2019	01:00	08/06/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				RAMA	NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	04/02/2019	24:00	21/02/2019	01:00
		REDMET	TMP, RH	09/09/2019	01:00	12/11/2019	01:00	Falla del sensor	
Venustiano Carranza	Merced	MER	RAMA	CO	31/03/2019	24:00	01/05/2019	04:00	Mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂	01/02/2019	24:00	24/02/2019	24:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	TMP	28/01/2019	23:00	19/02/2019	01:00	Falla del sensor
				UVA, UVB	01/01/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Falla del sensor
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂	26/10/2019	20:00	14/12/2019	02:00	Problemas equipo de aire acondicionado
				SO ₂	29/04/2019	01:00	24/05/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio

Tabla A.II.2. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otra causa, en estaciones de monitoreo ubicadas en el Estado de México, durante 2019.

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	NOx, NO ₂ , CO, SO ₂ , PM ₁₀	06/09/2019	01:00	12/12/2019	23:00	Problema energía y mantenimiento anual
				O ₃	30/06/2019	24:00	06/09/2019	01:00	Problema de energía
				O ₃	10/11/2019	11:00	12/12/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
Atizapán de Zaragoza	Atizapán	ATI	RAMA	CO	21/06/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Falta de refacciones o insumos
				NOx, NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀	21/06/2019	01:00	01/10/2019	01:00	Falta de refacciones o insumos
Chalco	Chalco	CHO	RAMA	NOx, NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀	01/04/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Falta de refacciones o insumos
Coacalco de Berriozábal	Villa de las Flores	VIF	RAMA	PM ₁₀	26/02/2019	24:00	29/03/2019	02:00	Manteniendo en laboratorio
				PM ₁₀	27/04/2019	02:00	23/05/2019	02:00	Problemas equipo de aire acondicionado
Ecatepec de Morelos	San Agustín	SAG	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	12/07/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Problemas de energía
				SO ₂	12/07/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Problemas de energía
				O ₃ , NOx, NO ₂ , NO, CO	01/08/2019	01:00	01/11/2019	01:00	Falta de refacciones o insumos
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	05/04/2019	01:00	27/04/2019	06:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	17/05/2019	12:00	07/06/2019	16:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	31/05/2019	21:00	20/06/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				TMP, RH, WDR, WSP	27/07/2019	01:00	13/08/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				RH	19/09/2019	21:00	01/11/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				TMP	01/10/2019	01:00	01/11/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				UVA, UVB	01/10/2019	01:00	19/10/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
Naucalpan de Juárez	FES Acatlán	FAC	RAMA	CO	28/02/2019	24:00	02/04/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				NOx, NO ₂ , NO	04/03/2019	17:00	02/04/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				SO ₂	04/03/2019	17:00	24/05/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM ₁₀	04/03/2019	17:00	29/03/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	UVA, UVB	11/12/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Mantenimiento en laboratorio

Tabla A.II.2. Continuación

Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Nezahualcóyotl	FES Aragón	FAR	RAMA	O ₃ , NO ₂ , CO, SO ₂ , PM _{2.5}	01/01/2019	01:00	01/03/2019	01:00	Inicio de operaciones
				CO	15/05/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	WSP, WDR	10/07/2019	01:00	01/09/2019	24:00	Falla en sensor
	Nezahualcóyotl	NEZ	REDMET	O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO	22/08/2019	10:00	21/09/2019	01:00	Falta refacciones/insumos
				NO _x , NO ₂ , NO	14/10/2019	13:00	15/11/2019	04:00	Mantenimiento en laboratorio
				PM _{2.5}	01/08/2019	01:00	20/09/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				SO ₂	17/02/2019	24:00	03/04/2019	04:00	Error en registro de datos
			SO ₂	12/04/2019	02:00	21/09/2019	01:00	Falta refacciones/insumos	
Ocoyoacac	Instituto Investigaciones Nucleares	INN	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PMCO	28/04/2019	20:00	01/12/2019	01:00	Problema comunicación con sitio
				O ₃ , CO, SO ₂	24/09/2019	01:00	01/12/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
			REDMET	RH	25/06/2019	19:00	01/12/2019	01:00	Falla en el sistema de comunicación
				TMP	25/06/2019	19:00	20/12/2019	01:00	Falla en el sistema de comunicación
				Pba	22/10/2019	10:00	20/12/2019	01:00	Problema de comunicación
Tepotztlán	Cuautitlán	CUT	REDMET	Pba	29/03/2019	11:00	13/04/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				RH	27/08/2019	01:00	24/09/2019	04:00	Desajuste en la constante del datalogger
			RAMA	NO _x , NO ₂ , NO	28/07/2019	01:00	13/08/2019	24:00	Mantenimiento en laboratorio
Texcoco	Montecillo	MON	RAMA	CO	27/06/2019	03:00	27/07/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO	25/03/2019	13:00	01/06/2019	01:00	Huelga en instalaciones sin acceso al sitio
			REDMET	UVA, UVB	05/06/2019	01:00	01/08/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
Tlalnepantla de Baz	La Presa	LPR	RAMA	CO	06/05/2019	24:00	05/06/2019	01:00	Problema de energía
	Tlalnepantla	TLA	REDMET	TMP, RH, WDR, WSP	12/04/2019	01:00	10/07/2019	14:00	Falla del sensor
				UVA, UVB	01/01/2019	01:00	31/12/2019	23:00	Falla del sensor
Tultitlán	Tultitlán	TLI	RAMA	PM ₁₀	01/01/2019	01:00	06/02/2019	02:00	Mantenimiento en laboratorio
				NO _x , NO ₂ , NO, CO	01/01/2019	01:00	02/02/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				SO ₂	01/01/2019	01:00	08/02/2019	01:00	Mantenimiento en laboratorio
				O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, PM ₁₀	29/08/2019	01:00	01/10/2019	01:00	Falta de refacciones o insumos



ANEXO III

NUEVAS ESTACIONES DE MONITOREO

Tabla A.III.1. Información básica de las nuevas estaciones de monitoreo.

Entidad	Estación	Clave	Red	Parámetros	Inicio de operación
Ciudad de México	Santiago Acahualtepec	SAC	RAMA	SO ₂ , NOx, NO ₂ , NO, CO, O ₃ , PM _{2.5}	01/03/2019 13:00
			REDMET	VV, DV, TMP, HR	01/03/2019 13:00
Estado de México	Facultad de Estudios Superiores Aragón	FAR	RAMA	SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃ , PM _{2.5}	01/03/2019 13:00
			REDMET	VV, DV, TMP, HR	01/03/2019 13:00

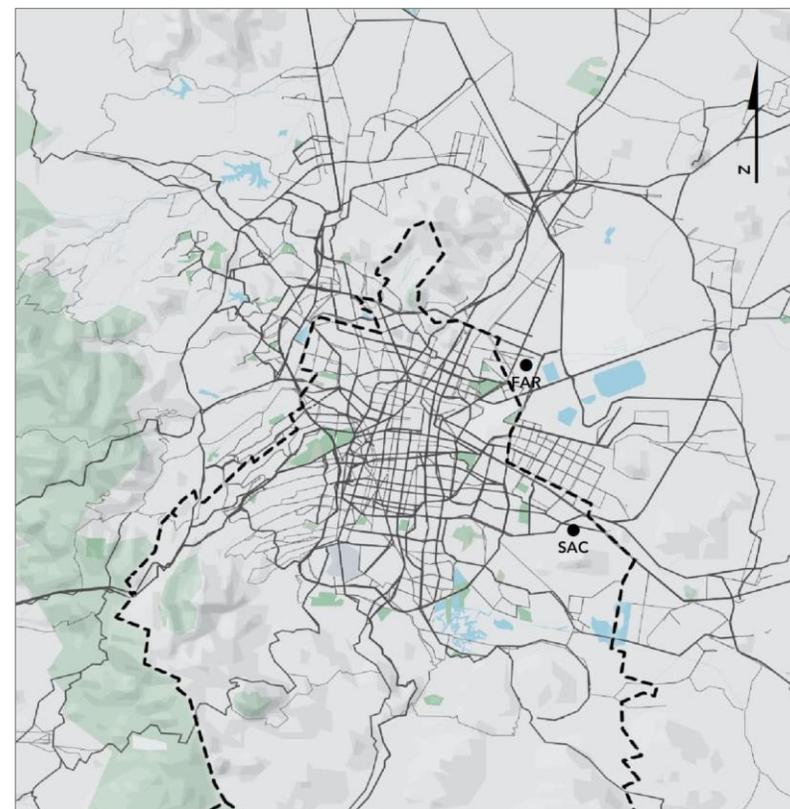


Figura A.III.1. Ubicación de las nuevas estaciones de monitoreo

Tabla A.III.2. Santiago Acahualtepec (SAC)

Domicilio:	Retama s/n Esq. 5 de febrero, Col. 2ª Ampliación Santiago Acahualtepec, Iztapalapa, C.P. 09606, CDMX		
Latitud:	19.34561	Longitud:	-99.009381
Altitud:	2293 msnm		
Contaminantes:	SO ₂ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, O ₃ , PM _{2.5}	Meteorología:	VV, DV, TMP, HR
Observaciones	Edificio del Centro de Salud T-III Santiago Acahualtepec		



Figura A.III.2. Estación Santiago Acahualtepec (SAC)

Tabla A.III.3. Facultad de Estudios Superiores Aragón (FAR)

Domicilio:	Av. Hacienda de Rancho Seco s/n, Col. Impulsora Popular Avícola, Nezahualcóyotl, C.P. 57130		
Latitud:	19.473692	Longitud:	-99.046176
Altitud:	2230 msnm		
Contaminantes:	SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃ , PM _{2.5}	Meteorología:	VV, DV, TMP, HR

**Figura A.III.3.** Estación Facultad de Estudios Superiores Aragón (FAR)



ANEXO IV

ESTADÍSTICAS BÁSICAS

Tabla A.IV.1. Estadísticas básicas para dióxido de azufre, la concentración está en ppb, a menos que se indique lo contrario. Las estaciones que tuvieron porcentaje de datos válidos $\geq 75\%$ se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS												CUMPLIMIENTO DE LA NOM			
			% datos válidos	trimestres con % datos válidos $\geq 75\%$	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio de 24 h 110 ppb	2° máximo del móvil 8 h 200 ppb	Promedio anual 25 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	88	3	44	3	0	4	2	0	1	1	3	6	14	31	3	Sí
	Benito Juárez	BJU	41	1	70	3	0	5	2	1	1	2	3	7	—	—	—	—
	Camarones	CAM	44	1	116	4	0	9	3	0	1	2	4	10	—	—	—	—
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	90	3	84	3	0	4	2	0	1	1	3	6	14	35	3	Sí
	Cuajimalpa	CUA	88	4	64	3	0	4	2	0	1	1	3	6	14	31	3	Sí
	Hospital General de México	HGM	86	3	163	4	0	8	3	0	1	2	4	10	27	67	4	Sí
	Iztacalco	IZT	94	4	126	3	0	6	2	1	1	2	3	7	26	62	3	Sí
	Merced	MER	89	3	105	4	0	7	3	1	1	2	4	8	28	66	4	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	96	4	101	4	0	5	3	1	1	2	4	8	19	49	4	Sí
	Milpa Alta	MPA	91	4	49	2	0	2	1	0	1	1	2	4	8	23	2	Sí
	Pedregal	PED	91	4	65	2	0	4	1	0	1	1	2	5	13	38	2	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	78	3	63	2	0	3	1	0	1	1	2	4	12	27	2	Sí
	Santa Fe	SFE	87	3	60	2	0	4	1	0	1	1	2	6	11	22	2	Sí
	Tláhuac	TAH	69	2	61	2	0	3	1	0	1	1	2	3	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	72	2	96	3	0	5	2	1	1	2	3	6	—	—	—	—
UAM Xochimilco	UAX	82	3	40	2	0	3	1	1	1	1	2	4	10	25	2	Sí	

Tabla A.IV.1. Continuación

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM				
			% datos válidos	trimestres con % datos válidos ≥ 75 %	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio de 24 h 110 ppb	2° máximo del móvil 8 h 200 ppb	Promedio anual 25 ppb	Cumple
Estado de México	Acolman	ACO	45	2	44	2	0	2	1	0	1	1	2	3	—	—	—	—
	Atizapán	ATI	69	3	86	5	0	8	4	0	1	2	5	11	—	—	—	—
	Chalco	CHO	24	1	25	2	0	2	1	1	1	2	2	4	—	—	—	—
	Cuautitlán	CUT	93	4	192	5	0	11	3	1	1	2	4	10	38	80	5	Sí
	FES Acatlán	FAC	73	2	127	4	0	7	3	1	1	2	4	9	—	—	—	—
	FES Aragón	FAR	75	3	60	2	0	4	1	0	1	1	2	5	16	35	2	Sí
	Inst. Investigaciones Nucleares	INN	77	3	29	1	0	2	0	0	1	1	1	2	5	9	1	Sí
	La Presa	LPR	91	4	141	2	0	4	2	1	1	1	3	5	20	51	2	Sí
	Los Laureles	LLA	89	4	208	4	0	9	2	0	1	2	3	7	30	75	4	Sí
	Montecillo	MON	89	4	46	1	0	2	1	0	1	1	2	3	7	17	1	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	39	1	162	4	0	7	2	1	1	2	3	7	—	—	—	—
	San Agustín	SAG	44	1	192	4	0	10	3	1	1	2	4	8	—	—	—	—
	Tlalnepantla	TLA	95	4	168	7	0	10	4	1	2	3	6	14	38	70	7	Sí
	Tultitlán	TLI	77	2	148	7	0	13	4	1	2	3	6	16	44	88	7	Sí
	Villa de las Flores	VIF	88	4	219	6	0	13	3	1	1	2	4	12	44	85	6	Sí
Xalostoc	XAL	87	3	73	3	0	5	2	1	1	2	3	7	18	42	3	Sí	

Tabla A.IV.2. Estadísticas básicas para dióxido de nitrógeno, la concentración está en ppb, a menos que se indique lo contrario. Las estaciones que tuvieron porcentaje de datos válidos $\geq 75\%$ se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Núm. excedencias >210 ppb (1 h)	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	72	15	0	9	11	5	8	13	19	26	0	Sí
	Benito Juárez	BJU	69	99	24	3	13	18	10	14	22	32	41	—	—
	Camarones	CAM	49	109	30	3	15	20	13	18	26	38	51	—	—
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	91	102	21	1	11	14	9	13	19	27	35	0	Sí
	Cuajimalpa	CUA	69	95	22	3	11	15	9	13	20	28	38	—	—
	Gustavo A. Madero	GAM	95	84	24	3	13	20	8	12	22	32	42	0	Sí
	Hospital General de México	HGM	87	93	27	4	13	17	12	17	25	34	44	0	Sí
	Iztacalco	IZT	95	100	27	4	13	17	13	18	26	35	44	0	Sí
	Merced	MER	93	104	31	3	14	18	16	21	29	39	49	0	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	59	88	27	5	13	18	13	17	25	35	45	—	—
	Milpa Alta	MPA	91	40	6	1	5	6	2	3	5	9	13	0	Sí
	Pedregal	PED	87	78	20	2	10	13	9	12	18	25	34	0	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	78	86	21	0	12	16	8	12	19	28	38	0	Sí
	Santa Fe	SFE	83	88	21	2	11	13	9	13	18	26	35	0	Sí
	Tláhuac	TAH	81	58	14	1	8	11	5	8	13	19	26	0	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	76	91	25	3	12	16	11	16	24	32	40	0	Sí
UAM Xochimilco	UAX	82	101	19	0	11	15	6	10	17.5	25	32	0	Sí	

Tabla A.IV.2. Continuación

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Núm. excedencias >210 ppb (1 h)	Cumple	
Estado de México	Acolman	ACO	44	61	15	2	9	13	5	8	13	21	27	—	—	
	Atizapán	ATI	68	95	21	3	12	15	8	12	18	27	37	—	—	
	Chalco	CHO	24	68	21	3	11	17	7	11	20	28	34	—	—	
	Cuautitlán	CUT	91	75	18	1	11	15	6	10	16	25	33	0	Sí	
	FES Acatlán	FAC	88	107	23	1	13	16	9	13	20	29	41	0	Sí	
	FES Aragón	FAR	79	74	18	1	11	16	5	9	17	25	34	0	Sí	
	La Presa	LPR	0	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*
	Los Laureles	LLA	90	77	23	2	12	18	9	13	21	31	40	0	Sí	
	Montecillo	MON	74	57	14	1	9	13	4	7	13	20	27	—	—	
	Nezahualcóyotl	NEZ	79	86	23	2	12	18	9	13	21	31	40	0	Sí	
	San Agustín	SAG	64	71	23	2	11	17	9	14	22	31	39	—	—	
	Tlalnepantla	TLA	93	108	29	4	13	16	14	19	27	35	46	0	Sí	
	Tultitlán	TLI	75	87	24	3	13	19	9	13	22	32	42	0	Sí	
	Villa de las Flores	VIF	89	72	17	1	11	16	5	8	15	24	33	0	Sí	
Xalostoc	XAL	88	104	29	3	13	18	14	19	27	37	46	0	Sí		

*SD= Sin datos

Tabla A.IV.3. Estadísticas básicas para monóxido de carbono, la concentración está en ppm, a menos que se indique lo contrario. Las estaciones que tuvieron porcentaje de datos válidos $\geq 75\%$ se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio móvil 8 h 11.0 ppm	Cumple
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	1.9	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	Sí
	Benito Juárez	BJU	80	2.6	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.5	Sí
	Camarones	CAM	31	3.2	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	—	—
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	91	2.2	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.3	0.4	0.7	1.5	Sí
	Cuajimalpa	CUA	83	2.1	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	1.2	Sí
	Hospital General de México	HGM	87	2.4	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.5	Sí
	Iztacalco	IZT	93	3.2	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.8	Sí
	Merced	MER	83	3.3	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.8	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	93	2.9	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.8	Sí
	Milpa Alta	MPA	67	1.3	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	—	—
	Pedregal	PED	90	1.8	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	79	3.6	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	2.3	Sí
	Santa Fe	SFE	79	1.2	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	Sí
	Tláhuac	TAH	81	2.7	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.3	0.4	0.7	1.3	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	68	3.1	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	—	—
UAM Xochimilco	UAX	73	3.2	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	—	—	

Tabla A.IV.3. Continuación

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM	
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio móvil 8 h 11.0 ppm	Cumple
Estado de México	Acolman	ACO	46	2	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	—	—
	Atizapán	ATI	45	2.5	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.8	—	—
	Chalco	CHO	24	3.5	0.5	0	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.6	1.0	—	—
	FES Acatlán	FAC	88	3.4	0.5	0	0.5	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.7	Sí
	FES Aragón	FAR	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Inst. de Investigaciones Nucleares	INN	74	1.3	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	—	—
	La Presa	LPR	85	4.4	0.6	0	0.5	0.6	0.1	0.2	0.5	0.8	1.3	2.6	Sí
	Los Laureles	LLA	87	3.6	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	2.3	Sí
	Montecillo	MON	82	2.6	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.5	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	87	4.2	0.4	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	2.6	Sí
	San Agustín	SAG	61	4.3	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	—	—
	Tlalnepantla	TLA	89	3.9	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	2.1	Sí
	Tultitlán	TLI	79	2.9	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	2.2	Sí
	Villa de las Flores	VIF	90	3.6	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	2.8	Sí
Xalostoc	XAL	84	5.2	0.5	0	0.5	0.5	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2	2.7	Sí	

Tabla A.IV.4. Estadísticas básicas para ozono, la concentración está en ppb, a menos que se indique lo contrario. Las estaciones que tuvieron porcentaje de datos válidos $\geq 75\%$ se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Núm. excedencias > 95 ppb (1 h)	Promedio móvil 8h 70 ppb	Cumple
Ciudad de México	Ajusco	AJU	53	143	37	0	26	37	7	16	31	53	76	131	116	No
	Ajusco Medio	AJM	92	141	38	0	24	32	12	20	33	52	72	170	103	No
	Benito Juárez	BJU	79	139	33	0	28	40	2	10	25	50	76	250	114	No
	Camarones	CAM	50	159	31	0	31	45	2	5	20	50	77	181	124	No
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	96	135	32	0	28	40	3	10	25	50	75	232	107	No
	Cuajimalpa	CUA	93	150	33	0	23	28	7	17	29	45	66	142	121	No
	Gustavo A. Madero	GAM	93	146	32	0	30	46	1	6	24	52	77	285	119	No
	Hospital General de México	HGM	87	142	31	0	28	40	2	7	22	47	73	209	105	No
	Iztacalco	IZT	94	146	29	0	28	40	1	6	21	46	71	190	109	No
	Merced	MER	95	155	28	0	28	41	1	4	19	45	72	231	117	No
	Miguel Hidalgo	MGH	95	131	28	0	26	36	2	7	21	43	67	149	97	No
	Milpa Alta	MPA	92	139	45	0	23	32	20	28	41	60	78	213	109	No
	Pedregal	PED	91	159	37	0	29	40	5	14	29	54	81	389	122	No
	Santiago Acahualtepec	SAC	77	146	32	0	25	39	3	11	26	50	70	101	107	No
	Santa Fe	SFE	86	126	30	0	23	31	5	12	24	43	64	106	97	No
	Tláhuac	TAH	91	144	36	0	27	40	6	14	30	54	75	196	111	No
UAM Iztapalapa	UIZ	77	149	28	0	26	39	1	6	19	45	67	103	103	No	
UAM Xochimilco	UAX	89	143	32	0	27	40	3	9	25	49	72	215	119	No	

Tabla A.IV.4. Continuación

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Núm. excedencias > 95 ppb (1 h)	Promedio móvil 8h 70 ppb	Cumple
Estado de México	Acolman	ACO	61	95	28	0	21	34	3	9	24	43	58	—	73	No
	Atizapán	ATI	69	119	27	0	23	35	2	8	22	43	61	35	92	No
	Chalco	CHO	32	99	28	0	22	39	1	6	25	45	58	2	74	No
	Cuautitlán	CUT	94	143	28	0	27	43	1	3	20	46	67	117	114	No
	FES Acatlán	FAC	95	137	31	0	26	36	3	10	24	46	70	188	111	No
	FES Aragón	FAR	76	151	35	0	28	43	3	11	28	54	76	220	123	No
	Inst. Investigaciones Nucleares	INN	73	132	40	0	21	28	16	24	37	52	69	81	98	No
	La Presa	LPR	93	156	26	0	25	33	2	6	20	39	61	148	112	No
	Los Laureles	LLA	94	120	27	0	24	37	1	6	21	43	63	50	90	No
	Montecillo	MON	92	133	32	0	26	44	1	7	28	51	70	91	100	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	83	158	32	0	28	43	2	9	25	52	73	164	115	No
	San Agustín	SAG	62	118	28	0	24	38	1	7	23	45	65	32	88	No
	Tlalnepantla	TLA	93	119	26	0	24	35	2	6	19	41	62	71	96	No
	Tultitlán	TLI	87	154	31	0	28	42	2	7	24	49	72	203	126	No
	Villa de las Flores	VIF	90	123	28	0	22	35	2	9	24	44	61	18	86	No
Xalostoc	XAL	94	133	25	0	23	35	1	5	19	40	59	66	105	No	

Tabla A.IV.5. Estadísticas básicas para óxidos de nitrógeno, la concentración está en ppb, a menos que se indique lo contrario..

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	130	18	0	13	15	6	9	15	24	34
	Camarones	CAM	49	507	51	4	48	41.5	15	22	35	63.5	107
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	91	208	30	2	24	23	10	14	23	37	58
	Cuajimalpa	CUA	69	233	30	3	25	21	10	15	23	36	57
	Hospital General de México	HGM	87	239	39	3	29	31	14	19	31	50	76
	Iztacalco	IZT	95	281	41	5	30	32	14	20	32	52	82
	Merced	MER	93	344	52	4	39	40	18	25	39	65	102
	Miguel Hidalgo	MGH	59	414	48	6	46	35	15	20	31	55	101
	Pedregal	PED	87	192	25	1	19	18	9	13	20	31	49
	Santiago Acahualtepec	SAC	78	296	32	1	31	26	9	13	21	39	66
	Santa Fe	SFE	83	161	29	2	21	20	10	15	22	35	57
	Tláhuac	TAH	81	143	19	1	15	16	6	9	15	25	38
UAM Iztapalapa	UIZ	76	300	37	4	29	29	12	18	29	47	72	
UAM Xochimilco	UAX	82	179	26	0	21	23	7	11	20	34	54	

Tabla A.IV.5. Continuación

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	
Estado de México	Acolman	ACO	44	197	22	2	18	20	6	9	15	29	46	
	Atizapán	ATI	68	207	31	3	28	25	9	13	21	38	67	
	Chalco	CHO	24	397	45	4	50	36	10	15	27	51	106	
	Cuautitlán	CUT	91	322	36	1	38	35	7	11	21	46	83	
	FES Acatlán	FAC	88	264	41	1	39	32	11	17	27	49	94	
	La Presa	LPR	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*
	Los Laureles	LLA	90	4	412	42	2	43	35	11	16	27	51	
	Montecillo	MON	74	3	287	28	1	34	26	5	8	16	34	
	Nezahualcóyotl	NEZ	79	2	321	35	2	32	27	10	15	25	42	
	San Agustín	SAG	64	1	330	38	1	34	33	11	16	27	49	
	Tlalnepantla	TLA	93	4	318	50	4	39	35	18	25	37	60	
	Tultitlán	TLI	75	2	284	38	4	34	32	10	15	27	47	
	Villa de las Flores	VIF	89	4	249	28	1	29	26	5	9	17	35	
Xalostoc	XAL	88	3	509	56	4	50	45	17	25	38	70		

*SD= Sin datos

Tabla A.IV.6. Estadísticas básicas para óxido nítrico, la concentración está en ppb, a menos que se indique lo contrario.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	92	81	4	0	6	3	0	1	2	4	10
	Camarones	CAM	49	444	21	0	39	21	1	2	6	23	61
	Centro Ciencias de la Atmósfera	CCA	91	164	9	0	18	7	0	1	2	8	25
	Cuajimalpa	CUA	69	190	8	0	17	6	1	1	3	7	20
	Hospital General de México	HGM	87	180	12	0	20	14	0	1	4	15	36
	Iztacalco	IZT	95	244	14	0	22	13	1	2	4	15	41
	Merced	MER	93	280	20	0	30	21	1	3	8	24	58
	Miguel Hidalgo	MGH	59	358	20	0	38	17	1	2	5	19	57
	Pedregal	PED	87	153	6	0	12	5	0	0	1	5	16
	Santiago Acahualtepec	SAC	78	225	11	0	23	8	0	1	2	9	30
	Santa Fe	SFE	83	121	8	0	14	7	1	1	2	8	23
	Tláhuac	TAH	81	120	5	0	9	4	1	1	2	5	13
UAM Iztapalapa	UIZ	76	265	12	0	21	13	1	1	4	14	34	
UAM Xochimilco	UAX	82	160	7	0	14	7	0	0	2	7	22	

Tabla A.IV.6. Continuación

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	
Estado de México	Acolman	ACO	44	171	7	0	12	5	0	1	2	6	20	
	Atizapán	ATI	68	160	10	0	20	8	0	1	2	9	32	
	Chalco	CHO	24	348	24	0	44	19	1	3	6	22	76	
	Cuautitlán	CUT	91	292	18	0	33	18	0	1	2	19	57	
	FES Acatlán	FAC	88	244	18	0	32	15	1	2	6	17	54	
	La Presa	LPR	0	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*
	Los Laureles	LLA	90	374	19	0	36	16	1	2	4	18	55	
	Montecillo	MON	74	265	14	0	29	10	0	1	2	11	44	
	Nezahualcóyotl	NEZ	79	292	12	0	24	9	1	1	2	10	33	
	San Agustín	SAG	64	277	15	0	28	15	1	1	4	16	47	
	Tlalnepantla	TLA	93	265	21	0	31	19	2	4	9	23	56	
	Tultitlán	TLI	75	236	14	0	25	13	1	1	3	14	42	
	Villa de las Flores	VIF	89	215	11	0	22	8	0	1	2	9	34	
Xalostoc	XAL	88	456	28	0	43	27	2	5	10	32	75		

*SD= Sin datos

Tabla A.IV.7. Estadísticas básicas para muestras de partículas suspendidas totales, la concentración está en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculada en condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											
				% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	
Ciudad de México	Merced	MER	Alto volumen	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	Alto volumen	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	UAM Iztapalapa	UIZ	Alto volumen	72	138	72	27	31	46	36	48	67	94	117	
Estado de México	Tlalnepantla	TLA	Alto volumen	98	165	83	39	28	42	53	62	73	104	122	
	Xalostoc	XAL	Alto volumen	93	224	130	15	48	76	71	90	128	166	195	

Tabla A.IV.8. Estadísticas básicas para las muestras de PM_{10} del muestreador de referencia (Método FRM, U.S. EPA), la concentración está en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en condiciones locales de presión y temperatura. Las estaciones que tuvieron porcentaje de muestreos válidos $\geq 75\%$ se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
				% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio 24 h $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Promedio anual $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Cumple
Ciudad de México	Lomas	LOM	FRM 16.67 lpm	87	80	35	11	15	22	18	23	32	45	53	80	35	No
	Merced	MER	FRM Alto Volumen	97	78	41	13	18	30	20	26	37	56	67	78	41	No
	Pedregal	PED	FRM 16.67 lpm	79	68	30	11	14	18	14	20	26	38	49	68	31	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	FRM Alto Volumen	72	98	40	10	20	30	18	24	38	54	65	98	43	No
Estado de México	La Presa	LPR	FRM Alto Volumen	95	98	51	15	23	37	23	33	46	70	81	98	51	No
	Nezahualcóyotl	NEZ	FRM Alto Volumen	92	83	42	10	18	27	18	28	38	55	67	83	42	No
	Tlalnepantla	TLA	FRM Alto Volumen	95	91	47	19	17	26	27	34	44	60	71	91	48	No
	Xalostoc	XAL	FRM Alto Volumen	93	125	69	19	27	43	34	47	66	90	103	125	68	No

Tabla A.IV.9. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM₁₀ reportada por los equipos de monitoreo continuo, la concentración está en µg/m³ en condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Tipo de analizador continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
				% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	TEOM (30°C)	93	187	33	1	19	25	12	19	30	44	58
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	42	143	30	2	18	21	12	17	26	38	53
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	50	232	52	2	26	33	22	33	48	66	86
	Cuajimalpa	CUA	BETA (35°C)	84	192	31	1	17	20	12	19	28	39	52
	Gustavo A. Madero	GAM	BETA (35°C)	85	165	45	3	24	32	18	26	41	58	77
	Hospital General de México	HGM	TEOM (30°C)	81	165	42	2	21	27	18	27	39	54	69
	Iztacalco	IZT	BETA (35°C)	94	202	39	1	21	29	14	23	36	52	66
	Merced	MER	TEOM (30°C)	91	227	48	2	25	32	20	30	44	62	80
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	37	191	42	3	19	23	21	29	39	52	66
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	86	160	32	2	19	23	12	19	28	42	56
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	80	217	34	2	21	25	13	20	30	45	61
Tláhuac	TAH	TEOM (35°C)	85	441	49	1	33	39	14	26	43	65	90	
UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	71	192	43	2	22	29	18	27	40	56	71	
Estado de México	Acolman	ACO	BETA (35°C)	47	626	56	1	31	37	21	35	52	72	93
	Atizapán	ATI	TEOM (35°C)	70	282	44	1	27	33	15	25	40	58	79
	Chalco	CHO	TEOM (35°C)	22	294	63	1	34	40	27	39	56	79	107
	Cuautitlán	CUT	TEOM (35°C)	93	373	46	1	33	37	13	23	38	60	89
	FES Acatlán	FAC	TEOM (35°C)	85	307	36	1	25	31	10	18	31	49	69
	Inst. de Investigaciones Nucleares	INN	TEOM (30°C)	38	123	28	2	17	21	10	16	25	37	51
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	33	247	62	4	30	34	30	42	58	76	98
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	78	244	50	1	26	33	21	31	46	64	83
	Tultitlán	TLI	TEOM (35°C)	74	411	46	1	31	37	13	24	39	61	86
	Villa de las Flores	VIF	TEOM (35°C)	75	653	48	1	39	40	12	22	38	62	95
Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	84	418	66	2	41	48	25	37	57	85	118	

Tabla A.IV.10. Estadísticas básicas para las muestras de PM_{2.5} del muestreador de referencia (Método FRM, U.S. EPA), la concentración está en µg/m³ en condiciones locales de presión y temperatura. Las estaciones que tuvieron porcentaje de muestreos válidos ≥ 75% se utilizaron en la evaluación de la NOM.

Entidad	Estación	Clave	Método de muestreo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											CUMPLIMIENTO DE LA NOM		
				% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio 24 h 45 µg/m ³	Promedio anual 12 µg/m ³	Cumple
Ciudad de México	Merced	MER	FRM 16.67 lpm	87	40	22	5	9	13	9	16	20	29	33	40	21.5	No
	Pedregal	PED	FRM 16.67 lpm	95	58	17	4	9	11	9	11	15	22	28	58	17.1	No
	UAM Iztapalapa	UIZ	FRM 16.67 lpm	69	60	18	3	10	13	8	10	16	23	26	60	17.9	No
Estado de México	San Agustín	SAG	FRM 16.67 lpm	87	33	17	4	8	11	7	12	17	23	28	33	17.5	No
	Tlalnepantla	TLA	FRM 16.67 lpm	97	59	22	8	9	11	12	14	20	26	32	59	21.5	No
	Xalostoc	XAL	FRM 16.67 lpm	98	66	26	4	12	14	11	18	25	31	42	66	25.8	No

Tabla A.IV.11. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM_{2.5} reportada por los equipos de monitoreo continuo, la concentración está en µg/m³ en condiciones locales de presión y temperatura.

Entidad	Estación	Clave	Tipo de equipo continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
				% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	BETA (35°C)	37	198	20	1	19	15	5	9	16	24	38
	Ajusco Medio	AJM	TEOM (30°C)	93	117	19	1	13	15	6	10	17	25	35
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	42	121	19	1	13	14	7	10	16	24	34
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	50	162	28	1	17	21	10	16	26	37	49
	C. Ciencias Atmósfera	CCA	BETA (35°C)	89	138	21	1	14	15	7	12	18	27	36
	Gustavo A. Madero	GAM	TEOM-FDMS (30°C)	85	106	24	1	14	17	9	14	21	31	43
	H. General de México	HGM	TEOM (30°C)	81	136	25	1	15	17	9	15	22	32	43
	Merced	MER	TEOM (30°C)	91	165	24	1	15	17	8	14	21	31	42
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	37	173	25	1	15	16	11	16	23	32	42
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	0	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	86	125	19	1	13	15	6	10	17	25	35
	Santiago Acahualtepec	SAC	TEOM (30°C)	72	211	25	1	17	20	8	13	21	33	47
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	80	179	19	1	13	15	6	10	16	25	36
UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	71	168	23	1	15	18	7	13	21	31	42	
UAM Xochimilco	UAX	BETA (35°C)	64	180	22	1	16	16	7	12	19	28	38	
Estado de México	FES Aragón	FAR	TEOM (30°C)	75	236	21	1	14	16	6	11	18	27	37
	Inst. Investigaciones Nucleares	INN	TEOM (30°C)	38	88	16	1	10	11	5	9	14	20	28
	Montecillo	MON	TEOM (30°C)	85	227	21	1	15	17	7	11	18	28	39
	Nezahualcóyotl	NEZ	BETA (35°C)	84	393	27	1	21	20	8	14	23	34	46
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	33	177	26	1	15	18	10	16	25	34	44
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	78	151	25	1	14	17	9	15	22	32	43
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	84	249	26	1	18	21	8	13	22	34	48

*SD= Sin datos

Tabla A.IV.12. Estadísticas de la concentración horaria de PM_{10-2.5} reportada por los equipos de monitoreo continuo, la concentración está en µg/m³ en condiciones locales de presión y temperatura

Entidad	Estación	Clave	Tipo de analizador continuo	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
				% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco Medio	AJM	TEOM (30°C)	93	82	14	1	9	12	4	7	12	19	26
	Benito Juárez	BJU	TEOM (30°C)	42	67	12	1	8	9	4	6	10	15	22
	Camarones	CAM	TEOM (30°C)	50	196	23	1	13	16	9	14	21	30	40
	Gustavo A. Madero	GAM	TEOM (30°C)	85	128	20	1	13	16	6	11	18	27	38
	Hospital General de México	HGM	TEOM (30°C)	81	96	17	1	10	12	6	10	15	22	30
	Merced	MER	TEOM (30°C)	91	118	24	1	14	18	8	14	22	32	43
	Miguel Hidalgo	MGH	TEOM (30°C)	37	77	17	1	8	10	8	11	15	21	27
	Milpa Alta	MPA	TEOM (30°C)	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*	SD*
	Pedregal	PED	TEOM (30°C)	86	67	13	1	8	10	4	7	11	17	24
	Santa Fe	SFE	TEOM (30°C)	80	105	15	1	10	12	5	8	13	20	28
UAM Iztapalapa	UIZ	TEOM (30°C)	71	113	20	1	12	15	7	11	18	26	36	
Estado de México	Inst. de Investigaciones Nucleares	INN	TEOM (30°C)	38	76	12	1	10	10	3	6	9	16	25
	San Agustín	SAG	TEOM (30°C)	33	181	36	1	21	22	15	22	32	44	60
	Tlalnepantla	TLA	TEOM (30°C)	78	206	25	1	16	19	8	14	23	33	46
	Xalostoc	XAL	TEOM (30°C)	84	294	40	1	28	30	13	21	34	51	74

*SD= Sin datos

Tabla A.IV.13. Estadísticas básicas para temperatura ambiente, todas las unidades están en °C.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	40	22.1	11.2	-2.8	4.0	5.2	6.3	9.0	11.0	14.2	16.5
	Ajusco Medio	AJM	79	27.8	17.0	5.2	3.7	5.2	12.5	14.4	16.6	19.6	22.3
	Benito Juárez	BJU	97	30.6	18.4	6.8	4.1	5.9	13.5	15.5	17.8	21.4	24.2
	Cuajimalpa	CUA	99	25.8	14.9	5.3	3.7	5.3	10.7	12.2	14.4	17.5	20.2
	Gustavo A. Madero	GAM	99	30.7	18.7	5.9	4.3	6.1	13.6	15.7	18.2	21.8	24.7
	Hospital General de México	HGM	75	29.3	18.0	6.7	4.0	5.6	13.2	15.2	17.5	20.8	23.5
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	96	31.6	18.9	5.8	4.7	6.8	13.2	15.5	18.3	22.3	25.5
	Merced	MER	93	29.9	18.5	6.1	4.1	6.0	13.75	15.6	18.0	21.6	24.3
	Miguel Hidalgo	MGH	100	30.4	18.5	7.6	4.1	6.0	13.7	15.5	17.8	21.5	24.4
	Milpa Alta	MPA	98	26.6	15.4	4.6	3.9	5.6	10.7	12.7	15.0	18.3	20.8
	Pedregal	PED	98	29.9	17.6	6.1	4.3	6.2	12.5	14.5	17.0	20.7	23.6
	Santa Fe	SFE	99	26.9	15.5	4.7	3.9	5.6	10.7	12.7	15.0	18.3	21.0
	Tláhuac	TAH	98	30.6	17.4	4.8	4.6	6.7	11.8	14.1	16.8	20.8	23.7
	UAM Iztapalapa	UIZ	91	30.4	18.9	6.7	4.1	5.9	13.9	16.0	18.3	21.9	24.6
UAM Xochimilco	UAX	49	30.5	17.2	5.4	5.1	7.9	10.6	13.3	17.0	21.2	24.1	

Tabla A.IV.13. Continuación.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Estado de México	Acolman	ACO	96	29.7	16.9	1.0	5.2	7.5	10.2	13.4	16.6	20.9	24.0
	Chalco	CHO	100	29.5	16.9	1.9	4.9	6.9	10.6	13.7	16.7	20.6	23.4
	Cuautitlán	CUT	95	30.5	16.1	-0.7	6.0	8.7	7.9	12.0	15.8	20.7	24.1
	FES Acatlán	FAC	100	33.6	17.7	1.0	6.3	9.6	9.8	13.2	16.9	22.8	26.5
	Inst. de Investigaciones Nucleares	INN	51	23.2	10.0	-2.8	5.7	9.4	2.9	5.3	9.5	14.7	17.9
	Montecillo	MON	96	33.4	17.7	1.4	5.8	8.1	10.4	13.9	17.3	22.0	25.4
	Nezahualcóyotl	NEZ	97	29.6	17.0	3.6	4.3	6.0	11.8	14.1	16.5	20.1	23.1
	San Agustín	SAG	87	31.0	18.9	6.3	4.6	6.3	13.2	15.9	18.4	22.2	25.2
	Tlalnepantla	TLA	68	29.1	17.0	5.7	4.3	6.3	11.5	14.0	16.5	20.3	23.1
	Villa de las Flores	VIF	84	30.8	17.7	4.1	5.1	7.3	11.3	14.2	17.2	21.5	24.9
Xalostoc	XAL	74	28.9	17.4	6.0	3.9	5.7	12.6	14.7	17.0	20.4	22.9	

Tabla A.IV.14. Estadísticas básicas para humedad relativa, todas las unidades están en %.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Ajusco	AJU	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Ajusco Medio	AJM	82	99	48	3	20	32	23	33	46	65	75
	Benito Juárez	BJU	97	91	50	3	20	32	24	35	51	67	76
	Cuajimalpa	CUA	99	92	56	4	21	35	27	39	56	74	82
	Gustavo A. Madero	GAM	94	98	55	6	20	33	27	39	56	72	81
	Hospital General de México	HGM	75	86	48	5	19	30	23	33	48	63	72
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	97	100	56	7	21	35	27	39	57	74	84
	Merced	MER	99	95	51	3	20	33	23	35	52	68	77
	Miguel Hidalgo	MGH	99	88	47	1	20	35	20	30	46	65	74
	Milpa Alta	MPA	97	91	55	3	19	30	28	41	56	71	79
	Pedregal	PED	98	92	52	4	20	33	25	36	52	69	78
	Santa Fe	SFE	85	96	60	5	21	34	29	44	62	78	85
	Tláhuac	TAH	98	88	49	1	19	32	22	34	50	66	74
	UAM Iztapalapa	UIZ	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
UAM Xochimilco	UAX	85	93	52	4	20	34	24	35	52	69	78	
Estado de México	Acolman	ACO	96	96	55	1	22	36	24	38	58	74	83
	Chalco	CHO	100	92	56	5	20	31.5	28	40.5	58	72	81
	Cuautitlán	CUT	87	96	63	2	25	43	27	43	67.5	86	93
	FES Acatlán	FAC	100	93	54	1	24	42	21	33	55	75	85
	Inst. Investigaciones Nucleares	INN	56	94	60	7	23	42	28	40	62	82	89
	Montecillo	MON	96	93	56	2	22	37	24	39	59	76	85
	Nezahualcóyotl	NEZ	97	93	50	4	19	31	24	35	51	66	74
	San Agustín	SAG	84	100	55	4	22	37	24	37	55	74	84
	Tlalnepantla	TLA	68	88	49	5	19	32	23	34	50	66	74
	Villa de las Flores	VIF	100	99	52	1	21	36	22	34	53	70	79
Xalostoc	XAL	74	86	48	4	18	29	23	34	49	63	71	

Tabla A.IV.15. Estadísticas básicas para velocidad de viento, todas las unidades están en m/s.

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS											Porcentaje de calmas	Dirección del viento dominante*
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90		
Ciudad de México	Ajusco	AJU	71	8.6	2.6	0	1.3	1.5	1.1	1.7	2.4	3.2	4.4	0.2	SSO
	Ajusco Medio	AJM	100	14.3	2.8	0	1.6	1.8	1.2	1.7	2.5	3.5	4.8	0.4	ONO
	Benito Juárez	BJU	97	6.9	1.8	0.2	0.9	1.1	0.8	1.1	1.7	2.2	3	0.1	NNE
	Cuajimalpa	CUA	99	6.6	2	0.1	0.9	1.1	1	1.4	1.9	2.5	3.1	0.1	NNO
	Gustavo A. Madero	GAM	94	8.8	1.9	0	1.3	1.4	0.6	1.1	1.7	2.5	3.8	3.8	NE
	Hospital General de México	HGM	75	8.7	2.3	0	1.2	1.7	0.9	1.3	2	3	4	1.1	NNO
	Laboratorio Análisis Ambiental	LAA	99	6	1.8	0	0.9	1.2	0.7	1.1	1.7	2.3	3	0	NNO
	Merced	MER	99	7.1	2.1	0.3	1	1.3	1	1.4	1.9	2.7	3.7	0.1	NNE
	Miguel Hidalgo	MGH	100	7.5	2	0	1	1.2	0.8	1.3	1.9	2.5	3.3	1.3	N
	Milpa Alta	MPA	97	10.4	2.9	0.2	1.4	1.6	1.4	1.9	2.6	3.5	4.6	0	SSO
	Pedregal	PED	98	7.2	1.9	0.1	0.9	1	0.9	1.3	1.8	2.3	3.1	0.1	ONO
	Santiago Acahualtepec	SAC	83	10.1	2.3	0	1.3	1.7	0.9	1.3	2	3	4.3	0.5	NE
	Santa Fe	SFE	99	8.4	2.3	0.2	0.9	1.1	1.3	1.7	2.2	2.8	3.7	0	O
	Tláhuac	TAH	98	7.6	2	0.1	1.2	1.4	0.8	1.1	1.7	2.5	3.6	0	O
	UAM Iztapalapa	UIZ	91	10	2.1	0	1.1	1.4	1	1.3	1.9	2.7	3.7	0.9	NE
UAM Xochimilco	UAX	97	7.4	2	0.1	1.1	1.2	0.9	1.3	1.7	2.5	3.6	0	ESE	
Estado de México	Acolman	ACO	95	10	2.3	0	1.4	1.7	1	1.3	1.9	3	4.4	0	N
	Chalco	CHO	100	6.9	1.8	0	1.2	1.7	0.5	0.8	1.4	2.5	3.6	0.5	ESE
	Cuautitlán	CUT	99	5.1	1.5	0	0.9	1.4	0.5	0.7	1.4	2.1	2.7	0.6	N
	FES Acatlán	FAC	100	7.2	1.7	0	0.9	1.1	0.8	1.1	1.6	2.2	3	0.1	NO
	FES Aragón	FAR	57	11.6	2.4	0	1.3	1.6	1.1	1.4	2	3	4.3	0.2	ENE
	Inst. Investigaciones Nucleares	INN	89	7.4	1.6	0	1.1	1.4	0.5	0.8	1.3	2.2	3.1	0.3	SE
	Montecillo	MON	98	8.4	2.1	0	1.6	2	0.4	0.8	1.7	2.8	4.5	2.7	E
	Nezahualcóyotl	NEZ	91	8.4	2.5	0	1.4	1.6	1.1	1.5	2.1	3.1	4.5	0.2	ENE
	San Agustín	SAG	89	7.1	1.6	0	0.9	1.1	0.6	1	1.4	2.1	2.8	2.4	NE
	Tlalnepantla	TLA	68	7.4	2.3	0.1	1.1	1.5	1	1.5	2.1	3	4	0.9	NO
	Villa de las Flores	VIF	100	7.3	2	0.1	1.1	1.2	0.9	1.3	1.7	2.5	3.5	0.1	NNO
Xalostoc	XAL	73	13	2.9	0	2	2.3	1	1.5	2.4	3.8	5.9	1.3	NE	

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

Tabla A.IV.16. Estadísticas básicas para radiación solar ultravioleta A, todas las unidades están en W/m².

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Laboratorio Análisis Ambiental	LAA	100	5.508	1.01	0	1.433	1.846	0	0	0.05	1.846	3.468
	Merced	MER	10	5.546	1.127	0	1.597	2.183	0	0	0	2.183	3.88
	Milpa Alta	MPA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	96	5.918	1.092	0	1.544	2.042	0	0	0.052	2.042	3.743
	Santa Fe	SFE	87	6.076	1.14	0	1.62	2.15	0	0	0.045	2.15	3.85
Estado de México	Chalco	CHO	100	5.222	0.968	0	1.348	1.856	0	0	0.05	1.856	3.302
	Cuautitlán	CUT	99	6.508	1.31	0	1.825	2.542	0	0	0.065	2.542	4.461
	FES Acatlán	FAC	94	5.718	1.08	0	1.522	1.981	0	0	0.062	1.981	3.685
	Montecillo	MON	83	6.422	1.2	0	1.688	2.263	0	0	0.048	2.263	4.096
	San Agustín	SAG	93	5.981	1.157	0	1.635	2.208	0	0	0.05	2.208	4.012
	Tlalnepantla	TLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

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

Entidad	Estación	Clave	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										
			% datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación Estándar	Rango intercuartil	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
Ciudad de México	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	100	0.3263	0.040	0	0.062	0.064	0	0	0.0004	0.064	0.149
	Merced	MER	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Milpa Alta	MPA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Pedregal	PED	96	0.359	0.051	0	0.081	0.078	0	0	0.0003	0.078	0.193
	Santa Fe	SFE	88	0.370	0.052	0	0.035	0.077	0	0	0.0001	0.077	0.198
Estado de México	Chalco	CHO	100	0.264	0.038	0	0.061	0.063	0	0	0.0003	0.063	0.146
	Cuautitlán	CUT	99	0.345	0.057	0	0.090	0.094	0	0	0.0002	0.093	0.216
	FES Acatlán	FAC	94	0.267	0.040	0	0.063	0.063	0	0	0.0002	0.063	0.152
	Montecillo	MON	82	0.380	0.056	0	0.090	0.090	0	0	0.0002	0.090	0.215
	San Agustín	SAG	93	0.295	0.047	0	0.074	0.077	0	0	0.0003	0.077	0.180
	Tlalnepantla	TLA	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Tabla A.IV.18. Estadísticas básicas para depósito atmosférico húmedo, calculados para la campaña de mayo a octubre de 2019, en la época de lluvias.

Entidad	Estación	Clave	PP	pH			ANIONES			CATIONES					
			Precipitación pluvial total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje de eventos de lluvia ácida (%)	NO ₃ ⁻ depósito total (kg/ha)	SO ₄ ⁻² depósito total (kg/ha)	Cl ⁻ depósito total (kg/ha)	NH ₄ ⁺ depósito total (kg/ha)	Ca ²⁺ depósito total (kg/ha)	K ⁺ depósito total (kg/ha)	H ⁺ depósito total (kg/ha)	Mg ²⁺ depósito total (kg/ha)	Na ⁺ depósito total (kg/ha)
Ciudad de México	Ajusco	AJU	1048	4.2	5.9	41	19.3	24.5	2.3	11.7	4.7	0.5	0.12	0.6	0.6
	Cerro del Tepeyac	TEC	594	4.9	6.6	10	16	17.8	1.3	10.6	8.6	0.4	0.01	0.4	0.6
	Corena	COR	435	4.8	6.6	8	10.3	11.4	1	7.5	3.2	0.3	0.01	0.3	0.4
	Diconsa	DIC	936	4.7	6.5	19	25.8	25.1	1.7	16.4	7.4	0.6	0.02	0.6	0.6
	Eco guardas Ajusco	EAJ	894	4.7	6.3	18	20	20.8	1.6	12.8	5.7	0.4	0.02	0.5	0.6
	Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	1139	4.4	6.1	28	23.8	23	1.8	14	6.2	0.5	0.07	0.5	0.5
	Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	637	4.9	6.1	30	16.4	20	1.3	11.3	4.4	0.3	0.03	0.3	0.5
	Legaria	IBM	779	4.8	6.5	4	21.1	23.7	1.7	14	7.2	0.4	0.01	0.5	0.6
	Lomas	LOM	996	4.6	6.4	12	27.9	28.2	1.9	17.5	7	0.6	0.04	0.5	0.7
	Milpa Alta	MPA	525	4.4	5.9	36	11	14.1	1.6	7.6	2.6	0.4	0.04	0.3	0.4
	Museo de la Ciudad de México	MCM	884	4.9	6.6	8	21.1	26.2	1.7	15.5	7.7	0.6	0.01	0.4	0.6
San Nicolás Totolapan	SNT	1040	4.8	6.3	23	19	21.6	1.9	13.3	5	0.9	0.04	0.5	0.5	
Estado de México	Montecillo	MON	365	4.6	6.3	24	8.9	10.8	0.8	6.8	2.4	0.2	0.02	0.2	0.2
	Nezahualcóyotl	NEZ	606	5.1	6.5	4	14.8	16.9	1.3	11.3	4.1	0.4	0.01	0.3	0.4
	Tlalnepantla	TLA	621	5.1	6.5	14	16.8	24.1	1.3	11.7	6.6	0.4	0.01	0.4	0.5
	Xalostoc	XAL	691	6.1	6.7	0	16.1	21	1.4	12.2	6.1	0.4	0	0.4	0.6

Tabla A.IV.19. Conteo de días con calidad del aire favorable. Un día es “bueno” si la concentración del contaminante ≤ 100 puntos del índice de calidad del aire.

Entidad	Estación	Clave	OZONO			PM ₁₀			PM _{2.5}			Total	
			% datos válidos	% días malos	% días buenos	% datos válidos	% días malos	% días buenos	% datos válidos	% días malos	% días buenos	% días malos	% días buenos
Ciudad de México	Ajusco	AJU	56	14	42	—	—	—	41	2	39	15	43
	Ajusco Medio	AJM	96	21	75	96	7	89	96	1	95	22	74
	Benito Juárez	BJU	83	28	55	45	3	42	45	1	44	29	55
	Camarones	CAM	52	16	36	53	21	32	53	2	51	19	33
	Centro Ciencias Atmósfera	CCA	100	27	73	—	—	—	91	2	89	28	72
	Cuajimalpa	CUA	97	16	81	89	4	85	—	—	—	18	80
	Gustavo A. Madero	GAM	97	29	68	89	22	67	89	1	88	32	67
	Hospital General de México	HGM	91	23	68	84	13	71	84	2	82	24	68
	Iztacalco	IZT	99	23	76	96	11	85	—	—	—	25	75
	Merced	MER	99	24	75	97	27	70	97	2	95	30	70
	Miguel Hidalgo	MGH	100	19	81	40	5	35	40	2	38	20	80
	Milpa Alta	MPA	97	22	75	—	—	—	—	—	—	22	75
	Pedregal	PED	96	37	59	89	4	85	90	1	89	38	59
	Santiago Acahualtepec	SAC	81	13	68	—	—	—	74	2	72	17	65
	Santa Fe	SFE	90	13	77	86	10	76	85	1	84	15	77
Tláhuac	TAH	98	21	77	93	46	47	—	—	—	30	70	
UAM Iztapalapa	UIZ	81	13	68	78	13	65	78	1	77	16	66	
UAM Xochimilco	UAX	92	23	69	—	—	—	68	2	66	25	71	
Estado de México	Acolman	ACO	64	0	64	47	25	22	—	—	—	13	52
	Atizapán	ATI	72	4	68	72	33	39	—	—	—	7	66
	Chalco	CHO	33	0	33	22	20	2	—	—	—	8	24
	Cuautitlán	CUT	99	12	87	99	58	41	—	—	—	20	80
	FES Acatlán	FAC	99	20	79	92	26	66	—	—	—	21	78
	FES Aragón	FAR	81	20	61	—	—	—	79	1	78	21	62
	Inv. Nucleares	INN	77	10	67	40	1	39	40	0	40	10	70
	La Presa	LPR	99	15	84	—	—	—	—	—	—	15	84
	Los Laureles	LLA	98	6	92	—	—	—	—	—	—	6	92
	Montecillo	MON	97	12	85	—	—	—	90	3	87	14	85
	Nezahualcóyotl	NEZ	88	18	70	—	—	—	87	4	83	22	70
	San Agustín	SAG	67	4	63	36	24	12	36	1	35	14	53
	Tlalnepantla	TLA	99	9	90	85	33	52	86	1	85	15	85
	Tultitlán	TLI	91	20	71	79	41	38	—	—	—	23	68
Villa de las Flores	VIF	94	2	92	81	36	45	—	—	—	19	76	
Xalostoc	XAL	100	7	93	89	56	33	89	3	86	44	56	
Total	Ciudad de México *		100	54	46	100	21	79	100	12	88	39	61
	Estado de México *		100	41	59	100	47	53	100	13	87	37	63
	Zona metropolitana *		100	59	41	100	48	52	100	15	85	24	76

* Considerando todas las estaciones de la RAMA con excepción de las estaciones de arrastre.



ANEXO V

PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS

Tabla A.V.1. Activación de Fase de Precontingencia a partir de 2001 (derogada en 2016).

Año	Activación				Desactivación	
	Contaminante	Fecha y hora	Estación	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 I
2003	PM ₁₀	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 ₁₀	25-dic 09:00	XAL	164	25-dic 12:00	Se activó la Fase I
2005	PM ₁₀	01-ene 06:00	VIF	167	01-ene 08:00	Se activó la Fase I
2006	PM ₁₀	01-ene 09:00	VIF	169	02-ene 03:00	18 h
	PM ₁₀	16-mar 19:00	SAG	167	17-mar 17:00	22 h
2007	Ozono	14-abr 16:00	PED	185	16-abr 16:00	48 h
	Ozono	23-jun 15:00	COY	172	24-jun 15:00	24 h
	Ozono	27-jul 16:00	TPN	184	28-jul 16:00	24 h
2008	Ozono	08-abr 16:00	EAC	172	09-abr 16:00	24 h
	Ozono	10-may 17:00	COY	172	11-may 17:00	24 h

Tabla A.V.1. Continuación

Año	Activación				Desactivación	
	Contaminante	Fecha y hora	Estación	IMECA	Fecha y hora	Duración
2009	Ozono	13-feb 17:00	PED	180	16-feb 17:00	72 h
	PM ₁₀	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 ₁₀	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	159	12-nov 15:00	23 h
	-	-	HGM	151	-	-
	PM ₁₀	25-dic 11:00	VIF	152	26-dic 10:00	23 h
2013	PM ₁₀	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	159	10-abr 19:00	50 h
	Ozono	05-may 16:00	IZT	157	06-may 18:00	26 h
	Ozono	09-may 17:00	PED	161	10-may 20:00	27 h
	Ozono	10-jun 16:00	COY	152	12-jun 17:00	49 h
	Ozono	04-oct 16:00	FAC	170	05-oct 17:00	25 h
2016*	PM ₁₀	25-dic 08:00	VIF	151	26-dic 12:00	28 h
	Ozono	19-feb 16:00	CHO	157	20-feb 17:00	25 h
	Ozono	21-feb 15:00	GAM	155	22-feb 20:00	29 h
	Ozono	12-mar 17:00	GAM	159	14-mar 16:00	Pasó a Fase I
	Ozono	04-abr 18:00	BJU	155	05-abr 17:00	Pasó a Fase I

A partir del 6 de abril de 2016 las autoridades Federales decidieron reducir el valor del umbral de activación de la Fase I, dejando como límite el valor de 155 ppb que correspondía al valor de Precontingencia, por esto desaparece la Fase de Precontingencia del PCAA.

Tabla A.V.2. . Activación de Fases de Contingencia I, II, Regional y Extraordinaria entre 2001 y 2019.

Año	Activación					Desactivación	
	Contaminante	Fecha y hora	Estación	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 ₁₀	25-dic 12:00	XAL	176	Fase I	26-dic 12:00	24 h
2004	-	-	-	-	-	-	-
2005	PM ₁₀	01-ene 08:00	VIF	181	Fase Regional	02-ene 08:00	24 h
2006	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-	-	-
2010	-	-	-	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-	-	-
2013	-	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-
2016	Ozono	14-mar 16:00	CUA	194	Fase I	17-mar 16:00	72 h
	Ozono	05-abr 17:00	AJM	156	Fase I*	06-abr 17:00	24 h
	Ozono	02-may 15:00	BJU	161	Fase I*	05-may 17:00	74 h
	Ozono	14-may 17:00	TAH	157	Fase I*	15-may 15:00	22h
	Ozono	20-may 15:00	SFE	178	Fase I*	21-may 17:00	26 h
	Ozono	24-may 15:00	CAM	151	Fase I*	24-may 21:00	06 h
	Ozono	27-may 15:00	GAM	165	Fase I*	28-may 18:00	27 h
	Ozono	31-may 16:00	MGH	155	Fase I*	01-jun 18:00	26 h
2017	Ozono	08-jul 17:00	SFE	152	Fase I*	09-jun 15:00	22 h
	Ozono	11-ago 16:00	AJM	151	Fase I*	12-ago 17:00	25 h
	PM ₁₀	06-ene 09:00	XAL	153	Fase I Regional	07-ene 09:00	24 h
	Ozono	15-may 16:00	AJM	151	Fase I*	21-may 19:00	147 h
2018	Ozono	22-may 15:00	GAM	162	Fase I*	24-may 18:00	51 h
	PM ₁₀	14-dic 11:00	SAG	154	Fase I Regional	15-dic 09:00	22 h
	Ozono	06-jun 16:00	PED	161	Fase I*	07-jun 16:00	24 h
2019	PM ₁₀	25-dic 11:00	VIF	152	Fase I Regional	26-dic 10:00	23 h
	PM ₁₀	01-ene 09:00	VIF	157	Fase I Regional	02-ene 10:00	25 h
	Ozono	30-mar 15:00	PED	155	Fase I	31-mar 15:00	24 h
	Ozono	10-abr 17:00	PED	152	Fase I	11-abr 15:00	22 h
	Ozono	16-abr 17:00	CAM	154	Fase I	18-abr 15:00	46 h
	PM _{2.5} y Ozono **	14-may 15:00	NEZ	161	Contingencia Extraordinaria	17-may 19:00	74 h
PM _{2.5}	25-dic 11:00	NEZ	142	Fase I Regional	26-dic 10:00	23 h	

* A partir del 5 de abril de 2016 las autoridades Federales redujeron el valor de activación de la Fase I, dejando el límite en 155 ppb (150 puntos del Índice de Calidad del Aire) que correspondía al valor de Precontingencia, desapareciendo esta Fase.

Se activó **Contingencia Ambiental Extraordinaria por Partículas PM_{2.5} y Ozono. Posteriormente el 28 de mayo se publicó el Aviso por el que se da a conocer el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas que incluye Fase Preventiva, Fase I, Fase II y Fase Combinada por PM₁₀ o PM_{2.5} y Ozono



ANEXO VI

MOSAICOS

Partículas menores a 2.5 µm (PM_{2.5})

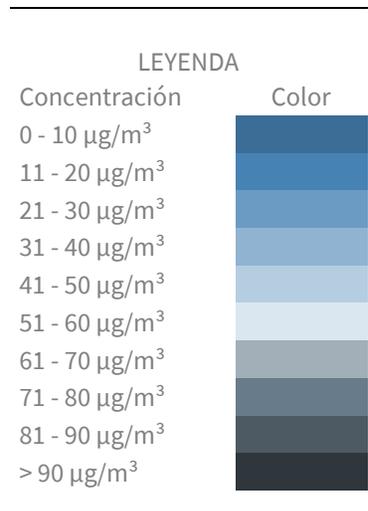


Figura A.VI.1. Mosaico de PM_{2.5}. Cada celda es el máximo diario del promedio móvil de 24 h del 2004 al 2019. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de PM_{2.5} de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.



Partículas menores a 10 µm (PM₁₀)

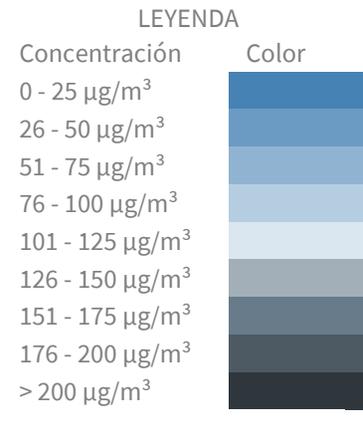
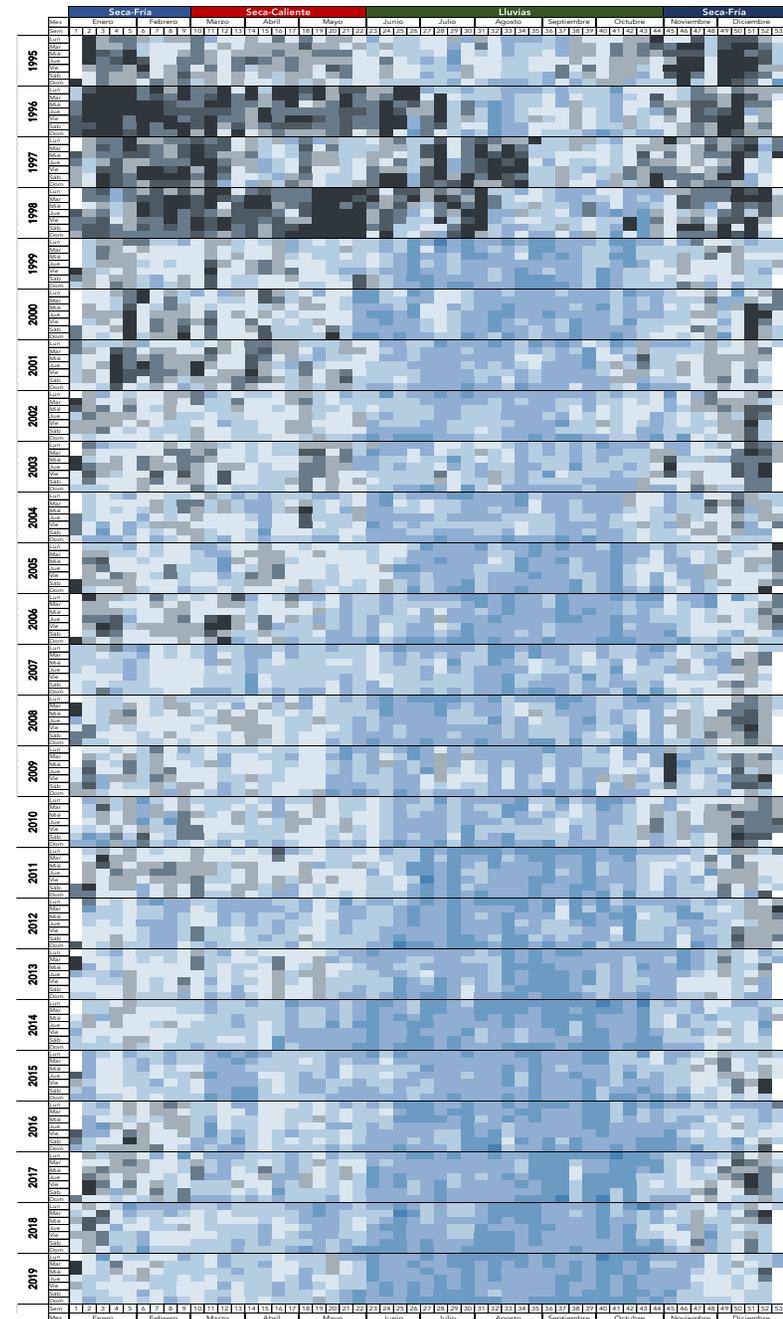


Figura A.VI.2. Mosaico de PM₁₀. Cada celda es el máximo diario del promedio móvil de 24 h del 1995 al 2019. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de PM₁₀ de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.



Ozono

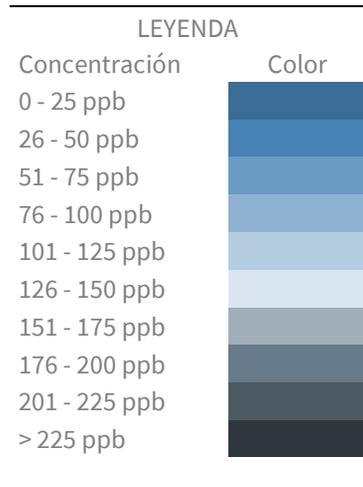
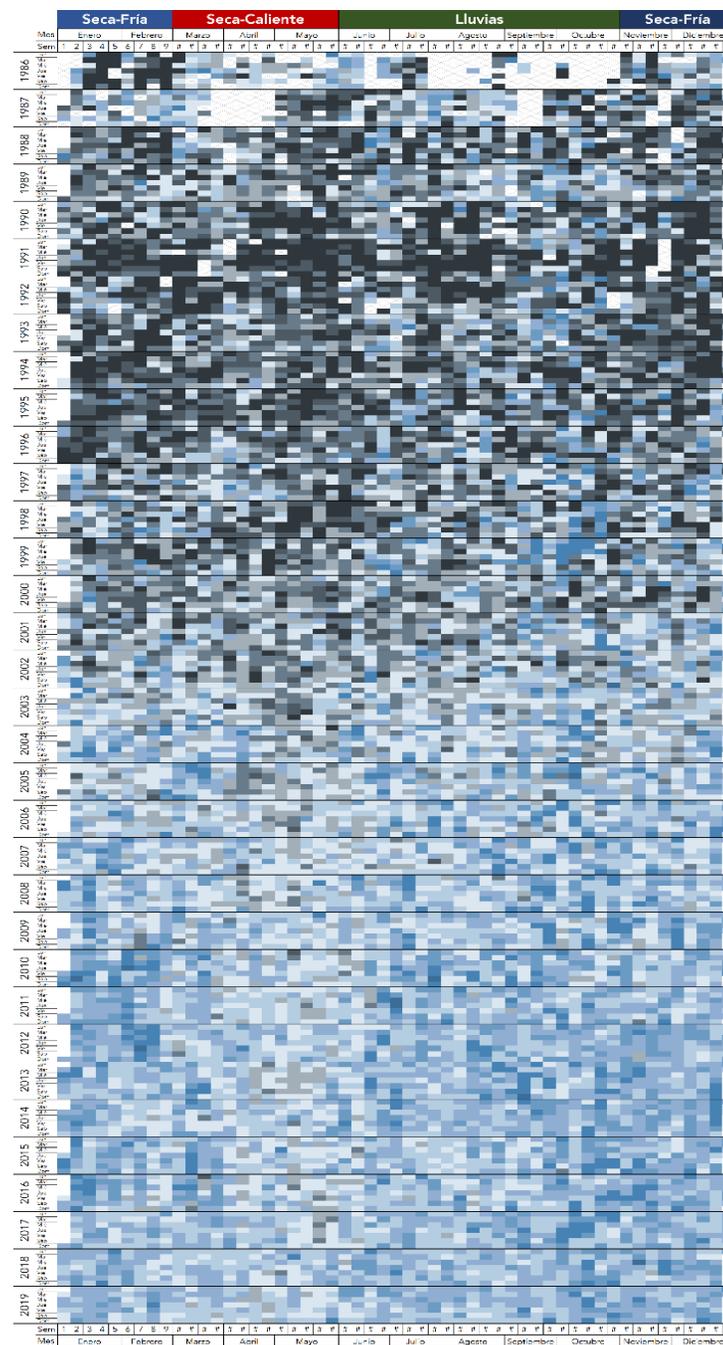


Figura A.VI.3. Mosaico de O₃. Cada celda es el máximo diario del promedio 1 h de 1986 al 2019. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de ozono de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.





GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

SEDEMA

CALIDAD
DEL AIRE



www.aire.cdmx.gob.mx



@Aire_CDMX



App: AIRE

Disponible para:

