



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

SEDEMA

CALIDAD
DEL AIRE

Informe anual

Calidad del aire

2023

Ciudad de México



Claudia Sheinbaum Pardo
Jefa de Gobierno de la Ciudad de México

Marina Robles García
Secretaria del Medio Ambiente

Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Director General de Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández
Directora de Monitoreo de Calidad del Aire

Mónica del Carmen Jaimes Palomera
Subdirectora de Análisis y Modelación

Alfredo Alfonso Soler
Subdirector de Análisis Meteorológico

Miguel Sánchez Rodríguez
Subdirector de Monitoreo de Calidad del Aire

José Luis del Río Jáuregui
Subdirector de Sistemas y Comunicaciones

PRESENTACIÓN

En el 2023, hubo eventos ambientales y climáticos de gran relevancia a nivel internacional y nacional. En septiembre, se realizó la Cumbre sobre la Ambición Climática convocada por Naciones Unidas (UN) en Nueva York, con el objetivo de acelerar las medidas para reducir los gases de efecto invernadero (GEI) y mantener el calentamiento global por debajo de los 1.5 °C. En diciembre se celebró la COP28 en Dubái, en la cual, la delegación mexicana participó y centró su postura en una acción climática con justicia social, respeto a los derechos humanos y equidad de género. México también se sumó al Compromiso Mundial sobre Energías Renovables y Eficiencia Energética. Dichos eventos representan puntos de reflexión y acción, con compromisos internacionales, así como la aplicación de la nueva evidencia científica en el diseño de políticas públicas para los próximos años.

A nivel local, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) también se implementan estrategias para mejorar la calidad del aire, por ejemplo, la Campaña Pro-Vehículos Limpios en la temporada de ozono 2023, organizada por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) y los gobiernos que la conforman. Esta campaña recopiló datos con sensores remotos para la caracterización del parque vehicular y de sus emisiones en las zonas urbanas dentro de la CAME. El análisis de las fuentes de emisión es fundamental para mejorar la calidad del aire; sin embargo, también existen factores naturales como las variables meteorológicas y su dependencia con el cambio climático; factores que deben ser considerados en el análisis e implementación de estrategias; por ejemplo, el patrón climático ENOS y sus fases (La Niña/Neutro/El Niño), que implican cambios en la temperatura, patrones de viento, humedad y precipitación, entre otros. Los cuales contribuyen a la generación, acumulación y dispersión de los contaminantes.

El estudio completo de los factores relacionados con la calidad del aire, desde la caracterización de las emisiones hasta el comportamiento de variables meteorológicas y climáticas locales o a gran escala, ayudan a una mejor comprensión de los niveles de contaminación en la ZMCM; especialmente en aquellos contaminantes que constantemente superan los niveles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), como son ozono o partículas suspendidas (PM₁₀ y PM_{2.5}). Es por estas razones, que se realiza este informe anual de calidad del aire, en el que se estudia y presentan los resultados del análisis integral de las variables que afectan la calidad del aire en la ZMCM.

Secretaría del Medio Ambiente

Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire

Elaboración del documento

Mónica del Carmen Jaimes Palomera,
Cintia Gabriela Reséndiz Martínez,
Citlalli Mendoza Munguía,
Ángel Fragoso Chino
Milena Lemes Rosales
Jorge Lara Osorio

Gráficos y estadísticos

Citlalli Mendoza Munguía,
Ángel Fragoso Chino
Daniel Eusebio Quintero Vallejo
Cintia Gabriela Reséndiz Martínez
Milena Lemes Rosales
Erick David Vázquez Gutiérrez

Edición del documento

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

Diseño

Paola Guadalupe Hernández Sánchez
Montserrat Martínez Mendoza

D.R. © 2025

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



Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

fotografías de los capítulos

Se tomaron de la plataforma Pexels.com de varios autores:
<https://www.pexels.com/es-es/>

Algunas fotos son cortesía de Alfonso López Medina y del repositorio del SIMAT

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. 2025. **Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe anual 2023**. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.



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

Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire

Olivia Rivera Hernández

Subdirección de Análisis y Modelación

Mónica del Carmen Jaimes Palomera, Alejandro Jonathan Gallardo Pérez, Cintia Gabriela Reséndiz Martínez, Citlalli Mendoza Munguía, Ángel Fragoso Chino, Eduardo Preciado Martínez, Jorge Luis Lara Osorio, Sofía Fernanda Moreno Gillestegui, Laura Edith Ocampo Trejo, Omar Alejandro Quijada Pérez, Claudia Lizeth Florean Cruz, Brenda González Calderon, Patricia Dominguez Taylor.

Subdirección de Análisis Meteorológico

Alfredo Alfonso Soler, Milena Lemes Rosales, José Ávalos Torres, Yoel Alejandro Cala Pérez

Subdirección de Monitoreo de Calidad del Aire

Miguel Sánchez Rodríguez, Alfonso López Medina, Jorge Domínguez Ochoa, Arturo Galicia Zepeda, María del Rocío Carmona Martir, Ma Dolores Maya Rojas, Anabel Rivera Arenas, Gabriel Elías Castro, José Armando González Aguayo, Edson Jair Quevedo Reyes, María Luisa Quintanar Chávez, Fernando Alonso Vega Bernal, Mario Alberto Cano Rodríguez, Julio Cesar Argueta Rodríguez, Eloy Contreras Sánchez, Jesús Yael Jiménez Valdez, Jesús Arriaga Falconi, Viviana Jaqueline Campos Torres, Salvador Cervantes Garduño, Abraham López Dorantes, Donald Manuel Godínez Ángeles, Ernesto González Carmona, Ulises Josué López Fabian, Adrian Pérez Narváez, Ángel Cesar Sánchez Martínez, José Salvador Juárez Mendoza, Daniel Alejandro Rivera Ávila, Fernando Reyes Sandoval.

Subdirección de Sistemas y Comunicaciones

José L. del Río Jáuregui, Juan M. Arriaga Cosío, Mauricio Hernández Mote, Leyda Castro Rodríguez, Julio Martínez Alpízar, Gabriela Hernández Cruz, Gabriela Holguín Pacheco, Víctor Valdés Espinosa, Christian Martínez Lozano, Paola Guadalupe Hernández Sánchez, Montserrat Martínez Mendoza, Sergio Vargas Garduño, Victor Manuel Muñoz Valladares, Miguel Ángel Velóz Lucas.

Administración

Margarita Barrientos Contreras, Xóchitl Loretto Carmona, Adriana Ramírez Tecla, Francisco J. Serrano Vázquez, Carla Mayorga Domínguez, Samuel López Venegas, Juan Manuel Campos Díaz.

En la elaboración de este informe se tuvo la colaboración del **Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático- Análisis del depósito atmosférico**: Rodolfo Sosa Echeverría, Ana Luisa Alarcón Jiménez

ÍNDICE

Resumen ejecutivo	11
Capítulo 1: Cumplimiento de la normatividad	16
Dióxido de azufre	20
Dióxido de nitrógeno	23
Monóxido de carbono	26
Ozono	29
Partículas PM ₁₀	32
Partículas PM _{2.5}	35
Capítulo 2: El Tiempo	38
Temperatura	39
Humedad relativa	46
Precipitación	49
Viento	53
Presión atmosférica	62
Radiación solar ultravioleta	64
Índice UV	68
CAPÍTULO 3: Calidad del aire	72
Micro y Nano plásticos (NMP) en el aire	73
Dióxido de azufre	79
Óxido de nitrógeno	82
Monóxido de carbono	87
Ozono	89
Partículas suspendidas (PM ₁₀ , PM _{2.5} y PM _{10-2.5})	93
Microplásticos en la atmósfera	99
Tendencia	101
CAPÍTULO 4: Índices de calidad del aire	106
Índice AIRE y SALUD	107
Índice de riesgo para personas susceptibles (IRPS)	113
CAPÍTULO 5: Eventos de alta concentración	118
Activación Fase I Regional PM _{2.5} : 1 de enero	122
Activación Fase I O ₃ : 24 de febrero	125
Activación Fase I O ₃ : 27 de marzo	128
Evento de alta concentración sin FI O ₃ : 20 de noviembre	131
CAPÍTULO 6: Depósito atmosférico	134

Microplásticos en el depósito atmosférico	135
Resultado de la campaña de la REDDA 2023	139
Precipitación pluvial	140
Comportamiento del pH ácido	142
Concentración iónica y depósito atmosférico	147
CAPÍTULO 7: Modelación	150
Características del pronóstico	151
Métodos de correcciones en el post proceso	152
Reporte diario	153
Evaluación de máximos diarios	154
Evaluación estadística	158
Comportamiento general	159
Evaluación categórica	162
Comportamiento del pronóstico durante las contingencias de ozono	165
Discusión	167
REFERENCIAS	168
ANEXOS	
I. Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX	180
II Operación del SIMAT	186
III. Estaciones fuera de operación	190
IV. Estadísticas básicas	194
V. Historial de contingencias ambientales	210
VI. Mosaicos de calidad del aire	214

Dedicamos este Informe al aporte del:

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, científico investigador del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM, jefe de la Sección de Contaminación Ambiental.

Su aporte principal a la ciencia y educación se ha dado en el campo de la ingeniería ambiental y química atmosférica específicamente en el estudio de la contaminación del aire y sus precursores, así como la deposición atmosférica. Ha estudiado los contaminantes criterio, los compuestos orgánicos volátiles, la química del depósito atmosférico con respecto a las concentraciones que presentan, las tendencias temporales, distribución espacial. Su contribución no solo se limita a la investigación también es clave en la construcción de capacidades científicas en México, ha dirigido numerosos estudiantes de licenciatura y posgrado, formando a la siguiente generación de científicos atmosféricos mexicanos. Ha participado en proyectos de investigación colaborativa nacionales e internacionales centrados en la calidad del aire de México. En sus estudios ha proporcionado información necesaria para comprender el problema complejo de la contaminación del aire en las megaciudades. Su trabajo traduce datos ambientales crudos en conocimiento accionable. Desde el año 2003, es un colaborador clave para el SIMAT en el depósito atmosférico, ya que sin el apoyo de su sección en la determinación de la composición química del agua de lluvia no se tendría información de depósito atmosférico en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Acrónimos

Acrónimo/ Abreviatura	Definición
AQHI	Air Quality Health Index – Índice de calidad del aire y salud
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis, incluye a los estados de México, Puebla, Tlaxcala, Morelos, Hidalgo, Querétaro y Ciudad de México
CDMX	Ciudad de México
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
hPa	Hectopascal equivalente a 100 Pa, 1 Pa = 9.8×10^{-6} atm o 1×10^{-5} Bar
HR y RH	Humedad relativa, en inglés relative humidity (RH)
IAS	Índice Aire y Salud
IRPS	Índice de Riesgo para Personas Susceptibles
IUV	Índice de radiación ultravioleta
NADP	National Atmospheric Deposition Program – Programa Nacional de Depósito Atmosférico
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration – Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
NOM	Norma Oficial Mexicana
OMM/WMO	World Meteorological Organization - Organización Meteorológica Mundial
OMS	Organización Mundial de la Salud
PA	Presión atmosférica
PCAA	Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas
PP	Precipitación pluvial en mm de lluvia
PM _{co}	Partículas <i>coarse</i> (2.5 a 10 micras)
PPRECAA	Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas,
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDDA	Red de Depósito Atmosférico
REDMA	Red Manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SGIRPC	Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
T/TMP	Temperatura
UV-A y UV-B	Radiación ultravioleta A y ultravioleta B

Estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX

Sitios en la Ciudad de México (CDMX)	
AJU	Ajusco
AJM	Ajusco medio
BJU	Benito Juárez
CAM	Camarones
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
TEC	Cerro del Tepeyac
COR	CORENADER (Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural)
CUA	Cuajimalpa
DIC	DICONSA (Distribuidora e Impulsora Comercial CONASUPO)
EAJ	Ecoguardas Ajusco
EDL	Exconvento Desierto de los Leones
GAM	Gustavo A. Madero
HGM	Hospital General de México
IZT	Iztacalco
LAA	Laboratorio de Análisis Ambiental
IBM	Legaria
LOM	Lomas
MER	Merced
MGH	Miguel Hidalgo
MPA	Milpa Alta
MCM	Museo de la Ciudad de México
PED	Pedregal
SNT	San Nicolás Totolapan
SFE	Santa Fe
SAC	Santiago Acahualtepec
TAH	Tláhuac
UIZ	Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa
UAX	Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco
Sitios en el Estado de México (EDOMEX)	
ACO	Acolman
ATI	Atizapán
CHO	Chalco
CUT	Cuautitlán
FAC	Facultad de Estudios Superiores Acatlán
FAR	Facultad de Estudios Superiores Aragón
INN	Instituto de Investigaciones Nucleares
LPR	La Presa
LLA	Los Laureles
MON	Montecillo
NEZ	Nezahualcóyotl
SAG	San Agustín
TLA	Tlalnepantla
TLI	Tultitlán
VIF	Villa de las Flores
XAL	Xalostoc

Resumen ejecutivo

El *Informe Anual de la Calidad del Aire 2023* presenta un análisis integral del comportamiento de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Así mismo, en el capítulo tres se habla sobre el impacto de los micro y nano plásticos en la atmósfera, su importancia y su impacto en la salud. El destino atmosférico real, el comportamiento, la transformación y la degradación de los microplásticos en el aire aún requieren mayor investigación. Este campo requiere atención urgente para aclarar las concentraciones (en particular en las fracciones de menor tamaño), a fin de informar con precisión sobre la exposición humana por ingestión e inhalación. El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), juega un papel primordial debido al amplio muestreo atmosférico que realiza, sin embargo, se requiere de colaboraciones y de equipos de trabajo que puedan aplicar las técnicas de identificación y caracterización de los microplásticos en los muestreos de contaminantes que realizan las diferentes redes del SIMAT, ya que se necesitan equipos especializados para su determinación, los cuales el SIMAT no los tiene.

La evaluación anual de la Normas Oficiales Mexicanas (NOM), determina el cumplimiento de la concentración máxima de los contaminantes criterio en la ZMCM (**Capítulo 1**) así como una comparación internacional con las guías de la OMS y los estándares de calidad del Aire Ambiental (NAAQS) de la U.S. EPA. Los principales resultados fueron:

- El **CO** fue el único contaminante que cumplió con todos los estándares nacionales e internacionales (NOM, OMS y U.S. EPA), tanto en la Ciudad de México (CDMX) como en el Estado de México (EDOMEX).
- El **SO₂**, **NO₂** y **PM₁₀** tuvieron cumplimiento variable de sus NOM. El SO₂ cumplió con la NOM y U.S. EPA en la CDMX, pero no en el EDOMEX y excedió la guía OMS en ambas entidades. En toda la ZMCM, el **NO₂** y las **PM₁₀** superaron sus NOM y las guías OMS; pero sí cumplieron con el límite de U.S. EPA.
- Los niveles de **O₃** y **PM_{2.5}**, continúan excediendo todos los estándares nacionales (NOM) e internacionales (NAAQS y OMS), por lo que son los contaminantes con mayor problemática.

Las variables meteorológicas tienen influencia directa en los niveles de contaminantes, por lo que es importante analizar su comportamiento anual (**Capítulo 2**); en 2023 se encontraron los principales resultados:

- **Temperatura:** La NOAA y la OMM determinaron que el 2023 fue el más cálido desde 1850; el aumento de la temperatura global fue influenciado por la transición de La Niña>Neutro>El Niño. En México, se presentó una Ola de Calor del 1 al 22 de junio, que afectó la ZMCM, donde dicho mes fue el más cálido del año, con los máximos del promedio mensual (20.9 °C), de anomalía positiva (2.9 °C) y del valor horario (35.3°C).

- **Humedad Relativa:** En México, 2023 se clasificó como el más seco desde 1941; las anomalías calculadas fueron negativas en la mayor parte del año, lo que reafirmó las condiciones secas en el país, la anomalía más notable fue en junio (-17.8 %). Los meses más secos del 2023 fueron marzo (HR: 39%), abril (42%) y junio (43%).
- **Precipitación:** Se registró una disminución del 21 % en la precipitación nacional con respecto al periodo 1991-2020. De acuerdo con datos de SACMEX, en CDMX, los máximos acumulados de fueron en julio y agosto 2023; sin embargo, en comparación con sus datos del 2022, dichos meses tuvieron una reducción del 73 y 74%, respectivamente.
- **Viento:** Al inicio del 2023, predominaron las zonas de confluencia en el centro-norte de la ZMCM, mientras que la región sur tuvo mayor aporte de vientos del sur hacia el norte que registraron más velocidad. El resto del año prevaleció la dirección del viento del norte hacia el sur, especialmente en la temporada de lluvias (junio a septiembre).
- **Radiación solar Ultravioleta (UV):** La radiación UV tiene una influencia directa en la generación de ozono y otros contaminantes. En 2023, los máximos de UVA y UVB en la ZMCM fueron de marzo a julio. En términos del Índice UV, el 49 % del año registró IUUV en niveles Extremadamente altos (11+), 37 % fue Muy Alto, 13% fue Alto y 1 % en Moderado; con los valores máximos de junio a septiembre (IUUV promedio = 12 = Ext. Alto).

La Calidad del Aire es importante evaluar su evolución para identificar el efecto de los programas de gestión, así como el impacto de la meteorología, la distribución de los contaminantes de forma temporal y espacial. El **capítulo 3** describe el comportamiento en 2023 de los contaminantes que se miden en las diferentes subredes que forman parte del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, así mismo se aborda el problema de los microplásticos en la atmósfera, los microplásticos son un componente de la contaminación del aire, afectando la salud y el ambiente, ya que los problemas ambientales están interconectados, los microplásticos en la atmósfera se comportan como otras partículas contaminantes y tienen impactos directos e indirectos, existe un gran desafío en la determinación de los micro y nano plásticos en la atmósfera, ya que no hay protocolos universales para muestrearlos en el aire, lo que dificulta comparar los datos de diferentes estudios, se requiere estricto control en su análisis porque son muestras que se pueden contaminar fácilmente, y el análisis detallado de las muestras es lento y requiere equipamiento costoso y especializado. El desarrollo de este tema está en su fase inicial y se requieren de muchos estudios. La calidad del aire en 2023 fue:

- **El dióxido de azufre:** registró un promedio anual de 3.2 ppb considerando las estaciones con una suficiencia del 70%, este valor representa un 23 % de incremento con respecto al año anterior. La estación Tlalnepantla registró el promedio anual mayor con 5.7 ppb. La concentración horaria más alta se presentó en la estación Villa de las Flores con 119 ppb en febrero, este año no se registró ningún incremento extraordinario con concentraciones mayores a 200 ppb.

- **El dióxido de nitrógeno:** registró un promedio anual de 23 ppb considerando las estaciones con una suficiencia del 70%, semejante al año anterior. La estación Merced registró el promedio anual mayor con 32 ppb. La estación Cuautitlán y FES-Acatlán, registraron la concentración más alta del año con 113 ppb.
- **El monóxido de carbono:** registró un promedio anual de 0.43 ppm considerando las estaciones con una suficiencia del 70%, este valor representa un 7.5 % de incremento con respecto al año anterior. La estación La Presa, registró el promedio anual mayor con 0.61 ppm, y el registro horario mas alto se presentó en la estación FES-Acatlán con 4.37 ppm el 28 de febrero.
- **Ozono:** registró un promedio anual de 31.3 ppb considerando las estaciones con una suficiencia del 70%, este valor es prácticamente igual al registrado el año anterior con un incremento del 0.6%. En este año se presentaron 969 horas distribuidas en 245 días que rebasaron el valor límite de una hora. La estación que registró más horas por arriba del valor límite de una hora (>90 ppb) fue UAM-Xochimilco (UAX) con 455 horas. La concentración máxima horaria fue de 171 ppb y ocurrió el 23 de febrero en la estación Ajusco Medio (AJM), así mismo la concentración máxima del promedio de 8 horas se registró ese mismo día en la misma estación con 128 ppb. Este año, se registraron 4 días con concentraciones ≥ 155 ppb.
- **Partículas suspendidas:** El promedio anual para PM_{10} fue de $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$; para las $PM_{2.5}$ fue de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para las $PM_{10-2.5}$ fue de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para los tres casos se consideraron las estaciones con un 65% de suficiencia. No se presentó ningún evento para declarar la contingencia ambiental por partículas, las concentraciones más altas del promedio de 24 horas para PM_{10} fue de $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 25 de diciembre en la estación Villa de las Flores (VIF), para las $PM_{2.5}$ fue de $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el primero de enero en la estación Santiago Acahualtepec (SAC) y $PM_{10-2.5}$ tuvo un máximo de $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 24 de febrero en la estación Tlalnepantla (TLA).
- **Tendencia:** En el 2023, los contaminantes SO_2 , NO_x , NO_2 , CO y $PM_{2.5}$ presentaron decrementos en sus promedios mensuales con respecto al año anterior con un 7 %, 4 %, 3 %, 7 % y 5 % respectivamente, las PM_{10} , tuvieron un mínimo decremento con respecto al año anterior de -0.4%, por el contrario, O_3 y PST presentaron incrementos del 1.2 % y 3.1 % con respecto al año anterior.

Los índices de calidad del aire son herramientas para la difusión de los niveles de contaminación hacia la población. La ZMCM tiene dos; el Índice Aire y Salud (IAS) que establece la NOM-172-SEMARNAT-2019 y el Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS), que es un índice multi contaminante ($PM_{2.5} + O_3 + NO_2$). El **capítulo 4** describe su comportamiento en 2023, con los principales resultados:

- El **IAS** total obtuvo **120 días limpios** (33% del año), esto significa que todos los contaminantes estuvieron en la categoría Buena o Aceptable. Sin embargo, en los restantes **245 días** (67%) la calidad del aire fue Mala a Extremadamente Mala (uno o más contaminantes dentro las categorías). Diciembre fue el mes más limpio y, por el contrario, de marzo a junio, registraron más

días sucios (Mala a Ext. Mala); esto relacionado con la temporada de ozono y la onda de calor en junio.

- En el **IRPS**, la mayoría del 2023 estuvo en Riesgo **Moderado** (4 al 6) con 274 días (75 % del año); en **Alto** (7 a 10) fueron 34 días (9 %), finalmente, en riesgo **Bajo** (1 a 3) se registraron en 57 días (16 % del año). Los valores del IRPS más altos ocurrieron en las últimas semanas de marzo, abril y mayo. El IRPS también puede detectar días con valores muy altos, como las contingencias, ya que durante los episodios de $PM_{2.5}$ y O_3 obtuvo valores de Riesgo Alto.

Los tres episodios de contingencia del 2023 fueron ocasionados uno por partículas $PM_{2.5}$ y dos por O_3 , además se presentó un día con concentración alta de O_3 que no ameritó activación de FI (**Capítulo 5**):

- **FI Regional de $PM_{2.5}$ (01/enero/2023)**: se activó a las 11:00 h con un promedio móvil de 24 h (métrica para activar FI) de $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Santiago Acahualtepec (SAC) y el máximo del día fue $108.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15:00 h. La CAME suspendió la contingencia a las 16:00 h debido a condiciones meteorológicas favorables. Los niveles de $PM_{2.5}$ fueron ocasionados por la pirotecnia del año nuevo, vientos débiles en el noreste e inversión térmica.
- **FI de O_3 (23/febrero/2023)**: Se activó con un máximo de 155 ppb a las 15:00 h registrado en Ajusco Medio (AJM) y el máximo del día fue 171 ppb (16:00 h). La CAME suspendió la contingencia de O_3 durante el 24 de febrero ya que el máximo del día fue 131 ppb. Este episodio fue influenciado un sistema de alta presión en el centro del país.
- **FI de O_3 (25/marzo/2023)**: se activó con 161 ppb en FES Acatlán (FAC) a las 16:00 h del 25 de marzo y se suspendió hasta el 27. Durante el 25 de marzo, hasta 20 superaron el límite NOM (90 ppb) y se alcanzó un máximo de 161 ppb; la situación fue similar el 26 de marzo (máx. 157 ppb). El 27 de marzo ninguna estación superó el umbral de FI y a las 20:00 h, la CAME suspendió la contingencia. Este evento fue consecuencia de un sistema de alta presión en el centro del país.

La campaña de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) del 2023 (**Capítulo 6**) se realizó de mayo a octubre, los principales resultados fueron:

- La REDDA operó con 15 sitios, ya que la estación San Nicolás Totolapan (SNT) sigue inactiva por avería del equipo. La mayoría de los sitios tuvo una suficiencia de muestreos superior al 70% excepto Xalostoc (XAL) con 50%, CORENA (COR) y Museo de la Ciudad de México (MCM), ambas con 54%.
- La precipitación registrada por REDDA tuvo su promedio mensual máximo en agosto con 2,096 mientras que el mínimo fue en octubre (459 mm).
- La lluvia ácida tuvo un pH de 3.92 a 5.55 (entre junio y octubre). La mayoría de los eventos de pH ácido fueron en julio (19 muestras) y agosto (18). Septiembre registró el pH mínimo con 3.92 en Milpa Alta (MPA) y sus muestras tuvieron los pH más bajos de la campaña. En 2023

hubo un ligero aumento en la distribución espacial de la lluvia ácida, específicamente en el sur de la CDMX; sin embargo, todavía predomina la tendencia de pH básico de años anteriores.

El último **capítulo 7** presenta la evaluación del sistema de pronóstico, así como de los métodos de corrección aplicados (Kalman - KF, Media Móvil - MA, Mapeo Cuantiles -QM), con los datos de la temporada de O₃ (15/febrero al 15/junio); los resultados más relevantes fueron:

- Se generaron reportes diarios con los pronósticos máximos con su categoría IAS; para comparar datos del pronóstico corregido y sin corrección. Así como para detectar días con muy mala calidad del aire o probabilidad de contingencia.
- El rendimiento general del modelo osciló entre el 78.2 % (MA + KF) y el 87.8 % (método QM).
- La temporada de O₃ son 120 días, de los cuales, 100 (83%) superaron el límite de 90 ppb (NOM) y 3 días de estos, alcanzaron valores de FI (≥ 155 ppb). Los pronósticos de 24 h tuvieron mayor probabilidad de acertar los datos que exceden la NOM, pero en los días con FI, fue más complicado poder detectarlos ya que son eventos atípicos y multifactoriales; el pronóstico con mayor acierto de contingencias fue el KF de 24 h.

Cumplimiento de la normatividad



Cumplimiento de la normatividad de salud ambiental en la ZMCM

Los contaminantes atmosféricos (gases y partículas) tienen límites de concentración establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), estos límites tienen el objetivo de proteger la salud de la población, ya que se ha comprobado que, si se supera dicha concentración, se intensifican los efectos adversos. Las NOM tienen diferentes indicadores que están relacionados con el tiempo de exposición y las consecuencias en salud que ocasionan los contaminantes, esto basado en estudios toxicológicos y epidemiológicos, como los de cohorte, los cuales también son utilizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para establecer sus valores guía y en la evaluación científica integrada (ISA, por sus siglas en inglés), que realiza la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA, por sus siglas en inglés) para determinar el límite de los estándares en ese país.

En México, las NOM de dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y partículas (PM₁₀, PM_{2.5}) fueron actualizadas a finales del 2021, por lo que desde el 2022 se utilizan los nuevos límites de cada contaminante para evaluar el cumplimiento de la normatividad; el detalle de estos cambios se puede consultar en el Informe Anual de Calidad del Aire 2022 (SEDEMA, 2024a) y en las NOM publicadas por el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2021).

En términos generales, los cambios en las NOM buscan alcanzar los valores **guía de la OMS publicados en 2005**; actualmente, las NOM de NO₂ y CO, ya están ajustadas a las guías de la OMS; sin embargo, en el caso de O₃ y partículas, se establecieron **valores graduales** que se aplicarán bianualmente hasta alcanzar las guías OMS en 2026. Los límites graduales de ozono solamente se establecieron en el indicador del promedio móvil de 8 h, mientras que, para el máximo horario, el límite quedó fijo en 90 ppb. El promedio móvil de 8 h para el periodo **2022-2023** se evaluó con 65 ppb, **2024-2025** con 60 ppb y a partir del **2026**, dicho indicador tendrá el límite de 51 ppb.

Las PM₁₀ tienen valores graduales para sus dos indicadores: **2022-2023** se evaluó con 70 µg/m³ (promedio 24 h) y 36 µg/m³ (promedio anual); para **2024-2025**, los límites son 60 µg/m³ y 28 µg/m³ para el promedio 24 h y anual, respectivamente; a partir del **2026**, las PM₁₀ se evaluarán con 50 µg/m³ (24 h) y 20 µg/m³ (anual). Finalmente, para PM_{2.5} se fijó un límite de 10 µg/m³ como promedio anual, a partir de **2026**, y se establecieron límites graduales para el promedio de 24 horas; en **2022** y **2023** se aplicó el límite de 41 µg/m³; para **2024-2025**, se evaluará con 33 µg/m³, y a partir de **2026**, la concentración de PM_{2.5} tendrá el límite en 25 µg/m³.

En la siguiente sección se presenta la evaluación de la normatividad para las estaciones de monitoreo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), que se realiza con los valores máximos de concentración por contaminante, indicador y suficiencia de datos con respecto a su NOM vigente durante 2023; adicionalmente, se presenta una comparación con las guías de la OMS del 2021 y los estándares de calidad del aire de la U.S. EPA (NAAQS - *National Ambient Air Quality Standards*). Es importante mencionar que para la comparación con las guías OMS de cada contaminante gaseoso, se hace una conversión de las unidades de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ a ppb) considerando **condiciones locales** de temperatura y presión atmosférica en la ZMCM (17°C y 585 mmHg), **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1. Comparación de los límites de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Salud Ambiental, las Guías de la OMS y la NAAQS de la U.S.EPA (vigentes en 2023).

Contaminante	Indicador	NOM	OMS*	U.S.EPA
Ozono (O ₃)	Promedio de 1 h	90 ppb	—	—
	Promedio móvil de 8 h	65 ppb	64 ppb	70 ppb
Monóxido de carbono (CO)	Promedio de 1 h	26 ppm	39 ppm	35 ppm
	Promedio móvil de 8 h	9 ppm	11 ppm	9 ppm
	Promedio de 24 h	—	4 ppm	—
Dióxido de azufre (SO ₂)	Promedio de 1 h	75 ppb	—	75 ppb
	Promedio de 24 h	40 ppb	19 ppb	—
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Promedio de 1h	106 ppb	134 ppb	100 ppb
	Promedio anual	21 ppb	7 ppb	53 ppb
	Promedio de 24 h	—	17 ppb	—
Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	Promedio de 24 h	70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Promedio anual	36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	—
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	Promedio de 24 h	41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Promedio anual	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

*Los límites de las guías OMS fueron convertidos a ppb o ppm con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.

En la **Tabla 1.2**, se presenta el resumen de cumplimiento para el año 2023 dividido por entidad, para los límites de la NOM, las guías OMS y NAAQS (U.S. EPA, 2024). El CO fue el único contaminante que cumplió con todos los estándares nacional e internacionales, tanto en la Ciudad de México (CDMX) como en el Estado de México (EDOMEX). En el resto de los contaminantes se tuvo un comportamiento variable, el SO₂ cumplió con la NOM y la U.S. EPA en la CDMX, pero no en el EDOMEX; para el caso del NO₂ y las PM₁₀, se excedieron los límites de la NOM y la OMS, pero cumplieron con el estándar de la U.S. EPA en ambas entidades de la ZMCM. Finalmente, los valores de concentración para O₃ y PM_{2.5}, superaron todos los estándares nacionales e internacionales.

Tabla 1.2. Resumen del cumplimiento de las NOM, guías OMS y estándares de la U.S. EPA por entidad de la ZMCM

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

En diversos estudios se han demostrado los efectos dañinos de los contaminantes sobre la salud, ya que ocasionan diferentes síntomas para toda la población (Figura 1.1); sin embargo, existen grupos más susceptibles como personas de la tercera edad, niños, personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares, entre otros. Debido a los riesgos de la contaminación, es importante evaluar el cumplimiento de la normatividad ambiental en la ZMCM.

Los contaminantes criterio y sus principales efectos en salud

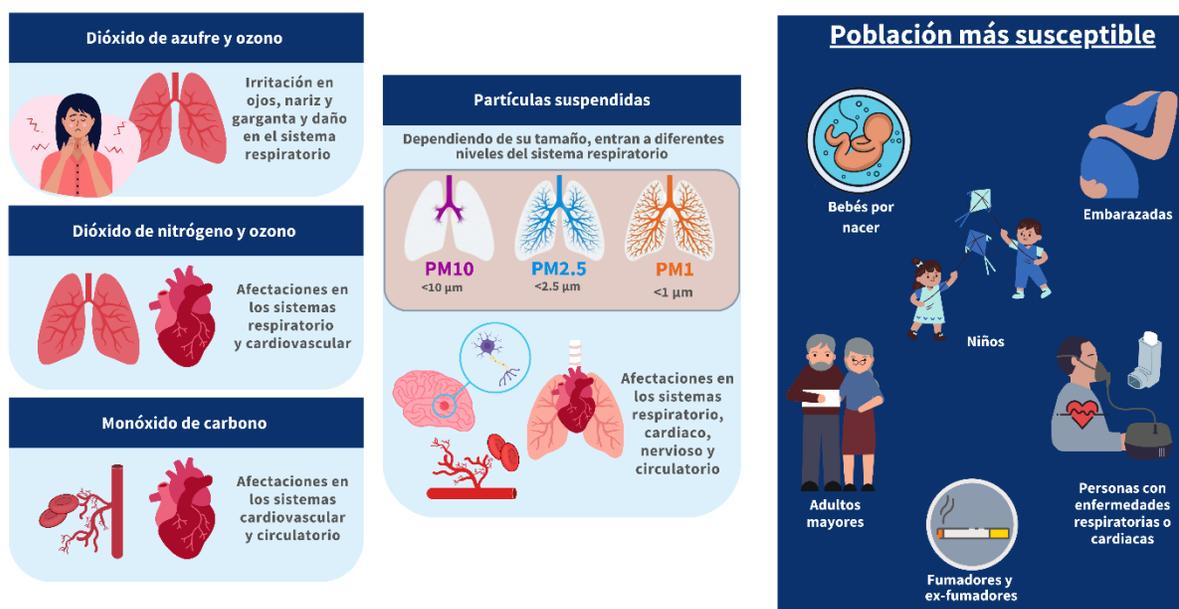


Figura 1.1. Principales efectos ocasionados por la exposición a contaminantes atmosféricos.

Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre (SO₂) se emite por el uso de combustibles fósiles en la industria y automotores a diésel, o fuentes de área (combustión habitacional, quemas a cielo abierto, etc.), pero también hay contribución de fuentes naturales como los volcanes. El SO₂ es precursor de sulfatos que pueden formar material particulado y también de la lluvia ácida, ya que el SO₂ reacciona con el agua para formar el ácido sulfúrico (H₂SO₄), esto incrementa la acidez de la lluvia; el análisis de este fenómeno se describe en el **capítulo 6** de este informe.

El SO₂ tiene efectos en la salud, ya que incrementa el riesgo de morbilidad y mortalidad respiratoria (Orellano et al., 2021), también se ha relacionado con admisiones hospitalarias por accidentes cerebrovasculares (Shen et al., 2020). La exposición prolongada a niveles altos, exacerba síntomas respiratorios y reduce el funcionamiento pulmonar, esto causa sibilancias, dificultad respiratoria y opresión en el pecho (*American Lung Association, 2024a*).

Evaluación de la normatividad

La NOM-022-SSA1-2019 tiene dos indicadores para evaluar el SO₂: el promedio trianual del percentil 99 (P99) de máximos diarios (1h) y el máximo trianual de promedios de 24 h. Los cuales tienen un cálculo y porcentaje de suficiencia de datos ($\geq 75\%$), descritos en la NOM. En 2023 se evaluaron **8 estaciones** para el promedio trianual del percentil 99 (P99) de 1 h y **22 sitios** para el máximo trianual (24 h), las cuales cumplieron con la suficiencia. Los datos completos se pueden consultar en el **Anexo IV** de este informe.

La **Tabla 1.3** presenta la concentración de SO₂ en la ZMCM, en la cual se observa que, durante 2023, las estaciones ubicadas en el EDOMEX superaron los límites de la NOM, OMS y U.S. EPA; por otro lado, la CDMX cumplió con los límites de la NOM y U.S. EPA, pero no con las guías OMS.

Tabla 1.3. Valores de concentración máxima de SO₂ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-022-SSA1-2019, OMS y las NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS*	U.S. EPA
	Promedio trianual del P99 (1 h)	Máximo trianual del promedio 24 h	P99 del promedio 24 h	Promedio trianual del P99 (1 h)
	75 ppb	40 ppb	19 ppb*	75 ppb
ZMCM	78 ppb	42 ppb	30 ppb	78 ppb
CDMX	52 ppb	33 ppb	22 ppb	52 ppb
EDOMEX	78 ppb	42 ppb	30 ppb	78 ppb

Se resaltan en rojo los valores que rebasan los límites.

*Los límites de las guías OMS fueron convertidos a ppb con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.

La U.S. EPA se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

Para una visualización espacial del cumplimiento de las NOM, se elaboraron mapas que incluyen únicamente las estaciones que cumplen con la suficiencia de información para cada indicador, ya que cada uno se evalúa de forma diferente, y el número de estaciones con suficiencia no es igual, esto mismo se aplica para los demás contaminantes. En el caso de SO_2 se puede observar que los límites de ambos indicadores se superaron únicamente en una estación que fue Tlalnepantla (TLA) ubicada en el EDOMEX. En la ZMCM, la concentración de SO_2 tiene influencia de las emisiones provenientes del complejo industrial de Tula, Hidalgo; dichas emisiones pueden llegar a la CDMX debido a la trayectoria de vientos, que frecuentemente trasladan contaminantes desde el norte hacia el sur.

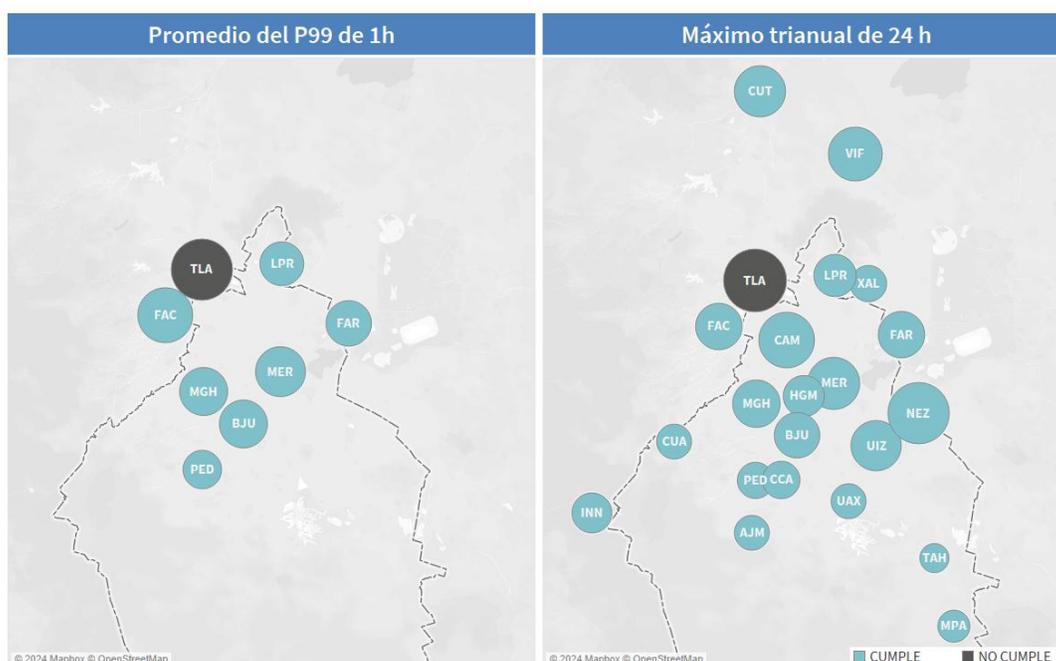


Figura 1.2. Distribución espacial del cumplimiento de la NOM-022-SSA1-2019 durante 2023. El tamaño del círculo es proporcional a la magnitud de la concentración de SO_2 . Se presentan las 8 y 22 estaciones que cumplieron suficiencia para el promedio trianual del P99 de 1h (izquierda) y máximo trianual de 24 h (derecha), respectivamente.

En los datos por estación, el indicador de la NOM y U.S. EPA, promedio trianual del P99 (1h), obtuvo su valor más alto en TLA con 78 ppb y el mínimo en Pedregal (PED) con 31 ppb; para el segundo indicador de la NOM que también es trianual, pero del máximo de 24h, su valor más alto también fue en TLA con 42 ppb y el mínimo en Tláhuac (TAH) con 9 ppb. Para el valor de la guía de la OMS, que es el máximo del promedio de 24 h en el año, la estación Cuautitlán (CUT) registró el máximo con 30 ppb, mientras que el mínimo fue de 4 ppb, registrado en el sitio Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN), ambas estaciones en el EDOMEX (**Figura 1.3**).

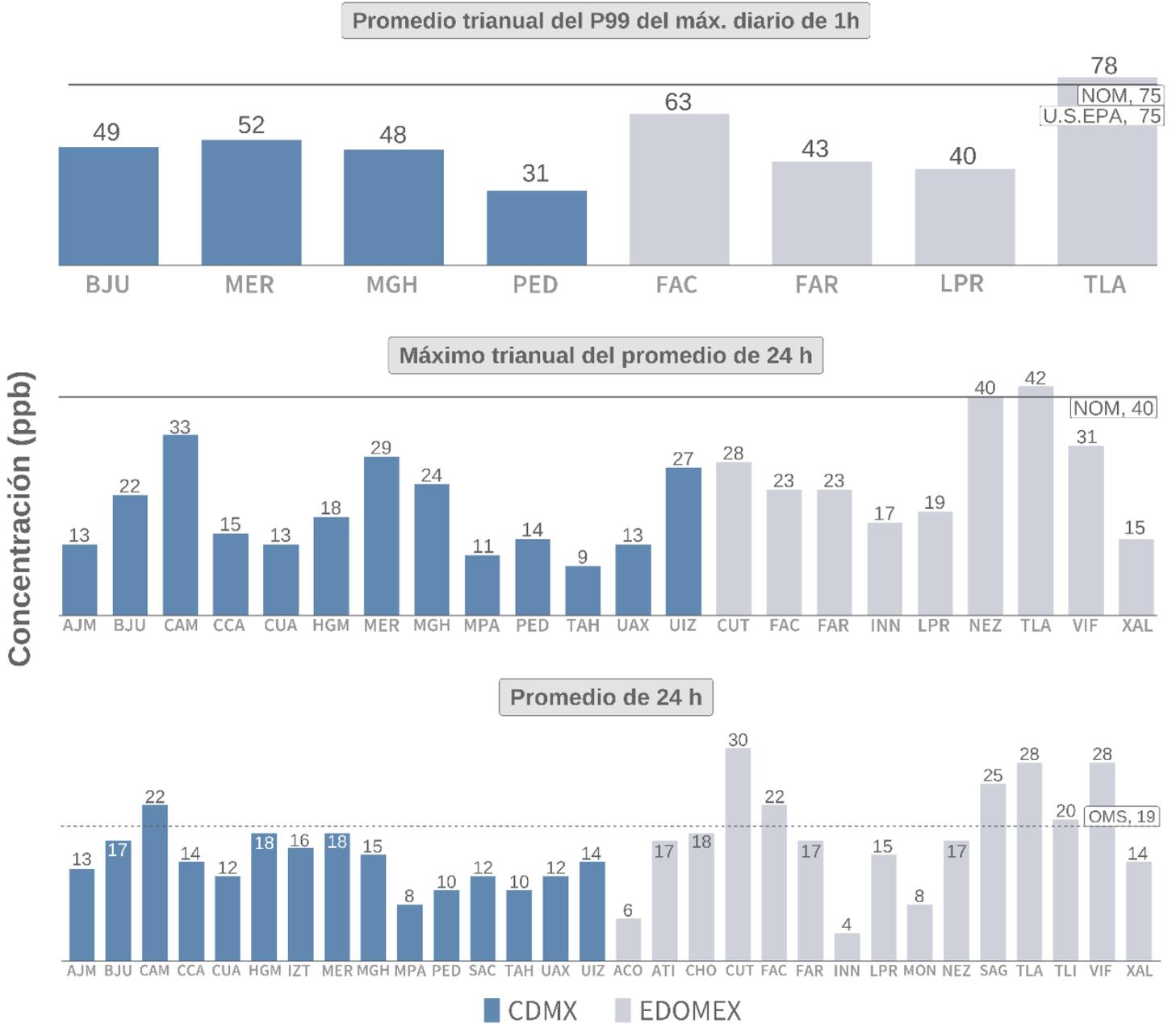


Figura 1.3. Concentración máxima de SO₂ en 2023 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-022-SSA1-2019, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un contaminante de origen primario y secundario, ya que es emitido directamente por el uso de combustibles fósiles, pero también se forma en la atmósfera mediante reacciones de sus precursores, como el óxido nitroso (NO) proveniente de los vehículos, los cuales son la principal fuente de los óxidos de nitrógeno (NO₂ y NO). Existen emisiones naturales, como las tormentas eléctricas; sin embargo, su aporte hacia la superficie es mínimo (Arndt et al., 2019). El NO₂ es precursor de lluvia ácida, ya que reacciona con el agua y forma ácido nítrico (HNO₃), lo que reduce el pH de la lluvia (ver [capítulo 5](#)).

En la salud humana, el NO₂ se relaciona con diversos síntomas respiratorios, incluso con el desarrollo de enfermedades como el asma infantil (Anenberg et al., 2019). De acuerdo con la *American Lung Association* (2024), este contaminante se asocia con la inflamación de vías respiratorias, reducción de la función pulmonar, el empeoramiento de síntomas de tos, sibilancias y ataques de asma. La exposición al NO₂ causa un incremento importante en el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Wang et al., 2021), incluyedo al COVID-19 (Liang et al., 2020).

Evaluación de la normatividad

La NOM-023-SSA1-2021 tiene dos indicadores para evaluar el NO₂: el máximo horario y el promedio anual. En 2023, se evaluaron **19 estaciones** de la ZMCM que tuvieron suficiencia de datos (≥ 75 %) para ambos indicadores de la NOM. Los resultados de la concentración por entidad y su comparación con indicadores internacionales ([Tabla 1.4](#)), mostraron que se superaron los límites normados en México, así como dos indicadores de la OMS (promedio anual y P99 del promedio de 24h); por el contrario, los estándares de la U.S. EPA se cumplieron en toda la ZMCM.

Tabla 1.4. Valores de concentración máxima de NO₂ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS*			U.S. EPA	
	Máximo 1h	Promedio anual	Máximo 1h	P99 del promedio 24h	Promedio anual	Promedio trianual del P98 máx. 1h	Promedio anual
	106 ppb	21 ppb	134 ppb*	17 ppb*	7 ppb*	100 ppb	53 ppb
ZMCM	113 ppb	32 ppb	113 ppb	54 ppb	32 ppb	69 ppb	32 ppb
CDMX	107 ppb	32 ppb	107 ppb	54 ppb	32 ppb	67 ppb	32 ppb
EDOMEX	113 ppb	28 ppb	113ppb	51 ppb	28 ppb	69 ppb	28 ppb

Notas:

Se resaltan en rojo los valores que rebasan los límites.

*Los límites de las guías OMS fueron convertidos a ppb con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.

La U.S. EPA se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

En la **distribución espacial del cumplimiento de la NOM (Figura 1.4)**, el límite horario se superó en 3 de 19 estaciones: Cuautitlán (CUT) y FES Acatlán (FAC) en EDOMEX, y Merced (MER) en CDMX. Para el promedio anual, 9 sitios (6 en CDMX y 3 en EDOMEX) excedieron el límite. La distribución de la concentración de NO₂ está influenciada directamente por las emisiones de fuentes móviles, en consecuencia, los sitios cercanos a vialidades con alto flujo vehicular, en el centro y norte, normalmente presentan los valores más altos.

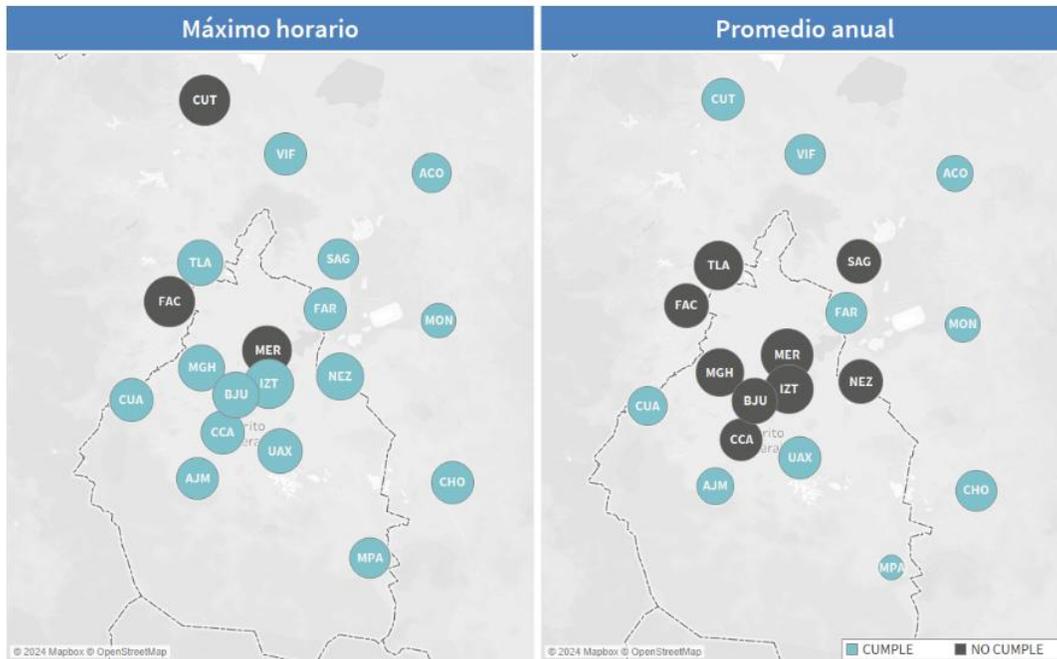


Figura 1.4. Distribución espacial del cumplimiento de la NOM-023-SSA1-2021 durante 2023. El tamaño del círculo es proporcional a la magnitud de la concentración de NO₂. Se presentan las 19 estaciones que cumplieron suficiencia en ambos indicadores de la NOM.

En la evaluación de indicadores por estación (**Figura 1.5**), se observó que en el promedio horario (NOM y OMS), el máximo de 113 ppb se presentó en los sitios CUT y FAC del EDOMEX; y el mínimo fue en Montecillos (MON), también del EDOMEX, con 53 ppb. En el indicador anual (NOM, OMS y U.S. EPA), el máximo se registró en la estación MER con 32 ppb y el mínimo fue 7 ppb en Milpa Alta (MPA), ambas de la CDMX. Se puede observar que la mayoría de los indicadores evaluados obtuvieron sus mínimos en Ajusco Medio (AJM), MPA, Acolman (ACO) y MON; debido a que están ubicadas en la periferia de la ZMCM y no tienen alto flujo vehicular como en los sitios del centro y norte, por ejemplo, MER, Benito Juárez (BJU), Iztacalco (IZT), Tlalnepantla (TLA), CUT y FAC, las cuales obtuvieron los valores más altos.

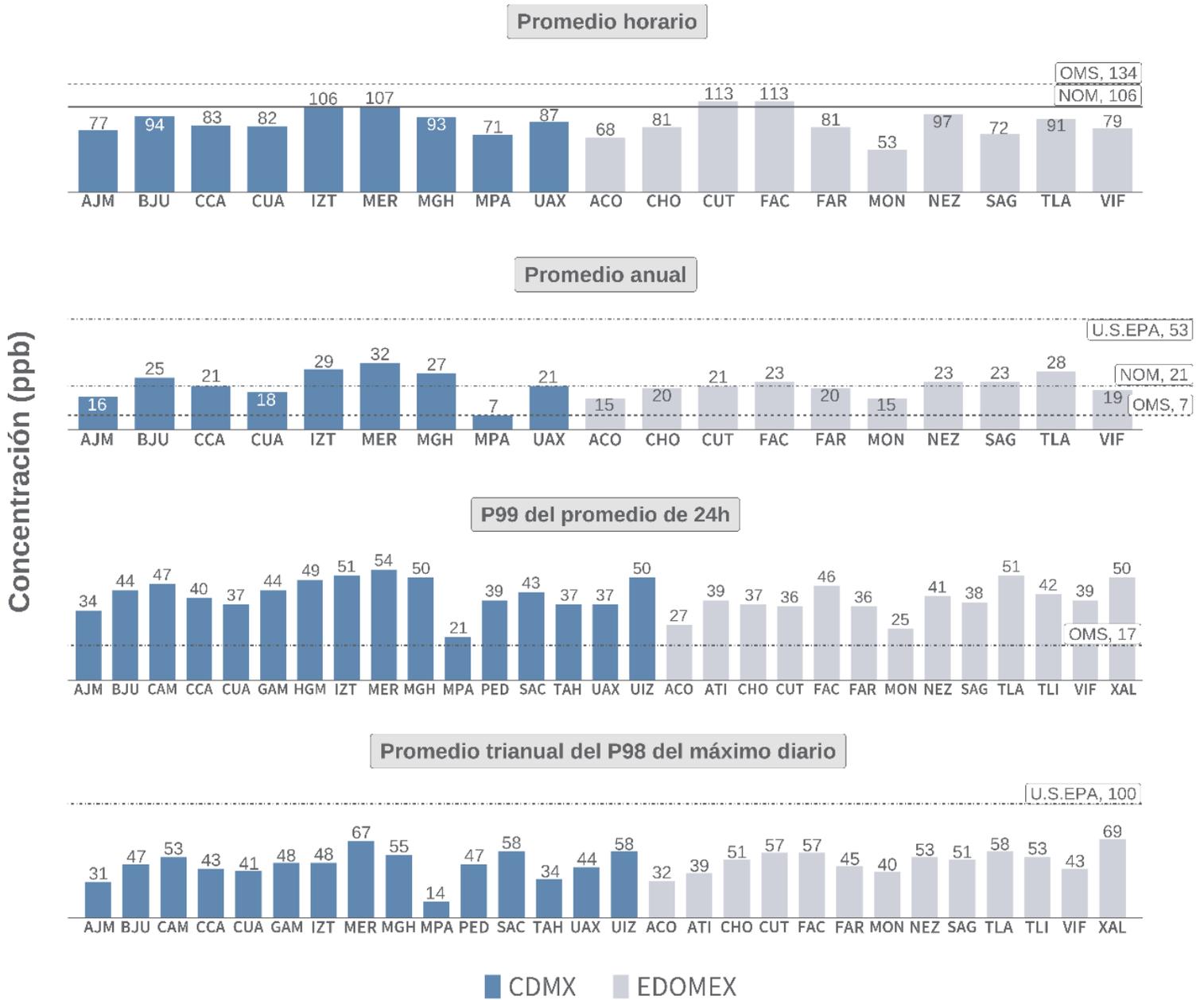


Figura 1.5. Concentración máxima de NO₂ en 2023 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-023-SSA1-2021, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas emitido en la quema de combustibles fósiles y la fuente principal son los vehículos, también existen fuentes naturales como volcanes e incendios forestales (UCAR, 2024); sin embargo, su aporte es menor comparado con las emisiones antropogénicas. Las fuentes de CO en interiores (calentadores de agua o ambiente, hornos, chimeneas, estufas de gas o leña, etc.) elevan su concentración en los hogares, por lo que puede ser más peligrosa que en exteriores. Durante 2021, se estimaron 28 900 muertes a nivel mundial (GBD, 2021), ocasionadas por intoxicación no intencionada de CO en interiores y sólo en EE.UU. esta cifra es de 400 muertes anuales (CDC, 2024).

El CO es dañino porque se une a la hemoglobina de la sangre, esto reduce su capacidad de transportar oxígeno y causa afectación a los órganos. Los síntomas más frecuentes son fatiga, dolor de cabeza, confusión y mareos; el CO afecta a las personas que padecen cardiopatías con capacidad reducida de oxigenación en el corazón y son más vulnerables durante el ejercicio o mayor estrés; lo cual se manifiesta con dolor torácico, conocido como angina de pecho (CARB, 2023). También se asocia con riesgo en el desarrollo de los bebés no nacidos cuyas madres se expusieron a niveles altos de CO durante el embarazo (Levy, 2015).

Evaluación de la normatividad

La NOM-021-SSA1-2021 tiene dos indicadores para evaluar el CO: el máximo horario y el promedio móvil de 8 h. En 2023, **19 estaciones** tuvieron suficiencia de datos para el indicador del promedio móvil de 8h y en el indicador del máximo horario fueron **20 sitios**. La concentración de CO fue menor a todos los límites nacionales e internacionales (**Tabla 1.5**).

Tabla 1.5. Valores de concentración máxima de CO con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS*			U.S. EPA	
	Promedio móvil 8h	Promedio horario	Promedio horario	Promedio móvil 8h	P99 del promedio 24h	Promedio horario	Promedio móvil 8h
	9 ppm	26 ppm	39 ppm*	11 ppm*	4 ppm*	35 ppm	9 ppm
ZMCM	2.7 ppm	4.4 ppm	4.4 ppm	2.7 ppm	1.3 ppm	4.4 ppm	2.7 ppm
CDMX	2.2 ppm	3.7 ppm	3.7 ppm	2.2 ppm	1.2 ppm	3.7 ppm	2.2 ppm
EDOMEX	2.7 ppm	4.4 ppm	4.4 ppm	2.7 ppm	1.3 ppm	4.4 ppm	2.7 ppm

Notas:

*Los **límites de las guías OMS** fueron convertidos a ppm con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.

La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

En la **distribución espacial de los indicadores NOM (Figura 1.6)**, se observa que los valores más altos fueron en las estaciones del centro y norte, ya que está influenciada por las emisiones de fuentes móviles. Las estaciones Milpa Alta (MPA), Acolman (ACO) e y Ajusco Medio (AJM) presentan los mínimos debido a que se encuentran en la periferia, donde el impacto de fuentes móviles es menor, así como el transporte del contaminante.

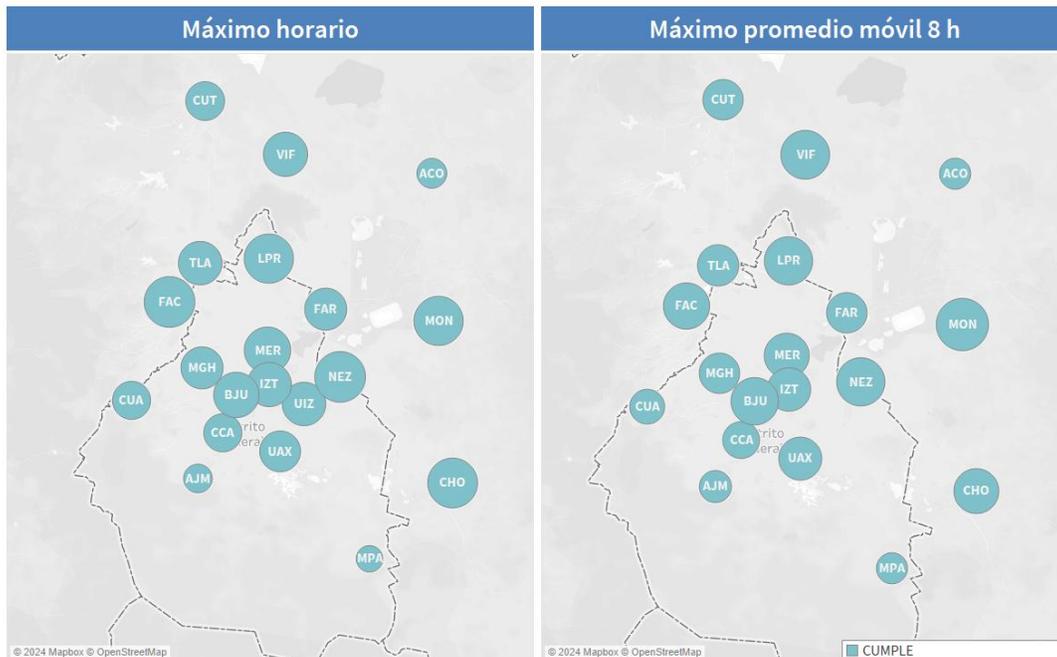


Figura 1.6. Distribución espacial del cumplimiento de la NOM-021-SSA1-2021 durante 2023. El tamaño del círculo es proporcional a la magnitud de la concentración de CO. Se presentan las 20 y 19 estaciones que cumplieron suficiencia para el máximo 1h (izquierda) y del promedio móvil de 8h (derecha), respectivamente.

En los datos por estación (**Figura 1.7**), se observó que en el promedio móvil de 8 h (NOM, OMS y U.S. EPA), el máximo de 2.7 ppm se presentó en el EDOMEX, en el sitio Montecillos (MON); mientras que el mínimo fue 1 ppm, en AJM y MPA, ambas en CDMX. En el promedio horario (NOM, OMS y U.S. EPA), el máximo también fue en el EDOMEX, en las estaciones FES Acatlán (FAC) y Nezahualcóyotl (NEZ), ambas con 4.4 ppm; el mínimo fue 1.2 ppm en MPA. El indicador del P99 del promedio de 24 h (OMS) presentó datos similares entre la CDMX y EDOMEX, con el valor más alto en Xalostoc (XAL) y el mínimo en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN), ambas en el EDOMEX.

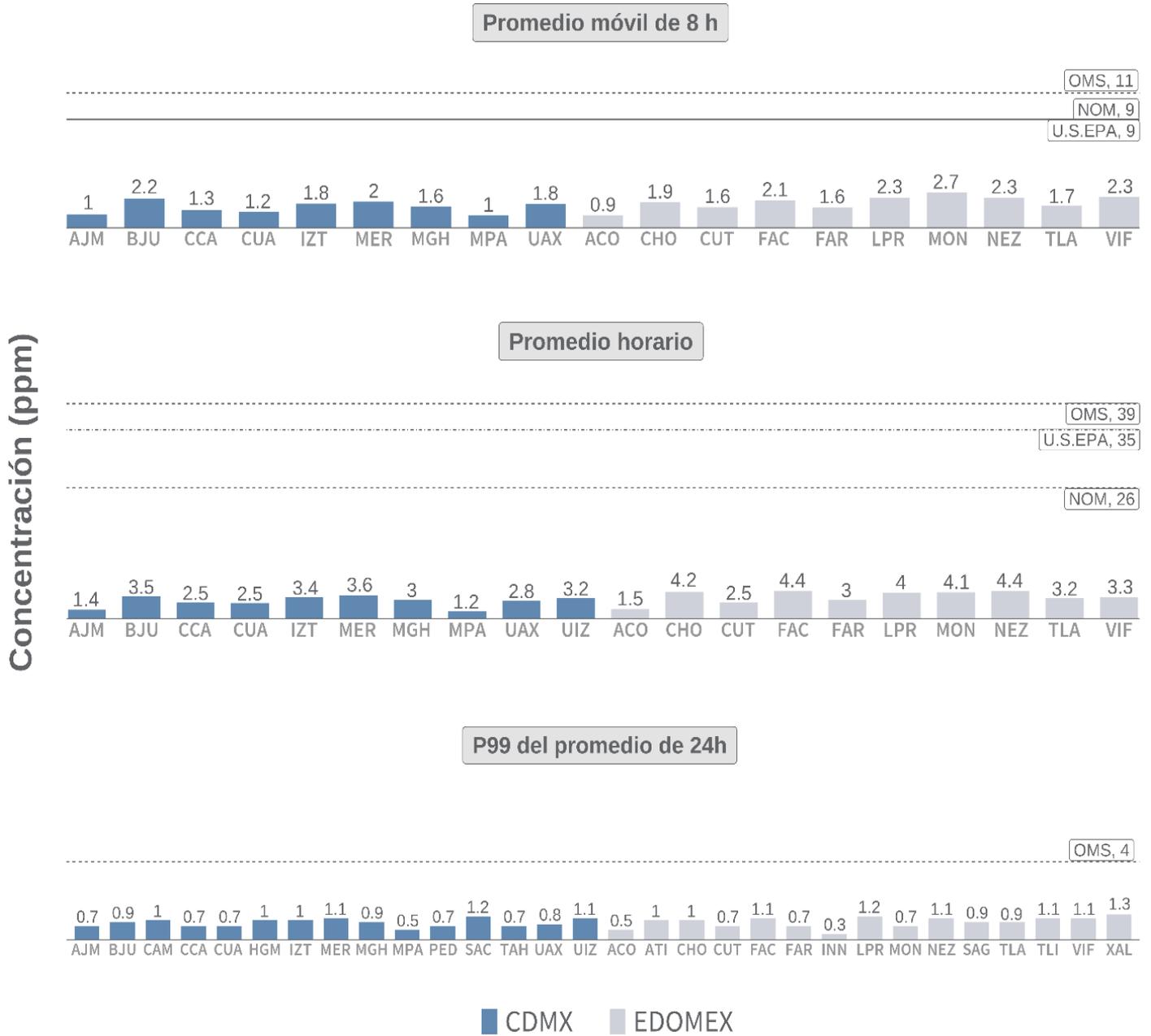


Figura 1.7. Concentración máxima de CO en 2023 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-021-SSA1-2021, OMS (convertido a ppm con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

Ozono (O₃)

El ozono (O₃) es un **contaminante secundario** que se forma a partir de sus **precursores**, los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y Óxidos de Nitrógeno (NOx), la reacción de los precursores ocurre con luz solar, por lo que los máximos de O₃ se registran en el día; para la ZMCM, es de 13:00 a 18:00 h. Las emisiones de NOx provienen de fuentes móviles, mientras que los COV se generan en fuentes de área como gasolineras, uso de solventes, Gas LP, etc.

El O₃ tiene efectos adversos en la vegetación, porque interfiere con la captura de CO₂, ocasiona pérdida de clorofila y afecta el proceso de la fotosíntesis (Dhir, 2016), esto se refleja como reducción en el rendimiento de cultivos como trigo, frijol, maíz, tomate, etc. (Mills et al., 2007). Además, afecta a los bosques debido a que causa disminución del crecimiento y cantidad de biomasa en algunas especies de árboles forestales (Paoletti, 2009).

Las consecuencias en la salud humana son a corto y largo plazo, se ha documentado que el O₃ causa síntomas como el dolor de cabeza, irritación en ojos y garganta, dificultad para respirar, tos, exacerbación del asma e incrementa visitas hospitalarias en padecimientos respiratorios. La exposición prolongada, tiene consecuencias más graves ya que incrementa el riesgo de muerte prematura por enfermedades respiratorias, ocasiona daños reproductivos y de desarrollo en los recién nacidos (Rappazzo et al., 2021), así como mayor riesgo de ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares, insuficiencia cardíaca (U.S. EPA, 2013).

Evaluación de la normatividad

La NOM-020-SSA1-2021 tiene dos indicadores para evaluar O₃: el máximo de 1h y el promedio móvil de 8h. En 2023, la suficiencia de datos de acuerdo con cada indicador, se cumplió en **24 estaciones** para el indicador horario y en **20 sitios** para el móvil de 8h. La concentración de O₃ en la ZMCM superó todos los límites nacionales e internacionales, alcanzando los máximos en la CDMX (**Tabla 1.6**).

Tabla 1.6. Valores de concentración máxima de O₃ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2021, las guías de la OMS y los NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS*	U.S. EPA
	Máximo horario	Promedio móvil 8h	P99 del promedio móvil 8h	Promedio trianual 4 ^{to} máx. 8h
	90 ppb	65 ppb	64 ppb*	70 ppb
ZMCM	171 ppb	128 ppb	111 ppb	114 ppb
CDMX	171 ppb	128 ppb	111 ppb	114 ppb
EDOMEX	161 ppb	120 ppb	101 ppb	99 ppb

Notas:

Se resaltan en rojo los valores que rebasan los límites.

*Los límites de las guías OMS fueron convertidos a ppb con una temperatura de 17°C y 585 mmHg de presión.

La U.S. EPA se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

En la ZMCM constantemente se presentan niveles altos de O₃, especialmente durante la temporada seca caliente (marzo a mayo), en la que las condiciones meteorológicas (cielo despejado, viento débil, alta temperatura y radiación solar, etc.) favorecen la generación y acumulación de O₃ en la CDMX, específicamente en la región centro y sur, esto debido a la dirección de los vientos predominantes (norte a sur) que transporta el O₃ y sus precursores hacia estas regiones, por esa razón en la **Figura 1.8**, se puede observar en la **distribución espacial que ambos indicadores de la NOM**, presentaron los valores más altos en sitios como Ajusco Medio (AJM), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Cuajimalpa (CUA), Pedregal (PED), Benito Juárez (BJU), Miguel Hidalgo (MGH) y UAM Xochimilco (UAX).

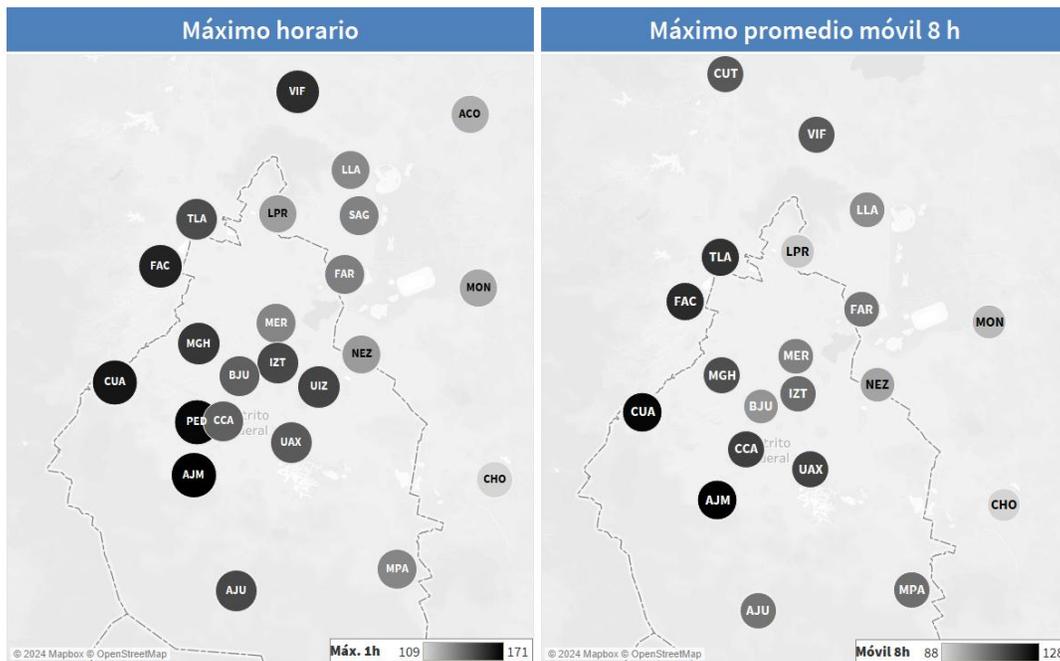


Figura 1.8. Distribución espacial del cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2021 durante 2023. El tamaño y color del círculo es proporcional a la magnitud de la concentración de O₃. Se presentan las 24 y 20 estaciones que cumplieron suficiencia para el máximo 1h (izquierda) y promedio móvil de 8 h (derecha), respectivamente.

En los datos por sitio (**Figura 1.9**), se observó que la concentración horaria más alta fue 171 ppb en CCA y el mínimo fue en Chalco (CHO) con 109 ppb. Para el segundo indicador de la NOM, el promedio móvil de 8 h presentó el mismo comportamiento, con el máximo en CCA y el mínimo en CHO, con 128 y 88 ppb, respectivamente. En los indicadores internacionales, el P99 del promedio de 8h (OMS) y el promedio trianual del 4to máximo de 8h (U.S. EPA), alcanzaron sus valores más altos en la CDMX, en sitios como AJM y CCA, mientras que los mínimos de ambos indicadores fueron en Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) en el EDOMEX.

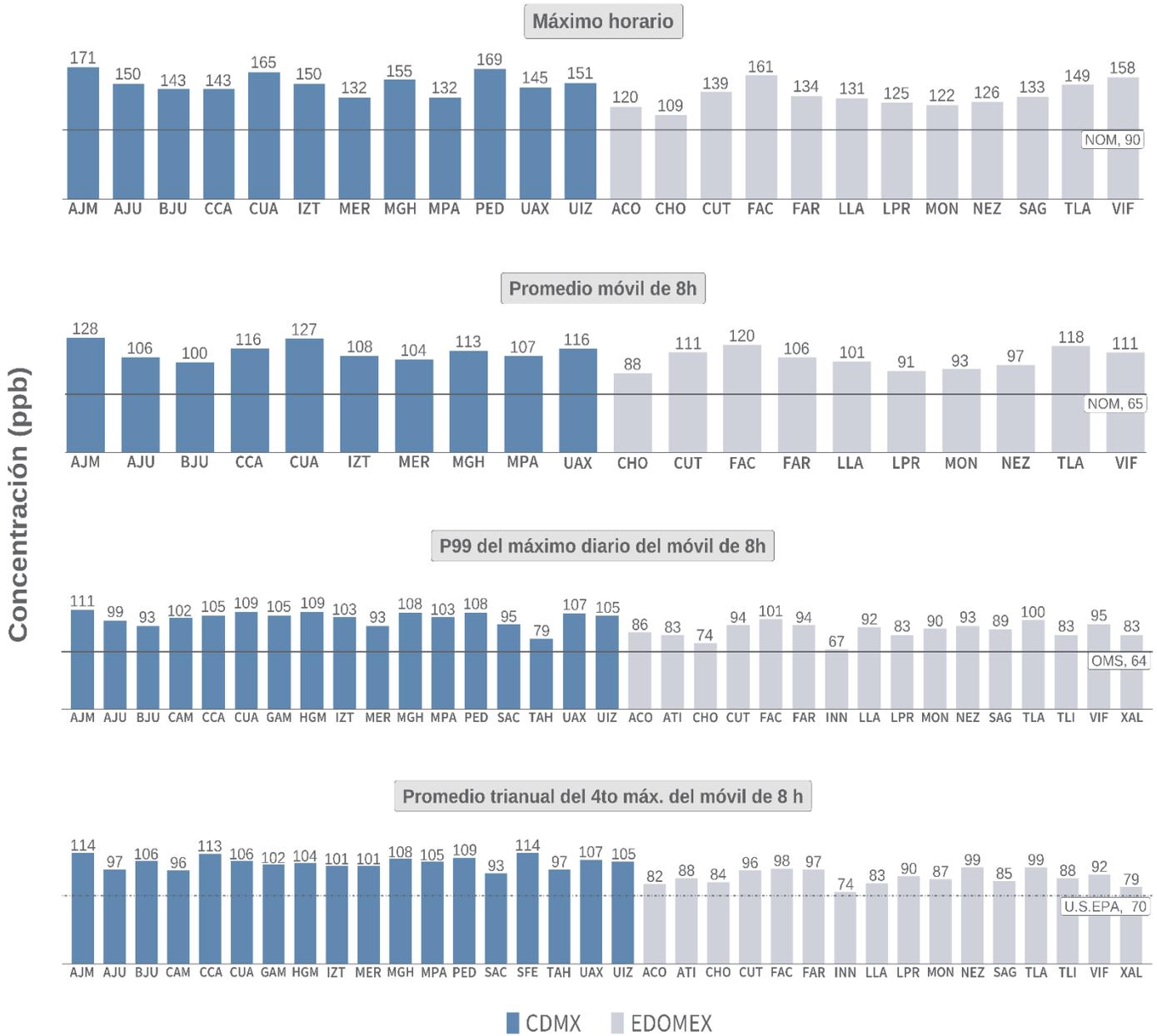


Figura 1.9. Concentración máxima de O₃ en 2023 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-020-SSA1-2021, OMS (convertido a ppb con 17°C, 585 mmHg) y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)

Las partículas suspendidas son una mezcla compleja de especies químicas, en estado sólido y aerosol. Se clasifican de acuerdo con su tamaño, las partículas que tienen un diámetro menor o igual a 10 micrómetros (µm) se les conoce como PM₁₀ y son emitidas por diversas fuentes, como incendios, tolvaneras, quemas a cielo abierto, vialidades sin pavimentar, así como fuentes móviles, entre otros.

Las partículas pueden alterar la absorción y dispersión de la luz en la atmósfera, reducen la visibilidad, afectan el clima, los ecosistemas y los materiales, también pueden interferir en el proceso de la fotosíntesis de las plantas (Honour et al., 2009), así como alterar su crecimiento y rendimiento (CARB, 2024b).

En términos de salud, las PM₁₀ pueden depositarse en la superficie de las vías respiratorias y causar inflamación pulmonar, así como alteración de la función cardíaca (Newell et al., 2017). La exposición a PM₁₀ se ha relacionado con el desarrollo y exacerbación de la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica, EPOC (Schikowski et al., 2005; van Eeden et al., 2001; Li et al., 2016), riesgo de cáncer (Hamra et al., 2014; IARC, 2015), así como mayor riesgo en padecimientos como COVID-19 (Marqués et al., 2022) e incremento de síntomas respiratorios en personas asmáticas.

Evaluación de la normatividad

La NOM-025-SSA1-2021 establece dos indicadores para la evaluación de PM₁₀: el P99 del promedio de 24h y el promedio anual. La suficiencia de datos en 2023, se cumplió en **siete estaciones** para ambos indicadores. En 2023 se superaron los límites de la NOM y la OMS en toda la ZMCM, por el contrario, el indicador trianual de la U.S. EPA se cumplió en la ZMCM; en todos los casos, con el máximo en el EDOMEX (**Tabla 1.7**).

Tabla 1.7. Valores de concentración máxima de PM₁₀ con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA
	P99 del promedio 24h	Promedio anual	P99 del promedio 24 h	Promedio anual	Promedio trianual del 2 ^{do} máx. de 24h
	70 µg/m ³	36 µg/m ³	45 µg/m ³	15 µg/m ³	150 µg/m ³
ZMCM	109 µg/m ³	58 µg/m ³	109 µg/m ³	58 µg/m ³	109 µg/m ³
CDMX	77 µg/m ³	37 µg/m ³	77 µg/m ³	37 µg/m ³	76 µg/m ³
EDOMEX	109 µg/m ³	58 µg/m ³	109 µg/m ³	58 µg/m ³	109 µg/m ³

Notas:

Se resaltan en rojo los valores que rebasan los límites.

Los datos presentados de PM₁₀ corresponden al monitoreo de la REDMA, que usan el método de referencia designado por la U.S. EPA.

La U.S. EPA se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

La **distribución espacial del cumplimiento de la NOM** (Figura 1.10) muestra que ambos límites se superaron en 5 estaciones (4 en el EDOMEX y 1 en la CDMX): Tlalnepantla (TLA), La Presa (LPR), Xalostoc (XAL), Nezahualcóyotl (NEZ) y Merced (MER). Los sitios Lomas (LOM) y Pedregal (PED), cumplieron con ambos límites normados. La distribución de las PM_{10} está influenciada continuamente por las fuentes móviles y de área, las cuales aportan el 83% de las emisiones totales de estas partículas, por ejemplo, vehículos particulares, transporte de carga pesada. La resuspensión de polvo en vialidades pavimentadas o no pavimentadas, quemas a cielo abierto y las actividades agrícolas también son una fuente importante de partículas cuando los vientos resuspenden el polvo (SEDEMA, 2023b).

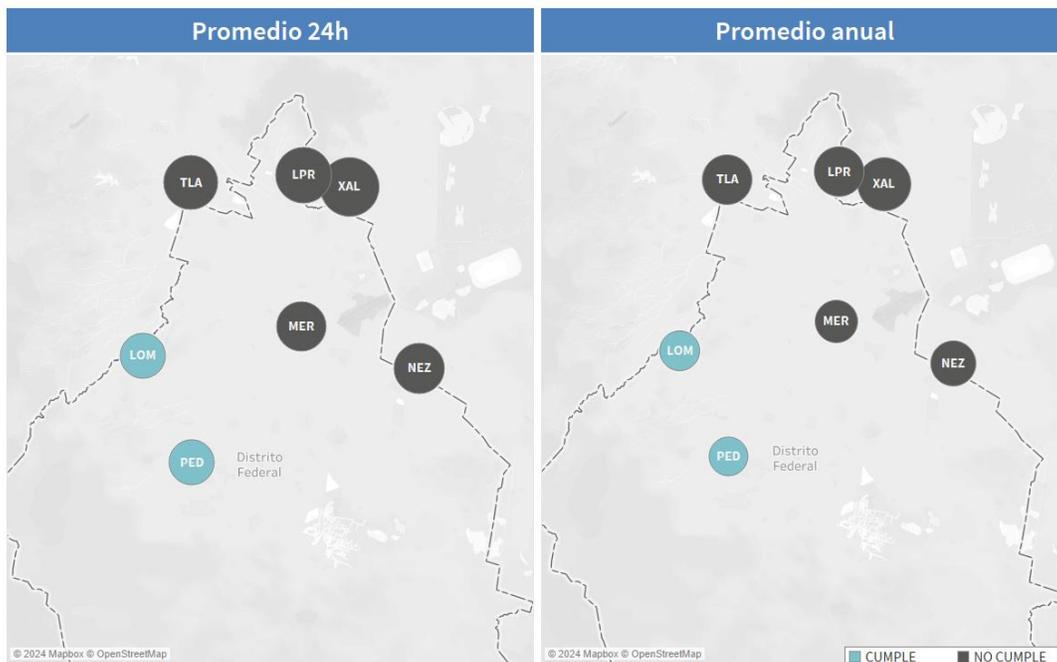


Figura 1.10. Distribución espacial del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2021 durante 2023. El tamaño del círculo es proporcional a la magnitud de la concentración de PM_{10} . Se presentan las 7 estaciones que cumplieron suficiencia para ambos indicadores normados.

En el análisis por estación (Figura 1.11), XAL registró el máximo en todos los indicadores nacionales e internacionales, con $109 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el P99 del promedio de 24 h de NOM y promedio trianual del 2do máximo de 24h de la U.S. EPA, mientras que el máximo del promedio anual fue $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores mínimos se presentaron en LOM y PED; para el P99 del promedio de 24 h (NOM y OMS) fue $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el indicador trianual de la U.S. EPA fue $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos en la estación LOM; mientras que, para el indicador anual de la NOM y OMS, el mínimo fue en PED, con $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este patrón se ha observado durante varios años, con los mínimos en la estación PED, que usualmente cumple con la NOM de PM_{10} .

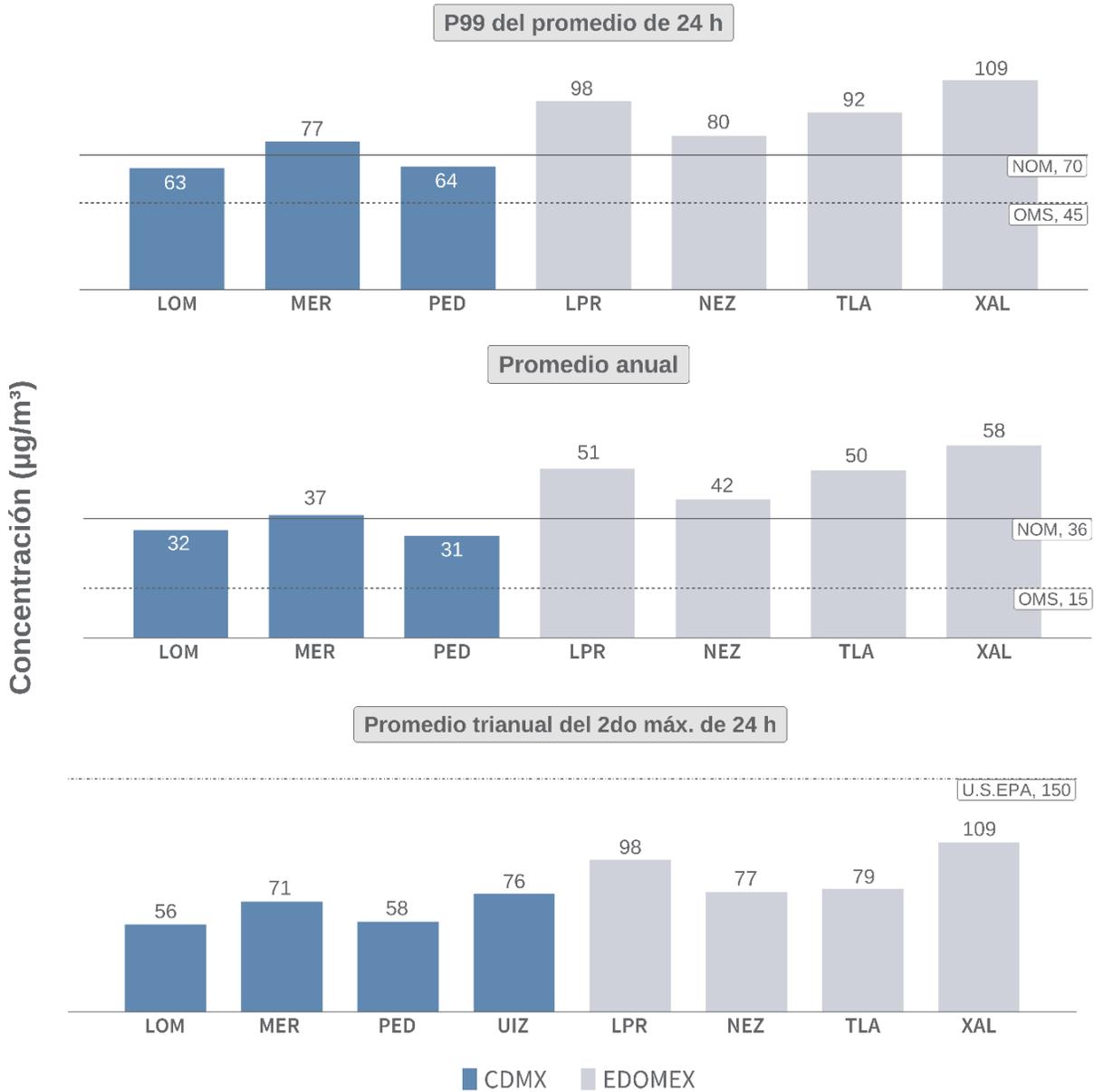


Figura 1.11. Concentración máxima de PM₁₀ en 2023 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})

Las partículas menores a 2.5 µm (PM_{2.5}), también llamadas partículas finas; están clasificadas en **primarias**, que se emiten directamente de fuentes naturales (tormentas de polvo, incendios forestales) y antropogénicas (uso de combustibles fósiles, pirotecnia). Las PM_{2.5} **secundarias** se forman por reacciones complejas de contaminantes emitidos por diversas fuentes (U.S. EPA, 2023). Debido al tamaño de las PM_{2.5}, pueden permanecer más tiempo en el aire, por lo tanto, se acumulan y se transportan a mayor distancia (Thangavel et al., 2022).

En términos de salud, las PM_{2.5} son consideradas como el contaminante más peligroso ya que por su tamaño, se transportan y depositan en el sistema respiratorio profundo e incluso llegan al torrente sanguíneo (CARB, 2023). De acuerdo con la U.S. EPA, las PM_{2.5} y la mortalidad tienen una relación causal, esto significa que son consideradas causa de muerte, así como daño en el sistema cardiovascular y respiratorio (U.S. EPA, 2019). En 2021, se estimó que la contaminación por PM_{2.5} contribuyó a 4.1 millones de muertes a nivel mundial, por padecimientos respiratorios y cardiovasculares, cáncer, infecciones pulmonares y otras enfermedades crónicas (Bu et al., 2021; *Health Effects Institute*, 2024; Thangavel et al., 2022).

Evaluación de la normatividad

La NOM-025-SSA1-2021 evalúa la concentración de PM_{2.5} con dos indicadores: P99 del promedio de 24h y el promedio anual. En 2023, se evaluaron **5 estaciones** que son las que cumplieron con la suficiencia establecida en la NOM, para cada indicador. Los resultados para los indicadores nacionales e internacionales (**Tabla 1.8**) mostraron que se superaron todos los límites, con valores similares entre ambas entidades de la ZMCM.

Tabla 1.8. Valores de concentración máxima de PM_{2.5} con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA.

Entidad	NOM		OMS		U.S. EPA	
	P99 del promedio 24h	Promedio anual	P99 del promedio 24h	Promedio anual	Promedio trianual P98 de 24h	Promedio trianual
	41 µg/m ³	10 µg/m ³	15 µg/m ³	5 µg/m ³	35 µg/m ³	12 µg/m ³
ZMCM	45 µg/m ³	21 µg/m ³	45 µg/m ³	21 µg/m ³	42 µg/m ³	20 µg/m ³
CDMX	43 µg/m ³	19 µg/m ³	43 µg/m ³	19 µg/m ³	36 µg/m ³	19 µg/m ³
EDOMEX	45 µg/m ³	21 µg/m ³	45 µg/m ³	21 µg/m ³	42 µg/m ³	20 µg/m ³

Notas:

Los datos presentados de PM_{2.5} corresponden al monitoreo de la REDMA, que usan el método de referencia designado por la U.S. EPA.

Se resaltan en rojo los valores que rebasan los límites.

La **U.S. EPA** se refiere a la institución internacional que establece estándares (NAAQS) en Estados Unidos de América.

En la ZMCM, los valores más altos de $PM_{2.5}$ se registran durante la temporada seca fría (noviembre a febrero), esto debido a las condiciones meteorológicas, como las inversiones térmicas, y a las emisiones en festividades decembrinas por el uso de pirotecnia. En la **distribución espacial de los valores de la NOM**, solamente la estación San Agustín (SAG) cumplió con el límite para el P99 del promedio de 24 h, mientras que, para el promedio anual, todos los sitios evaluados registraron valores mayores a la NOM (**Figura 1.12**). La distribución de las $PM_{2.5}$ está influenciada por las emisiones directas de las fuentes móviles y de área; así como por la generación de partículas secundarias.

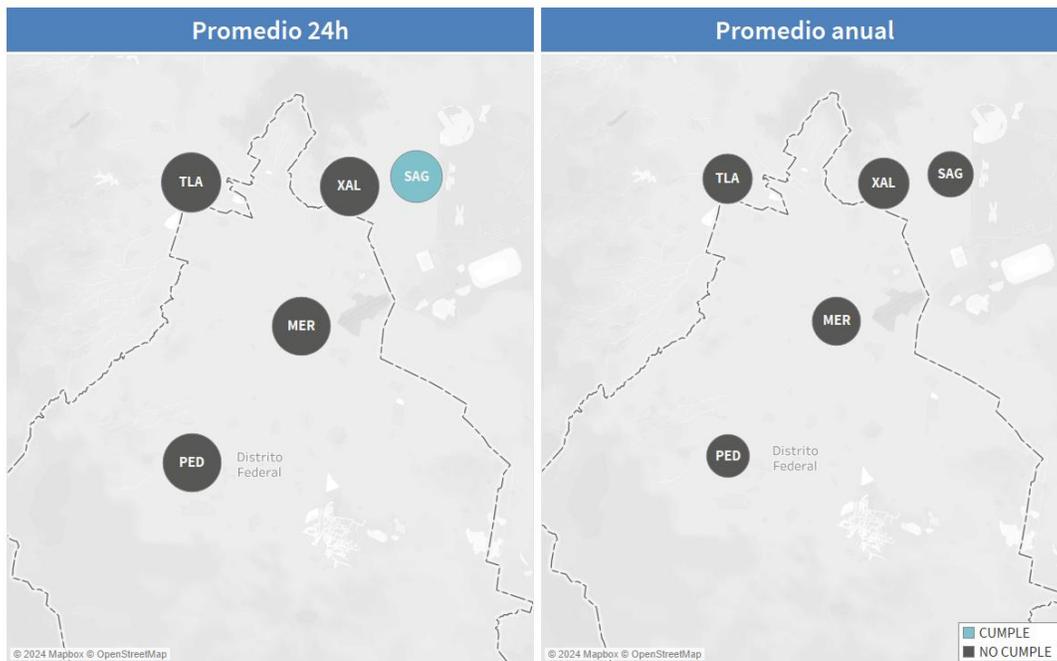


Figura 1.12. Distribución espacial del cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2021 durante 2023. El tamaño del círculo es proporcional a la magnitud de la concentración de $PM_{2.5}$. Se presentan las 5 estaciones que cumplieron suficiencia para ambos indicadores normados.

En los datos por estación (**Figura 1.13**), el indicador del P99 del promedio 24h (NOM y OMS) presentó su máximo en Tlalnepantla (TLA) con $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y su mínimo en SAG con $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la media anual (NOM y OMS), el valor más alto fue $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Xalostoc (XAL) y el mínimo en Pedregal (PED) con $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En los estándares de la U.S. EPA, el promedio trianual del P98 (24h) alcanzó el máximo de $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en XAL y en la media trianual obtuvo dos máximos de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TLA, XAL); mientras que los mínimos de ambos indicadores fueron en PED, con $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

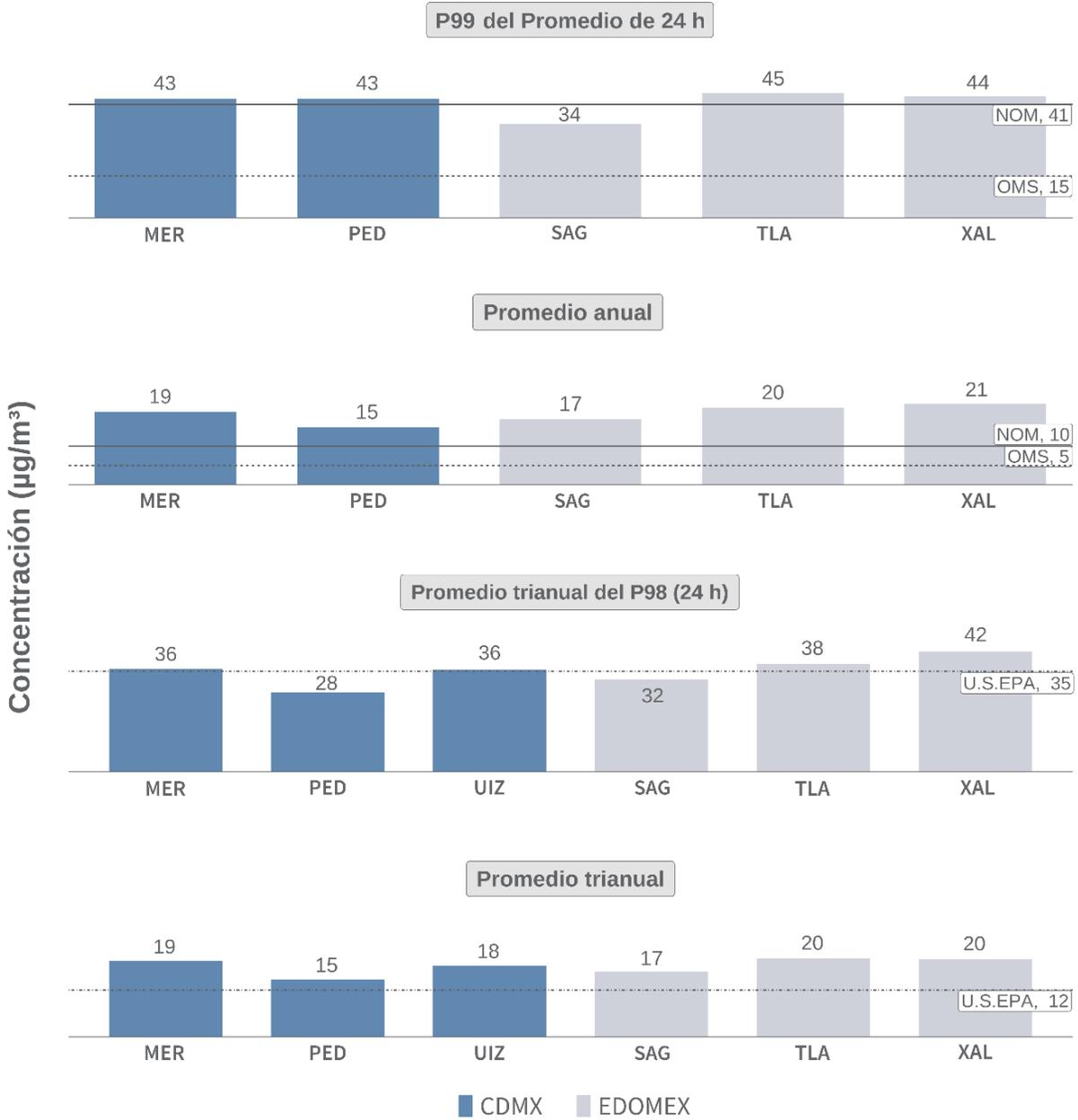
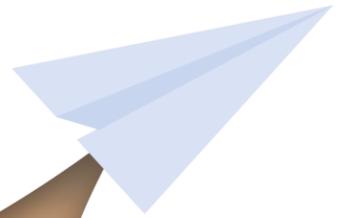


Figura 1.13. Concentración máxima de PM_{2.5} en 2023 con respecto a los indicadores y límites de la NOM-025-SSA1-2021, OMS y NAAQS de la U.S. EPA, por estación de monitoreo.

Tiempo



Temperatura

La temperatura del aire es una medida fundamental en meteorología, que se mide con un termómetro y las escalas de grados Celsius (°C) o Fahrenheit (F). En México se expresa generalmente en °C. Esta variable meteorológica influye en una variedad de procesos atmosféricos como la formación de nubes, la precipitación, y los patrones de viento; por lo que su comportamiento es muy importante para el pronóstico de la calidad del aire.

La distribución de la temperatura en el planeta, tanto espacial como temporalmente, está condicionada por varios factores, que incluyen:

- 1. Radiación Solar:** La principal fuente de calor en la atmósfera es la radiación solar. La inclinación de los rayos solares y la duración de la exposición solar, determinan la cantidad de energía que recibe una región.
- 2. Altitud:** La temperatura disminuye con la altitud debido a la expansión adiabática¹ del aire. Por cada 1,000 metros de ascenso, la temperatura puede disminuir aproximadamente 6.5°C (gradiente promedio en la vertical).
- 3. Superficie terrestre:** La vegetación y el tipo de superficie influyen en la absorción y emisión de calor. Las áreas urbanas tienden a ser más cálidas que las rurales, un fenómeno conocido como isla de calor urbano² (Oke, 1982).
- 4. Corrientes de aire y movimiento atmosférico:** El desplazamiento de las masas de aire cálidas y frías afectan las temperaturas locales. Los frentes fríos, olas de calor, sistemas de alta y baja presión modulan este desplazamiento de las masas (Wallace & Hobbs, 2006).

¹ Una expansión adiabática se refiere a un proceso termodinámico en el que no hay ganancia ni pérdida de calor en un volumen de gas. En términos del aire ambiente, esto sucede cuando una masa de aire se aleja de la superficie terrestre y se encuentra una presión atmosférica menor, lo que provoca su expansión y enfriamiento (Vallero, 2008).

² La “isla de calor” describe áreas urbanas de muchas construcciones que son más calientes que las áreas rurales cercanas. La temperatura media anual del aire en una ciudad de 1 millón de personas o más puede ser de 1 a 12 °C más elevada que en las áreas rurales circundantes (U.S. EPA, 2025).

- 5. Humedad y nubes:** La humedad del aire y la cobertura nubosa pueden modular las temperaturas al actuar como un aislante, lo que reduce la pérdida de calor durante la noche y limita el calentamiento durante el día (Holton, 2004).

Comportamiento de la temperatura del aire a nivel global

La tendencia actual de aumento de la temperatura global, en la superficie terrestre y el océano, se ha convertido en uno de los principales retos ambientales que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. El cambio climático ya es una realidad que compete a las autoridades de todos los niveles y a la población. Este fenómeno se refiere a las alteraciones en los patrones del clima, principalmente debido al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Los GEI, como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y el ozono (O₃), retienen el calor en la atmósfera y contribuyen al aumento de la temperatura del planeta, lo que causa el calentamiento global.

El NCEI-NOAA (*National Center for Environmental Information from National Oceanic and Atmospheric Administration*) y la OMM (Organización Meteorológica Mundial), reportaron el año 2023 como el más cálido desde que comenzaron los registros mundiales en 1850, con 1.18 °C por encima del promedio del siglo XX (13.9 °C). Este valor supera en 0.15 °C el récord anterior establecido en 2016. A diferencia de los dos años anteriores (2021 y 2022), que estuvieron asociados a un episodio de fase fría de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), también conocido como **La Niña**; el 2023 pasó rápidamente a fase neutral de ENSO y en junio transitó a un episodio de fase cálida (**El Niño**). Es necesario comentar que, en promedio, durante El Niño, las temperaturas globales tienden a ser más cálidas que en las fases ENSO neutral o La Niña; por el contrario, las temperaturas globales tienden a ser ligeramente más frías en los episodios de La Niña. Los meses de junio a diciembre de 2023, se ubicaron como los más cálidos registrados y julio registró la temperatura global más cálida de todos. Además, las anomalías mensuales de julio, agosto y septiembre superaron en 1.0°C su promedio histórico, situación que ocurre por primera vez desde que se tiene registro (NOAA, 2024).

La combinación del aumento de temperatura global ocasionado por los GEI, junto con el cambio de fase del ENSO (transición de La Niña a El Niño), que tuvo una duración desde mediados del 2020 hasta principios de 2023; puede explicar parte del aumento de la temperatura entre 2022 y 2023 (WMO, 2024).

El cambio climático es un problema global que requiere una acción coordinada a nivel local, nacional e internacional. Las perspectivas para el futuro dependerán, en gran medida, de nuestras acciones presentes para mitigar y adaptarnos a sus impactos (IPCC, 2021).

Comportamiento de la temperatura en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

Los datos de temperatura de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) para 2023 mostraron un promedio anual de 16.9 °C, igual al registrado en 2022 (**Figura 2.1a**). En los promedios mensuales (**Figura 2.1b**), junio destacó con el valor más alto con 20.9 °C, esto superó en 2.2 °C el promedio de abril (18.8 °C), que fue el segundo mes más cálido del 2023. Durante junio, también se presentó la temperatura horaria máxima del año, con 35.3 °C, registrada el día 19 a las 15:00 y 16:00 h en la estación Villa de las Flores (VIF), ubicada en el norte del Estado de México (EDOMEX). La temperatura horaria mínima fue -3.7 °C en el sitio Ajusco Medio (AJU) al amanecer del día 4 de febrero.

En el perfil horario de este año (**Figura 2.1c**), se observó un comportamiento típico, con las temperaturas mínimas entre las 06:00 y las 08:00 h, mientras que los máximos se alcanzaron entre las 14:00 y las 16:00 h. En términos de la distribución espacial del promedio anual de temperatura por estaciones (**Figura 2.2d**), el valor más alto fue 20.6 °C registrado en FES Aragón (FAR), ubicada en el noreste de la ZMCM y el segundo máximo fue de 19.9 °C, en la estación Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) en el norte de la Ciudad de México (CDMX). El sitio AJU reportó el promedio anual mínimo con 10.9 °C, seguida por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (INN) con 11.7 °C. Esta distribución espacial, con máximos en las estaciones del centro-noreste y mínimos en la periferia suroeste, es coherente con años anteriores y está influenciada por el tipo de entorno en el que se encuentran (urbano o rural), así como por la altura del sitio de medición.

El análisis de anomalías mensuales de temperatura (**Figura 2.2**) indicó que el 2023 fue muy cálido con valores por encima del promedio (2008-2019) en la mayoría de los meses, con junio como el más cálido con una anomalía positiva de 2.9 °C; esto fue consistente con la presencia de la 3ra onda de calor que afectó al país durante casi todo este mes. Las anomalías negativas fueron menos significativas; sólo se presentaron en mayo y diciembre. En agosto, la temperatura se mantuvo igual que su promedio 2008-2019. El detalle para el método de cálculo de anomalías se puede consultar en el Informe Anual de Calidad del Aire 2021 (SEDEMA, 2023).

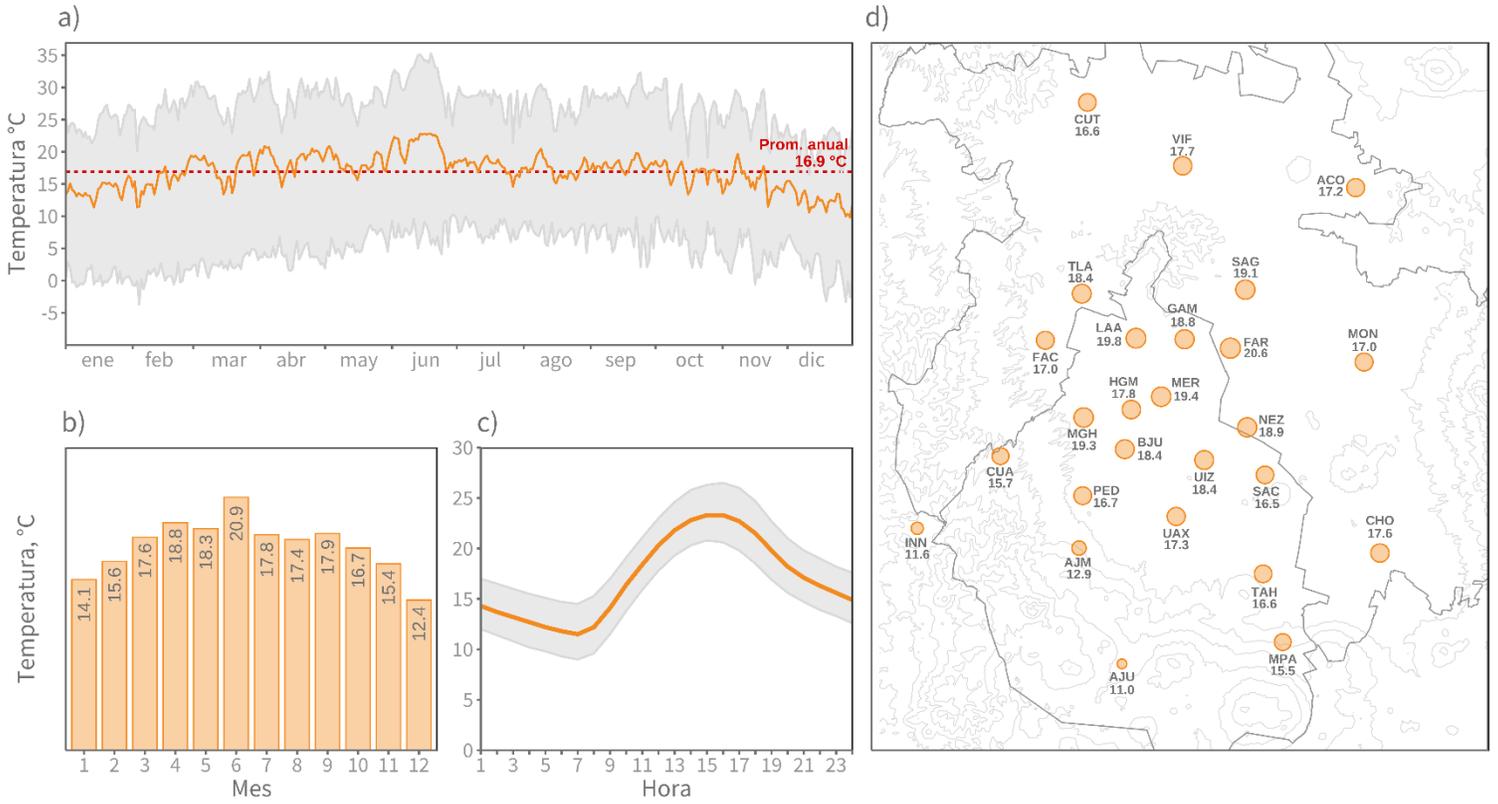


Figura 2.1. Comportamiento de la temperatura ambiente (°C) durante 2023. **a)** Serie de tiempo con promedio diario (línea naranja continua), desviación estándar (sombreado gris) y promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea naranja es el promedio por hora y el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual por estación.

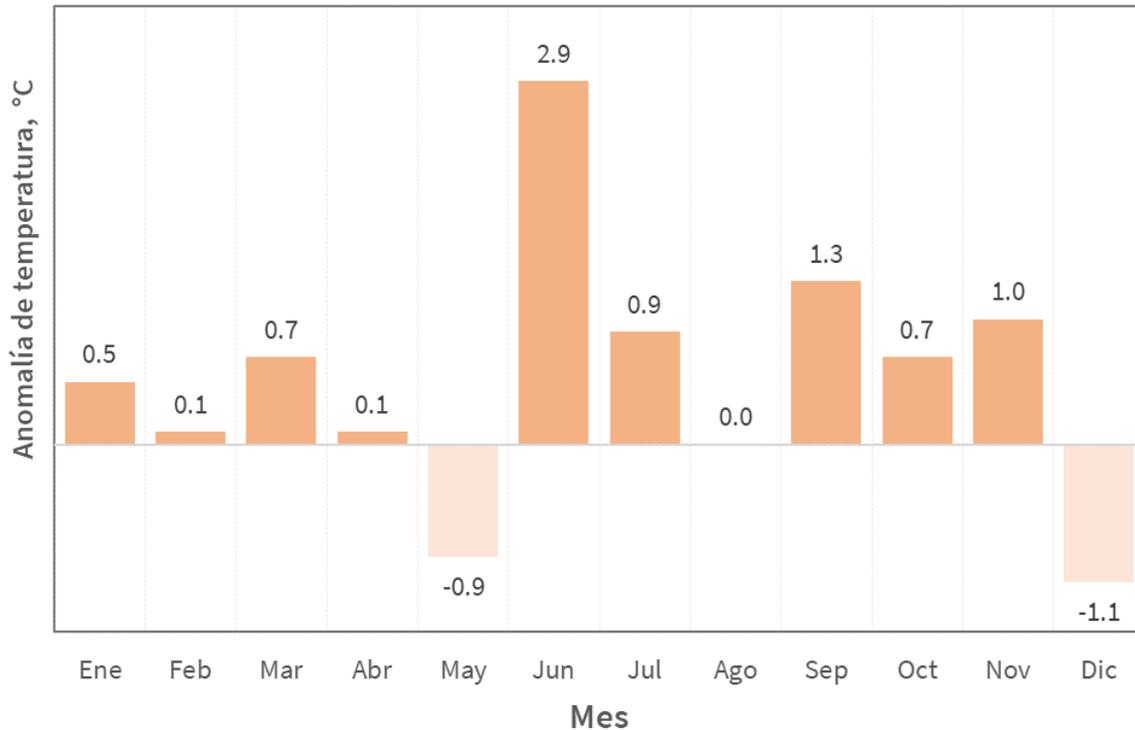


Figura 2.2. Anomalia de temperatura mensual con respecto al promedio de 12 años (2008-2019), calculada con las estaciones: TLA, FAC, VIF, MER, PED, TAH, XAL.

Tercera onda de calor en junio del 2023

Las ondas de calor son un fenómeno meteorológico caracterizado por un período prolongado de temperaturas extremadamente altas en comparación con los valores climatológicos normales de una región. Pueden ser provocadas por factores como sistemas de alta presión persistentes, cambios en las corrientes en chorro y patrones climáticos a gran escala, p. ej. El Niño. Un **anticiclón** o **sistema de alta presión** se forma cuando el aire frío desciende hacia la superficie, esto aumenta la presión en la región debido a la compresión adiabática del aire. Este movimiento descendente inhibe la formación de nubes, ya que el aire se calienta y se seca al descender, por lo que esta condición meteorológica se asocia con el cielo despejado y ausencia de precipitaciones. Especialmente en la primavera y verano, los anticiclones pueden conducir a ondas de calor cuando persisten por varios días, la falta de nubosidad permite una mayor radiación solar, esto eleva las temperaturas y mantiene condiciones secas durante varias semanas.

La determinación de una onda de calor puede tener diferente metodología por país; en México, se activa una alerta según los avisos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que usa el percentil 95 (P95) como indicador estadístico y es calculado con la serie de temperaturas históricas (30 años) para una época y sitio específico. Además, se debe superar dicho umbral por un mínimo de 3 días consecutivos. En el caso de la CDMX, se determina una temperatura máxima superior a 30 °C, por lo menos, durante 3 días seguidos, así como una temperatura media diaria mayor a 25 °C (Jáuregui, 2009).

Las ondas de calor son fenómenos peligrosos para el ser humano, por lo que es importante contar con un sistema de alerta temprana, ya que puede salvar vidas. Los efectos fisiológicos en el cuerpo humano pueden ser significativos si las temperaturas extremas superan la capacidad del organismo para regular su temperatura interna, esto puede provocar deshidratación, golpes de calor e incluso la muerte (Ballester et al., 2023; OMS, 2025).

En 2023, las altas temperaturas de junio estuvieron asociadas a la tercera onda de calor del año, la cual tuvo una duración de 22 días, del 1 al 22 de junio, de acuerdo con la información del SMN. Este fenómeno estuvo asociado a la presencia de un anticiclón en niveles medios de la tropósfera que provocó anomalías positivas de las variables: altura de geopotencial y temperatura (**Figura 2.3**).

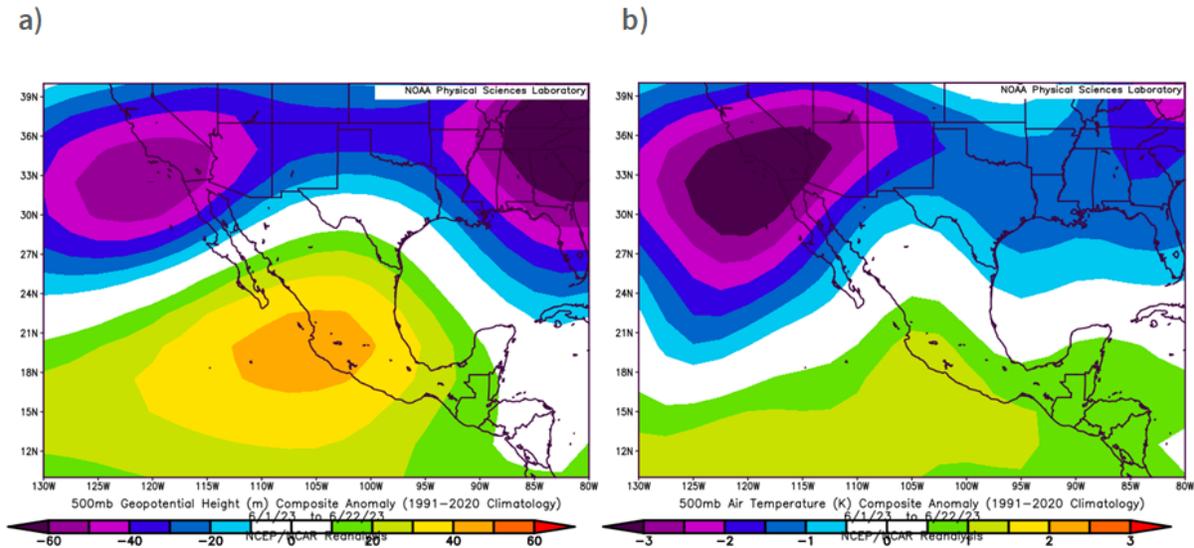


Figura 2.3. Anomalia promedio para 500 hPa en el período del 1ro al 22 de junio del 2023: a) altura de geopotencial, b) temperatura del aire.

Es importante mencionar que el SMN es la institución encargada de emitir alertas tempranas en caso de onda de calor y para esto, utiliza estaciones meteorológicas de tipo climáticas con datos para un período mínimo de 30 años. Sin embargo, para la onda de calor de junio del 2023 se replicó un análisis similar al SMN, pero con los datos de la REDMET con el fin de observar el comportamiento de la temperatura durante estos períodos anómalamente cálidos y analizar cómo podrían impactar en la formación de ozono (O_3).

Se realizó una comparación de la temperatura en las fechas del 15 de mayo al 30 de junio del 2023 con la media del período de 11 años, 2008-2019 (Figura 2.4). Para esto se calculó la temperatura máxima diaria y el P95 de la serie histórica para las fechas mencionadas, lo que comprende la duración de la onda de calor en junio de 2023. En los resultados se observó que las temperaturas en 2023 excedieron el umbral del P95 entre el 12 y el 20 de junio; además se mantuvieron por encima de la media de referencia en casi todo el período considerado como onda de calor, excepto entre los días 5 y 8 de junio.

Estas temperaturas elevadas ameritaron una alerta temprana del SMN, además, en este periodo hubo presencia de estabilidad atmosférica (moderada a fuerte) sobre la ZMCM, relacionada con un sistema de alta presión, así como masa de aire seco y cálido; sin embargo, en este período no se alcanzó el umbral de contingencia atmosférica por O_3 (155 ppb). Esto se puede observar en la Figura 2.5, que en general, las concentraciones fueron menores a 120 ppb, excepto los días 1ro y 15 de junio, que registraron valores ligeramente superiores a 150 ppb, pero sin alcanzar el P95 (178.7 ppb) del período de referencia (2008-2019). Este análisis revela que las temperaturas máximas extremas no son el único factor decisivo para que

ocurra una contingencia ambiental de O₃, ya que son episodios en los que intervienen diversos factores y se combinan para que se registren picos excesivos de O₃. Es importante enfatizar que las contingencias son situaciones extremas (eventos atípicos estadísticamente) y complejas debido a la naturaleza de los factores que las originan, tanto meteorológicos como fotoquímicos; además del comportamiento en las emisiones de precursores de ozono, locales o regionales.

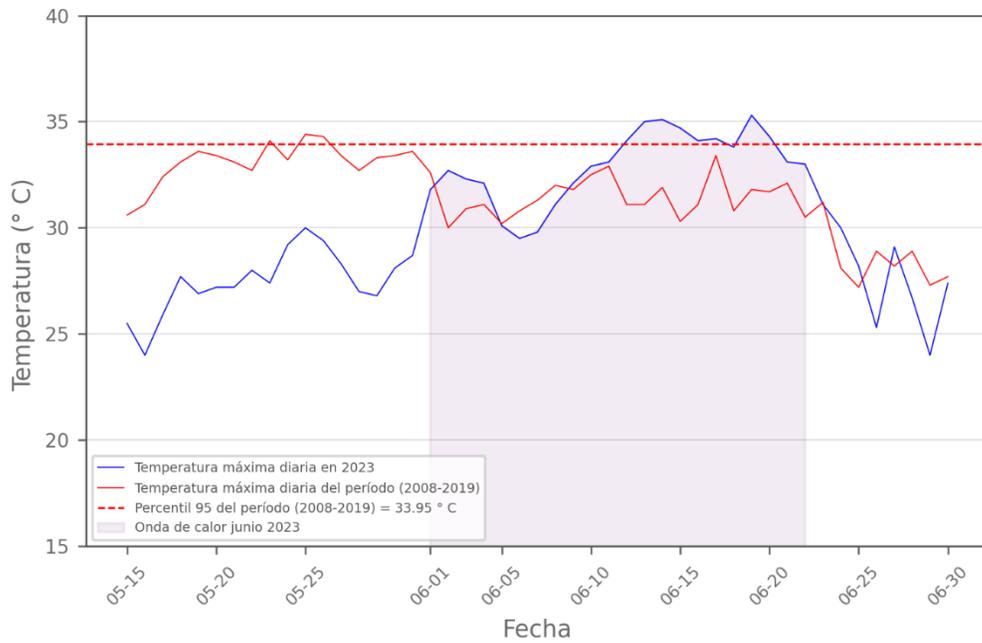


Figura 2.4. Comparación de la temperatura máxima diaria para el período del 15 de mayo al 30 de junio del 2023 con respecto a la media del período de 11 años, 2008-2019.

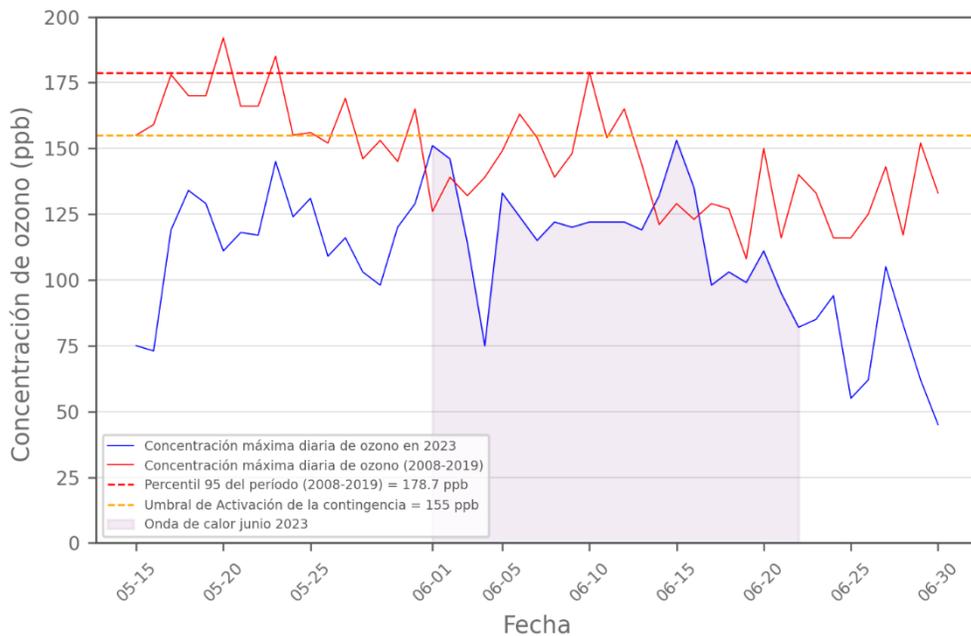


Figura 2.5. Comparación de la concentración de ozono para el período entre el 15 de mayo y el 30 de junio del 2023 con respecto a la media del período de 11 años, 2008-2019.

Humedad relativa

La humedad relativa (HR) es un parámetro meteorológico que se expresa como un porcentaje y describe la cantidad de vapor de agua que está presente en el aire, en relación con la cantidad máxima que el aire puede contener a una temperatura específica, antes de que se alcance la condensación³.

La humedad del aire es de gran importancia porque interviene en los procesos de formación de nubes y precipitaciones; así como en procesos humanos, como la sensación térmica y el confort. Por ejemplo, una HR baja provoca una evaporación más rápida del sudor, lo que ayuda a enfriar el cuerpo, mientras que una HR alta dificulta este proceso, lo que incrementa la sensación de calor (Wallace & Hobbs, 2006).

La medición de la humedad del aire es muy importante para la predicción de los fenómenos atmosféricos, ya que tiene una estrecha relación con las variables temperatura y precipitación. La capacidad del aire para retener vapor de agua aumenta con la temperatura, así que la HR disminuye cuando la temperatura se eleva. En términos de lluvia, una HR alta se asocia con ocurrencia de precipitaciones, mientras la HR baja por largos períodos genera sequía.

En México, el 2023 fue un año particularmente seco y cálido, ya que, de acuerdo con los datos de precipitación y temperatura, se clasificó como el año más seco desde 1941 y el más cálido desde 1953. Esto contribuyó a la intensificación de las áreas con sequía a nivel nacional y el mes de septiembre 2023 fue el septiembre con mayor superficie de sequía (moderada a excepcional) en los últimos 21 años, de acuerdo con datos del Monitor de Sequía de México (SMN, 2023).

Comportamiento de la HR en la ZMCM

En 2023, de acuerdo con los datos de REDMET, el promedio anual de la HR fue de 52.8 % (Figura 2.6a), lo que representó una disminución del 0.4 % en comparación con 2022. Los meses más húmedos se observaron de julio a octubre, lo que coincidió con la temporada de lluvias, con los máximos de HR en julio (64%) y agosto (63 %). Por el contrario, el periodo más seco fue de febrero a abril, con el mínimo de 39.4 % en marzo (Figura 2.6b). En el perfil horario (Figura 2.6c) se observó que la HR incrementó desde la madrugada hasta las 07:00 h, esto se explica porque durante la noche y la madrugada, la temperatura ambiente disminuye por la ausencia de la radiación solar, lo que reduce la capacidad del aire para retener vapor de agua.

³La condensación es un cambio de estado de la materia, es el proceso en el cual un gas o un vapor se transforma en líquido.

A partir de las 08:00 h comienza un proceso de disminución gradual y alcanza su valor mínimo aproximadamente a las 15:00 h; debido a que en este horario se registran los máximos de temperatura en la ZMCM, además, la combinación de máxima radiación solar y temperatura elevada conlleva a que la capacidad del aire para contener vapor de agua esté en su punto más alto, lo que reduce la HR.

El promedio anual por estación (Figura 2.6d) tuvo su máximo de 76 % en AJU y un mínimo de 35.2 % en Hospital General de México (HGM). Los valores máximos en las estaciones del sur son típicos de cada año y están vinculados a la influencia de las sierras Ajusco y las Cruces, que crean un microclima húmedo a través del efecto orográfico, la vegetación y la regulación térmica. En contraste, los mínimos en el centro se deben a factores relacionados con la urbanización, como el efecto de isla de calor, la alteración del ciclo de evaporación y precipitación, así como a la disminución de las áreas verdes.

El análisis de las anomalías de HR en 2023, reafirmó las condiciones secas durante este año, con anomalías negativas (déficit de humedad con respecto al período de comparación) en todos los meses, excepto en mayo y diciembre, cuando fueron positivas. La mayor anomalía negativa fue en junio con -17.8 %, seguida de septiembre con -10.3 % (Figura 2.7).

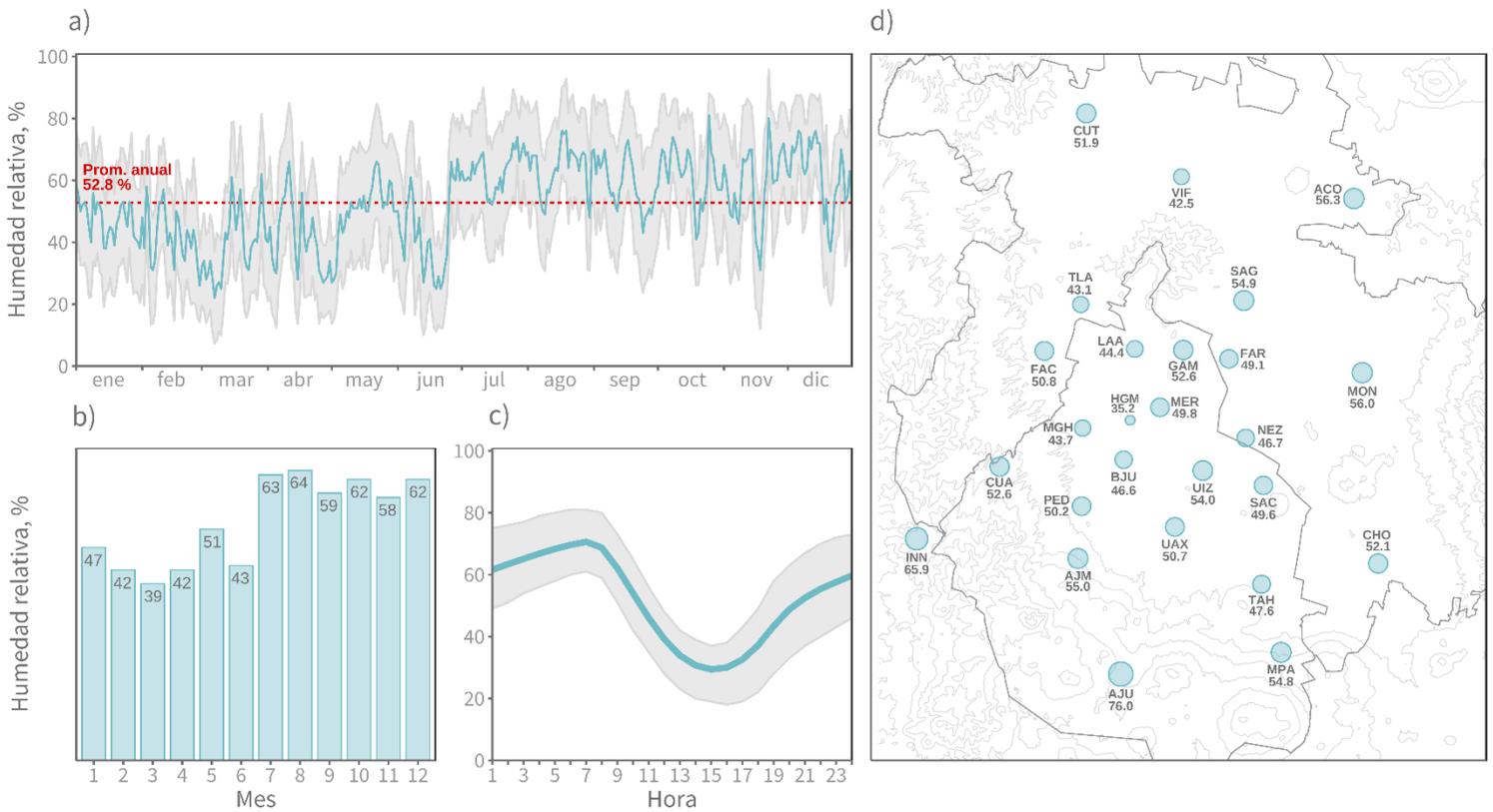


Figura 2.6. Comportamiento de la HR (%) durante 2023. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea azul continua), desviación estándar (sombreado gris) y promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea azul es el promedio por hora y el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual por estación.

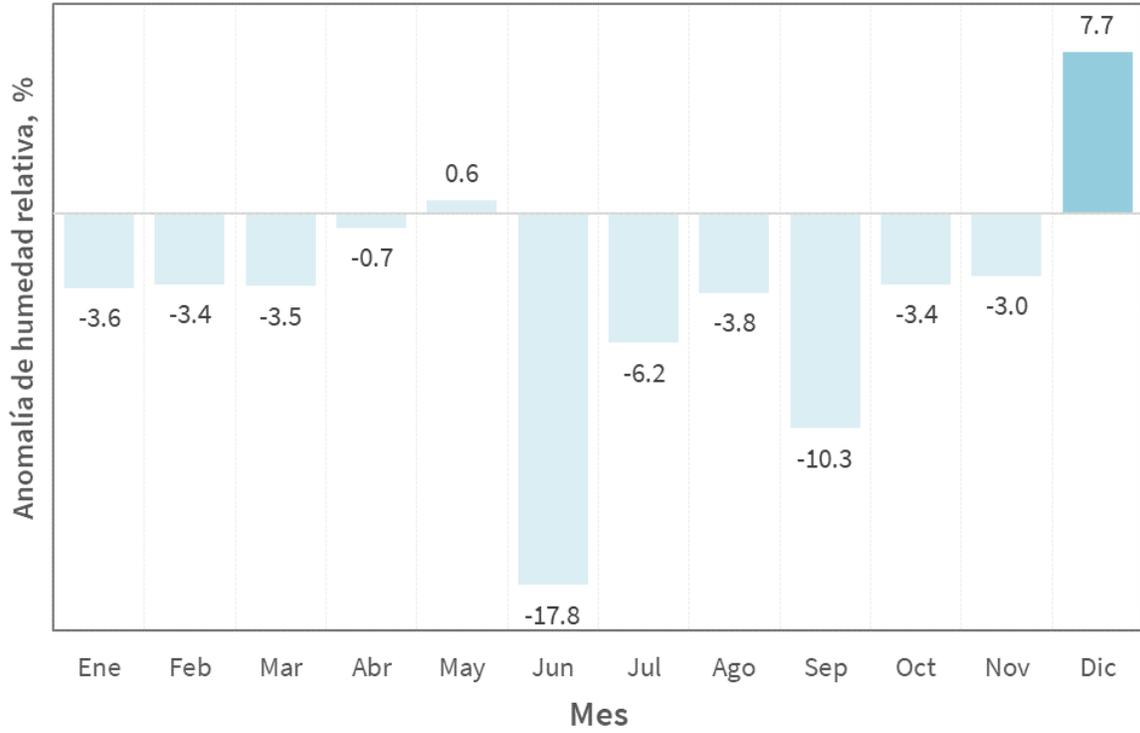


Figura 2.7. Anomalía de humedad relativa mensual en 2023, con respecto al promedio de 12 años (2008-2019), calculada con las estaciones: TLA, FAC, VIF, MER, PED y XAL

Precipitación

La precipitación es el proceso mediante el cual el agua cae desde la tropósfera hasta la superficie terrestre y puede ser en sus diferentes estados (líquido, sólido o su combinación). La precipitación forma parte esencial del ciclo hidrológico y tiene un papel fundamental en la distribución del agua en el planeta (Barry & Chorley, 2009). Existen varios tipos de precipitación, por ejemplo: lluvia, llovizna, nieve, aguanieve y granizo; pero la distribución y sus tipos, así como los mecanismos que la forman, están influenciados por varios factores:

Topografía: las montañas inducen precipitación orográfica debido a que hay un forzamiento del aire húmedo para ascender en la ladera a barlovento^{4a}; sin embargo, conducen a sequía en la ladera a sotavento^{4b}.

Frentes meteorológicos: la interacción de masas de aire frío y cálido ocasionan precipitaciones, que pueden ser fuertes y rápidas con un frente frío, intensas y prolongadas con un frente cálido (Wallace & Hobbs, 2006).

Convección: el calentamiento de la superficie terrestre y oceánica provoca el ascenso del aire húmedo, el cual se enfría y condensa a determinada altura, formando las nubes convectivas.

Temperatura y humedad: la temperatura de la región climática determina el estado físico del agua (líquido o sólido); mientras la humedad se asocia mayormente a la cantidad de precipitación.

En México, las lluvias se relacionan con la temporada de ciclones tropicales que aportan gran cantidad de precipitación en el territorio nacional; adicionalmente, otros factores regulan la temporada de lluvias, como las oscilaciones de la fase ENOS, patrones estacionales de circulación como el desplazamiento de la Zona Intertropical de Convergencia⁵ (ZCIT) hacia latitudes medias, los flujos de humedad, ubicación de sistemas de alta presión e incluso efectos locales, como el contraste térmico, esto hace que cada año, la temporada de lluvias sea diferente (SMN, 2024).

4a) Barlovento es desde donde viene el viento con respecto a un punto de referencia, por ejemplo, una montaña. b) Sotavento, es el lado a resguardo del viento (lado opuesto del punto de referencia)

5 La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es una franja de nubes compuesta por lluvias y tormentas eléctricas ocasionales que rodea la Tierra cerca del ecuador

De acuerdo con el NCEI de la NOAA, en 2023 hubo variación en las regiones con más humedad y más secas, como se observa en el mapa de anomalías de precipitación a nivel mundial (Figura 2.8). Esto es consistente con los episodios de lluvia y de sequía extremos que se reportaron en todo el mundo. Las anomalías de 2023 indicaron que se registraron precipitaciones anuales significativamente inferiores a la media en partes de Estados Unidos (noroeste, suroeste, valle de Ohio, costas del golfo y este), en Argentina, Brasil, sur de Europa, norte de África y costas de Australia. Por el contrario, se registró precipitación superior a la media en el noreste de los Estados Unidos (desde California hasta llanuras centrales), en la mayoría de Europa y en algunas partes del este de Asia.

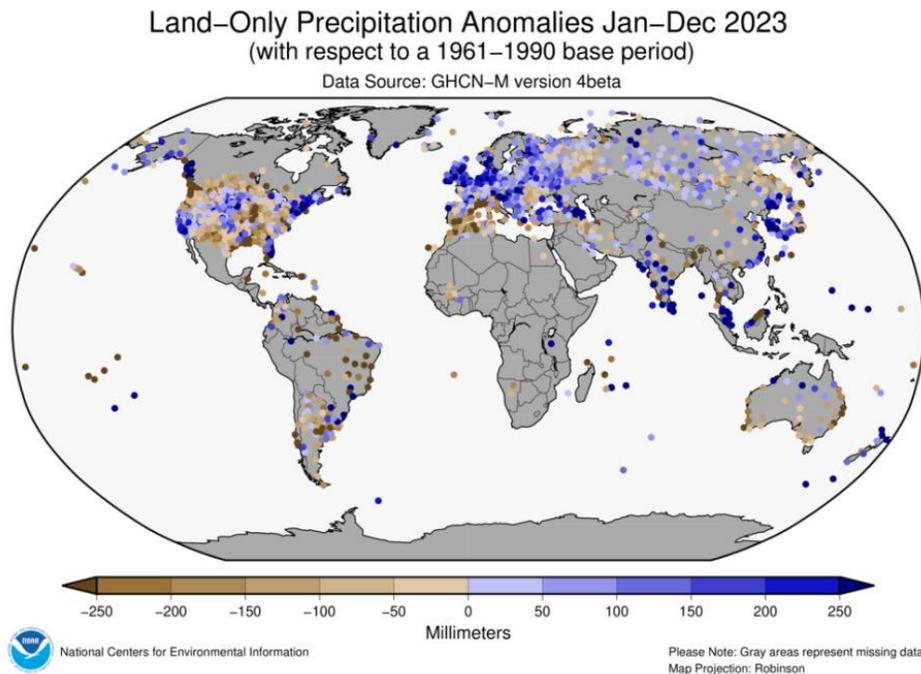


Figura 2.8. Anomalías de precipitación en tierra firme de enero a diciembre de 2023. **Fuente:** NOAA (2023) <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>

México también fue afectado por esta situación, en 2023 se registró una precipitación anual de 589.9 milímetros (mm) a nivel nacional; esto representó un déficit de 157.7 mm en comparación con la media climatológica de 747.6 mm que comprende el periodo 1991-2020; en consecuencia, el año 2023 fue clasificado como el año más seco de los registros históricos desde 1941.

Comportamiento de la precipitación en la Ciudad de México

En la CDMX, la precipitación suele presentarse en forma de lluvia, llovizna o granizo; aunque en las zonas más altas de las sierras que rodean la ciudad, también se puede registrar nieve. Existen dos períodos climatológicos definidos para el régimen de precipitaciones, uno húmedo de mayo a octubre y otro seco, de noviembre hasta abril (Jáuregui, 1971). Sin embargo, en 2023, hubo un retraso en el inicio de la temporada de lluvias en la mayoría del país, y específicamente, en la ZMCM, ya que la climatología indica que para esta zona inicia aproximadamente a mediados de mayo; pero inició después del 22 de junio (SMN, 2023). Esto coincidió con las fechas en que se presentó la 3ra onda de calor en el país y la persistencia del sistema anticiclónico descrito en la sección previa de Temperatura.

Los datos registrados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) durante 2023 confirman el déficit de precipitación reportado por el SMN. En el análisis de la distribución de la precipitación mensual (Figura 2.9), los valores máximos fueron julio y agosto, con apenas 36 y 33 mm, respectivamente. Estas cifras representaron acumulados promedios notablemente bajos en comparación con los mismos meses del 2022, que se alcanzaron 134 y 127 mm. El análisis a nivel de alcaldías también indicó un déficit significativo en toda la CDMX, el máximo fue en Coyoacán donde se registró el acumulado promedio más alto del año con escasos 201.3 mm; mientras, las alcaldías Iztacalco y Benito Juárez reportaron los mínimos con 9.6 y 64.6 mm, respectivamente (Figura 2.10).

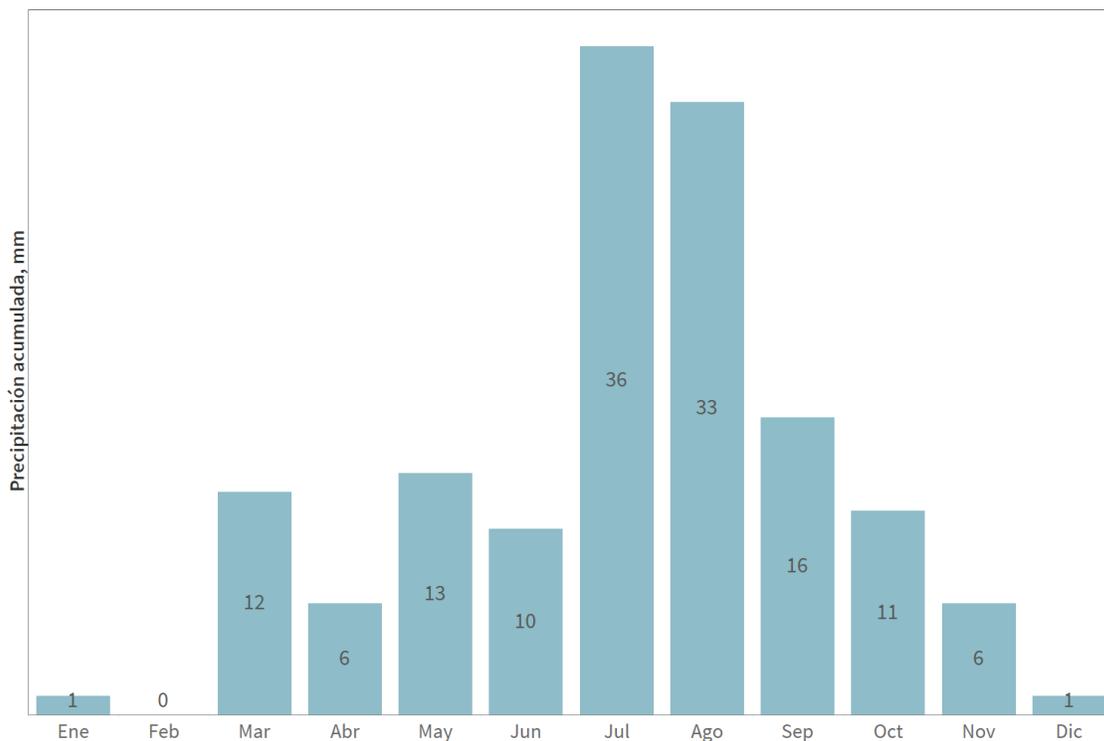


Figura 2.9. Distribución mensual de la precipitación en la CDMX durante 2023.

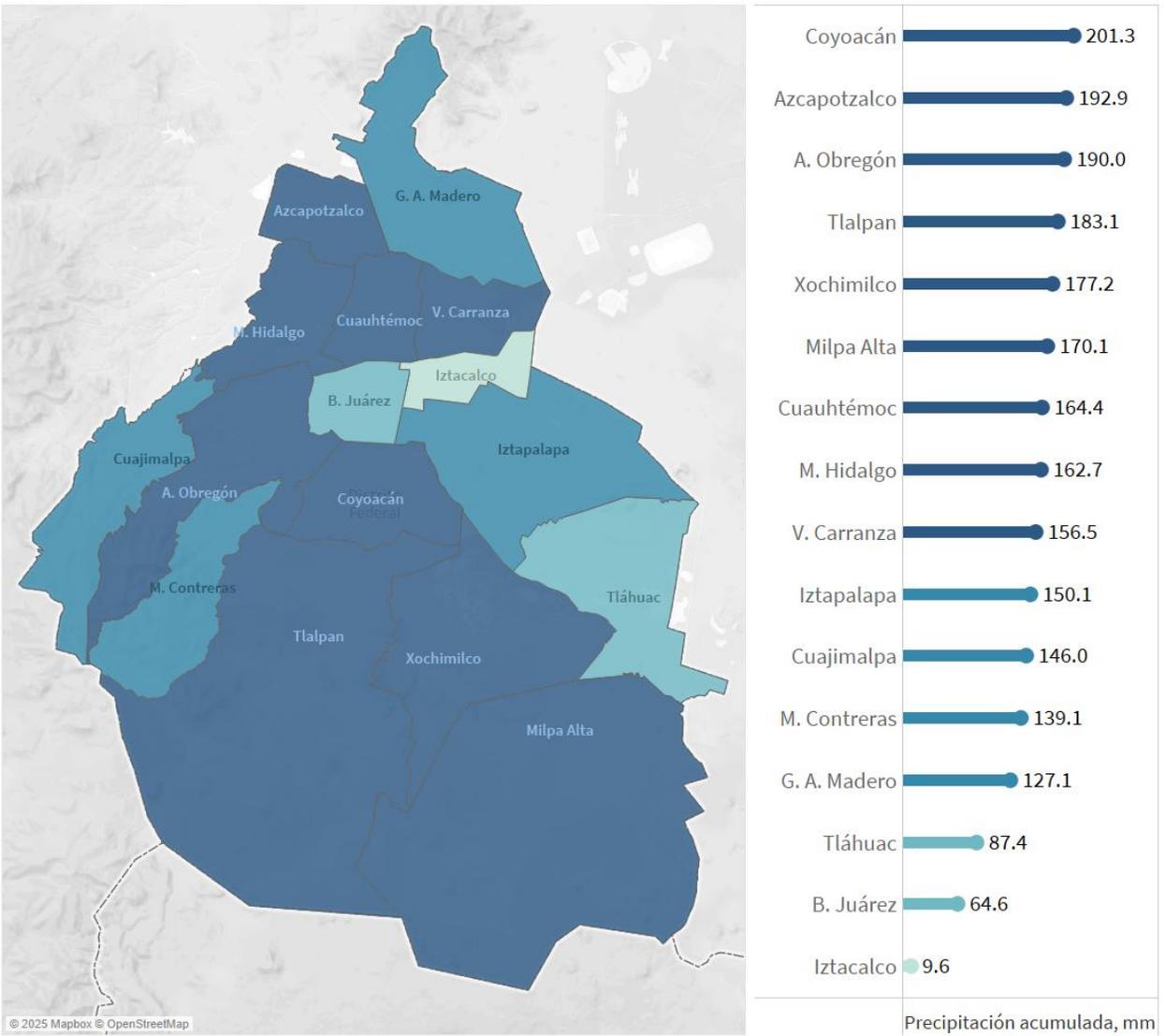


Figura 2.10. Distribución de la precipitación por alcaldía de la CDMX durante 2023.

Viento

El viento es el movimiento del aire en la atmósfera con respecto a la superficie terrestre, es generado por diferencias de presión entre distintas áreas geográficas. Las diferencias de presión se originan principalmente por el calentamiento desigual de la superficie terrestre debido a la radiación solar (AMS, 2024).

El viento es una variable vectorial, por lo que se expresa en función de su magnitud y sentido; en este caso la magnitud se asocia con la velocidad, intensidad o rapidez en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h); y el sentido en función de la dirección, que considera desde donde viene el viento y se expresa en grados (°). Para su medición se utilizan anemómetros y veletas.

El viento es un elemento muy importante ya que regula la distribución de calor, humedad, así como los contaminantes en la atmósfera; es esencial en la formación y evolución de sistemas meteorológicos como frentes, ciclones y tormentas de menor escala. Su comportamiento está influenciado por varios factores, entre los cuales se pueden mencionar:

1. **Gradiente de presión:** Si la diferencia de presión entre dos regiones es muy grande, más fuerte será el viento.
2. **Fuerza de Coriolis:** es el resultado de la rotación de la Tierra, esta fuerza desvía todos los fluidos (incluido el viento) hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur, modulando su dirección.
3. **Fricción superficial:** cuando el viento interactúa con la superficie terrestre es frenado y/o desviado por la interacción con el terreno, edificaciones, y vegetación, especialmente en la capa que se conoce como capa límite atmosférica⁶.
4. **Topografía:** Las montañas, valles y otras características del terreno modifican localmente la dirección y velocidad del viento. También se pueden generar fenómenos de viento, por ejemplo, la brisa de valle-montaña⁷.

⁶ La capa límite atmosférica o planetaria se define como la parte de la atmósfera que siente directamente el efecto de la superficie terrestre. Su altura puede variar desde pocos metros hasta varios kilómetros, esto depende de la meteorología local.

⁷ En las regiones montañosas, se forman vientos ascendentes y descendentes (brisa montaña-valle) generados por la radiación solar durante el día. En las laderas de las montañas expuestas a la luz solar, la masa de aire se calienta y asciende por las

Dispersión y acumulación de contaminantes

El comportamiento del viento influye en la concentración de contaminantes atmosféricos en una zona, por ejemplo, un viento fuerte puede dispersar partículas y gases lo que reduce su concentración; por el contrario, el viento débil favorece su acumulación y genera niveles altos de contaminación, en consecuencia, mala calidad del aire. El viento es un factor fundamental en el transporte de contaminantes y en ocasiones, puede trasladarlos por largas distancias, esto afecta regiones alejadas de la fuente de emisión. Por ejemplo, las partículas finas procedentes de los incendios forestales pueden viajar cientos de kilómetros, lo que repercute en la salud humana y la visibilidad.

En México, el mayor número de incendios normalmente se registra durante los meses de la primavera, y a veces, la circulación del viento permite que se transporte humo hacia la CDMX desde regiones tan distantes como Guerrero y Oaxaca; esto ocasiona reducción de visibilidad, olor a humo, e incremento en la concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, las cuales pueden incluir precursores de ozono en su composición.

También hay un efecto de los vientos locales sobre la dinámica de los contaminantes. En el caso de la CDMX, se presenta el sistema local de vientos de brisa valle-montaña debido a los cuerpos montañosos que la rodean. En este sistema de vientos, durante el día el viento sopla desde el valle hacia las laderas de las sierras, lo que traslada los contaminantes desde la ciudad hacia las zonas altas. Sin embargo, por la noche la dirección del viento se invierte, lo que puede provocar el retorno de contaminación hacia la ciudad. Esta circulación nocturna, combinada con la estabilidad atmosférica, favorece concentraciones residuales de contaminantes para el día siguiente.

Comportamiento del viento en la ZMCM

El promedio de la velocidad del viento para 2023, calculada con los datos de REDMET, fue de 2.1 m/s (**Figura 2.11a**), el cual fue igual al que se reportó en 2022. El promedio mensual (**Figura 2.11b**), registró el valor más alto en junio con 2.42 m/s; mientras que el mínimo ocurrió en diciembre con 1.70 m/s. En los datos horarios, la velocidad de viento máxima fue 13 m/s y se registró el 22 de mayo a las 16:00 h en la estación Xalostoc (XAL).

pendientes (viento valle); mientras que, en la noche, las laderas y el aire se enfrían, así se crea un flujo de viento que desciende por las laderas de las montañas.

El perfil horario de la velocidad de viento (**Figura 2.11c**) presentó un comportamiento típico como en otros años, con los mínimos de 06:00 a 08:00 h y los máximos de 17:00 a 19:00 h. Este patrón está influenciado por el ciclo de la radiación solar. La ausencia de radiación solar durante la madrugada reduce la convección y la mezcla del aire, esto genera velocidades de viento más bajas. En el transcurso del día, el calentamiento solar aumenta la inestabilidad atmosférica y la turbulencia, lo que favorece la mezcla de aire e incremento en la velocidad del viento. Por la tarde, la combinación de temperatura máxima y gradientes de presión, generados por el calentamiento de la superficie terrestre, intensifica los vientos; en especial, en el sistema de brisa valle-montaña, debido al contraste térmico entre las laderas de las sierras y el terreno urbano.

La distribución espacial del promedio anual de la velocidad del viento (**Figura 2.11d**) indicó que el máximo fue de 2.9 m/s en la estación Ajusco Medio (AJM) y el mínimo se estimó en el sitio INN con 1.5 m/s.

En el análisis de las anomalías de la velocidad del viento para el 2023 (**Figura 2.12**), fueron positivas en febrero, abril y desde junio a septiembre; mientras que fueron anomalías negativas durante enero, marzo y mayo, así como al final del año, de octubre a diciembre. Las anomalías más notables, positiva y negativa, se registraron en los meses de junio y octubre, respectivamente, con igual magnitud de 0.24 m/s.

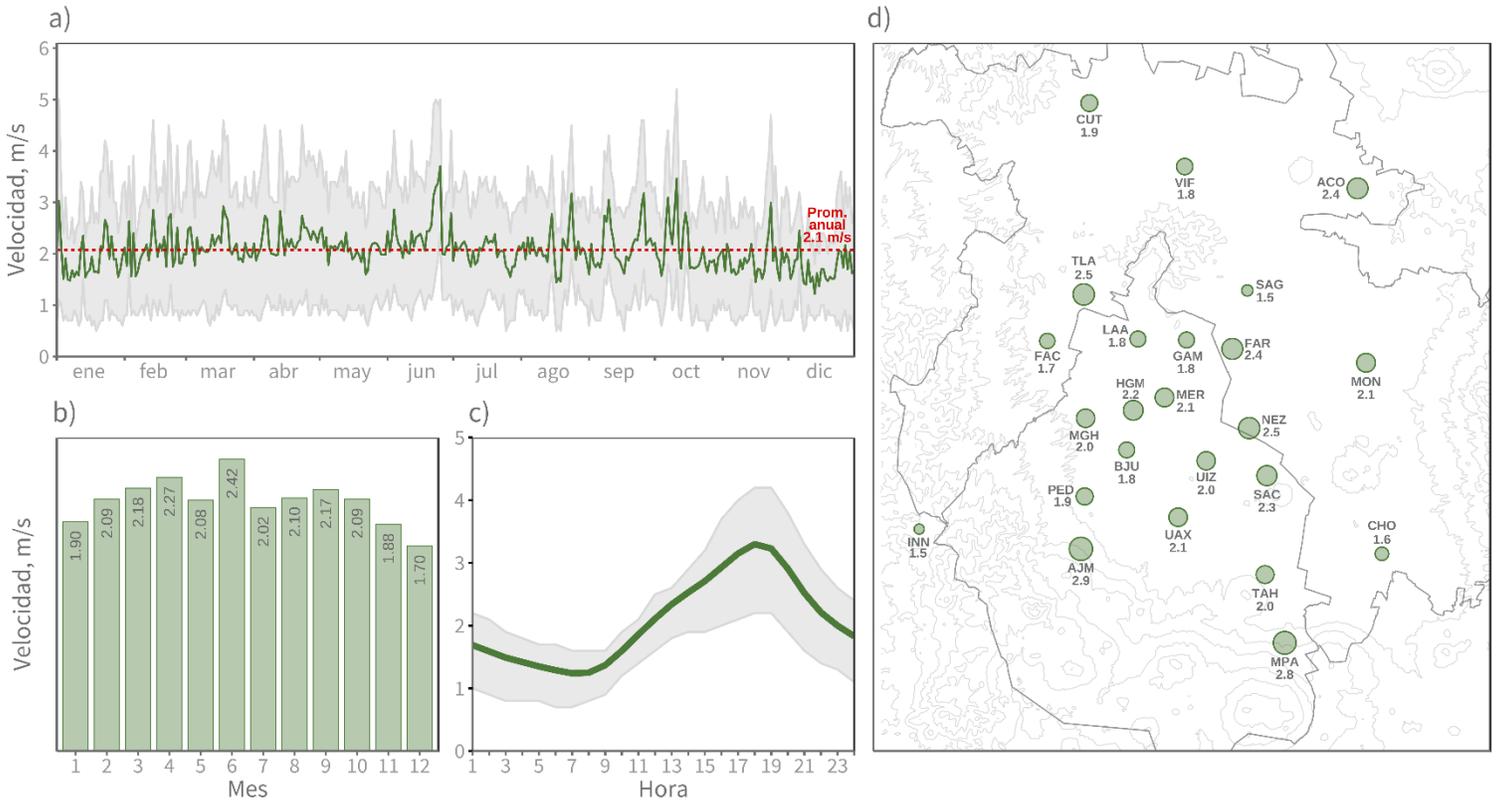


Figura 2.11. Comportamiento de la velocidad de viento (m/s) durante 2023. **a)** Serie de tiempo con el promedio diario (línea verde continua), desviación estándar (sombreado gris) y promedio anual (línea roja punteada). **b)** Promedio mensual. **c)** Perfil horario, la línea verde es el promedio por hora y el sombreado gris es la desviación estándar. **d)** Promedio anual por estación.

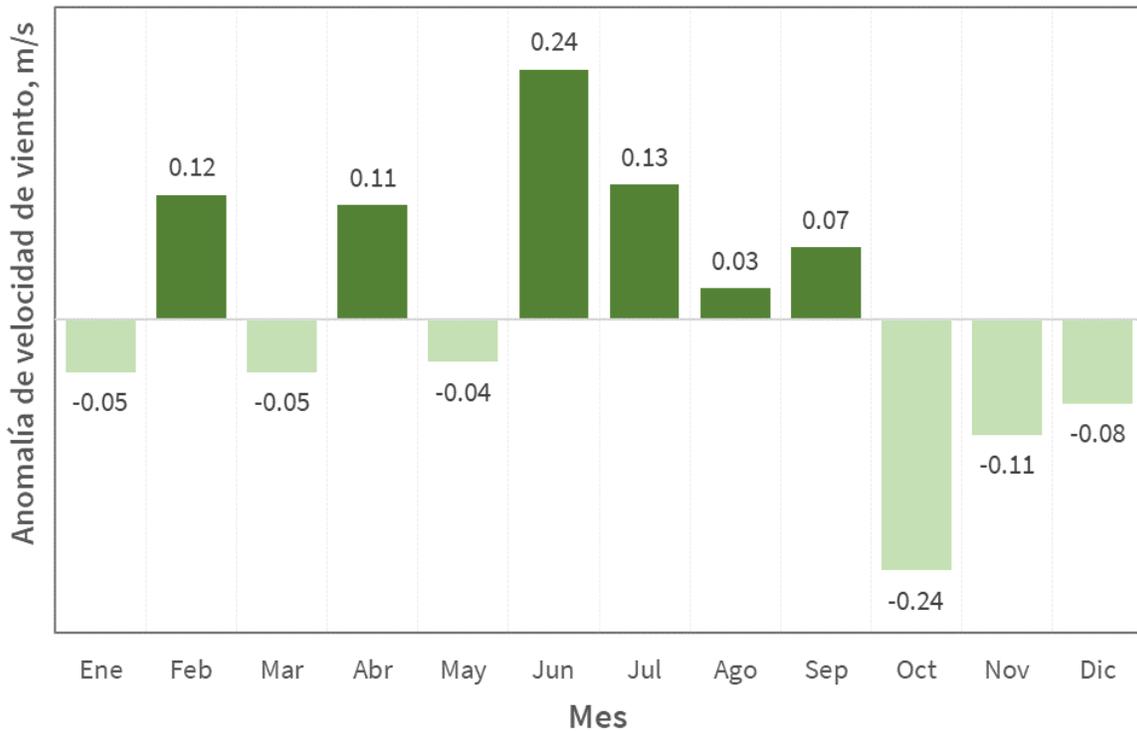


Figura 2.12. Anomalía de velocidad de viento mensual para el año 2023 con respecto al promedio de 12 años (2008-2019), calculada con las estaciones: TLA, FAC, VIF, MER, PED y SAG.

Análisis mensual del viento

El análisis del campo de viento promedio mensual se calculó vectorialmente y se dividió en tres periodos del día: **09:00 a 14:00 h**, **15:00 a 21:00 h** y de **22:00 a 08:00 h**. Esta división de los horarios se realizó de acuerdo con la tendencia de la velocidad del viento en el perfil diurno observado (ver **Figura 2.11c**).

El periodo de las 09:00 a 14:00 h (**Figura 2.13**) indica el inicio de la brisa que predomina, desde la cuenca hacia las montañas, lo que conlleva a un incremento progresivo de la rapidez del viento conforme se calientan las diferentes capas superficiales y se presenta la mezcla en la vertical. En el análisis de este primer horario, se observó poca variabilidad de la dirección del viento en el transcurso del año, el que predominó la componente norte, que es un patrón típico de la ZMCM, siempre y cuando no sea perturbado por el flujo sinóptico⁸.

El segundo horario, de 15:00 a 21:00 h (**Figura 2.14**), es el lapso del día con mayor intensidad del viento debido al calentamiento y a la convección vespertina, en ocasiones, la brisa local es reforzada por el flujo sinóptico, en este momento se presentan los máximos en la velocidad del viento de todo el año.

En el 2023 se registró un comportamiento similar para los primeros 5 meses del año, con un predominio de zonas de confluencia del viento sobre el centro-norte de la CDMX, mientras que en el sur de la cuenca hubo mayor influencia de la componente sur del viento, la cual registró una velocidad más alta en comparación con la componente norte, que se presentó en el resto del área. Esta situación se relacionó con la influencia de vaguadas⁹ en altura que acompañan a los frentes fríos durante la primera parte del año, en combinación con el desplazamiento de la corriente en chorro subtropical¹⁰ hacia latitudes más bajas.

El resto del año prevaleció una componente norte del viento, específicamente durante los meses de la temporada de lluvias (junio a septiembre), debido a la influencia de los Alisios¹¹ y la perturbación de estos por el movimiento de las ondas tropicales.

⁸ Patrón del viento observado a gran escala, es decir, escala sinóptica (desde cientos a miles de kilómetros). Se relaciona con los sistemas de alta o baja presión, frentes y la rotación de la Tierra (efecto Coriolis).

⁹ La **vaguada** es una región de baja presión, asociada con inestabilidad atmosférica, puede ocurrir en superficie o en atmósfera alta.

¹⁰ Las corrientes en **chorro** son bandas estrechas de viento fuerte en la atmósfera superior, a 9000 m de elevación (NOAA, 2024).

¹¹ Los vientos **alisios** son corrientes de aire más cercanas a la superficie terrestre que soplan de este a oeste cerca del ecuador.

Mientras que, de octubre a diciembre se observó un predominio de viento del norte, relacionado con la presencia de anticiclones fríos en las capas bajas de la tropósfera, en el norte del país y en el sur de los Estados Unidos. Sin embargo, noviembre también estuvo influenciado por anticiclones cálidos con menor temporalidad, pero que impactaron significativamente sobre las temperaturas del país y de la CDMX. En noviembre de 2023, la temperatura media nacional fue de 19.9 °C, cifra que se ubicó 0.7 °C por arriba del promedio climatológico de 1991-2020 y fue el sexto noviembre más cálido del registro histórico. Para la CDMX, fue su tercer noviembre más cálido desde 1953 (SMN, 2023).

El horario de la noche y madrugada, 22:00 a 08:00 h (**Figura 2.15**) es el período del día con el viento más débil y se registran los mínimos al amanecer, lo que coincide con la mayor estabilidad del día, previo a qué salga el sol y empiece el calentamiento de las capas cercanas a superficie. El campo de viento para este lapso de tiempo tuvo un comportamiento similar desde enero hasta junio, con predominio de las corrientes desde las montañas hacia el interior de la cuenca, lo que ocasionó zonas de confluencia sobre el centro de la CDMX y contribuyó a que las concentraciones de algunos contaminantes, como el ozono, prevalecieran altas durante la primavera y hasta junio.

En la época más lluviosa, de julio a septiembre, la dirección del viento experimentó un cambio, con menos zonas de confluencia y predominio de la componente norte-noroeste. Esto es ocasionado por el régimen de lluvias que genera pérdida de calor y descenso de las temperaturas, por lo que se invierten los flujos a nivel de cuenca; en este caso, la región con mayor cambio fue el suroeste, en las alcaldías con mayor precipitación anual, combinado con la influencia de la orografía de la zona que tiene cercanía a las sierras Ajusco y las Cruces.

**Campo de Viento Promedio Mensual
Horario 09:00 a 14:00**

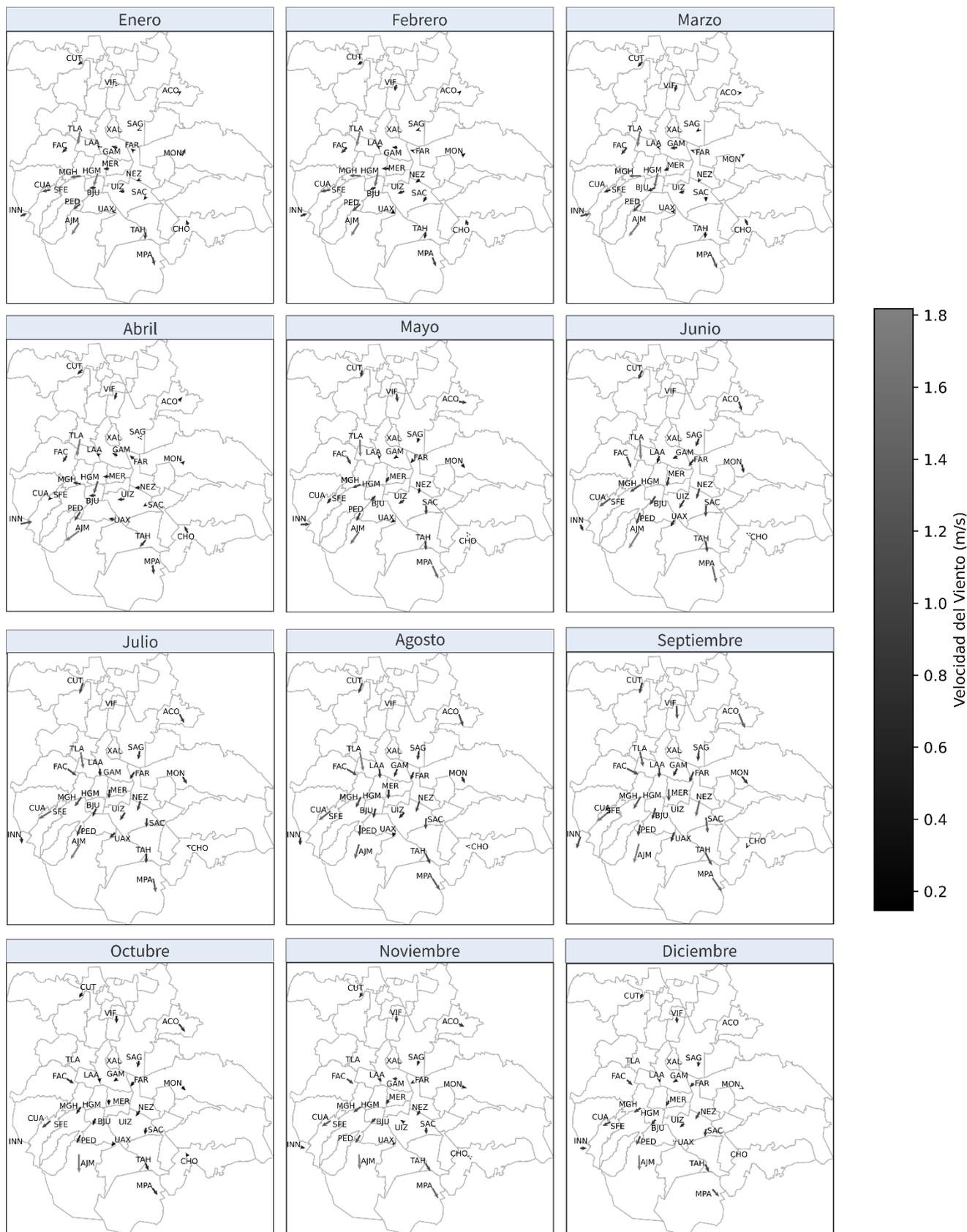


Figura 2.13. Campo de viento promedio mensual para las estaciones de la ZCMM de las 09:00-14:00 h. Las flechas indican la dirección desde donde fluye el viento; el tamaño y color de la flecha indican la velocidad del viento.

**Campo de Viento Promedio Mensual
Horario 15:00 a 21:00**

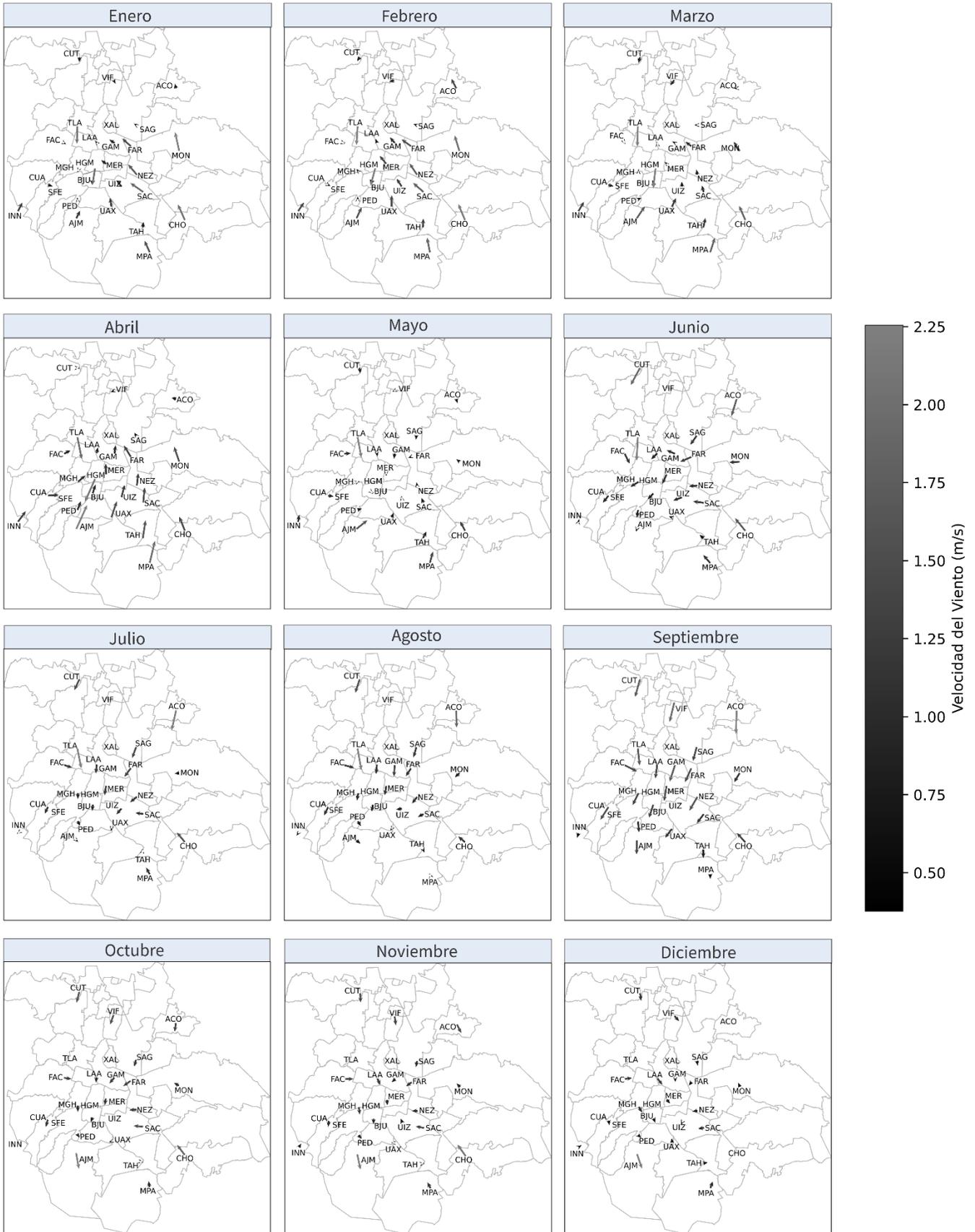
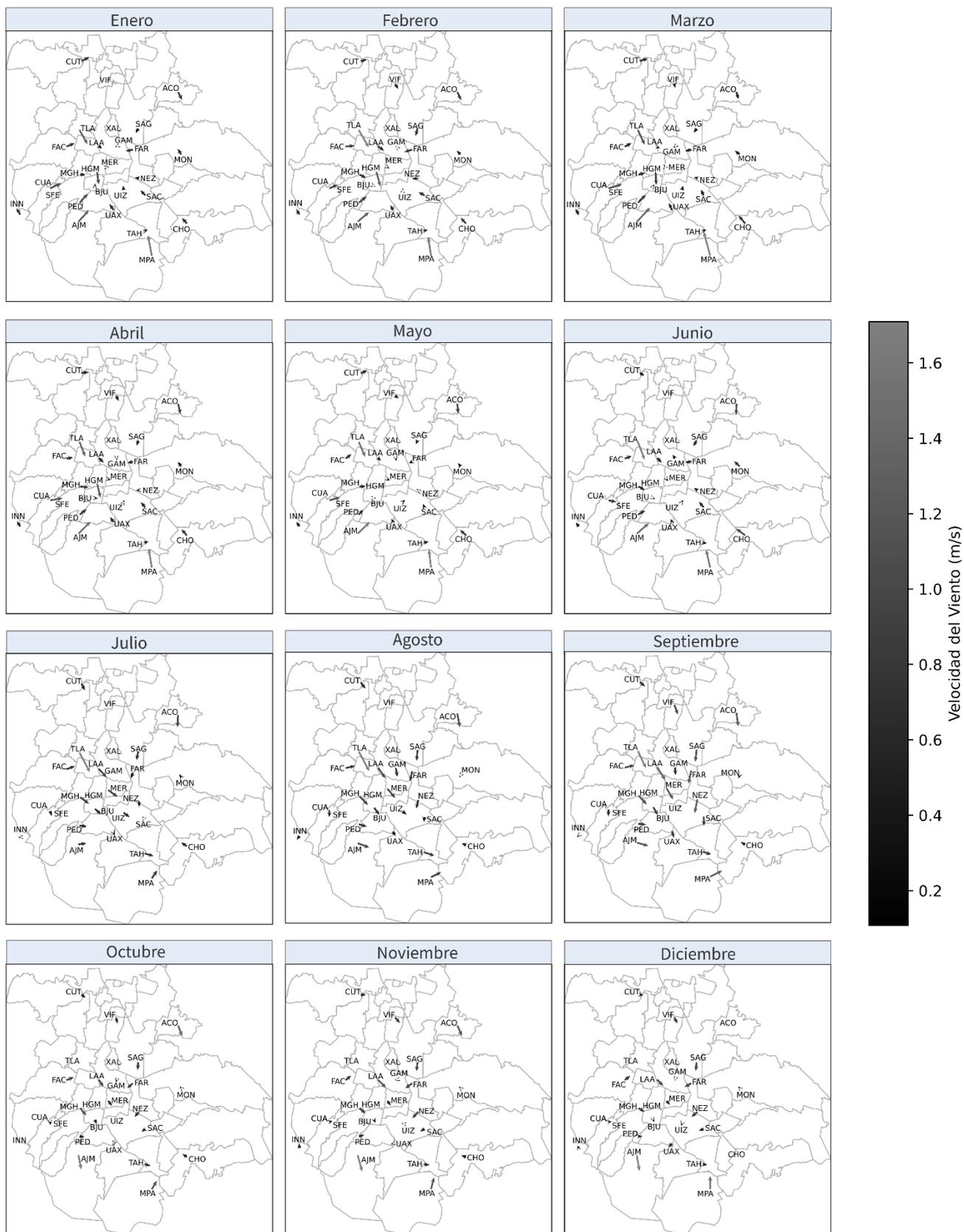


Figura 2.14. Campo de viento promedio mensual para las estaciones de la ZMCM de las 15:00-21:00 h. Las flechas indican la dirección desde donde fluye el viento; el tamaño y color de la flecha indican la velocidad del viento.

**Campo de Viento Promedio Mensual
Horario 22:00 a 08:00**



61 **Figura 2.15.** Campo de viento promedio mensual para las estaciones de la ZMCM de las 22:00-08:00 h. Las flechas indican la dirección desde donde fluye el viento; el tamaño y color de la flecha indican la velocidad del viento.

Presión

La presión atmosférica es la fuerza que ejerce el aire sobre la superficie terrestre debido al peso de la columna de aire que se encuentra sobre un determinado punto. Se mide en hectopascales (hPa) o milibares (mb) y su valor promedio al nivel del mar es de 1013.25 hPa. La presión cambia con la altitud, temperatura y los sistemas meteorológicos que influyen en una región (Wallace & Hobbs, 2006).

La presión atmosférica es de gran importancia en la dispersión y concentración de contaminantes en la atmósfera, lo cual depende de la presencia de **sistemas de alta** o **baja presión**. Los anticiclones (**alta presión**) se caracterizan por movimientos descendentes de aire, que impiden la formación de nubosidad; esto favorece las inversiones térmicas, especialmente en la madrugada, lo que conlleva a la acumulación de contaminantes en la superficie, por ejemplo, de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, óxidos de nitrógeno (NO_x), así como ozono (O₃). En consecuencia, la calidad del aire se deteriora en las zonas urbanas, además se percibe un ambiente brumoso y con reducción de visibilidad. Los sistemas de **baja presión** se caracterizan por condiciones inestables, movimientos ascendentes del aire (convección) y alta humedad que favorece nubosidad, lluvias y tormentas. Este movimiento de aire en la vertical permite la dispersión de contaminantes y renovación del aire (Holton, 2004).

Comportamiento de la presión atmosférica en la ZMCM

La ZMCM se localiza en una latitud tropical, por lo que presenta con gradientes más débiles de la presión, en comparación con las latitudes medias. En consecuencia, los patrones de circulación son más irregulares y dependientes de procesos locales (p.ej. convección), lo que contribuye con incertidumbre en los modelos de predicción meteorológica.

Los datos de REDMET en el 2023 indicaron que el promedio anual de la presión fue 584.8 mmHg (**Figura 2.16a**). Este promedio usa datos de los sitios ubicados en la parte baja de la cuenca, esto debido a que la altura de los sitios puede influir en la medición de la presión. El comportamiento mensual (**Figura 2.16b**) tuvo ligeras variaciones, los máximos fueron en julio y diciembre, ambos con 585.6 mmHg; mientras que el mínimo se estimó en abril con 583.7 mmHg. El perfil horario presentó variaciones durante el día, lo que responde a un comportamiento típico en los trópicos. Los valores más altos fueron de las 09:00 a 12:00 h y los mínimos de 15:00 a 18:00 h (**Figura 2.16c**).

Las anomalías de la presión para el 2023 (Figura 2.17) con respecto al promedio de 8 años (2012-2019), fueron positivas de enero a febrero y en el segundo semestre del año, con la máxima en septiembre con 1.2 mmHg. Las anomalías negativas se presentaron de marzo a junio, con el valor más notable durante marzo con -1.5 mmHg.

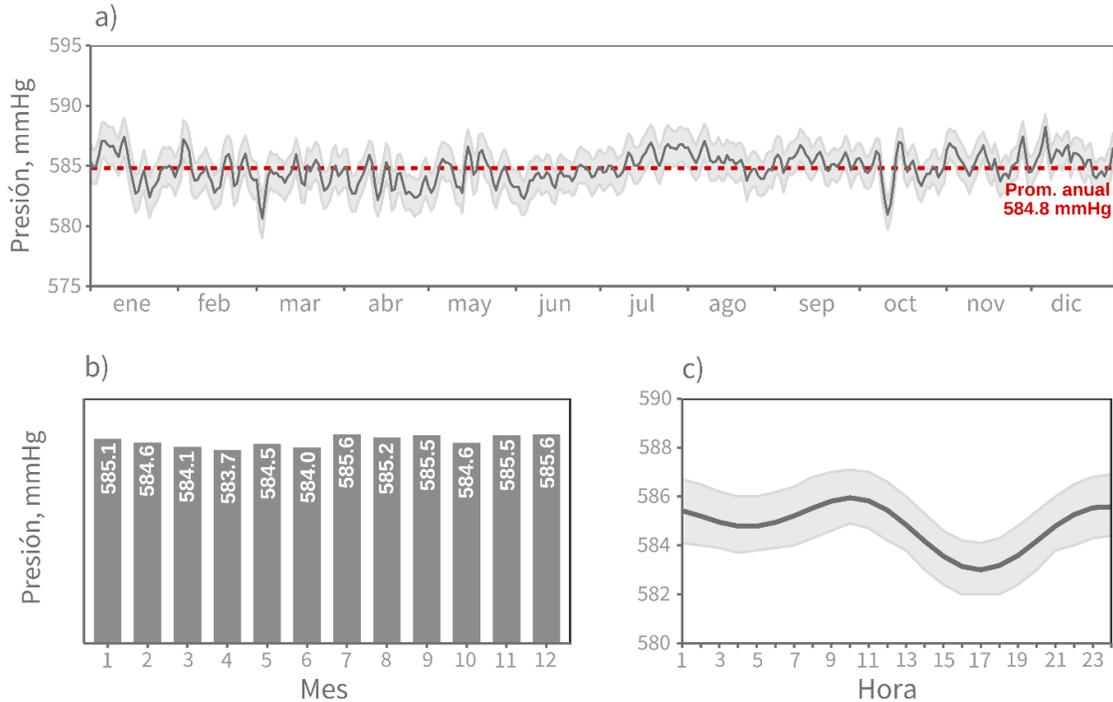


Figura 2.16. Comportamiento de la Presión (mmHg) durante 2023. a) Serie de tiempo con el promedio diario (línea gris continua), desviación estándar (sombreado gris) y promedio anual (línea roja punteada). b) Promedio mensual. c) Perfil horario, la línea gris es el promedio por hora y el sombreado gris es la desviación estándar.

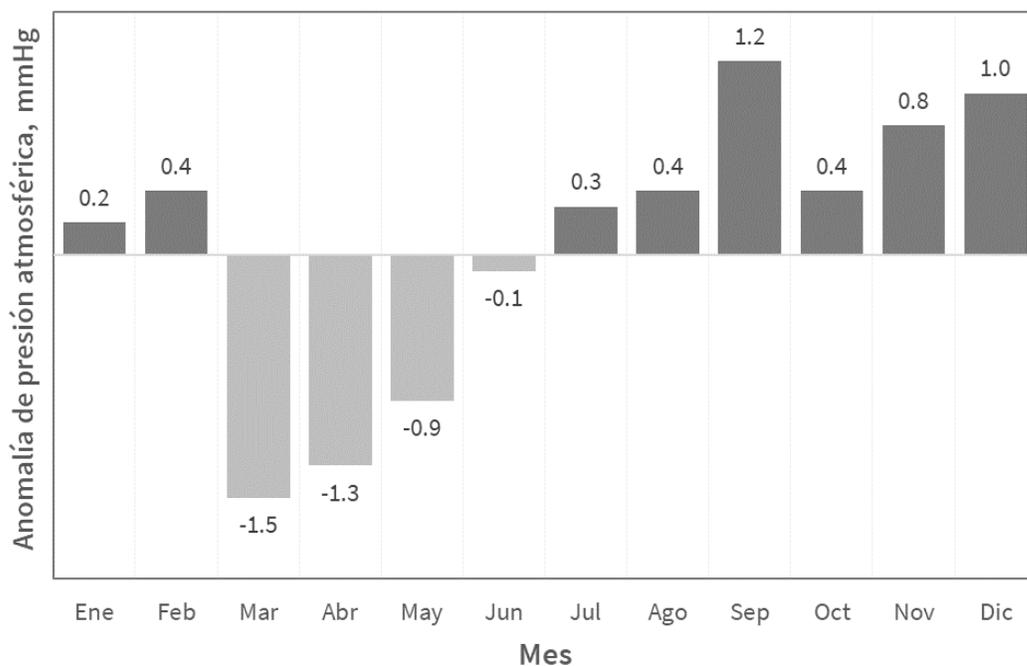


Figura 2.17. Anomalía de presión atmosférica mensual para el 2023 con respecto al promedio de 8 años (2012-2019), calculada con las estaciones: TLA y MER.

Radiación Solar Ultravioleta (UV)

La **radiación solar** es la energía electromagnética emitida por el Sol, la cual llega a la Tierra en diversos rangos del espectro electromagnético¹². Esta radiación es fundamental para desencadenar procesos atmosféricos, físicos y biológicos en la Tierra, que determinan el desarrollo de la vida, el equilibrio de los ecosistemas, del clima y la biodiversidad.

La cantidad e intensidad de la radiación solar que recibe un lugar depende de diversos factores, como latitud, altitud, época del año, hora del día y nubosidad. De acuerdo con los datos del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés), México es uno de los países que recibe una alta irradiancia solar (**Figura 2.18**), debido a la ubicación y factores meteorológicos.

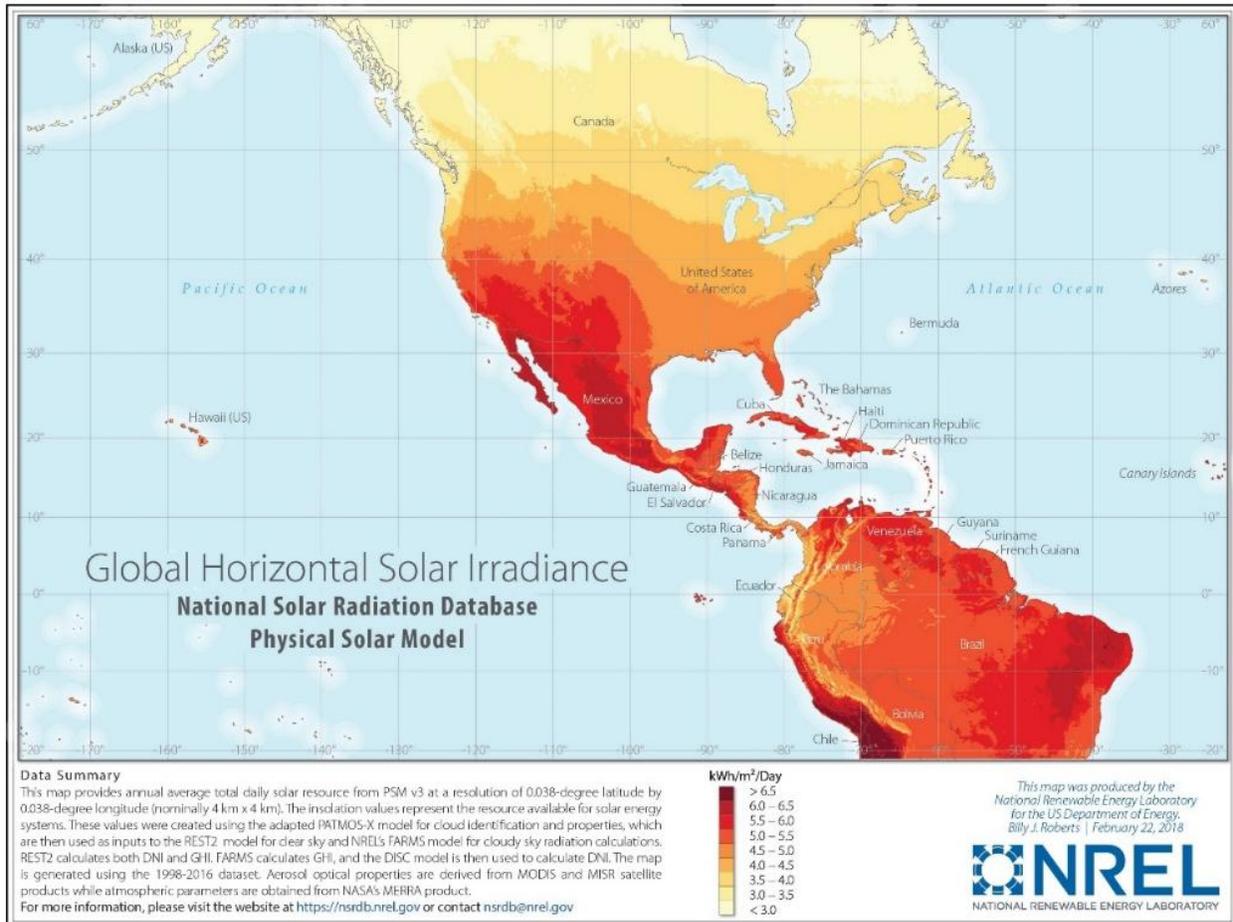


Figura 2.18. Promedio anual de la Irradiancia Solar Horizontal Global (GHI) en Norteamérica y parte de Sudamérica. Fuente: <https://www.nrel.gov/gis/solar-resource-maps>

¹² El **espectro electromagnético** es el conjunto de todos los tipos de radiación que se desplazan en ondas y tienen campos eléctricos, así como magnéticos. Incluye la radiación de baja energía y frecuencia, que se desplaza en ondas largas (p.ej. radio y microondas), hasta la radiación de alta energía y frecuencia, que se mueve en ondas cortas (p. ej. rayos X y gamma).

Es importante mencionar que el 70 % de la radiación solar entrante, se absorbe por la atmósfera (19 %), nubes (4 %) y la superficie terrestre (47 %). El restante 30 % de la radiación entrante, regresa al espacio, reflejado por la nubosidad y la superficie, con el 23 % y 7 %, respectivamente (NOAA, 2023; **Figura 2.19**).

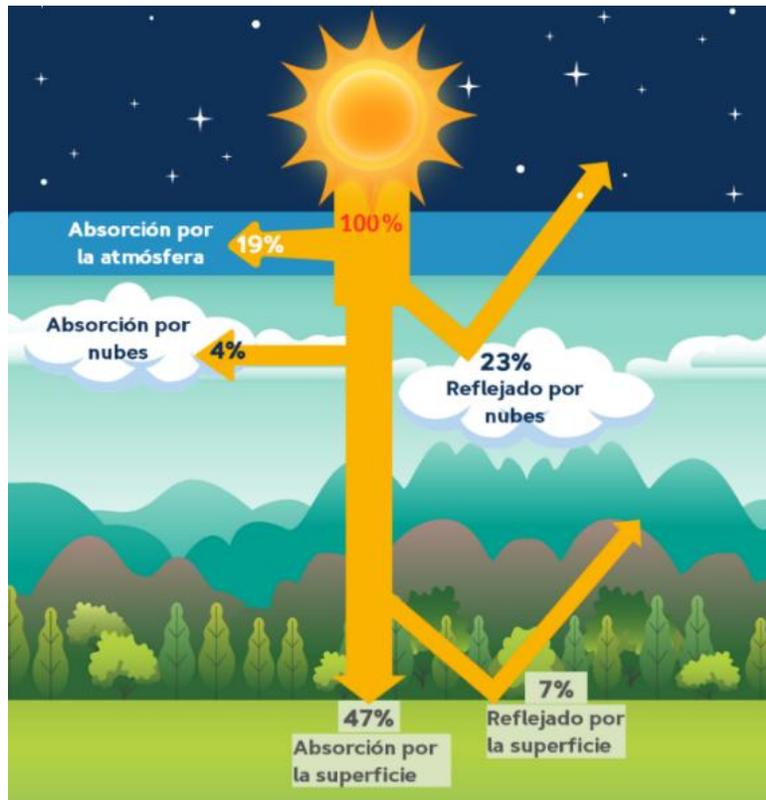


Figura 2.19. Balance energético de la radiación solar entrante.

Adaptado de: <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/energy>

El 47 % de la energía solar que sí llega a la superficie está compuesta, en su mayoría, de tres tipos de radiación: **ultravioleta** (UV) que tiene una longitud de onda¹³ (λ) de 100 a 380 nanómetros (nm; $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9}$ metros); luz **visible** ($\lambda = 380$ a 780 nm) caracterizada por los colores que podemos observar; e **infrarrojo** ($\lambda = 780$ nm a $1,000,000$ nm) que se percibe como calor. Estos tipos de radiación solar tienen un aporte del 52 al 55 % del infrarrojo; 42 al 43 % de luz visible y del 3 al 5 % de radiación UV (Wang & Yu, 2023).

La radiación UV se divide en tres tipos de acuerdo con su longitud de onda y tienen diferentes efectos en el ambiente, así como en la salud humana.

¹³ La **longitud de onda** es la distancia desde la "cresta" (parte superior) de una onda hasta la cresta de la siguiente onda y representada por la letra griega lambda, λ .

- **UVA (320 a 400 nm)**: Representan el **98 % de la radiación UV total** y la mayoría llega a la superficie terrestre. **Efectos en la salud**: causa daños oculares, así como enrojecimiento y envejecimiento de la piel. Contribuyen al riesgo de cáncer de piel.
- **UVB (290-320 nm)**: Son el **2 % de la radiación UV total** que alcanza la superficie y tiene alta energía. La estratósfera absorbe la mayoría de los UVB, pero su alcance final depende de factores geográficos y meteorológicos. Los UVB se asocian con la mayoría de los procesos fotoquímicos en la atmósfera (Valdés-Barrón et al., 2013) debido a que su energía es suficiente para romper moléculas, p.ej. O₃, CO₂, NO₂, formaldehído (CH₂O). **Efectos en la salud**: provocan daño en la piel como quemaduras, pigmentación, envejecimiento y cáncer; efectos en la visión como cataratas y “ceguera de las nieves” (pérdida temporal de la visión); además, disminuyen la capacidad del sistema inmune.
- **UVC (100-290 nm)**: Los rayos UVC no llegan a la superficie de la Tierra porque la atmósfera los absorbe completamente.

Relación entre la radiación UV y la generación de ozono troposférico

La radiación UV tiene diversos efectos en el medio ambiente, uno de los más importantes, es su interacción con las moléculas presentes en la atmósfera, lo que lo convierte en un importante regulador de la química atmosférica. El O₃ y la radiación UV interactúan en dos niveles de la atmósfera: estratósfera y tropósfera. El **O₃ estratosférico** es considerado “bueno” debido a que la capa de ozono filtra todos los rayos UVC, una parte importante (95-98 %) de los UVB y sólo una porción pequeña (2-5%) de los UVA, por lo que los rayos UVB es la radiación más peligrosa que llega a la superficie terrestre (Jasaitis et al., 2016).

En la tropósfera, la capa más cercana a la superficie, el **O₃ troposférico** es un contaminante con efectos negativos en la salud humana y vegetación. Este O₃ se forma con las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV), en la presencia de la radiación UV. La radiación UV, específicamente la UVB, actúa como un acelerador en la química troposférica, debido a que interactúa con los NO_x y COV para separar sus moléculas y así, reaccionen para generar O₃; sin embargo, la radiación UVB tiene una participación dual, formación-destrucción de ozono (Hodzic & Madronich, 2018), ya que también logra separar sus moléculas.

Las concentraciones futuras de O₃ troposférico dependerán de los cambios en las emisiones de COV y NO_x, así como de las variaciones meteorológicas causadas por el cambio climático; además, hay estudios que sugieren que la cantidad de radiación UVB también será un factor, esto debido a la recuperación del O₃ estratosférico que filtra y reduce la intensidad de UVB que llega a la tropósfera, esto puede alterar la cantidad de gases reactivos en esta última capa, entre ellos, el O₃, NO_x y COV. La influencia de estos cambios en la radiación UV podría ser relevante para la calidad del aire a escala regional, ya que se estima que modifique las concentraciones a corto y largo plazo de algunos contaminantes.

La fotólisis¹⁴ del O₃ produce radicales OH, que generan más O₃ en presencia de NO_x. Sin embargo, la disminución de la radiación UV que llega a la superficie, reduce tanto la producción como la destrucción del O₃ troposférico, la magnitud de estos efectos dependerá de la concentración de NO_x, así como de factores meteorológicos, químicos y físicos. En el estudio de Hodzic & Madronich (2018) se realizaron simulaciones con un modelo fotoquímico (WRF-Chem) en Estados Unidos, en el que se analizó el impacto de la disminución de UV en la tropósfera asociada con la recuperación de O₃ estratosférico. Los resultados principales del análisis fue un incremento regional de ozono troposférico (0.5 a 1 ppb) esto debido a una menor tasa de destrucción, esto se observó más en las zonas rurales; sin embargo, en ciudades como Los Ángeles y Chicago, se estimó una disminución de hasta 1 ppb ocasionado por una menor la tasa de producción de O₃ en ambientes ricos de NO_x. Estos resultados se suman a los factores que influyen en la compleja química de formación de O₃ en la tropósfera.

Comportamiento de la radiación UV en la ZMCM

Los datos del 2023 indicaron que los promedios anuales de UVA y UVB fueron 1.738 y 0.076 W/m², respectivamente; con los máximos desde marzo a julio (**Figura 2.20a**), este comportamiento es consistente con los años pasados; sin embargo, el 2023 presentó una ligera reducción en ambos tipos de radiación (-2.2% en UVA y -1.3% en UVB); en comparación con 2022. La intensidad de la radiación es variable por época del año ya que depende de la declinación solar. En la ZMCM, los máximos de la radiación UVB y declinación solar fueron durante el verano, mientras que los mínimos ocurrieron en el invierno (**Figura 2.20b**). El perfil horario de la radiación UV depende del ángulo de elevación solar; la UV incrementa con el ascenso del sol y cuando éste alcanza su punto más alto en el cielo, la radiación UV también

¹⁴ La fotólisis es la descomposición de una sustancia por acción de la luz y radiación electromagnética.

presenta su máximo del día, por esta razón, la REDMET registró los valores más altos entre las 12:00 y 15:00 h (Figura 2.20c).

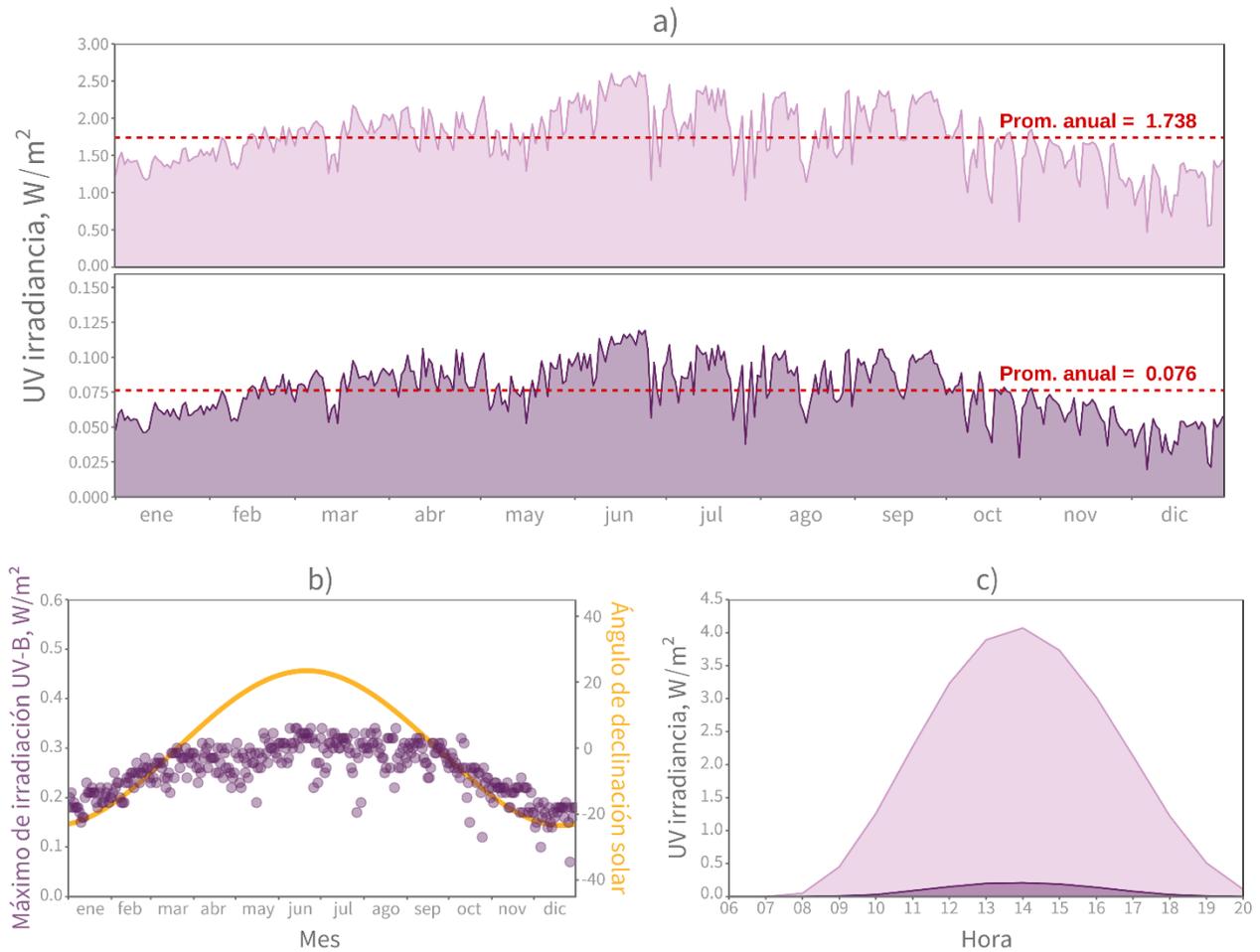


Figura 2.20. Comportamiento de la radiación UV durante 2023. **a)** Promedio diario de la irradiancia de UVA (superior) y UVB (inferior), entre las 06:00 y 20:00 h, la línea punteada roja es su promedio anual. **b)** Comparación de la intensidad máxima diaria de la radiación UVB (puntos morados) y el ángulo de declinación solar (línea amarilla). **c)** Perfil horario de la radiación solar UVA (morado claro) y UVB (morado oscuro).

Índice de Radiación Ultravioleta (IUV)

El alcance de los rayos UV dentro de la piel depende de su longitud de onda. Los UVA llegan al interior de la dermis (capa intermedia de la piel), donde generan compuestos reactivos de oxígeno que pueden dañar el ácido desoxirribonucleico (ADN) de forma indirecta; por el contrario, los UVB se absorben inmediatamente en la epidermis (capa superior de la piel) y tienen corto alcance en la dermis, pero esta radiación sí tiene un efecto directo en el ADN, lo

que provoca reordenamientos moleculares y modificaciones del ADN, que pueden ocasionar mutaciones y cáncer (D’Orazio et al., 2013).

El avance en los estudios sobre los efectos dañinos de la radiación UV, conllevó a la implementación del **índice UV (IUV)** durante 1992 en Canadá y en 2003 fue estandarizado internacionalmente por la OMS. El IUV tiene una escala adimensional del 1 a 11+; en la que un valor alto equivale a un mayor riesgo de lesiones cutáneas y oculares, además que tardarían menos tiempo en presentarse. El IUV es una herramienta para el cuidado de la salud, con el objetivo de informar a la población sobre los niveles de radiación UV, así como el peligro de la exposición prolongada y las acciones para protegerse.

En la ZMCM, el índice IUV se calcula con los datos de radiación UVB y se reporta cada 10 minutos para proporcionar información en tiempo casi real, mientras que para este análisis anual del IUV, se calcularon promedios horarios y con estos, se obtuvo el valor diario máximo del índice. La escala numérica, los colores y las recomendaciones utilizadas para comunicar la información sobre el IUV, provienen de la guía de la OMS publicada en 2003 (**Figura 2.21**).

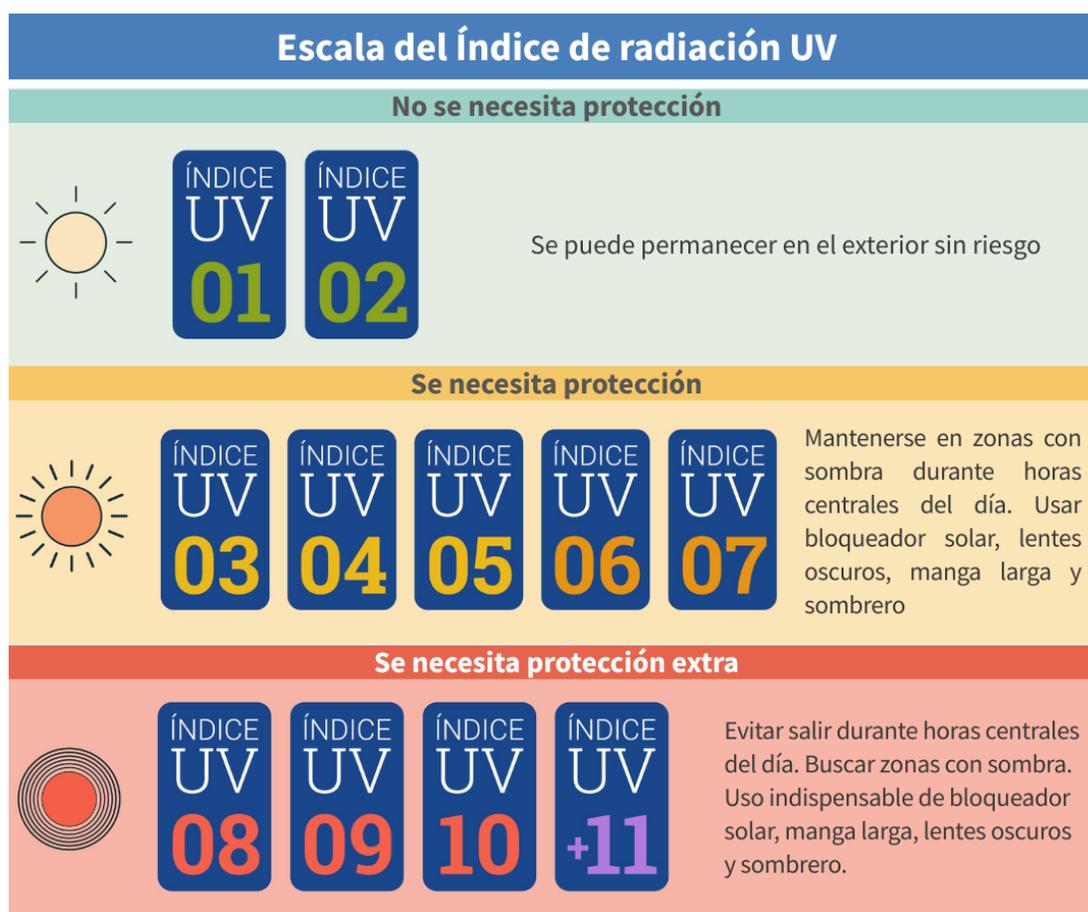


Figura 2.21. Sistema de protección solar recomendado por la OMS. Adaptación del Índice UV solar mundial (OMS, 2003).

Comportamiento del IUV en la ZMCM

En el análisis del IUV se utilizó su valor máximo por cada día del 2023; los resultados indicaron que en este año no hubo días con IUV en la categoría Baja (1 al 2) mientras que en Moderada (IUV: 3 al 5) sólo se presentaron 4 días (1% del año). En las categorías Alta (6 al 7) y Muy Alta (8 al 10) se registraron 49 (13%) y 134 días (37%), respectivamente. La mayor proporción de días registró un IUV Extremadamente Alto (11+) con un total de 178 días, equivalente al 49 % del 2023 (**Figura 2.22**)

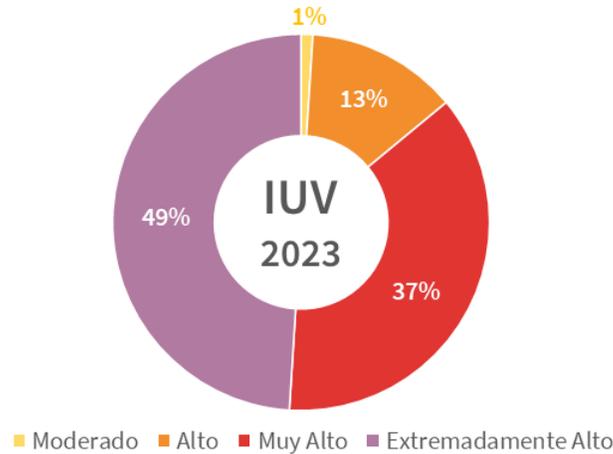


Figura 2.22. Distribución de categorías del IUV durante 2023

En la **Figura 2.23** se presenta el comportamiento diario del IUV máximo durante 2023, en la que se puede observar que el IUV comienza a incrementar desde febrero y que los valores más altos del índice ocurrieron de marzo a octubre, en este periodo se calculó un **IUV promedio** entre 10 (octubre) y 12 (junio a septiembre). En febrero se obtuvo un promedio mensual de 9, seguido de noviembre y enero, ambos meses con IUV promedio de 8; mientras que el promedio mínimo fue en diciembre con un valor de 6.

En el conteo del IUV por día y mes (**Figura 2.24**) se observó que los 4 días con IUV Moderado ocurrieron en octubre y diciembre; para la categoría Alta, la mayoría se presentaron en diciembre (26 días) y enero (10 días), el resto se ocurrieron en noviembre con 8, así como en febrero y julio, ambos con 2 días; por último, octubre con 1 día. El IUV Muy Alto se presentó en todo el año, con mayor frecuencia de días durante febrero y noviembre, con 23 y 22, respectivamente. El IUV Extremadamente Alto, se registró desde febrero (3 días) hasta octubre (8 días); sin embargo, el conteo máximo fue en junio y septiembre, ya que en la mayoría de sus días se alcanzaron valores de IUV en esta categoría.

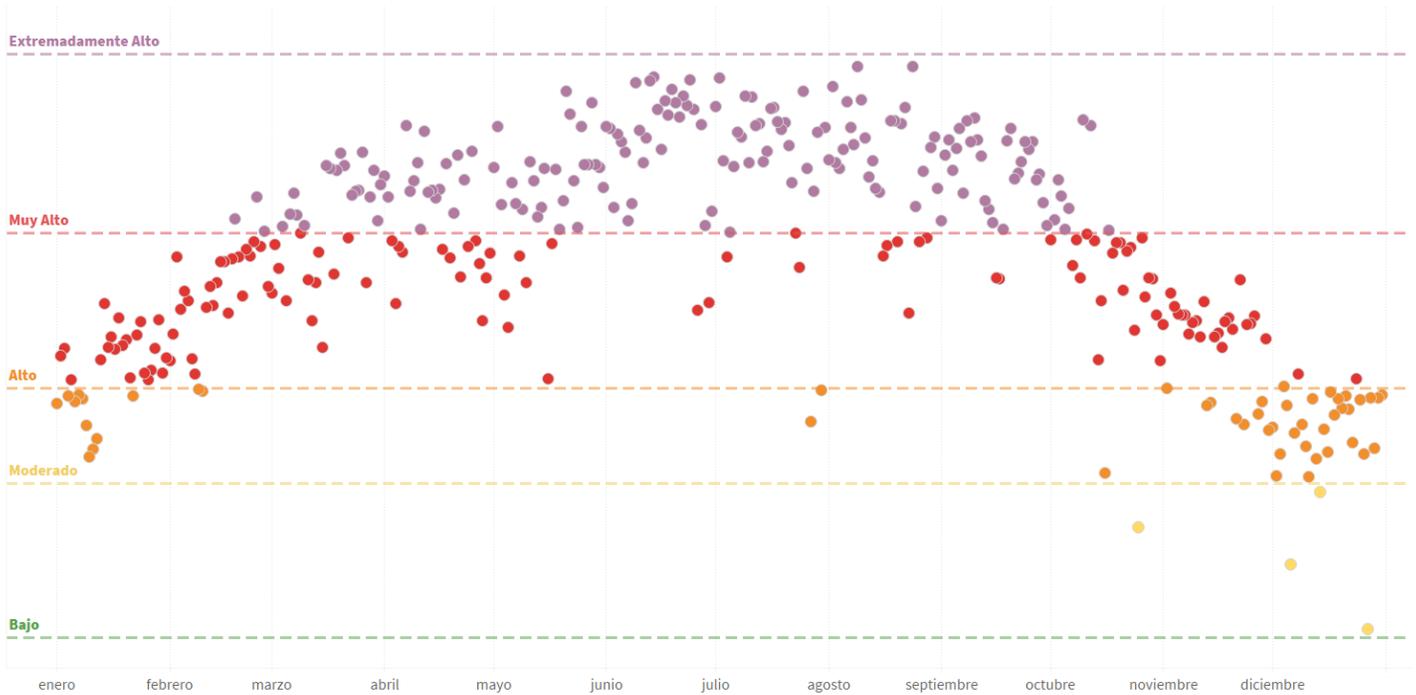
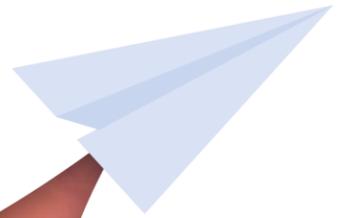


Figura 2.23. Comportamiento del Índice de Radiación Solar (IUV) máximo durante 2023.

Conteo de días												
Índice UV	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Ext. Alto		3	18	17	25	28	26	25	28	8		
Muy Alto	21	23	13	13	6	2	3	6	2	21	22	2
Alto	10	2					2			1	8	26
Moderado										1		3
Distribución general												

Figura 2.24. Conteo de días por mes en cada categoría del Índice UV durante 2023.

Calidad del aire



Calidad del Aire

Nano y Micro plásticos (NMP) en el aire

A medida que aumenta el conocimiento mundial sobre la crisis de los plásticos, surgen nuevos aspectos del problema que revelan impactos en la salud humana y el ambiente. Los recientes avances científicos han permitido explorar cómo los **nano y micro plásticos (NMP)** forman una parte crítica del problema de la contaminación. Al principio se pensaba que se trataba de contaminación marina, pero en la última década los científicos han descubierto que los micro y nanoplásticos existen en todos los sectores ambientales, desde el agua dulce, el suelo y el aire, así como en miles de especies, incluidos los humanos. Pero, al igual que el cambio climático y compuestos químicos peligrosos, la mayoría de los plásticos son invisibles al ojo humano, lo que significa que su impacto es relativamente desapercibido (Allen *et al.*, 2022a).

Anteriormente se estableció que los océanos eran el “sumidero final” de los micro plásticos (Allen *et al.*, 2022b). Sin embargo, las diminutas partículas de plástico en la atmósfera pueden y trasladarse a zonas urbanas, rurales y remotas como altas montañas e islas. En la atmósfera, la velocidad con la que se transportan es más rápida que en las corrientes oceánicas (Allen *et al.*, 2020). Al desplazarse por aire, los NMP recorren miles de kilómetros en cuestión de días o semanas, en consecuencia, se genera un “bucle interminable” de transporte de plástico (Allen *et al.*, 2022a). El potencial de transporte a larga distancia es grave, ya que significa que los NMP pueden afectar a lugares, por lo tanto, poblaciones que se encuentran a gran distancia de las fuentes de contaminación, esto convierte a los micro plásticos en “uno de los contaminantes más dispersos en todos los ambientes debido a las actividades antropogénicas” (Zhang *et al.*, 2021) y puede ser un grave problema de salud pública (Vethaak D. & Legler J., 2021). Aunque los científicos tal vez no conozcan todavía el alcance total y las consecuencias de los NMP en la salud, la causa es innegablemente clara: la producción y el uso de plásticos (CIEL, 2023).

La evaluación de la exposición humana a los NMP requiere la caracterización de varios parámetros como el tamaño de las partículas, la forma y la composición del polímero, información sobre aditivos químicos, así como la fisicoquímica y propiedades del polímero, por ejemplo, la reactividad de la superficie y la densidad de partículas, para poder comprender sus efectos sobre la salud humana y su toxicidad (**Figura 3.1**).

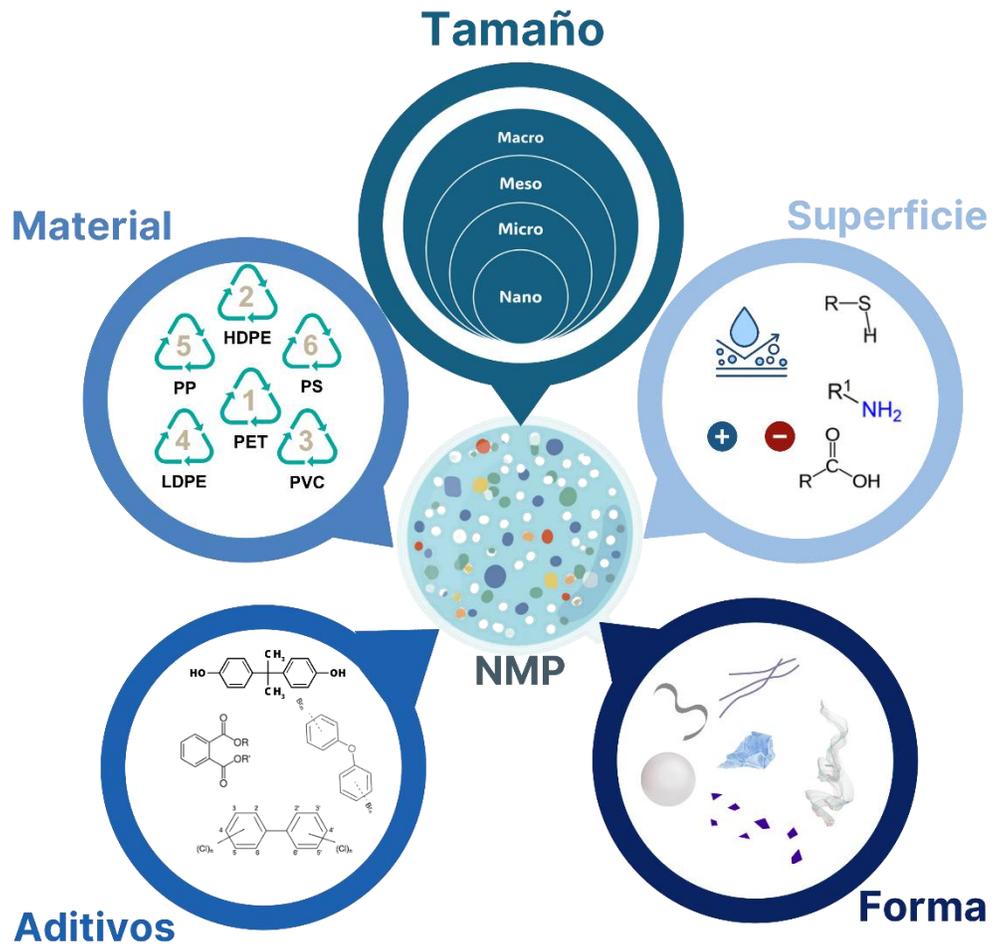


Figura 3.1. Atributos de los nano y micro plásticos (NMP) que deben considerarse para la exposición y toxicidad (adaptado de WHO, 2022).

La probabilidad de que las partículas fibrosas transportadas por el aire entren en nuestro sistema respiratorio dependerá del tamaño. Primero, es importante distinguir entre los términos inhalable y respirable. Las partículas y fibras capaces de ingresar por la nariz o boca y depositarse en las vías respiratorias superiores son **inhalables**, mientras que las que pueden llegar a las capas profundas del pulmón y depositarse en ellas son **respirables** (Figura 3.2). La deposición en las vías respiratorias depende del diámetro aerodinámico y una vez dentro del sistema, la deposición disminuye por encima de los 5 μm de diámetro (Gasperi J. *et al.*, 2018).

En general, los nanoplásticos son partículas de polímeros (p. ej., tereftalato de polietileno - PET o poliestireno - PS) en el rango de tamaño nanométrico (10^{-9} m). Las partículas

nanoplásticas pueden ser primarias y secundarias; las **primarias** se fabrican intencionalmente para diferentes productos (dispositivos médicos o electrónicos, medicamentos, etc.) con un tamaño y composición definidos; mientras que los **secundarios** se forman por la degradación física, química o biológica de los artículos plásticos más grandes (botellas, envases, bolsas, etc.). El proceso continuo de fragmentación no intencionada de los residuos plásticos mal-gestionados por la exposición al sol, al viento o al agua tiene como consecuencia, la formación de partículas en el rango 1 μm a 5 mm (micro a meso plásticos), y posteriormente, genera partículas nanoplásticas, más pequeñas de 1 μm .

Sin embargo, actualmente no existe una definición oficial del término “nanoplásticos” porque no consiste en un material o composición uniforme. La comunidad científica utiliza la siguiente clasificación de grupos de partículas plásticas con base en su tamaño: **nanoplásticos** de 1 nm a 1 μm , **microplásticos** de 1 μm a 5 mm y los **macroplásticos** con tamaño mayor a 5 mm (Hartmann N.B. *et al.*, 2019; Bermudez & Swarzenski, 2021).

Tamaño de los micro y nanoplásticos

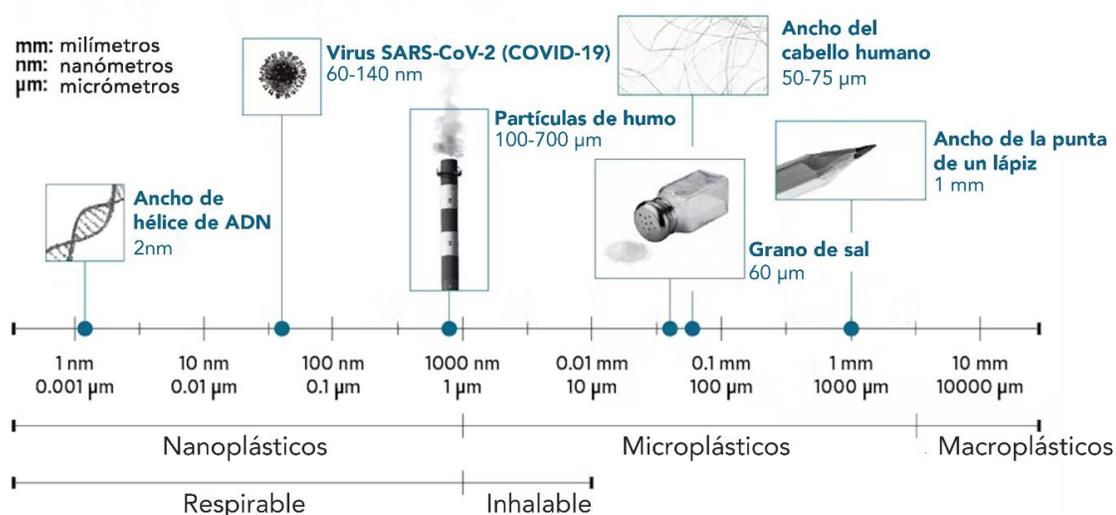


Figura 3.2. Escala y comparación de los diferentes tamaños de los plásticos (adaptado y traducido de CIEL, 2023).

La mayoría de los estudios sobre la exposición humana a NMP y sus posibles efectos sobre la salud, se han centrado en el sistema gastrointestinal debido a la exposición a través de la ingestión de alimentos y agua contaminados, la cual se consideró la ruta predominante de acumulación en los humanos mediante la absorción intestinal de los micro plásticos (MP). Existen pocos estudios sobre la exposición humana a través de la inhalación; sin embargo, los científicos han descubierto que la inhalación tiene una contribución importante en la ingesta

de NMP, con tasas de exposición (cantidad de NMP atmosféricos alrededor de un individuo) que alcanzan los 5,700 micro plásticos por metro cúbico, m^3 (Yaowei L. et al., 2020; Allen S. et al., 2021; An X. et al., 2022). Se estima que los seres humanos pueden inhalar hasta 22,000,000 de NMP al año (van Seville E. et al., 2015).

En el estudio de Catarino et al. (2018) se demostró que la ingestión de fibras sintéticas por el consumo de mejillones es menor que por la inhalación de polvo doméstico durante la misma comida. La inhalación tiene un papel fundamental en la exposición humana a micro y nano partículas con residuos plásticos, metálicos, carbono, compuestos biológicos, entre otros. El mecanismo patogénico de estas partículas aerotransportadas ha sido comprobado en varios estudios in vitro e in vivo (López-Chaves C. et al., 2017). En el proceso de inhalación, cualquier tipo de micropartícula puede alcanzar la superficie alveolar y las partículas nanométricas pueden pasar al torrente sanguíneo, superando la barrera epitelial pulmonar (Figura 3.3). Su distribución causa daños en diferentes regiones del cuerpo, incluido el sistema nervioso central (Facciolà A. et al., 2019).

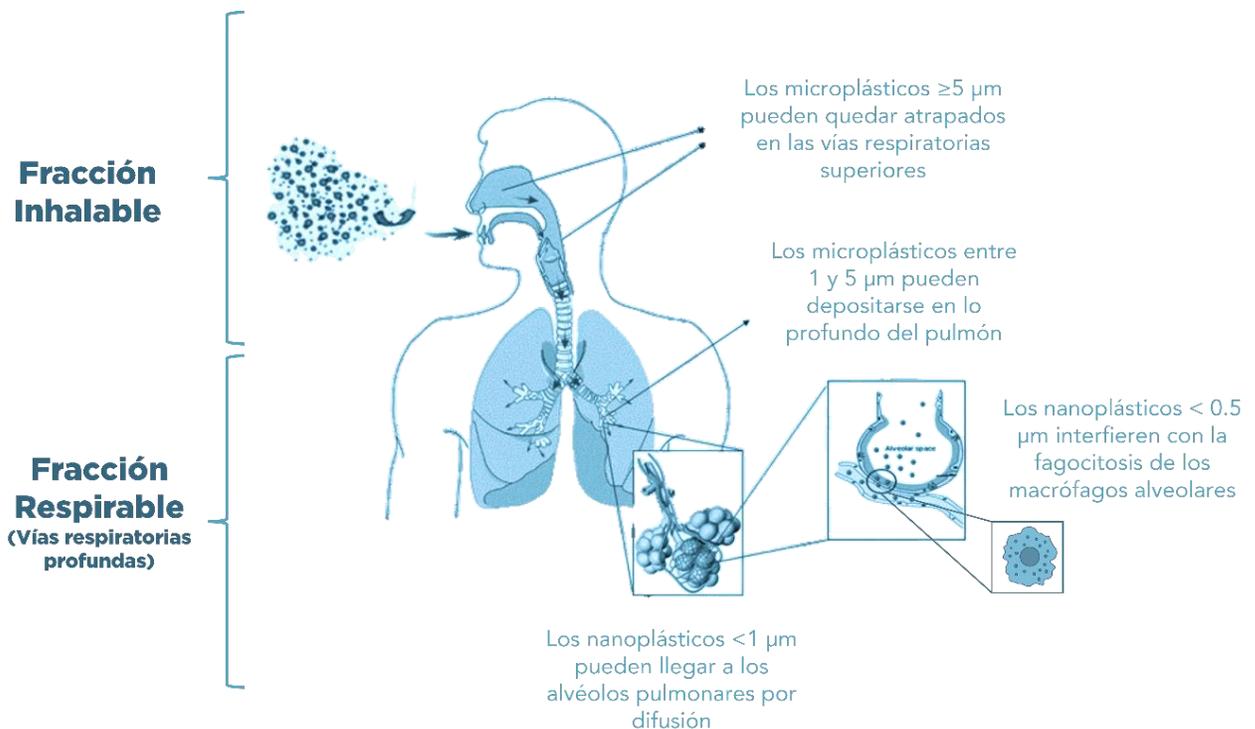


Figura 3.3. Impacto de los NMP en regiones específicas del tracto respiratorio: fracción **inhalable** en vías respiratorias superiores e inferiores; fracción **respirable** en vías respiratorias profundas. **Fuente:** adaptado de Facciolà A. et al., 2021 y CIEL, 2023.

El estudio y análisis del impacto de los micro plásticos del aire sobre la salud se encuentra en sus primeras etapas; sin embargo, los estudios sobre la inhalación de NMP ya muestran efectos adversos a lo largo del tracto respiratorio, que pueden ser desde irritación hasta la aparición de cáncer en los casos de exposición crónica (Amato-Lourenco et al., 2020). Entre los efectos adversos más importantes incluyen:

- ❖ reacciones inmediatas parecidas al asma,
- ❖ reacciones inflamatorias y cambios fibróticos (p.ej. bronquitis crónica),
- ❖ trastornos pulmonares como alveolitis alérgica extrínseca y neumonía crónica,
- ❖ enfisema pulmonar,
- ❖ desarrollo de enfermedades pulmonares intersticiales, que resultan en tos, dificultad para respirar y una reducción de la capacidad pulmonar;
- ❖ estrés oxidativo, así como la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y, por lo tanto, aumenta la capacidad de dañar células (efectos citotóxicos)
- ❖ enfermedades autoinmunes.

Los factores que influyen en la dispersión de cualquier tipo de partículas en el aire y que aumentan la exposición humana relativa en interiores y exteriores:

- ❖ **Gradiente vertical.** La mayor concentración de contaminación se encuentra cerca del suelo, debido a la resuspensión de partículas y fuentes directas.
- ❖ **Velocidad del viento.** Hay una disminución en los niveles de contaminación cuando la velocidad del viento es mayor, que favorece la dispersión.
- ❖ **Dirección del viento.** Determina cómo interactúa la dirección del viento con el entorno, ya sea en paralelo o perpendicular a los obstáculos.
- ❖ **Sedimentación.** Las partículas con diámetros mayores a 2.5 mm, caen al suelo por efecto de la gravedad
- ❖ **Temperatura.** La nucleación y condensación de las partículas aumenta cuando la temperatura es baja, lo que resulta en concentraciones atmosféricas menores (Kaur S. et al., 2007).

El conocimiento sobre NMP en los últimos años aún se está desarrollando y la investigación futura se debe centrar en las evaluaciones del impacto, la identificación de los umbrales de exposición aguda o crónica, así como la estimación cuantitativa de la carga global de NMP y su ciclo de vida en el ambiente (aire, suelo, agua). Además, debido a la naturaleza tóxica de muchos aditivos plásticos, se necesitan estudios toxicológicos que consideren los efectos multigeneracionales, incluidos estimación de la bioacumulación en múltiples especies y compartimentos ambientales (atmósfera, hidrósfera, geósfera y biota). La elevada

producción de plástico, así como, la rápida creación y mala gestión de sus desechos, no presentan signos de desaceleración, por eso es de gran importancia comprender el impacto completo de este contaminante persistente en el ambiente (Allen, 2022b).

En la Ciudad de México y los municipios conurbados del Estado de México (ZMCM), se han realizado algunos estudios, en los que se han detectado presencia de microplásticos en la atmósfera con una concentración media de 0.205 ± 0.061 y 0.100 ± 0.055 elementos/m³ en PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente. En términos de la distribución espacial y temporal, se encontró mayor abundancia en lugares cercanos a centros industriales y urbanos; las fibras fueron las más abundantes y el azul fue el color más común. En términos del tamaño, se determinó una variación entre 39 a 5,000 μm , con un 66% menores a 500 μm (Valtierra M. M., 2010; Amador O. *et al.*, 2020). La variación en la composición (polímeros y polipropileno) indica múltiples fuentes (Shruti V.C. *et al.*, 2022). Otros estudios hacen referencia a la toxicidad potencial de los microplásticos en la CDMX, ya que estos contienen aditivos químicos como ftalatos y bisfenol A, así como los retardantes de llama (PBDEs), metales pesados como cadmio y plomo, los cuales actúan como disruptores endocrinos, los cuales interfieren con el sistema hormonal humano y animal, incluso en bajas concentraciones (Valtierra M. M., 2010), también se ha encontrado evidencia de posibles efectos en cáncer de mama y próstata, por su acción estrogénica (Amador O. *et al.*, 2020; Segovia-Mendoza, M. *et al.*, 2020; 2022a) y efectos en desordenes neurológicos como depresión (Segovia-Mendoza M. *et al.*, 2022b). En estudios sobre la presencia de contaminantes orgánicos asociados a microplásticos y partículas en el aire de la CDMX, se detectaron ftalatos como DEHP (di-(2-etilhexilo)), DBP (dibutilo), DIBP (diisobutilo) en partículas finas con las concentraciones más altas en las zonas con mayor tránsito vehicular y actividad industrial; estos compuestos provienen de la degradación de plásticos, pinturas, adhesivos y emisiones vehiculares (Quintana-Belmares *et al.*, 2018). En otro estudio encontraron microplásticos (fibras y fragmentos) en muestras de aire, que contenían aditivos retardantes de llama y ftalatos (Amador *et al.*, 2022). Los micro plásticos en la ZMCM no son solo un problema ambiental, sino también de salud pública, debido a los aditivos tóxicos que contienen. Se necesitan más estudios para cuantificar el impacto real, sin embargo, la evidencia que existe a nivel mundial sugiere que deben tomarse medidas urgentes para reducir su emisión y exposición.

A continuación, se presenta el análisis del comportamiento de los contaminantes criterio gaseosos (dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y ozono), así como en partículas suspendidas (PM₁₀: diámetro menor a 10 micrómetros; PM_{10-2.5}: partículas gruesas y PM_{2.5}: finas, menores a 2.5 μm) medidos por las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) para el 2023.

Dióxido de azufre (SO₂)

Los microplásticos pueden interactuar con otros contaminantes atmosféricos, como el dióxido de azufre (SO₂), los cuáles actúan como vehículos de transporte para contaminantes gaseosos debido a su superficie porosa y carga electrostática. Zhang et al., 2021 muestra como fragmentos de poliestireno y polietileno pueden absorber SO₂, especialmente en condiciones de alta humedad. Los microplásticos pueden catalizar las reacciones en la formación de la lluvia ácida debido a los metales pesados como hierro, cobre, entre otros, los cuales están presentes en la superficie (proviene de aditivos plásticos o contaminación cruzada), esto implica una mayor formación de aerosoles sulfatados (Liu et al., 2022).

En 2023 el SO₂, registró un promedio anual de 3.2 ppb, calculado con las estaciones que tuvieron suficiencia anual del 70 % o más. Este valor representa un incremento del 23 % con respecto a 2022. En los sitios ubicados en la CDMX, la media anual fue 2.9 ppb, mientras que para los del EDOMEX fue 3.4 ppb, esto es debido a que en el norte se registran las concentraciones más altas por la cercanía con Tula y conforme se mueve la masa de aire contaminado con la trayectoria del viento, se presentan procesos de transformación, deposición y dilución, que disminuyen gradualmente la concentración del SO₂, en consecuencia, los niveles en el sur son menores (**Figura 3.4a**). En el análisis por estación, promedio anual máximo fue 5.4 ppb y se registró en Tlalnepantla (TLA) en EDOMEX. En el promedio diario (24 h), el valor más alto fue 28 ppb, observado el 18 de febrero en la estación Villa de las Flores (VIF) y el 18 de octubre en la estación TLA, EDOMEX; mientras que el máximo horario fue 119 ppb, registrado en la estación VIF durante el 20 de febrero, este año ninguna estación rebaso el valor de 300 ppb.

En la serie de tiempo del SO₂ (**Figura 3.4b**) se observó que el promedio horario presentó valores altos en los meses de la temporada seca fría que va de noviembre a febrero, esto ocurre debido a las condiciones meteorológicas de la temporada seca fría y una mayor frecuencia de inversiones térmica. En este año de marzo a junio se registraron los valores mínimos, debido a la altura de la capa límite en los meses de seca caliente y a la temporada de lluvia donde se presenta el lavado atmosférico, el mes de julio de este año presentó valores altos debido a que el promedio acumulado de lluvia fue muy bajo comparado con años anteriores, en los meses de lluvias es cuando ocurre la reacción del SO₂ que genera parte de la lluvia ácida; la descripción de este fenómeno se puede consultar en el **capítulo sobre la REDDA** de este informe anual.

El promedio mensual del SO₂ se observó que los máximos fueron en diciembre y noviembre y los mínimos en mayo y junio, la magnitud de los valores se ha reducido considerablemente, ya que, en 2023, los máximos fueron 5.4 ppb para diciembre, noviembre con 5.1 ppb y febrero con 4.2 ppb; mientras que los promedios históricos de enero, diciembre y febrero fueron 15.3, 14.7 y 13.8 ppb, respectivamente (Figura 3.4c).

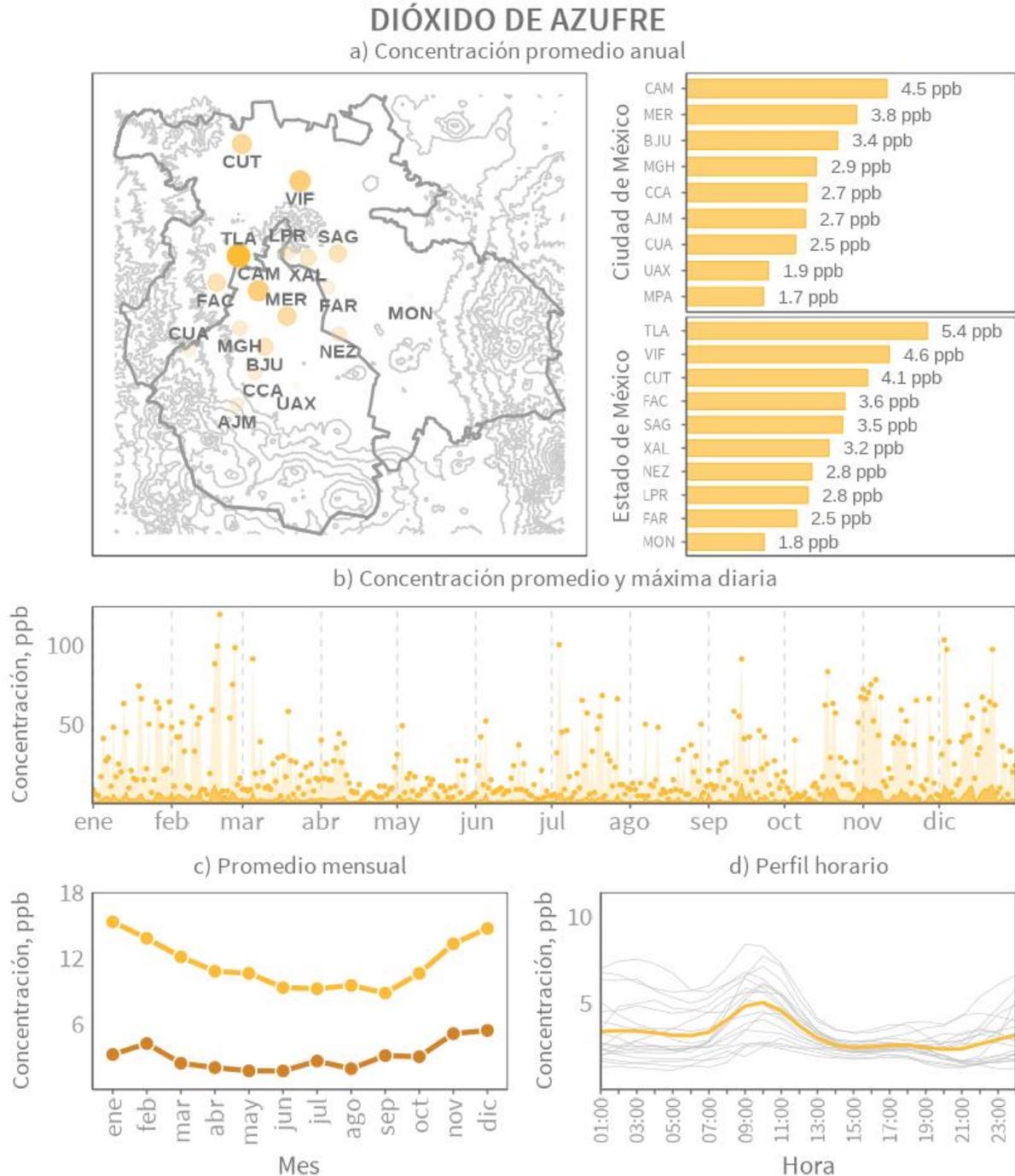


Figura 3.4. a) Promedio anual de SO₂ por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en amarillo oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). **c)** Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2022 (línea clara). **d)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea amarilla) y por sitio (líneas grises).

El perfil horario del contaminante indica concentraciones elevadas en la madrugada con mayor impacto en sitios como VIF, TLA y Atizapán (ATI), relacionados al transporte regional desde el complejo industrial de Tula; también se presenta un pico en la mañana, entre las 08:00 y las 10:00 h, el cual se asocia con el tránsito vehicular (Figura 3.4d). El transporte regional del SO₂ ocurre principalmente en la noche, debido a que la capa límite atmosférica es más estable por la baja de temperatura y viento débil proveniente del norte, lo que hace a la masa de aire contaminada mantenerse cerca de la superficie, en consecuencia, los niveles altos de SO₂ se registran al norte de la ZMCM y durante la mañana.

En el análisis del promedio mensual por estación de la Figura 3.5, se observa que los valores más altos en tonos amarillo intenso, se registran durante la temporada seca-fría (noviembre a febrero). En la temporada de lluvia, las concentraciones del SO₂ disminuyeron significativamente, siendo junio el mes que reporta los valores más bajos.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sept	oct	nov	dic	
Ciudad de México	CAM	3.7	5.5	2.8	3.2		1.0	3.3	2.3	4.4	4.2	7.6	7.5
	MER	5.0	6.0	3.3	2.5	1.9	1.8	2.7	2.1	4.1	3.8	6.2	6.6
	BJU	3.6	5.0	2.4	1.7	1.8	1.8	2.9	3.5	3.6	3.2	5.7	6.0
	MGH	3.6		1.6	1.2	1.3	1.8	2.6	1.8	3.6	3.4	5.0	5.5
	CCA	2.0	3.7	2.6	1.8	2.2	2.0	3.6	2.2	3.4		2.0	3.9
	AJM	2.9	3.8	2.0	1.5	1.4	1.4	2.4	1.1		3.4	4.1	4.8
	CUA	2.7	3.2	2.4	1.5	1.3	1.0	2.1	2.0	2.3	2.7	4.4	3.7
	UAX	1.7	2.8	1.9	1.5	1.5	1.5	2.7	1.5	1.9	0.6		
	MPA	1.5	1.9	1.7	1.3	1.4	1.2	1.3	1.1	2.3	1.9	2.3	2.8
	Estado de México	TLA	6.0	7.3	3.4	3.1	2.5		4.5	3.6	6.1	5.9	8.6
VIF		6.0	9.0	4.0	3.2	2.8	2.7	2.9	2.1	3.3	4.3	9.5	7.0
CUT		5.2	6.9	3.4	3.7		2.2	2.9	1.8	3.2	3.7	6.3	6.4
FAC		4.1	5.0	3.5	2.4	2.0	2.0	3.2	2.5	3.9	3.2	4.8	6.4
SAG		3.4	5.1	2.3	1.9	1.5	1.9	2.9	3.0	2.8	3.3	6.4	6.0
XAL		3.9	4.6	3.3	4.4	2.1	2.0	2.3	1.9	3.3	2.8	4.2	4.2
NEZ		3.0	4.5	2.6	2.0	2.3	1.3	2.5	1.8	2.6	2.4	4.1	4.0
LPR		3.6	5.1	3.4	2.3	2.1	1.8	2.0	1.4	1.9	1.9	3.5	3.6
FAR		2.1	3.6	2.1	1.5	1.3	1.4	2.5	1.5	2.4	2.5	4.7	4.3
MON		2.1	2.5	1.8	1.4	1.6	1.5	1.8	1.3	1.9	1.5	2.3	

Figura 3.5. Promedio mensual de la concentración de SO₂ por estación de monitoreo. Los espacios grises indican periodos sin datos o insuficiencia de información.

Óxidos de nitrógeno (NO₂)

Los microplásticos que contienen nitrógeno (N-MP) están ampliamente presentes en la atmósfera, pero sus riesgos potenciales para la salud no se han estudiado. Zhu K. *et al.*, 2022, investigaron la formación de radicales aminoxilo persistentes (R₂ N—O) y especies reactivas de nitrógeno (ERN), en los N-MP bajo irradiación de luz. Entre los diversos procesos de meteorización¹, la degradación por radiación UV combinada con el oxígeno atmosférico, se considera el método de envejecimiento más eficaz para los MP en condiciones ambientales (Stubbins *et al.*, 2021). El foto- envejecimiento puede cambiar significativamente las propiedades físicas y químicas de los MP, incluido el aumento de los grupos funcionales oxidados², la disminución del tamaño de las partículas y la ruptura de enlaces químicos (Sun *et al.*, 2021).

En el análisis de los óxidos de nitrógeno en 2023, con las estaciones que tuvieron suficiencia anual del 70 % o más. El promedio anual para óxido nítrico (NO) fue 13 ppb, en dióxido de nitrógeno (NO₂) fue 23 ppb y el total de óxidos de nitrógeno (NO_x) fue 36 ppb. Estos valores son muy parecidos al 2022, con un incremento en NO y NO₂ de 1 ppb y NO_x de 2 ppb. Los promedios anuales para los sitios ubicados en la CDMX fueron 13, 23 y 36 ppb para NO, NO₂ y NO_x, respectivamente; en comparación con 2022, fue un incremento de 2 ppb en NO y NO_x. En EDOMEX la variación fue igual que 2022 para NO (14 ppb), un incremento de 1 ppb para NO₂ (21 ppb) y un decremento de 4 ppb para NO_x (36 ppb). Este patrón es debido a que los sitios cercanos a vialidades con alto tránsito vehicular (p. ej. MER, TLA, CAM y MGH) tienen mayores concentraciones porque la fuente principal de emisiones de estos compuestos son los vehículos (**Figuras 3.6a, 3.7a y 3.8a**). Los niveles han disminuido gradualmente en los últimos años; sin embargo, la concentración horaria de NO_x supera 400 ppb en algunas estaciones que están influenciadas por las emisiones vehiculares y condiciones meteorológicas adversas, como inversiones térmicas que provocan estancamiento de los contaminantes.

El máximo horario de NO_x, fue 411 ppb y se registró el 30 de enero en la estación Camarones (CAM) en la CDMX. En NO₂, el promedio horario más alto fue 113 ppb en Cuautitlán (CUT) el 17 de enero y en la estación FES-Acatlán (FAC), el 20 de diciembre, ambas estaciones en el EDOMEX. En cuanto al NO, la concentración máxima horaria se presentó en la estación Chalco (CHO) con 364 ppb el 19 de enero. Los tres contaminantes (NO, NO₂ y NO_x) tienen un patrón

¹ Son los procesos que fragmentan, que alteran la estructura molecular de los polímeros y que ocasionan que el plástico se disgregue, debilite y se quiebre en pedazos más pequeños

² Los grupos funcionales oxidados son aquellos que contienen átomos de oxígeno enlazados a átomos de carbono, y se clasifican según su estado de oxidación. Los grupos funcionales más oxidados son los ácidos carboxílicos y los ésteres, mientras que los menos oxidados son los alcanos. Los alcoholes, aldehídos, cetonas y éteres se encuentran en posiciones intermedias en la escala de oxidación

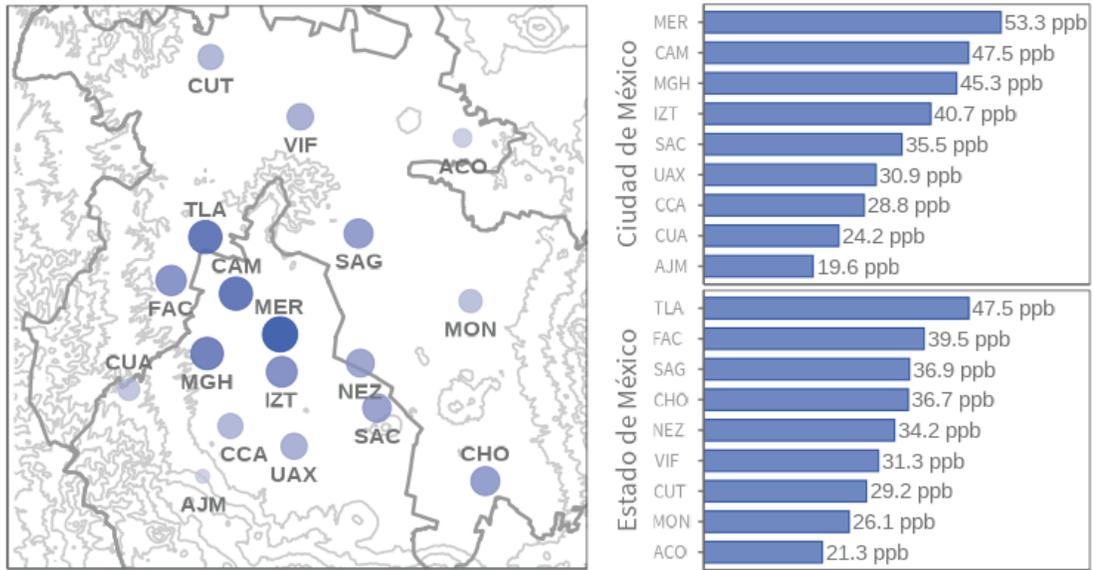
estacional, con mayor concentración en la temporada seca-fría (noviembre a febrero), ocasionado por condiciones de estabilidad atmosférica, disminución de la capa de mezcla, así como mayor frecuencia e intensidad de inversiones térmicas. En la temporada de lluvia (junio a octubre), el lavado atmosférico y la reducción de emisiones debido a las vacaciones escolares de verano, favorecen la disminución de la concentración (**Figuras 3.6b, 3.7b y 3.8b**).

Durante 2023, los máximos mensuales fueron en diciembre y enero, el NOx con 49 ppb (enero y diciembre), NO con 20 ppb en ambos meses; por último, NO₂ con 28 ppb, para enero y diciembre. El mínimo mensual fue en junio para NOx y NO, con 26 y 7 ppb respectivamente y 18 ppb para NO₂, en agosto y septiembre, que coincide con los meses de lluvias y es cuando ocurre la reacción del NOx que genera mayor acidez en el agua de lluvia (ver capítulo 6 en este informe anual). Los patrones mensuales son congruentes con los datos históricos (1988 a 2022), pero 2023 con concentraciones menores, ya que diciembre (1988 a 2022) obtuvo 72.3 ppb en NOx, 33.1 ppb para NO y 36.0 ppb en NO₂; los mínimos históricos fueron en agosto para NOx (40 ppb) y NO₂ (23 ppb); en junio para NO con 14 ppb (**Figuras 3.6c, 3.7c y 3.8c**).

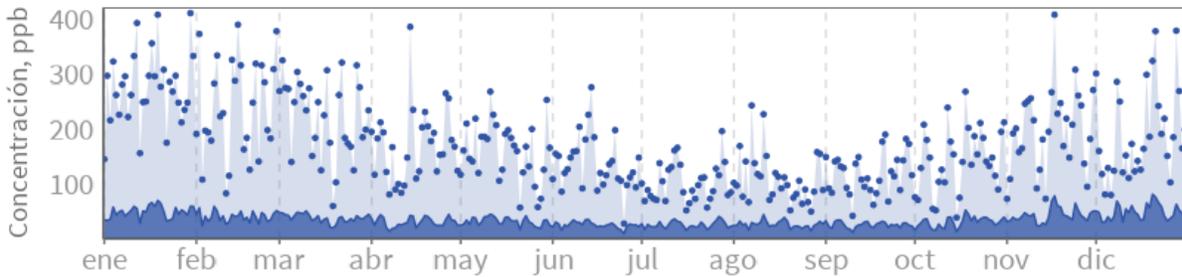
En el perfil horario de las tres especies (**Figuras 3.6d, 3.7d y 3.8d**), los NOx tienen dos picos, uno muy pronunciado en la mañana (07:00 - 08:00 h) relacionado con tránsito vehicular y otro en la noche (22:00 - 23:00 h) asociado con el NO₂. El NO presentó un máximo a las 08:00 h, debido al periodo de actividad vehicular y el NO₂ tiene dos picos, el primero (10:00 h) se relaciona con la oxidación fotoquímica y el segundo (21:00 - 24:00 h) debido a la química nocturna, en la cual hay formación de especies reactivas y contaminantes secundarios, que contribuyen a la fotoquímica del día siguiente.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO

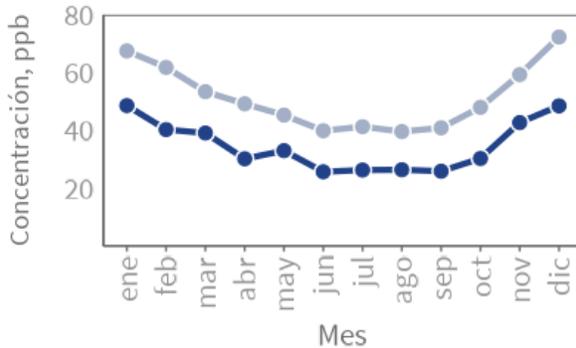
a) Concentración promedio anual



b) Concentración promedio y máxima diaria



c) Promedio mensual



d) Perfil horario

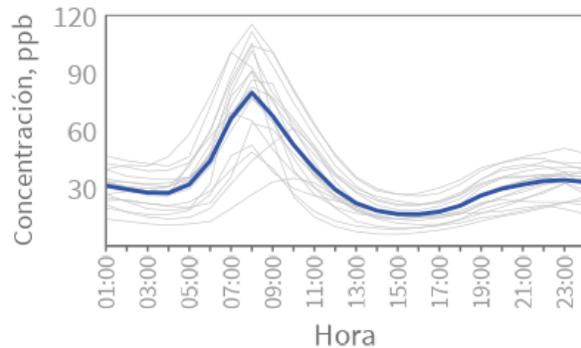
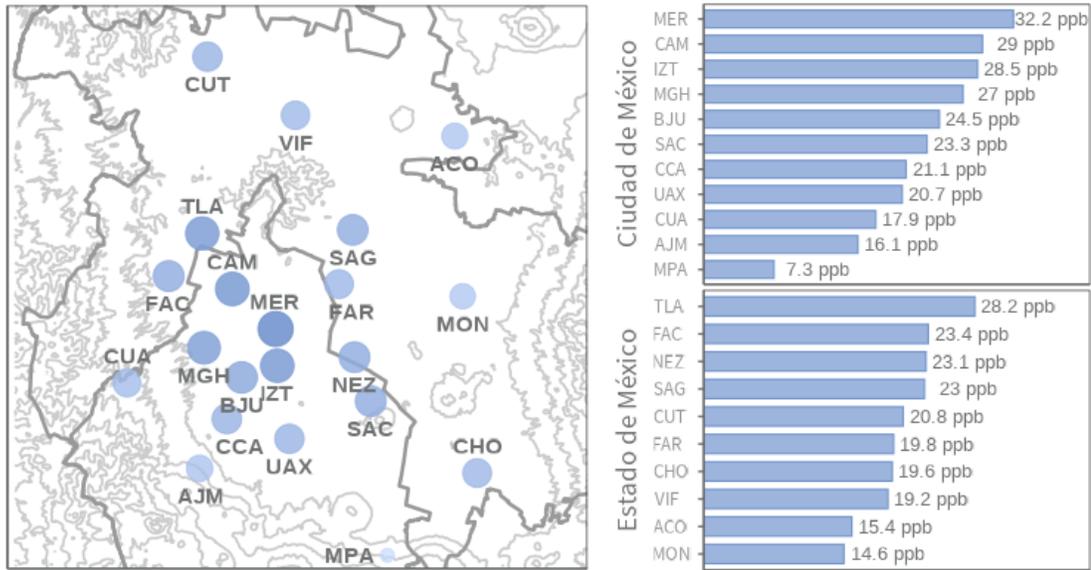


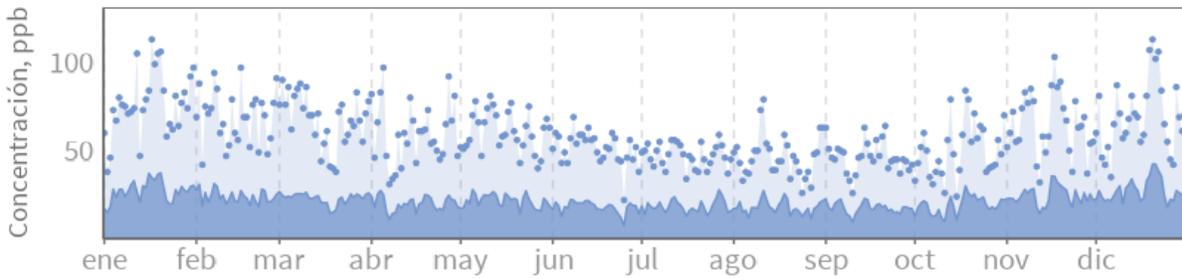
Figura 3.6. a) Promedio anual de NOx por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. b) Serie de tiempo del promedio diario (área en azul oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). c) Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2022 (línea clara). d) Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea azul) y por sitio (líneas grises).

DIÓXIDO DE NITRÓGENO

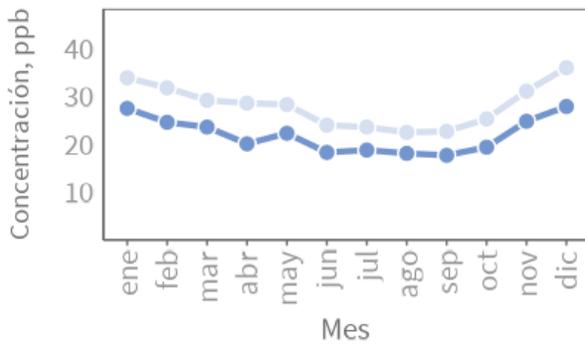
a) Concentración promedio anual



b) Concentración promedio y máxima diaria



c) Promedio mensual



d) Perfil horario

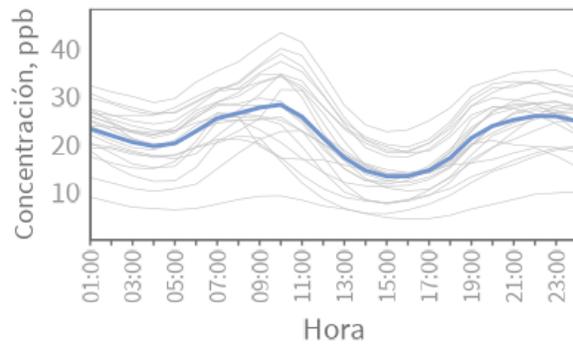
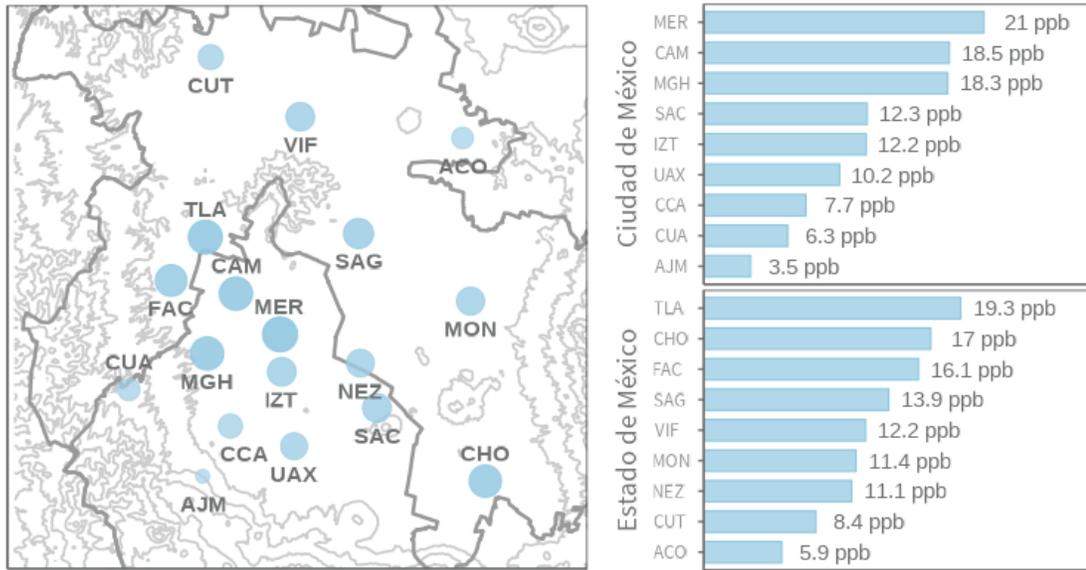


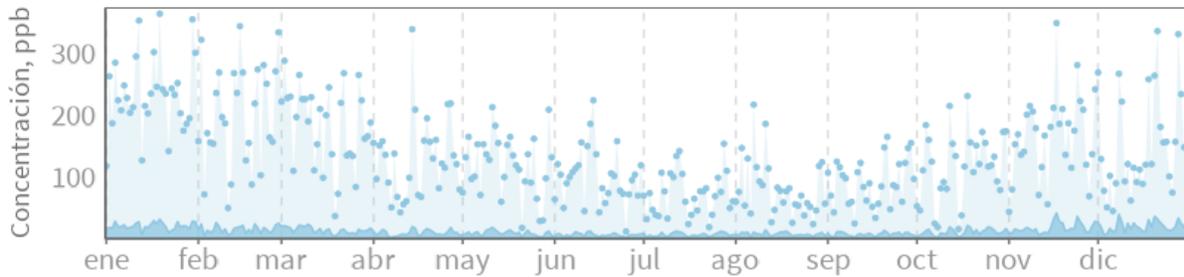
Figura 3.7. a) Promedio anual de NO₂ por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en azul oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). **c)** Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2022 (línea clara). **d)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea azul) y por sitio (líneas grises).

MONÓXIDO DE NITRÓGENO

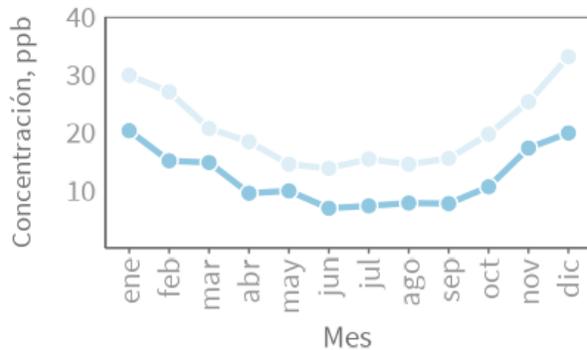
a) Concentración promedio anual



b) Concentración promedio y máxima diaria



c) Promedio mensual



d) Perfil horario

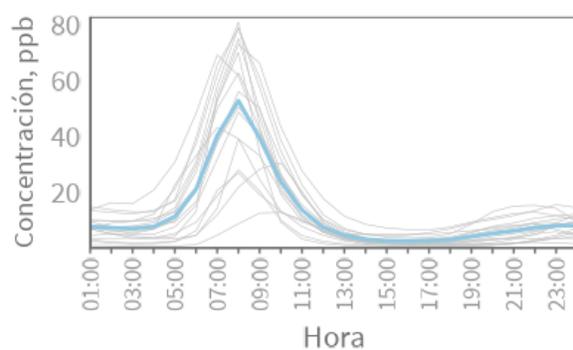


Figura 3.8. a) Promedio anual de NO por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. b) Serie de tiempo del promedio diario (área en azul oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). c) Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2022 (línea clara). d) Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea azul) y por sitio (líneas grises).

Monóxido de carbono (CO)

No hay estudios que demuestren que los microplásticos afecten químicamente las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en la atmósfera. Estos contaminantes pertenecen a categorías diferentes (partículas vs. gases) y sus ciclos atmosféricos son independientes. La quema de residuos plásticos, incluidos los microplásticos, puede emitir CO y otros gases tóxicos, esto no implica que tengan una interacción atmosférica, pero sí contribuyen a la emisión de CO cuando son quemados (Allen *et al.*, 2019; Rochman, *et al.*, 2019).

En 2023, el promedio anual fue de 0.43 ppm, superior al año anterior (0.40 ppm); este incremento se puede relacionar con el incremento de vehículos. Los sitios ubicados en la CDMX registraron un promedio de 0.42 ppm y los del EDOMEX, registraron un promedio anual de 0.44 ppm. A nivel estación, el promedio anual máximo fue 0.61 ppm en La Presa (LPR), al noreste de la ZMCM; el segundo máximo fue 0.55 ppm en Merced (MER), ambas cerca de vialidades con flujo vehicular constante. El mínimo fue en Acolman (ACO) con 0.23 ppm, seguida de Milpa Alta (MPA) con 0.25 ppm, ambas ubicadas en zonas semirurales y tienen baja influencia vehicular (**Figura 3.9a**).

En la serie de tiempo de CO (**Figura 3.9b**), se observa que el comportamiento es similar en la mayor parte del año, excepto en los periodos vacacionales y su variabilidad estacional de CO depende de la meteorología. Los máximos se registran en el invierno, cuando las condiciones meteorológicas son adversas para la dispersión de contaminantes (estabilidad atmosférica, temperaturas bajas, mayor frecuencia de inversiones térmicas, menor altura de la capa límite), particularmente en diciembre, que aumenta el tránsito vehicular por las festividades de fin de año. Los mínimos de CO ocurren en la temporada de lluvia, cuando hay condiciones favorables para la dispersión y remoción de la contaminación.

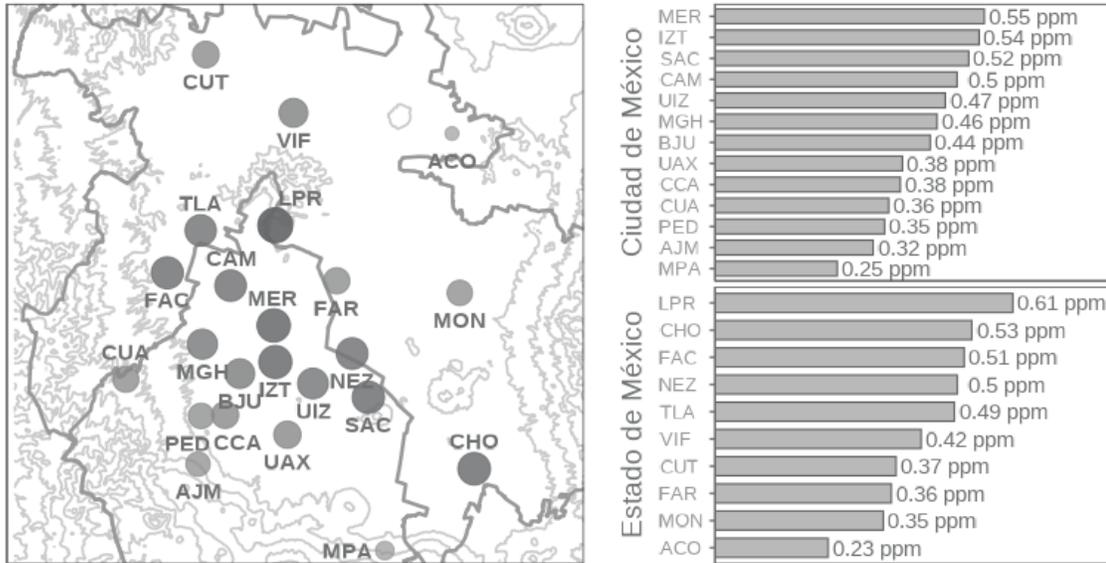
En 2023, el promedio mensual máximo fue 0.59 ppm en diciembre, seguido de enero con 0.56 ppm; los mínimos fueron en septiembre con 0.33 ppm, junio a agosto con 0.34 ppm. Este patrón coincide con los datos históricos, al inicio del año se tienen valores altos que decrecen gradualmente, los mínimos son dentro del periodo de lluvias, e históricamente diciembre ha registrado los máximos (**Figura 3.9c**).

El perfil horario tiene un pico de concentración a las 08:00 h que está relacionado con el intenso tránsito vehicular y la disminución de la capa límite baja; también se registra un segundo pico de menor magnitud, entre las 19:00 y 24:00 h, asociado con un ligero incremento en el tránsito vehicular, de la capa límite y una mayor velocidad del viento. El perfil horario del sitio LPR es diferente a las demás estaciones, ya que va decayendo

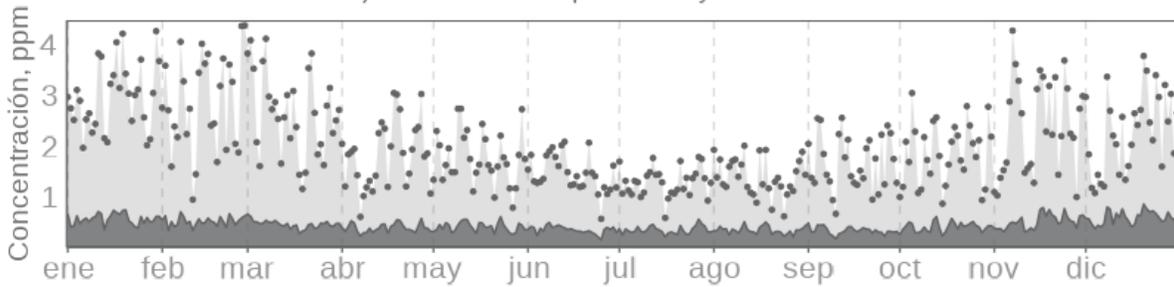
lentamente, por lo que desde las 10:00h, sus niveles superan al resto de los sitios, este patrón ha sido característico desde el 2018. La estación MPA, alejada de vialidades, también tiene un perfil diferente, sin picos matutinos o nocturnos y presenta un incremento gradual desde las 08:00 h, alcanza su máximo a las 10:00 h, que se mantiene hasta las 2:00 h, cuando comienza a reducir (Figura 3.9d).

MONÓXIDO DE CARBONO

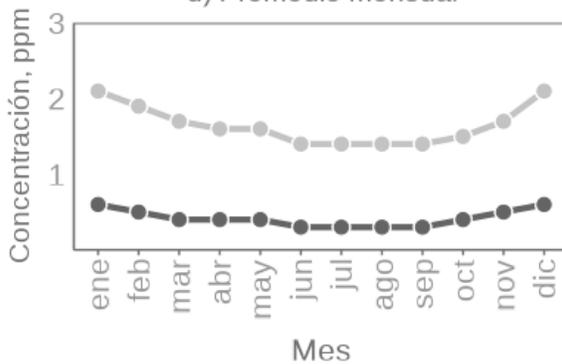
a) Concentración promedio anual



b) Concentración promedio y máxima diaria



d) Promedio mensual



c) Perfil horario

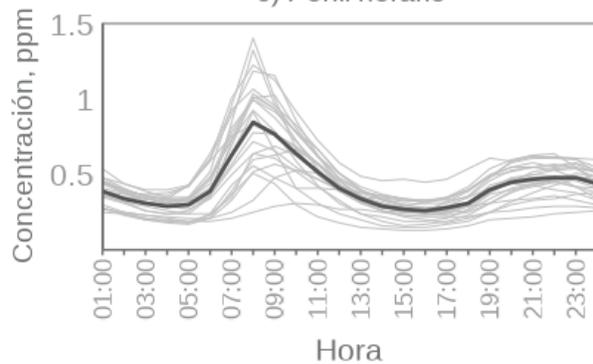


Figura 3.9. a) Promedio anual de CO por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en gris oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). **c)** Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2022 (línea clara). **d)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea oscura) y por sitio (líneas claras).

Ozono (O₃)

No hay estudios que demuestren que los microplásticos afecten los niveles de concentración del ozono de forma directa, pero hay factores que indirectamente pueden afectar la formación del O₃ como es la capacidad de los MP de dispersar la luz UV, por su alto valor de albedo con picos de absorción de 326-334 nm, en el artículo de Yang y Ma (2023), encontraron como la dispersión y absorción de radiación UV debida a las propiedades ópticas de los microplásticos afectaban la fotosíntesis de microalgas, lo cual tiene implicaciones atmosféricas. El estudio realizado por La Nasa y colaboradores (2020), analiza polímeros comunes como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), PET y PVC, donde simularon procesos de degradación y midieron en tiempo real la emisión de COV de estos plásticos, encontrando que todos emitieron mezclas complejas de COV incluyendo: aldehídos (como formaldehído y acetaldehído), cetonas, ácidos carboxílicos, hidrocarburos aromáticos y halogenados. Algunos de los compuestos detectados tienen potencial carcinogénico o efectos sobre la calidad del aire, como precursores del ozono troposférico. Es un área de investigación con un gran potencial para su desarrollo.

En 2023, el O₃ obtuvo un promedio anual de 31.3 ppb, calculado con las estaciones que registraron 70 % o más de suficiencia de datos, este valor comparado con el 2022 (31.1 ppb) es prácticamente igual, con un incremento del 0.6%. La media de los máximos diarios (1 hora) fue 76 ppb, lo que fue un 1.3 % de aumento comparado con 2022 (75 ppb). El límite horario de la NOM (**90 ppb**, NOM-020-SSA1-2021) se superó en 969 horas distribuidas en 245 días del 2023, mientras que el límite para promedio móvil de 8 horas (**65 ppb**) se superó en 245 días. Las estaciones en el centro y sur de la CDMX reportaron las concentraciones máximas debido al transporte de sus precursores (NO_x y COV) desde el norte, ocasionado por los patrones de vientos predominantes y posteriormente, se acumulan en la región montañosa del sur. El conteo de horas (O₃ > 90 ppb) por estación (**Figura 3.10a**) tiene su máximo en UAM-Xochimilco (UAX) con 455 horas, seguida por Ajusco Medio (AJM) con 449 horas, Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) con 440 hora y las demás con menos de 400 horas. Los mínimos en el conteo de horas se presentaron en los sitios del Estado de México con menos de 100 horas Chalco (CHO), FES-Aragón (FAR) y Acolman (ACO), con 13, 76 y 81 horas respectivamente.

En la serie de tiempo para O₃ (**Figura 3.10b**), los niveles más altos de concentración normalmente ocurren en la temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio) y en este año se presentaron máximos horarios superiores a 155 ppb (valor de activación de Fase I en contingencias de O₃) durante febrero y marzo; sin embargo, en todo el año se registraron promedios horarios que superaron el límite de la NOM (90 ppb). En general, el comportamiento del O₃ es de un incremento gradual desde mediados de febrero y hasta mediados de junio, lo que coincide con la temporada seca caliente; mientras que, desde junio

los niveles comienzan a disminuir por el inicio de la temporada de lluvia y el mínimo se presentó en septiembre. A partir de octubre, hay cambios de sistemas atmosféricos relacionados con el cambio estacional (otoño e invierno), en consecuencia, la concentración promedio de O_3 incrementa, pero en diciembre disminuye ligeramente.

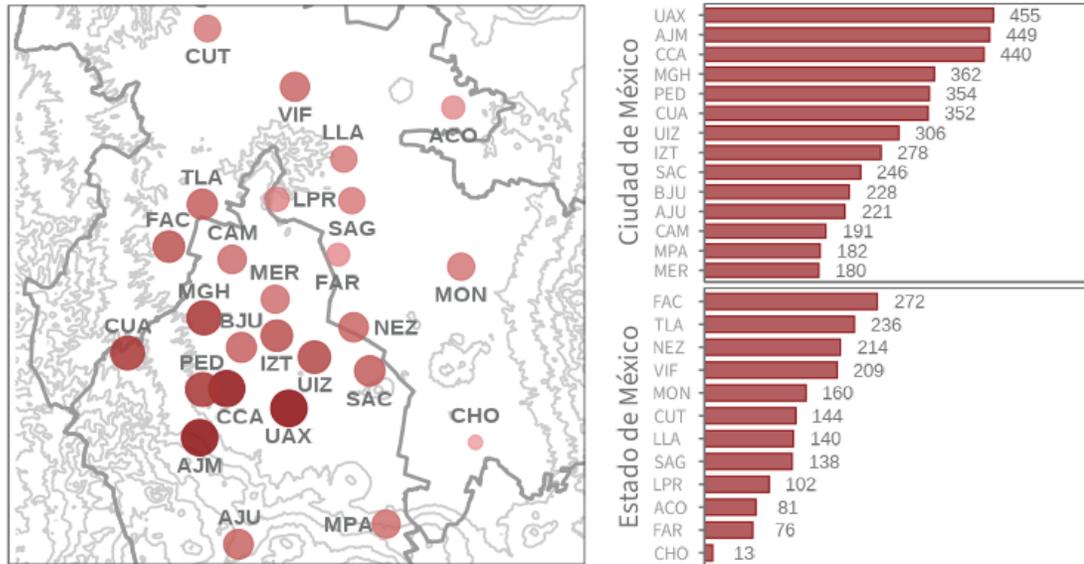
En 2023, la concentración máxima horaria fue 171 ppb y ocurrió el 23 de febrero a las 16:00 h en la estación Ajusco Medio (AJM); ese mismo día, a las 20:00 h, se presentó el máximo del promedio móvil de 8 horas con 128 ppb, en la misma estación. Este año, se activaron dos eventos de contingencia, que se describen en el capítulo 5 de este informe anual, de estos episodios dos ocurrieron dentro de la temporada de ozono. El 20 de noviembre también se registró un máximo horario de 158 ppb en la estación Villa de las Flores (VIF), pero no se activó la contingencia debido a la corta duración, ya que después de registrar este valor, se presentaron condiciones favorables para su dispersión que disminuyeron el O_3 por debajo de 100 ppb, así como un pronóstico meteorológico con mejores circunstancias para el día siguiente, esta decisión fue con base al plan vigente en el cual, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) tiene la coordinación con los gobiernos locales del Valle de México y federal para activar o no una contingencia, con fundamento de un pronóstico meteorológico favorable para la dispersión de los contaminantes (GOCDMX, 2019, Número 100Bis).

Los niveles de ozono también tienen aporte de la concentración de fondo, la cual se define como la fracción de O_3 que no se atribuye directamente a las fuentes antropogénicas locales. De acuerdo con Jacobson (2012), la concentración de fondo para O_3 en regiones con grandes altitudes está entre 30 y 70 ppb. En ambientes urbanos, existe una mayor disponibilidad y variedad de precursores, por lo que hay más generación de O_3 durante el día, pero en las noches, no hay producción fotoquímica de O_3 , por lo que el remanente del día se elimina por la dispersión o reacción con otras especies.

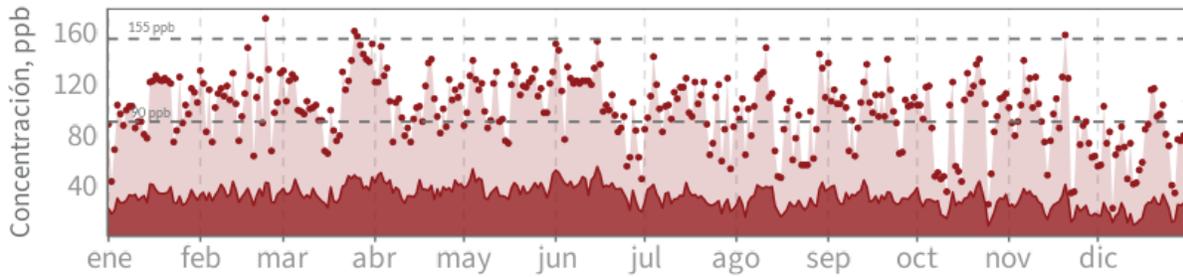
En el comportamiento mensual del O_3 en 2023, diciembre presentó el promedio mensual mínimo, este mes presentó una humedad mayor que los años anteriores con una anomalía positiva y junio obtuvo el máximo, debido a una fuerte onda de calor, así mismo fue el mes más cálido del año (en el capítulo 2, se explica a detalle lo ocurrido en estos meses) este año fue atípico en algunos meses que se comportaron diferente a la tendencia histórica (1988-2022), debido a los cambios de los fenómenos meteorológicos más intensos que se han presentado en los últimos años ([Figura 3.10c](#)).

OZONO

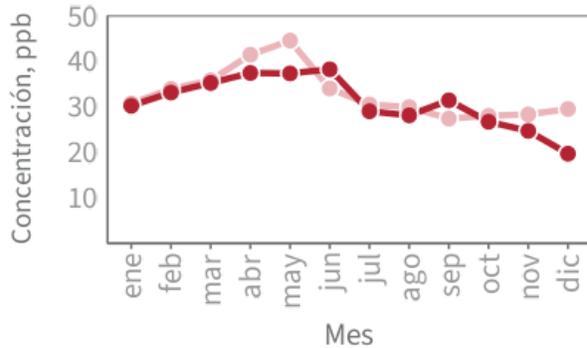
a) Número de horas mayores a 90 ppb



b) Concentración promedio y máxima diaria



c) Promedio mensual



d) Perfil horario

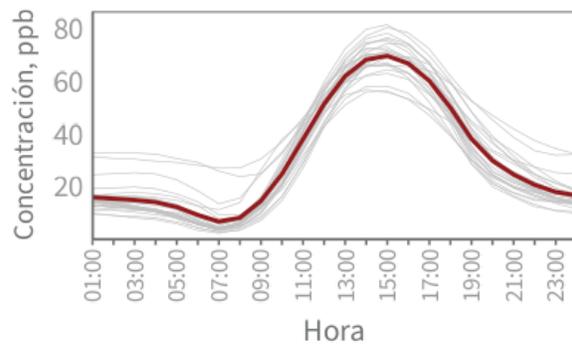


Figura 3.10. a) Promedio anual de O₃ por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales al número de horas > 90 ppb y las gráficas de barras (derecha) corresponden al conteo de horas dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en rojo oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). **c)** Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 1988 a 2022 (línea clara). **d)** Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea roja) y por sitio (líneas grises).

En la ZMCM se ha observado que la concentración de O₃ por la noche (fondo) puede alcanzar valores superiores a 20 ppb, especialmente en los sitios con mayor altitud, por ejemplo, la estación Ajusco Medio (AJM) registró un valor de 33 ppb (promedio de 00:00 a 04:00 h) y Milpa Alta (MPA) obtuvo 31 ppb. El máximo dentro del periodo nocturno fue de 65 ppb y se presentó en MPA, el 14 de junio a las 00:00 h; seguido de AJM con 64 ppb durante el 3 de abril a las 02:00h. Debido a esto, es importante analizar las concentraciones de fondo en los sitios de monitoreo, ya que estas contribuyen a la exposición total de las personas al ozono, estableciendo una línea base que, por si sola, supone un desafío para el cumplimiento de los valores límites de las NOM destinados a proteger la salud humana. El perfil diurno de O₃ se caracteriza por alcanzar un valor máximo de las 13:00 a 17:00 h, relacionado con las reacciones fotoquímicas que producen O₃ en presencia de luz solar; mientras que el mínimo fue a las 07:00 h. En la noche (20 a 24 horas), la estación MPA presentó los valores máximos, esto debido a su altura y ubicación, al sur de la ZMCM donde la trayectoria del viento transporta los contaminantes desde la región urbana. Las estaciones con los niveles más altos de O₃ fueron UAX, AJU y CCA, las cuales presentaron los máximos del año, así como un mayor número de horas que superan el límite de 90 ppb (1 h) establecido en la NOM ([Figura 3.10d](#)).

Partículas Suspendidas

Los microplásticos (MP) se pueden considerar partículas atmosféricas y pueden ser parte de la composición de las PM, ya sea como PM₁₀ o PM_{2.5}. Existen muy pocos estudios sobre el alcance y la importancia de los MP en el aire y sobre sus impactos como PM en suspensión en el aire en la salud humana (Sridharan, S. et al., 2021). Un estudio realizado por Akhbarizadeh R., y colaboradores (2021), sobre la relación de las PM_{2.5}, los microplásticos y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), en Irán, muestra que la concentración media de PM_{2.5} fue de 52.8 µg/m³, que se incrementa cuando hay días más contaminados. El nivel medio de MP en PM_{2.5} fue de 5.2 elementos/m³, con niveles más altos en días con mayor contaminación, y confirmó que las PM_{2.5} pueden actuar como portadoras de MP y estos a su vez son portadores de HAP en el aire. La determinación de los MP en la atmósfera es bastante compleja y representa un desafío importante para su identificación y caracterización precisa de los microplásticos, por lo que, se requiere usar métodos de pretratamiento y análisis estandarizados (Santos dos G., et al., 2022).

Shruti, V. C. y colaboradores (2022), realizaron un estudio para identificar la presencia y características de los microplásticos en la Ciudad de México, tomaron las muestras de los filtros de PM₁₀ y PM_{2.5}, en siete estaciones de la Red Manual del SIMAT (LOM, PED, UIZ, MER, SAG, TLA y XAL), encontrando microplásticos en todas las muestras examinada, con concentraciones medias de microplásticos (elementos/m³) de 0.205 ± 0.61 y 110 ± 0.055 en PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente, las fibras fueron la forma predominante (> 75%), y el azul el color más común (>60%), el tamaño que encontraron esta entre 39 y 5,000 µm, con un 66% de MP menores a 500 µm. Los principales polímeros que encontraron fueron: celofán, polietileno, tereftalato de polietileno, poliamida y celulosa (rayón).

Las estaciones de RAMA miden las fracciones de partículas: PM₁₀ (suma de finas y gruesas), PM_{10-2.5} (gruesas) y PM_{2.5} (finas). El promedio anual 2023 en la ZMCM (sitios con suficiencia ≥65 %) para las tres fracciones fue 41 µg/m³ (PM₁₀), 17 µg/m³ (PM_{10-2.5}) y 20 µg/m³ (PM_{2.5}). En la CDMX, los promedios anuales fueron 37, 16 y 20 µg/m³, en PM₁₀, PM_{10-2.5} y PM_{2.5}, respectivamente. El indicador del promedio diario (24 h), en PM₁₀ se obtuvo su máximo de 148 µg/m³ (25 de diciembre, sitio VIF); en PM_{2.5} fue 104 µg/m³ (1 de enero, estación Santiago Acahualtepec-SAC) y PM_{10-2.5}, tuvo un máximo de 59 µg/m³ (24 de febrero, Tlalnepantla-TLA). En 2023 no se registraron valores suficientemente altos de partículas que activaran una contingencia.

La distribución espacial de las PM₁₀ (Figura 3.11a) está relacionada con el tránsito vehicular, actividades agrícolas, erosión del suelo y actividad industrial en el norte, por lo tanto, los valores más altos de PM₁₀ se reportan en las estaciones al norte de la ZMCM, específicamente

las que están ubicadas en EDOMEX, como VIF que tuvo el máximo del promedio anual con $55.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$; así mismo, el sitio Chalco (CHO), al sureste, también obtuvo concentración alta debido a que está cerca de vialidades, áreas agrícolas y suelos descubiertos. Por el contrario, el mínimo anual se presentó en la estación Ajusco Medio (AJM) con $25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las $\text{PM}_{2.5}$ tienen una mayor homogeneidad en su distribución espacial en 2023, debido a su porción de origen secundario (del 45 al 65 %), las estaciones Ajusco Medio (AJM) y Ajusco (AJU), son las que presenta el promedio menor (**Figura 3.12a**). La fracción gruesa $\text{PM}_{10-2.5}$, se puede observar un patrón similar a PM_{10} , ya que tienen composición mayormente primaria, los máximos fueron en los sitios TLA, UIZ y CAM, que cumplieron con suficiencia de datos, mientras que el mínimo se registró en AJM que tiene solo el 9% de composición primaria, esta estación se encuentra al sur de la ZMCM (**Figura 3.13a**).

Las series de tiempo para los tres tamaños de partículas (**Figura 3.11b, 3.12b y 3.13b**), presentaron mayores concentraciones durante la temporada seca, las PM_{10} el promedio mensual más alto se presentó en enero ($54.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) seguido de febrero con $53.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que está asociado a condiciones de estabilidad atmosférica e inversiones térmicas, por otro lado el registro máximo horario fue de $629 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 11 de marzo en la estación Chalco (CHO) el cual, está relacionado con el evento de viento intenso que resuspendido el polvo y junto con el transporte de las partículas ocasionó esos niveles de concentración. La **fracción $\text{PM}_{10-2.5}$** tuvo un promedio mensual máximo en febrero ($26 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido de enero y marzo. En la **fracción $\text{PM}_{2.5}$** , los meses con valores más altos fueron enero, diciembre y mayo con 24.5, 23.7 y $23.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, ocasionado por condiciones meteorológicas que favorecen la formación de contaminantes secundarios, así como condiciones de estabilidad atmosférica e inversiones térmicas que favorecen el estancamiento de las partículas en el invierno. Los niveles de partículas disminuyeron considerablemente durante la temporada de lluvia siendo agosto el mes que registro la media mensual mínima, seguido de julio para las tres fracciones, debido al efecto de lavado atmosférico.

En el promedio mensual, las tres fracciones presentaron valores altos en las temporadas secas (caliente y fría), con los mínimos en la temporada de lluvias; sin embargo, si se compara con los datos históricos (PM_{10} : 1995-2022, $\text{PM}_{2.5}$: 2003-2022 y $\text{PM}_{10-2.5}$: 2012-2022), las PM_{10} y $\text{PM}_{10-2.5}$ cambiaron sus patrones en el mes de diciembre, con decrementos ocasionados por una mayor humedad en el periodo invernal 2023. En las tres fracciones, septiembre tuvo un ligero incremento comparado con la tendencia histórica, debido a la disminución de la precipitación que se espera en este mes, así mismo debido a la onda de calor de gran magnitud en junio, las tres fracciones cambiaron su patrón y se observa un ligero incremento.

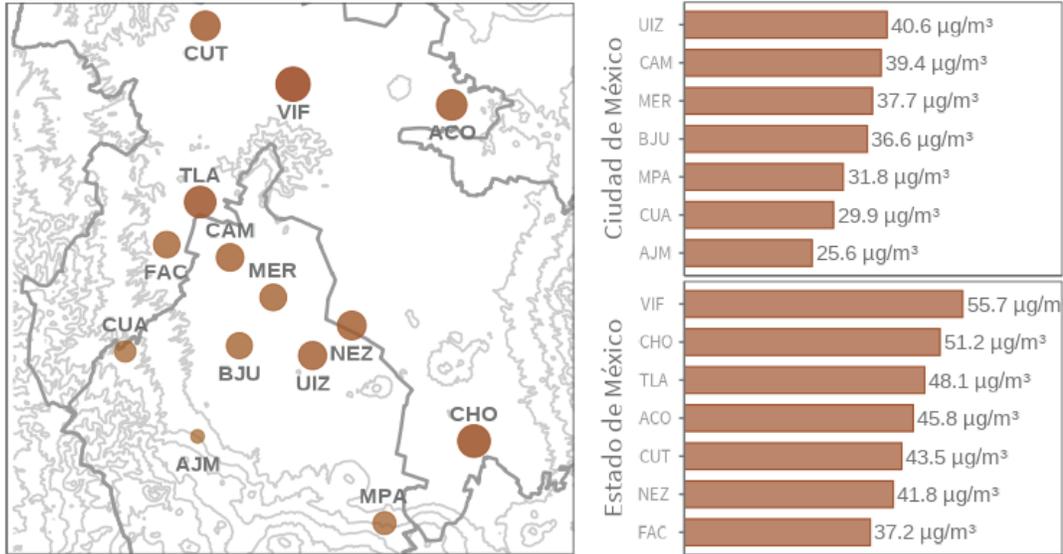
Lo cual muestra como la meteorología afecta directamente el comportamiento de los contaminantes (**Figuras 3.11c, 3.12c y 3.13c**).

Las variaciones horarias (**Figuras 3.11d, 3.12d y 3.13d**) de PM_{10} y $PM_{10-2.5}$ en la mayoría de las estaciones se caracterizó por dos picos de concentración, el primero de las 08:00 a las 10:00 h y el segundo de las 18:00 a 19:00 h. Ambos están influenciados por contribuciones del transporte, como la re-suspensión de polvos y emisiones del escape. En la tarde, se observó un aporte del polvo levantado por el viento, principalmente en la fracción gruesa ($PM_{10-2.5}$), con valores más altos que en la mañana. En las $PM_{2.5}$, el perfil se caracterizó por un pico único de 10:00 a 12:00 h, el cual se asocia con la formación de aerosoles inorgánicos (nitratos, sulfatos) y orgánicos (compuestos con baja presión de vapor con grados de oxidación). En la estación AJM predominó la contribución secundaria, con un pico entre las 13:00 y las 14:00 h. En los sitios que están influenciados por el transporte ocasionado por el viento desde las zonas más contaminadas (p. ej., AJU y MPA), su máximo se presentó durante la tarde, algo que se observó es en la estación UAX en el algunos meses como junio y agosto presentó el máximo a las 19:00 h, y en otros meses a las 18:00 h, lo que hace que su perfil horario presente un incremento de concentración entre as 18:00 y 19:00 h, puede estar influenciado por las condiciones meteorológicas y la distribución de las partículas secundarias que se registran en esa estación.

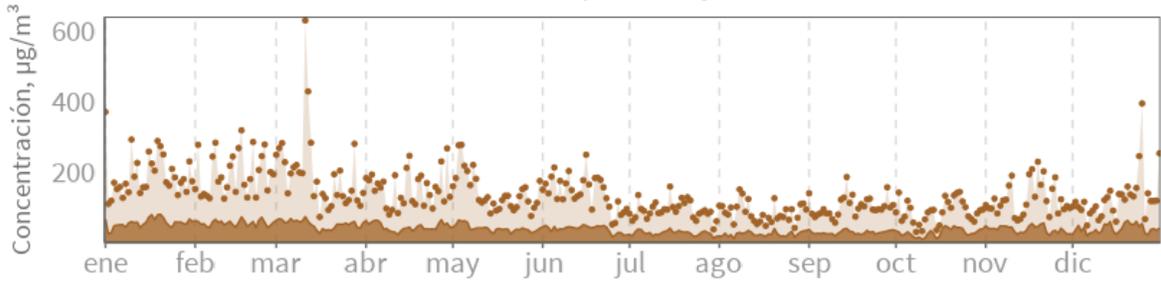
En la **Figura 3.14** se presentan las contribuciones promedio mensual de las fracciones gruesa y fina a la concentración total de PM_{10} para cada una de las estaciones de monitoreo (con una suficiencia $\geq 65\%$). En términos generales, los sitios ubicados al sur de la Ciudad de México tienen una mayor aportación de la fracción fina, mientras que en las estaciones ubicadas al norte (p. ej., Tlalnepantla – TLA), la contribución de la fracción gruesa fue mayor.

PARTÍCULAS MENORES A 10 µm (PM₁₀)

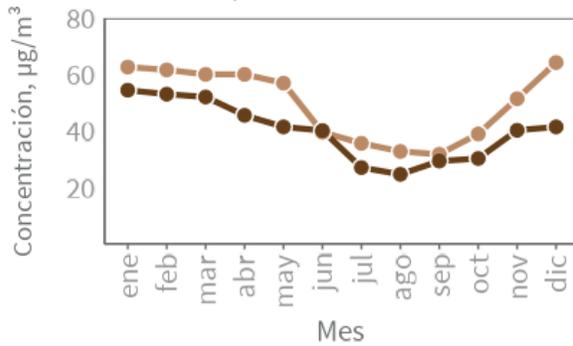
a) Concentración promedio anual



b) Concentración promedio y máxima diaria



c) Promedio mensual



d) Perfil horario

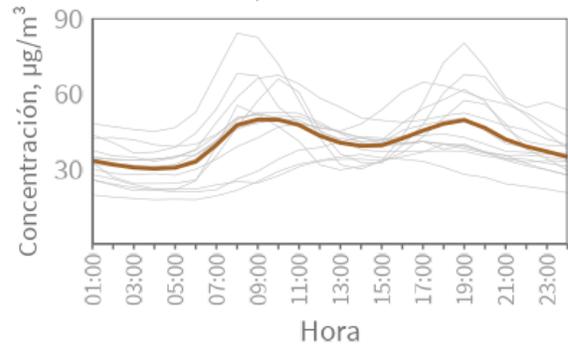
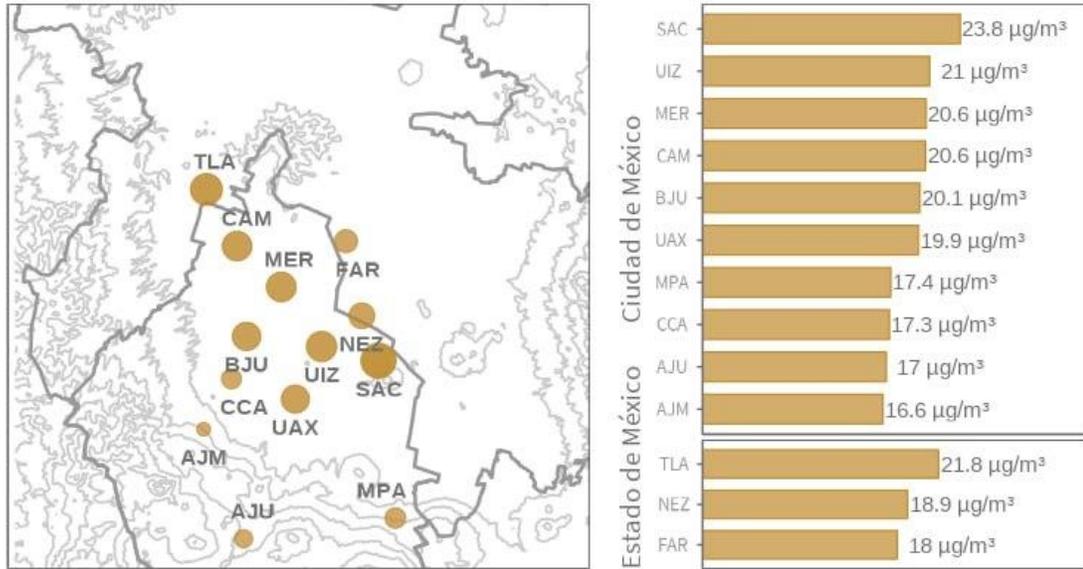


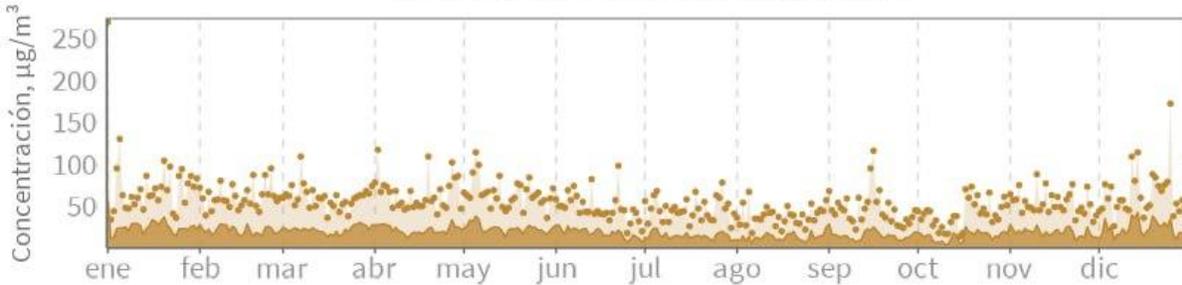
Figura 3.11. a) Promedio anual de PM₁₀ por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. **b)** Serie de tiempo del promedio diario (área en café oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). **c)** Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 1995 a 2022 (línea clara). **d)** Perfil horario del

PARTÍCULAS MENORES A 2.5 μm (PM_{2.5})

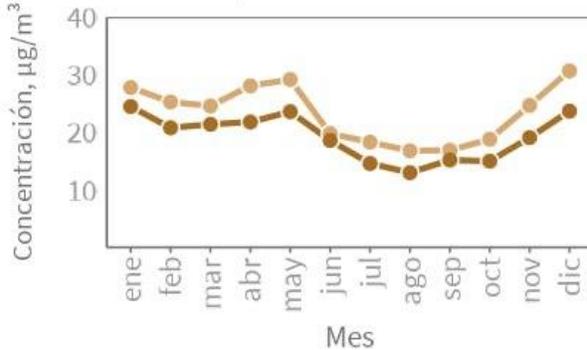
a) Concentración promedio anual



b) Concentración promedio y máxima diaria



c) Promedio mensual



d) Perfil horario

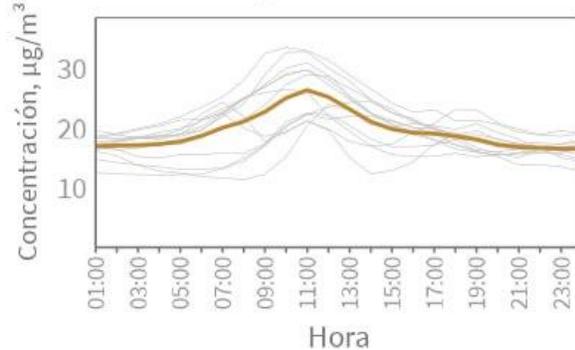


Figura 3.12. a) Promedio anual de PM_{2.5} por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda), el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al promedio anual dividido por entidad. b) Serie de tiempo del promedio diario (área en café oscuro) y el máximo horario por día (puntos y área sombreada clara). c) Promedio mensual del 2023 (línea oscura) y datos históricos de 2003 a 2022 (línea clara). d) Perfil horario del promedio de todas las estaciones (línea café) y por sitio (líneas grises).

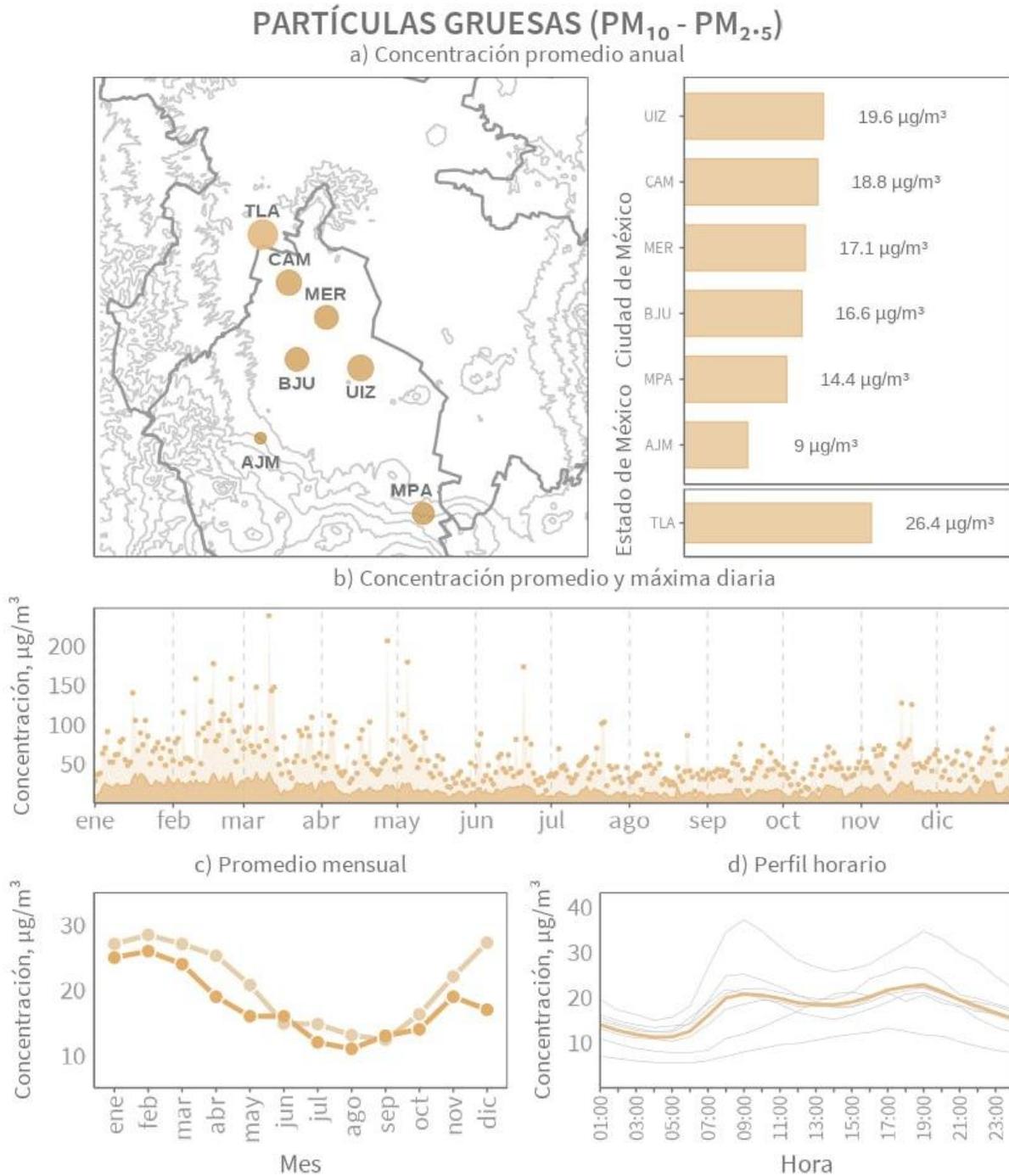


Figura 3.13. a) Promedio anual de PM_{10-2.5} por sitio de monitoreo. En el mapa (izquierda) se presenta la ubicación de la estación, el color y tamaño del círculo son proporcionales a la magnitud del promedio anual y las gráficas de barras (derecha) corresponden al valor del promedio anual dividido por entidad. **b)** La serie de tiempo del promedio diario es el área oscura, los puntos y el área sombreada clara son la concentración horaria máxima por día. **c)** Promedio mensual, la línea clara es el promedio mensual de 2012 a 2022, la línea oscura es el valor del promedio mensual en 2023. **d)** Perfil horario, la línea gruesa es el promedio de todas las estaciones y las líneas grises son el perfil horario por sitio.

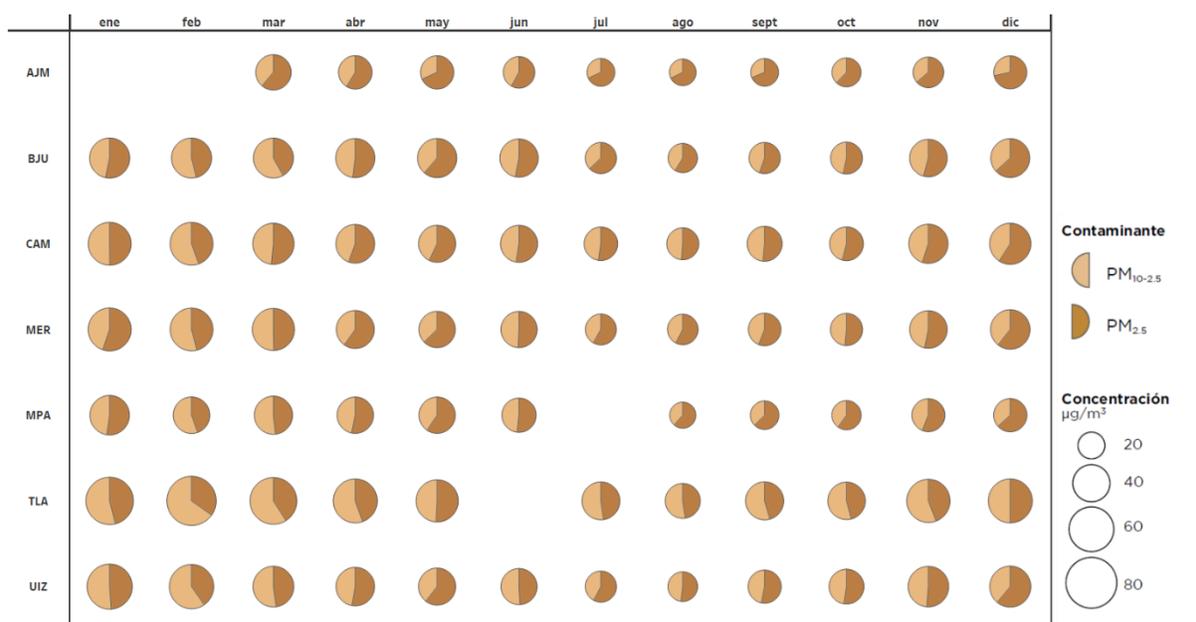


Figura 3.14. Variabilidad mensual de las contribuciones de las fracciones gruesa (PM_{10-2.5}) y fina (PM_{2.5}) a la concentración total de PM₁₀ en las diferentes estaciones de monitoreo de la RAMA.

Microplásticos en la atmósfera

Los microplásticos se han detectado de forma ubicua en el medio ambiente, incluso en todas las facetas del entorno atmosférico, en áreas remotas (Zhang et al., 2019) y a grandes altitudes (Allen et al., 2019). Los microplásticos se han identificado y cuantificado tanto en el aire ambiente interior como exterior, la precipitación de polvo en interiores, la deposición en exteriores, en las carreteras, en la nieve y utilizando diversos bioindicadores. Si bien el número de publicaciones que tratan este tema se ha incrementado recientemente, sigue habiendo muchas lagunas en el conocimiento. Específicamente, los estudios han informado históricamente las concentraciones de microplásticos como un recuento de partículas por muestra de aire (m³), masa (g) o líquido (L), que se pueden convertir en concentraciones basadas en la masa, que cada una se ha limitado a tipos de polímeros específicos y no informa los detalles morfológicos, que son relevantes para determinar el movimiento y el destino en el medio ambiente. El destino atmosférico real, el comportamiento, la transformación y la degradación de los microplásticos en el aire aún requieren mayor investigación (Allen et al., 2020). Este campo requiere atención urgente para aclarar las concentraciones (en particular en las fracciones de menor tamaño), a fin de informar con precisión sobre la exposición humana por ingestión e inhalación. Más allá de la exposición, se requiere la revisión y evaluación sistemática de la toxicidad de las diversas composiciones, tamaños, formas,

características superficiales, estado de degradación y mezclas de plásticos para este contaminante ubicuo, en cada vía de exposición humana, ya que el aire, la deposición y el polvo afectan a todos (O'Brien, S., et al, 2023). El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, en este momento no puede determinar los N-MP, ya que para esto se requiere tecnología específica, protocolos estandarizados para el muestreo y análisis en laboratorio, equipos especiales como espectroscopía FTIR o Raman, que identifican la composición química del plástico (si es polietileno, polipropileno, PET, etc.) y cuentan partículas, los protocolos deben ser muy estrictos para evitar que las muestras se contaminen con fibras plásticas de la ropa o materiales de laboratorio. Un aspecto fundamental, es el costo de las tecnologías de análisis (FTIR/Raman) y contar con personal altamente capacitado, además que actualmente no se cuentan con estándares globales para el monitoreo de microplásticos en el aire, como los que si existen para los gases y partículas de contaminantes criterio.

Tendencia

El monitoreo atmosférico es fundamental para evaluar las tendencias en la calidad del aire, de los contaminantes criterio, ya que proporciona datos científicos confiables que permiten:

- Identificar patrones y tendencias temporales.
- Detecta aumentos, disminuciones o estabilidad en las concentraciones de contaminantes como $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 , SO_2 , CO , PM_{10} .
- Permite comparar datos históricos para evaluar el impacto de políticas ambientales.
- Validar la efectividad de políticas ambientales.
- Proporciona evidencia para ajustar normas y regulaciones (p. ej.: estándares de emisiones vehiculares).

Sin un monitoreo confiable no sería posible, cuantificar el éxito de las medidas ambientales, proteger la salud de la población y sobre todo de la población susceptible y diseñar estrategias basadas en evidencia (OMS, 2021; EEA, 2023).

El análisis de tendencias es importante para estudiar los cambios en la concentración de contaminantes en el tiempo y puede ser usado como evidencia de la eficacia de las políticas ambientales (Lang et al, 2019).

Desde 1990 se han aplicado diferentes programas para reducir emisiones de las diversas fuentes en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), inició con el Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA) en 1990, hasta el último Programa para mejorar la calidad del Aire en el Valle de México (PROAIRE 2021-2030). Se han logrado reducciones importantes en algunos de los contaminantes atmosféricos, principalmente en los primarios como el SO_2 , CO , NO_x y partículas.

En el análisis del porcentaje de cambio en la concentración anual de contaminantes (**Figura 3.15**), se observa que 2020 tuvo reducciones notables en la mayoría de los contaminantes debido a las restricciones de actividades en la pandemia COVID-19, con excepción del O_3 , el cual depende de sus precursores y de la sensibilidad de la atmósfera (COV o NO_x), además de su fuerte correlación con factores meteorológicos, en consecuencia, 2020 presentó un incremento en dicho contaminante. En el 2023, se observó que la mayoría de los contaminantes mantuvieron un comportamiento similar al año 2022, con sus excepciones como el O_3 , el cual, tuvo concentraciones más bajas y esto representó un mayor porcentaje en comparación con 2022, a pesar de la onda de calor de junio los meses de abril y mayo presentaron mejores condiciones meteorológicas que 2022. El promedio anual de CO y NO_x , también presentaron cambios, ya que fue menor que en 2022, por lo tanto, presentó un incremento en estos contaminantes y por eso el porcentaje es menor. Es importante mencionar que no se observan cambios significativos en los niveles de contaminación en los últimos años, lo que podría indicar una condición de equilibrio entre las estrategias de control

y el volumen de emisiones, así como un cambio en la química atmosférica causada por factores meteorológicos.

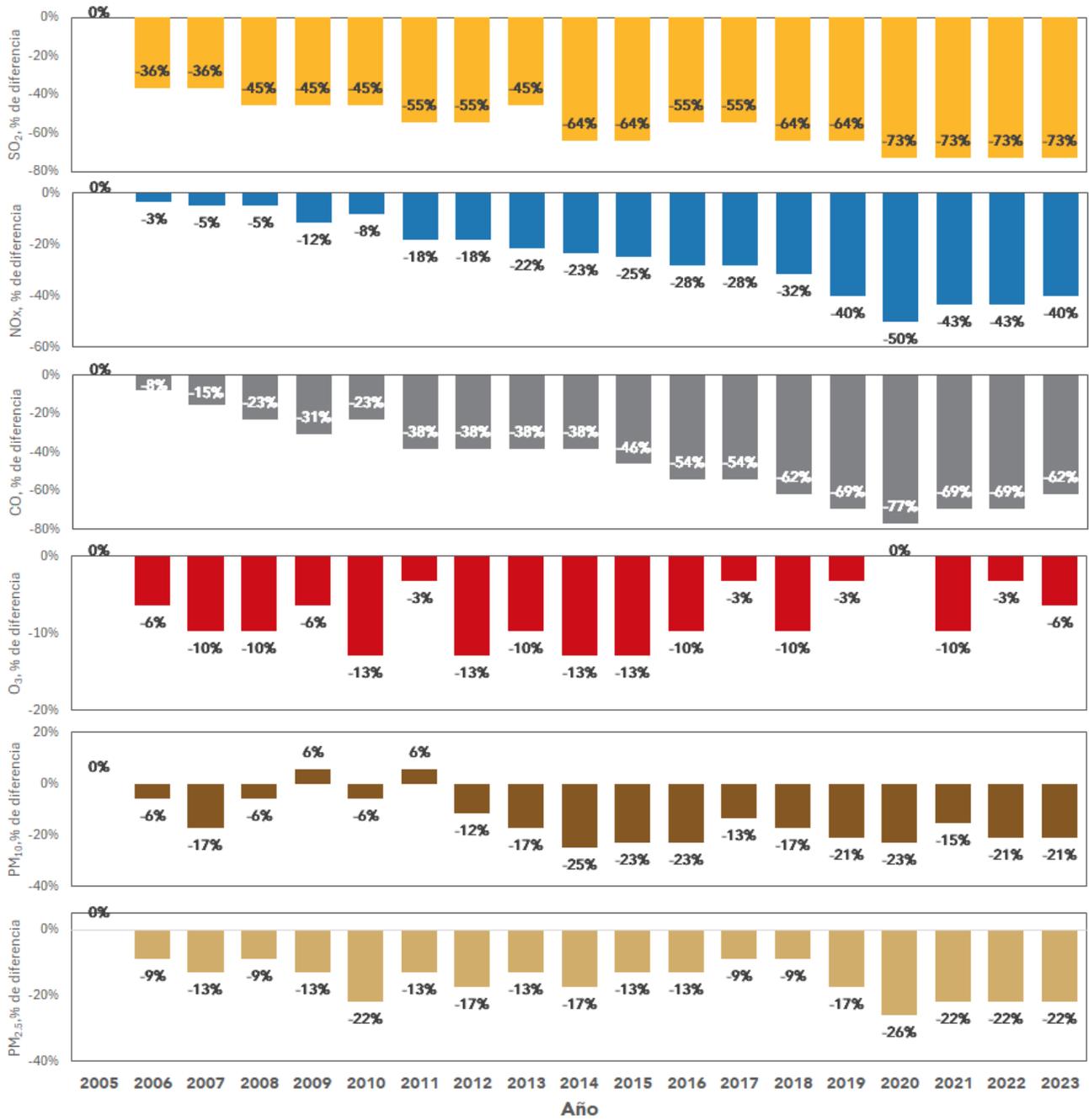


Figura 3.15. Porcentaje de cambio en los promedios anuales (desde 2006 al 2023) con respecto al promedio del 2005 para los principales contaminantes.

En las series de tiempo históricas (**Figuras 3.16 a 3.23**) se presentan los promedios mensuales de cada contaminante desde 1995 al 2023, la desviación estándar y la línea de tendencia que utiliza el método **LOESS**, que es una técnica no paramétrica de regresión ponderada para ajustar una curva suave a través de puntos en un diagrama de dispersión.

En los promedios mensuales se puede observar el comportamiento atípico del 2020 que estuvo influenciado por la pandemia COVID-19 y sus restricciones. En el 2023, los contaminantes SO₂, NO_x, NO₂, CO y PM_{2.5} presentaron decrementos en sus promedios mensuales con respecto al año anterior con un 7 %, 4 %, 3 %, 7 % y 5 % respectivamente, las PM₁₀, tuvieron un mínimo decremento con respecto al año anterior de -0.4%, por el contrario, O₃ y PST presentaron incrementos del 1.2 % y 3.1 % con respecto al año anterior. La línea de ajuste LOESS muestra una tendencia decreciente en la mayoría de los contaminantes, la cual es consistente con la aplicación de medidas para el control de emisiones y los programas de calidad del aire, ya que, desde finales de los noventa, se observan reducciones en la mayoría de los contaminantes.

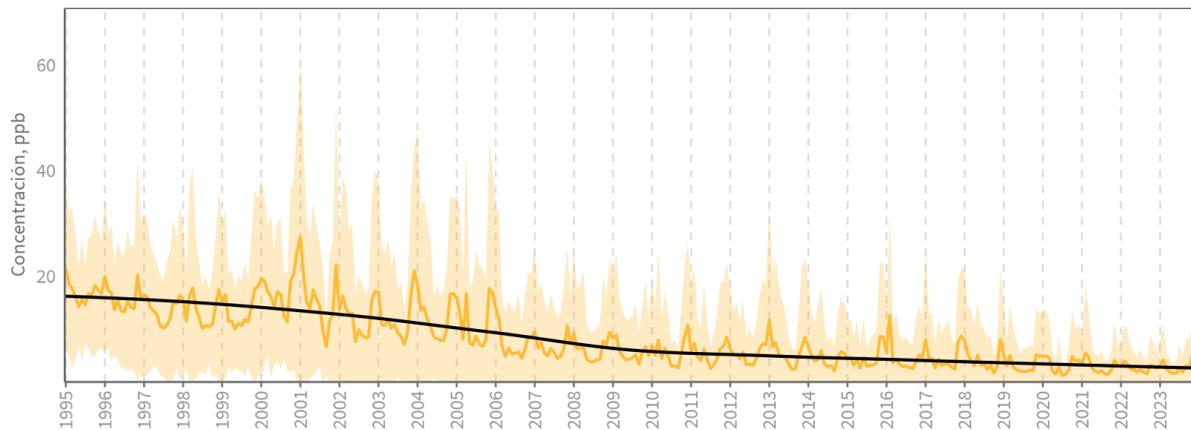


Figura 3.16. Serie de tiempo con promedios mensuales de SO₂ (1995-2023). La línea amarilla es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada amarilla es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

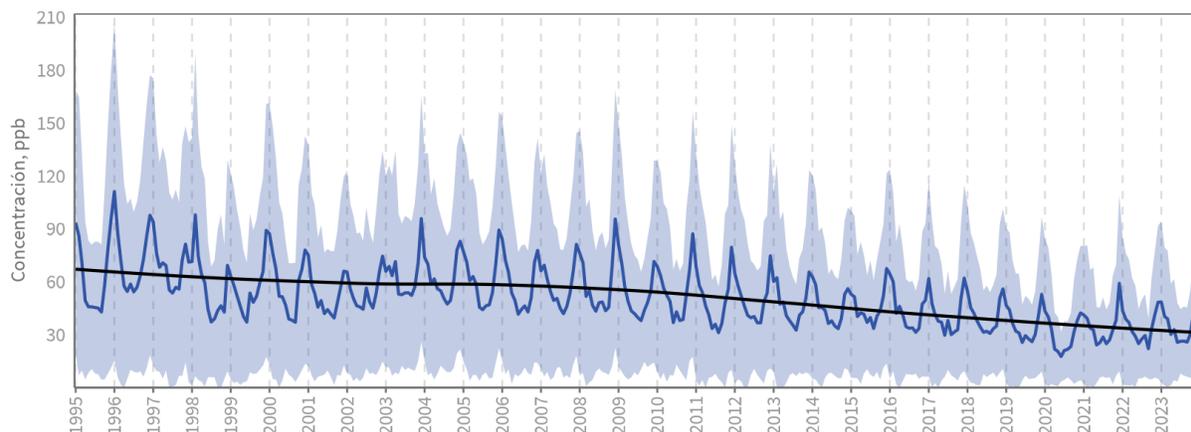


Figura 3.17. Serie de tiempo con promedios mensuales de NO_x (1995-2023). La línea azul es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada azul es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

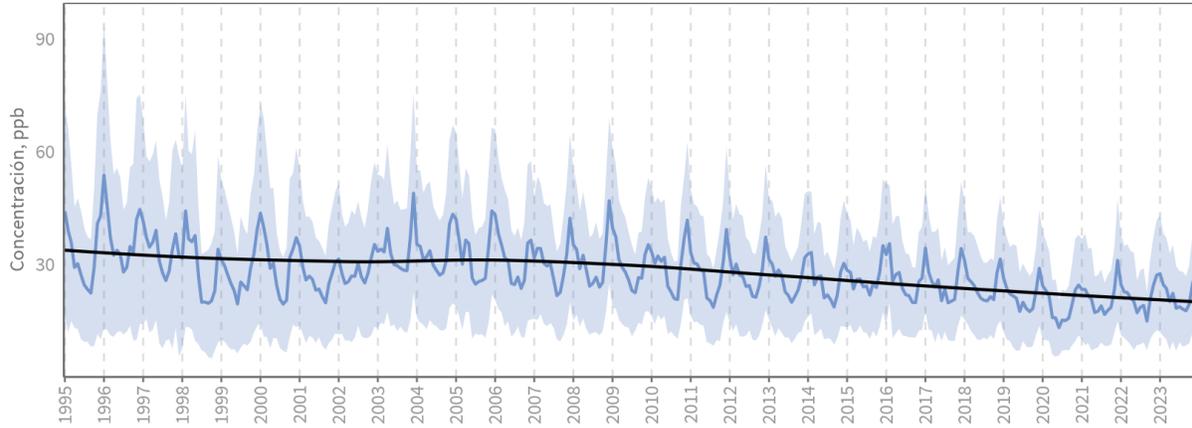


Figura 3.18. Serie de tiempo con promedios mensuales de NO_2 (1995-2023). La línea azul es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada azul es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

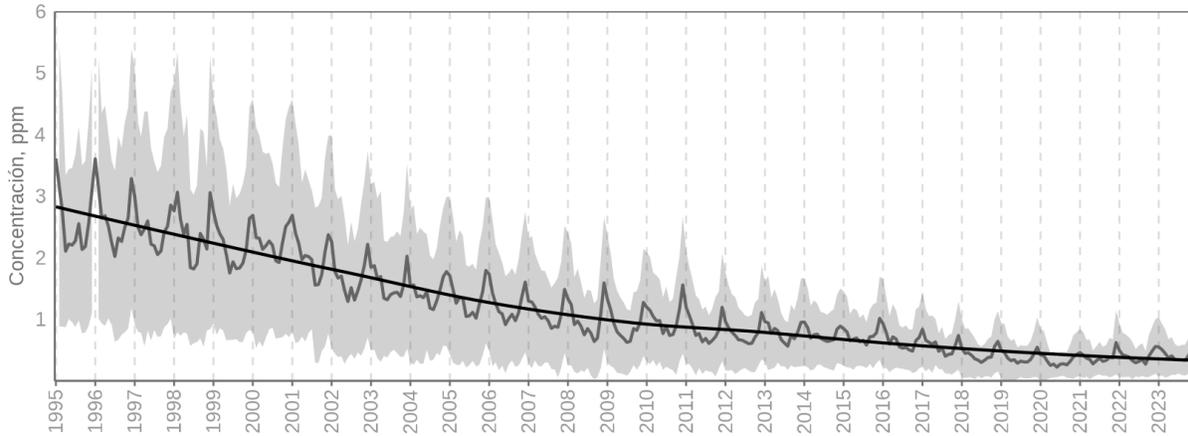


Figura 3.19. Serie de tiempo con promedios mensuales de CO (1995-2023). La línea gris oscuro es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada gris es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

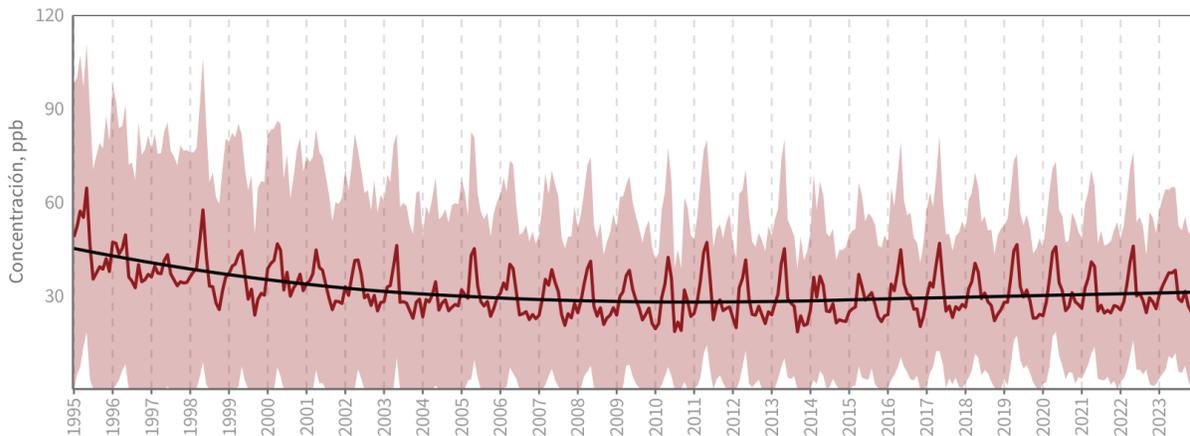


Figura 3.20. Serie de tiempo con promedios mensuales de O_3 (1995-2023). La línea roja es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada roja es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

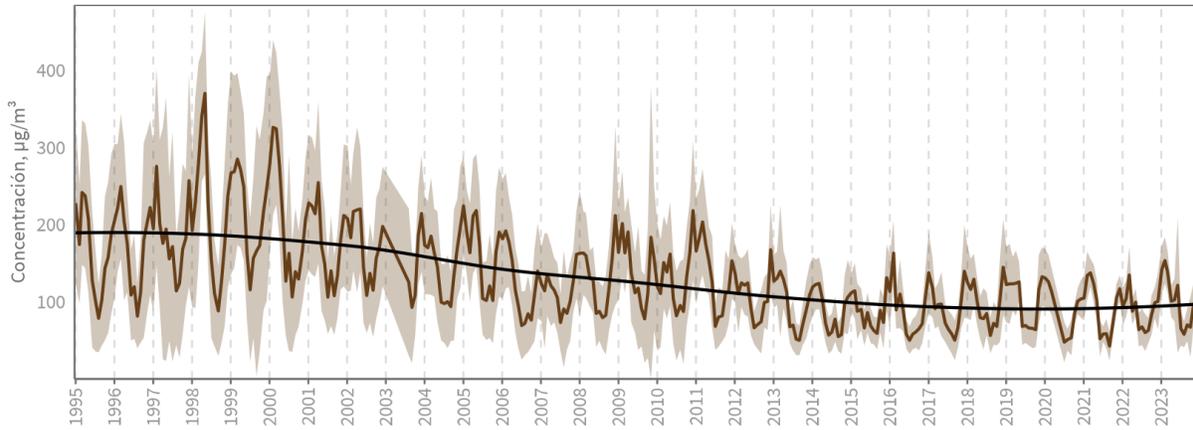


Figura 3.21. Serie de tiempo con promedios mensuales de PST (1995-2023). La línea café es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

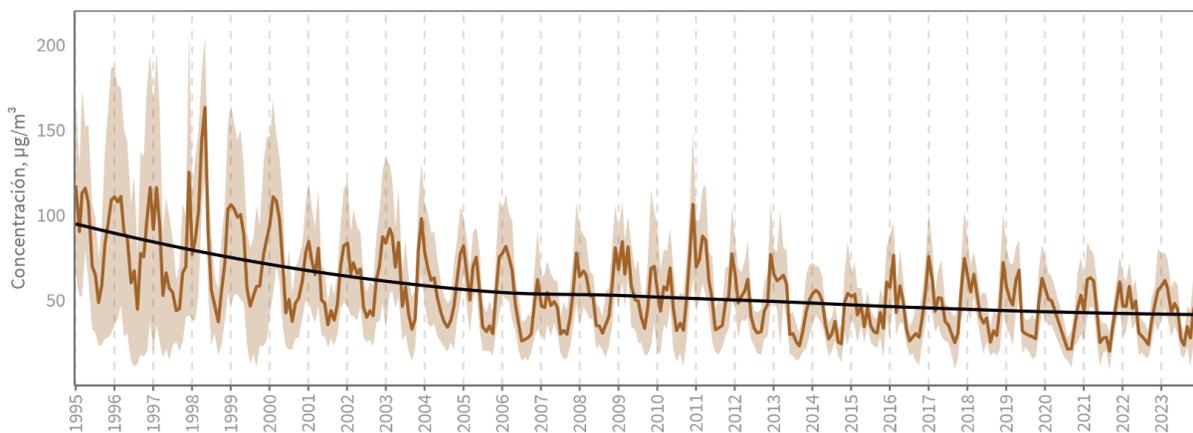


Figura 3.22. Serie de tiempo con promedios mensuales de PM₁₀ (1995-2023). La línea café es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

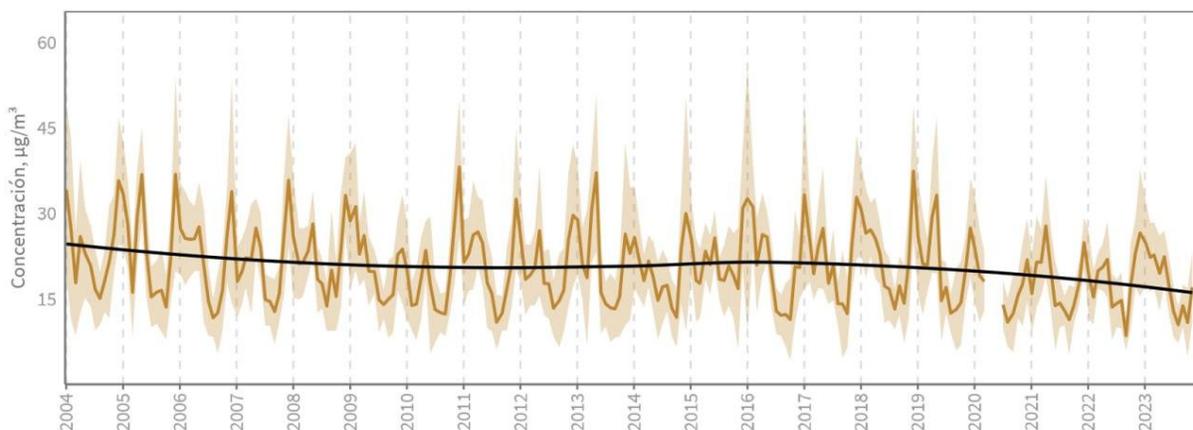
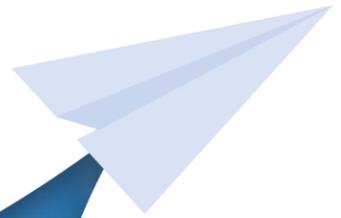


Figura 3.23. Serie de tiempo con promedios mensuales de PM_{2.5} (2004-2023). La línea café es el promedio de todas las estaciones, la región sombreada café es la desviación estándar alrededor del promedio y la línea negra es la tendencia obtenida con el método LOESS.

Índices de calidad del aire



Índices de calidad del aire

A nivel mundial, existen diferentes sistemas de monitoreo para medir la calidad del aire. En algunos países monitorean los **contaminantes criterio**, llamados así porque hay estudios científicos que demuestran que tienen diversos efectos y se les ha establecido un límite de concentración en el que se estima que incrementan los riesgos en la salud humana; este umbral está definido en estándares o normas de calidad del aire. Los contaminantes criterio son: ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), partículas PM₁₀ y PM_{2.5}. En algunos países, el benceno, tolueno y los xilenos también tienen estándares de calidad del aire.

En algunos países, los índices de calidad del aire están relacionados con los límites de las normas o estándares; sin embargo, esto depende de cada sistema de monitoreo o país, por lo que pueden establecer diferentes criterios para asignar la puntuación, escala y color de su Índice de Calidad del Aire.

En México, se implementaron diferentes índices de calidad del aire en algunas entidades del país; en la Ciudad de México se desarrolló desde la década de los 80 y tuvo cambios a través del tiempo (SEDEMA, 2024). Sin embargo, no existía un método homologado a nivel nacional para la obtención de un índice de calidad del aire, por lo que en 2019 se publicó el Índice AIRE y SALUD (IAS) en la NOM-172-SEMARNAT-2019; esta NOM contiene los lineamientos para el cálculo y difusión del IAS, que son aplicables a todas las entidades del país. El objetivo principal de la NOM es homologar y proporcionar un método único para la obtención del índice de calidad del aire en todos los sistemas de monitoreo atmosférico que operan en el país. El IAS representa las concentraciones de los contaminantes atmosféricos de forma sencilla, ya que asigna una categoría de calidad del aire (Buena, Aceptable, Mala, etc.) y un color dentro de una escala definida dentro de la NOM. En cada categoría y rango de concentraciones, se identifican los riesgos y las recomendaciones para la protección de la salud.

El sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), reporta para toda la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), que incluye las 16 alcaldías de la Ciudad de México (CDMX) y los 26 municipios conurbados del Estado de México (EDOMEX). El SIMAT publica el IAS de cada contaminante para las 24 horas del día y todo el año. Además, la ZMCM tiene un sistema de pronóstico de calidad del aire (AQFS-CDMX), el cual estima los niveles de contaminación para las siguientes 24 y 48 horas, con la finalidad de prevenir a la población y que puedan proteger su salud. La información del AQFS-CDMX se utiliza para calcular el Índice

de Riesgo para las Personas Susceptibles¹ (IRPS), el cual es un índice multi contaminante ($O_3 + PM_{2.5} + NO_2$) que se obtiene de forma diaria para la CDMX; el IRPS tiene una metodología de cálculo y escala diferente al IAS; por lo que ambos índices se complementan entre sí. El detalle y desarrollo del IRPS, se puede consultar en el Informe Anual de Calidad del Aire de 2019 (SEDEMA, 2022).

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del SIMAT, tiene 34 sitios de los cuales, solamente 29 reportan el índice AIRE y SALUD, debido a que su objetivo es **“Informar y prevenir a la población sobre los niveles de contaminación en zonas representativas y sus posibles riesgos a través del índice de calidad del aire”**, mientras que las otras cinco estaciones (ACO, INN, MPA, AJU y MON) son consideradas de transporte de contaminantes y están ubicadas en los límites de la zona urbana (**Figura 4.1**)

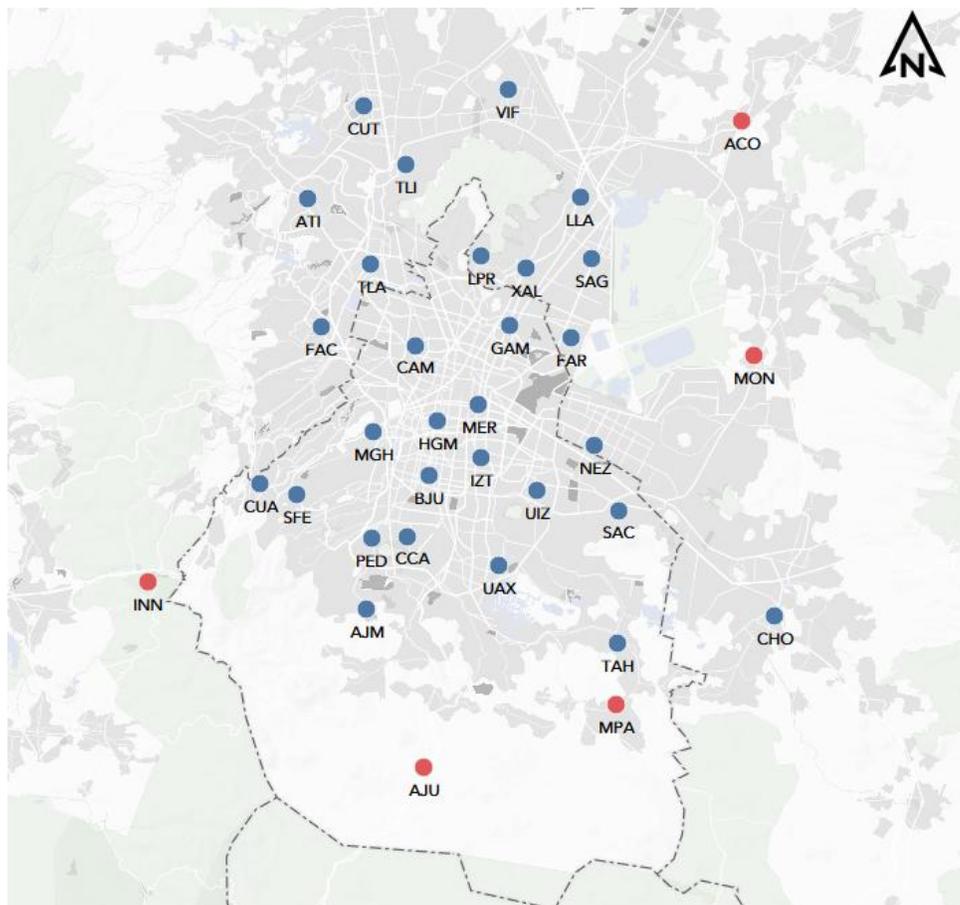


Figura 4.1. Distribución espacial de las estaciones de monitoreo de la RAMA, los puntos azules son los sitios que se utilizan para publicar el índice AIRE y SALUD; los puntos rojos indican las estaciones de transporte de contaminantes y no son usadas para reportar el IAS. La mancha gris es la zona urbana de la ZMCM.

¹ Personas susceptibles se considera a niños, adultos mayores, mujeres embarazadas, y personas con enfermedades respiratorias y/o cardíacas, así como trabajadores activos al aire libre.

Evaluación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud (IAS) en 2023

En el año 2023, los resultados del análisis del Índice AIRE y SALUD en la ZMCM (**Figura 4.2**) considerando los contaminantes: O₃ (1h) + O₃ (8h) + PM₁₀ (m12h*) + PM_{2.5} (m12h*) + NO₂ (1h) + SO₂ (m24h**); se registraron **120 días limpios** que corresponden al **33% del año** y son días dentro de las categorías Buena y Aceptable del IAS, es decir, en los que ningún contaminante superó el valor límite de su NOM. En la comparación con el año 2022, en el que se registraron 126 días limpios; el 2023 obtuvo un decremento del 2% (6 días). En las categorías Mala, Muy Mala y Extremadamente Mala del IAS, se presentó un total de **245 días**; para este conteo se utilizó el valor máximo del día sin distinción de la estación, contaminante o indicador de cálculo, esto debido al carácter preventivo del IAS que busca mantener una situación de alerta en la región.

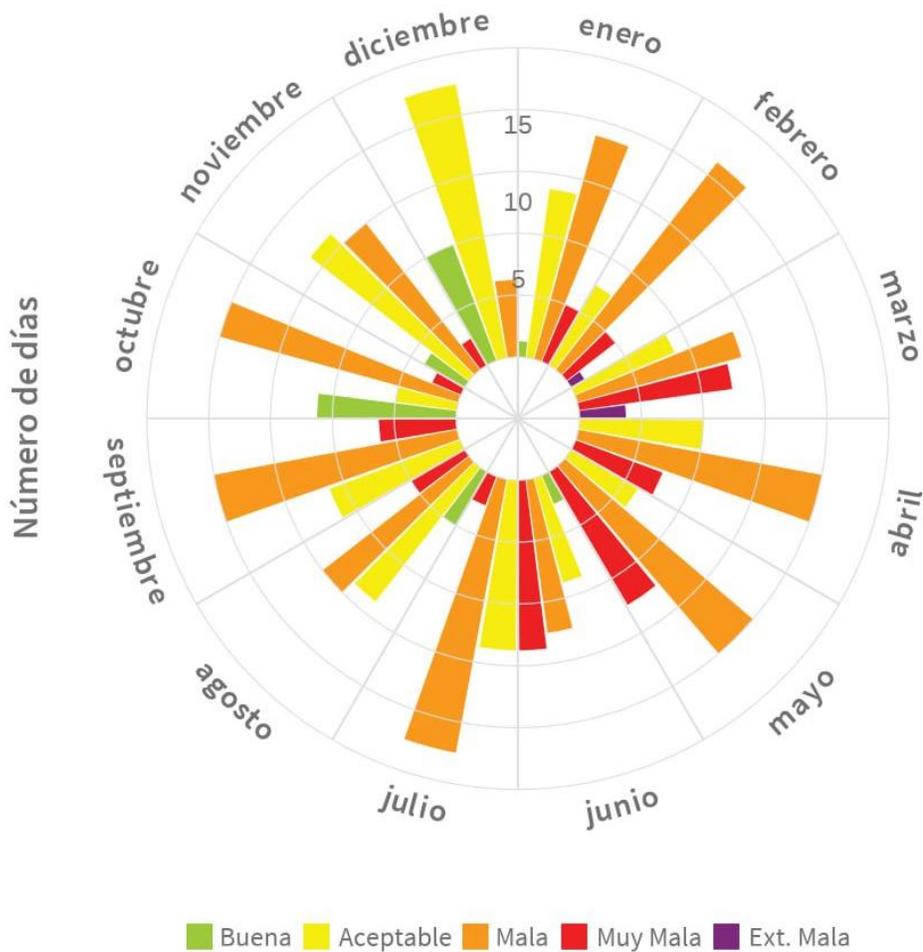


Figura 4.2. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD en el año 2023, considerando todos los contaminantes y estaciones que tienen como objetivo informar el índice.

* promedio ponderado de 12 horas (NowCast)

** promedio móvil de 24 horas

Los 245 días en categorías de Mala a Extremadamente Mala, corresponden a los que, al menos, un contaminante excedió su límite normado. La distribución de estos días fue: 180 en Mala, 61 para la categoría Muy Mala y 4 días en Extremadamente Mala. Esta última categoría, se dividió en un día en febrero y tres en marzo, todos fueron por altas concentraciones de O₃ en su indicador del promedio móvil de 8 h; dos días estuvieron coincidentes con los episodios de contingencias, 23 de febrero y 25 de marzo; mientras que el tercer día en categoría Extremadamente Mala fue el 31 de marzo, que registró alta concentración de O₃ (151 ppb, promedio 1h). En la comparación con el 2022, este año obtuvo menos eventos extremos de contaminación (4 días), ya que el 2022 registró 12 días en Extremadamente Mala.

En el comportamiento mensual del IAS, diciembre tuvo más días limpios (categorías Buena + Aceptable) con un total de 20; seguido de octubre con 17 días; finalmente noviembre y agosto, ambos con 15. Por el contrario, las categorías Mala, Muy Mala y Extremadamente Mala tuvieron más días en los meses de enero y mayo, ambos con 26; marzo obtuvo un total de 24 días; mientras que febrero y junio registraron 23 días cada uno. Las dos categorías más altas (Muy Mala + Extremadamente Mala) se distribuyeron en marzo (13 días) y junio (11 días), ambos meses dentro de la Temporada de ozono; sin embargo, en junio se asoció a la onda de calor, que presentó altas temperaturas atípicas; lo cual se puede consultar en el [capítulo 2](#) de este informe.

Los resultados por contaminante ([Figura 4.3](#)), muestran que el ozono² obtuvo el máximo número de días en las categorías Mala a Extremadamente Mala, con un total de 228; mientras que las PM₁₀ presentaron 82 días y 10 para las PM_{2.5}. Similar al año pasado, en los contaminantes NO₂, CO y SO₂, no se registraron días en categoría Mala. El IAS combinado para el O₃ obtuvo Mala calidad del aire en todos los meses, con más días en mayo y marzo, 26 y 24, respectivamente. El mes con mejor calidad del aire con respecto al O₃ fue diciembre, que solamente presentó 5 días en Mala y tuvo 26 días limpios, es decir, en las categorías Buena + Aceptable ([Figura 4.3a](#)).

El índice de PM_{2.5} obtuvo 355 días limpios (categoría Buena + Aceptable); es importante mencionar que para este conteo se utiliza el promedio de 24h, ya que es el indicador establecido en la NOM-025-SSA1-2021. La categoría Mala se presentó en 6 días de diciembre; durante enero, mayo y septiembre, con un día en cada mes. En la categoría Muy Mala solamente se contabilizó un día, el 1° de enero, correspondiente a la contingencia ocasionada por el uso de pirotecnia en la celebración del año nuevo ([Figura 4.3b](#)).

² El ozono se evalúa con dos indicadores, de 1h y de 8h, por lo que, para el conteo de días, se consideró el indicador que presentó la peor calidad del aire, es decir, la categoría más alta del IAS

El IAS de partículas PM₁₀ (obtenido con el promedio 24 h), alcanzó Mala calidad del aire de enero a junio y de noviembre a diciembre; en junio también se asoció con el fenómeno de la onda de calor. El mayor número de días en las categorías Mala, Muy Mala y Extremadamente Mala ocurrieron en enero con 22, seguido de marzo y febrero con 16 y 15 días, respectivamente; este comportamiento se relacionó con las condiciones de estabilidad atmosférica, mayor frecuencia de inversiones térmicas, incendios y la resuspensión de partículas, ocasionada por fuertes vientos durante febrero y marzo. Los meses más limpios (Buena + Aceptable) se presentaron en la época de lluvias (julio a octubre), ya que ocurre el lavado atmosférico (Figura 4.3c).

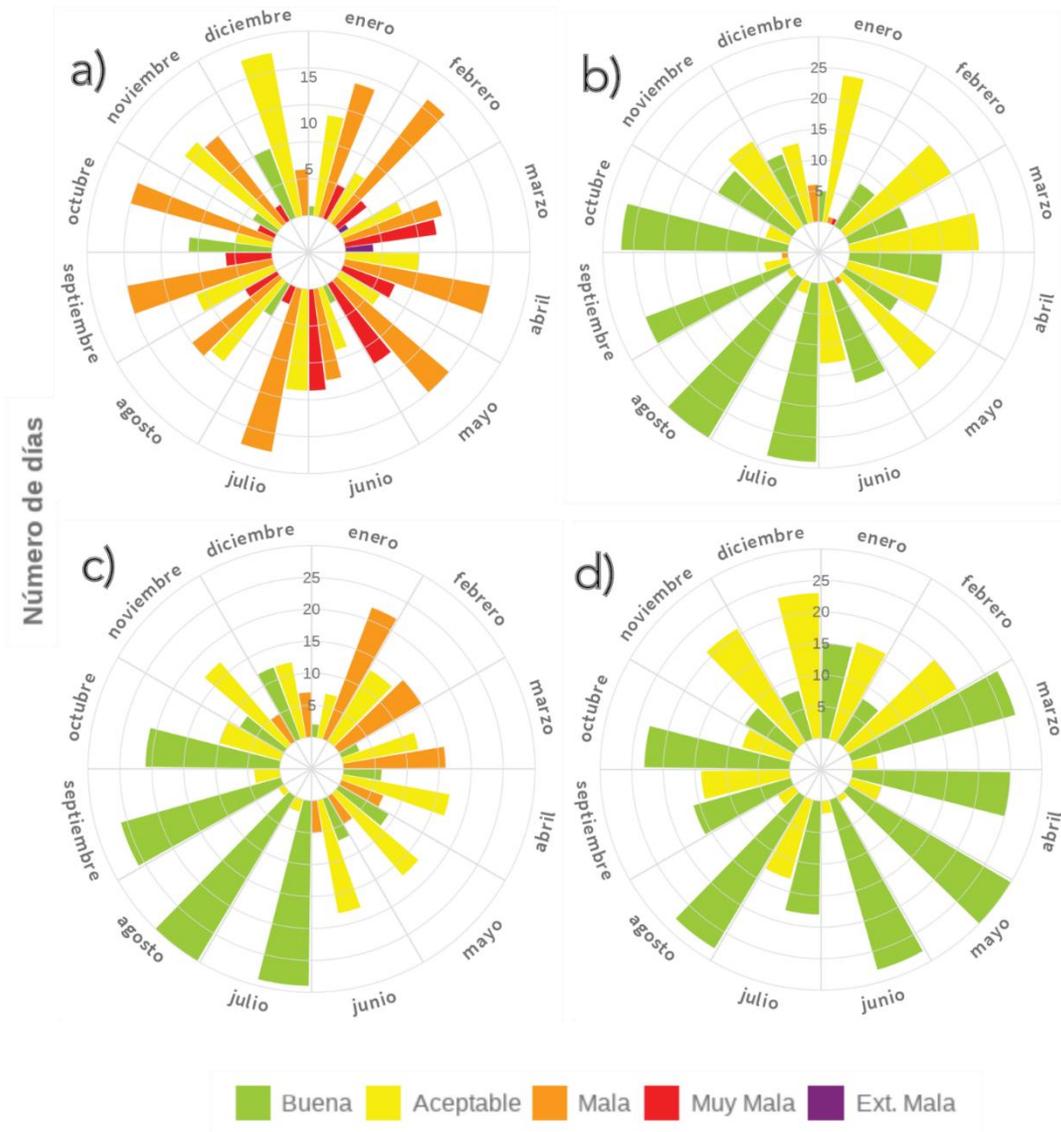


Figura 4.3. Comportamiento del Índice AIRE y SALUD por contaminante: a) O₃, b) PM_{2.5}, c) PM₁₀ y d) SO₂.

Finalmente, el índice para el SO₂, que usa el promedio móvil de 24 h, no obtuvo días en categorías Mala a Extremadamente Mala, es decir, que durante los 365 días del 2023 la calidad del aire fue Buena o Aceptable. El mes con más días en categoría Buena fue mayo con 30; junio y agosto, ambos con 28; marzo con 27 días. En calidad del aire Aceptable, la mayoría de los días fue durante la temporada seca fría (noviembre - febrero) y el mes con más días de esta categoría fue diciembre con 23 (Figura 4.3d).

El análisis del IAS por entidad federativa considerando todos los contaminantes, muestra que la CDMX presentó **137 días limpios** y el EDOMEX obtuvo un total de **174**, esta diferencia de 41 días representa un **23%**. A nivel contaminante, los días sucios de O₃ (categorías Mala a Extremadamente Mala) predominaron en la CDMX en comparación con el EDOMEX; este patrón es congruente con años anteriores y ocurre porque las emisiones de contaminantes precursores en el norte de la ZMCM, comienzan a reaccionar en presencia de luz solar y se genera el O₃, adicionalmente, los vientos predominantes (de norte a sur) transportan el contaminante y se acumula en el sur de la ZMCM, donde hay montañas altas que forman una barrera natural. En las PM₁₀, el EDOMEX presentó **80 días** con categoría Mala, mientras que la CDMX obtuvo **27 días**, esta diferencia está asociada con la resuspensión del suelo ocasionada por el viento, así como por las emisiones de partículas en el EDOMEX. Para las PM_{2.5}, en la CDMX se registraron **9 días** con categoría Mala y **uno** en Muy Mala, el cual fue durante el 1° de enero, ocasionado por el uso de pirotecnia; el EDOMEX presentó **2 días** con Mala calidad del aire por PM_{2.5} (Figura 4.4).

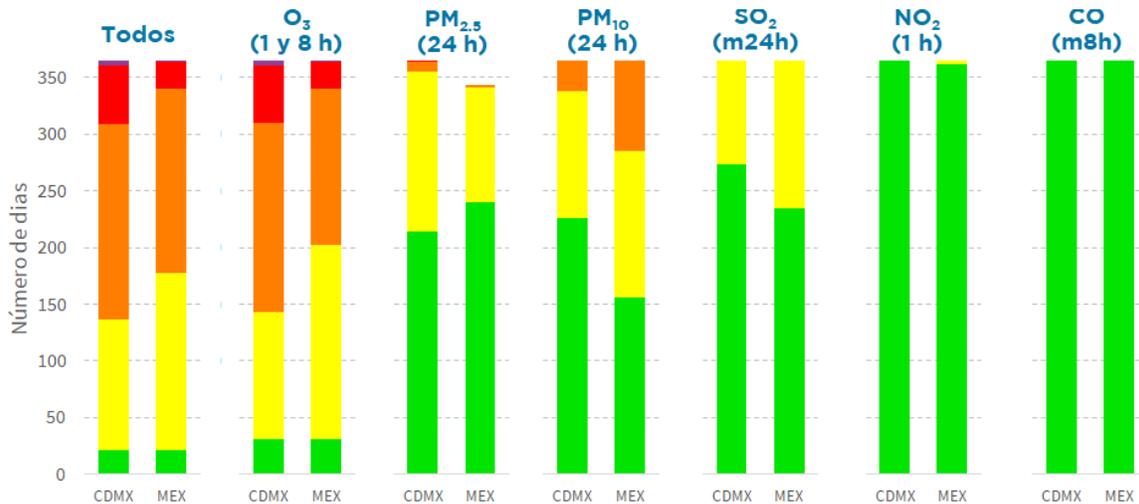


Figura 4.4. Comparación del índice AIRE y SALUD para 2023 por entidad federativa: Ciudad de México (CDMX) y Estado de México (MEX)

En comparación con el año pasado (**Tabla 4.1**), durante 2023, las categorías más altas (Mala a Extremadamente Mala) en O₃ (indicador de 1h) tuvieron un incremento de 12 días (6 %) en la CDMX y de 15 días (13 %) en el EDOMEX, lo cual está relacionado con las condiciones extremas de temperatura y estabilidad atmosférica en la época seca, que se extendió hasta los meses de junio y julio. Las PM₁₀ incrementaron en 11 días (69 %) para la CDMX, especialmente en febrero y marzo, que tuvieron eventos de viento fuerte y resuspensión del suelo; también en abril, que estuvieron relacionados con estabilidad atmosférica. Por el contrario, el EDOMEX tuvo una reducción de 9 días (10 %) en PM₁₀. Para las PM_{2.5} no hubo cambios con respecto al año anterior, ya que ambas entidades obtuvieron el mismo número de días en categoría Mala.

Tabla 4.1. Comparación del número de días con categoría Mala o superior (2022 vs. 2023) por contaminante y entidad federativa

Contaminante	Entidad	Número de días con calidad del aire Mala a Ext. Mala		Diferencia de días (2023-2022)	Porcentaje de cambio (%)	
		2022	2023			
Ozono (O ₃)	CDMX	197	209	12	6	↑
	EDOMEX	119	134	15	13	↑
PM ₁₀	CDMX	16	27	11	69	↑
	EDOMEX	89	80	-9	-10	↓
PM _{2.5}	CDMX	10	10	0	0	—
	EDOMEX	2	2	0	0	—

Evaluación del Índice de Riesgo para personas susceptibles (IRPS) en 2023

El Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (**IRPS**) proporciona un solo valor diario para toda la CDMX y está asociado directamente al riesgo en salud por la exposición a tres contaminantes (promedio 24 h de PM_{2.5}, promedio móvil 8 h de O₃ y promedio horario de NO₂). El IRPS tiene una **escala numérica del 1 a 10+**; donde el 1 corresponde al riesgo **Bajo** y el 10+ es riesgo **Muy alto**. El IRPS se publica desde un día antes con los datos del AQFS-CDMX, esto con la finalidad de que las personas planifiquen sus actividades al aire libre y reduzcan su exposición a la contaminación en el corto plazo. Uno de los objetivos del IRPS es que cada persona pueda definir su nivel dependiendo de su sensibilidad con respecto a la contaminación del aire, es decir, pueden asignarse un valor del IRPS en función del momento en que empiezan a sentir efectos o síntomas, esto con la finalidad de que encuentren el IRPS más acertado a sus características y condición de salud.

En la **Figura 4.5** se puede observar el comportamiento de días por valor del IRPS durante 2023, la mayoría estuvo en riesgo Moderado (IRPS de 4 al 6) con un total de 274 días; para el riesgo Alto (7 a 10 de la escala) fueron 34 días, de los cuales 29 fueron con IRPS = 7 y cinco días en el IRPS = 8.

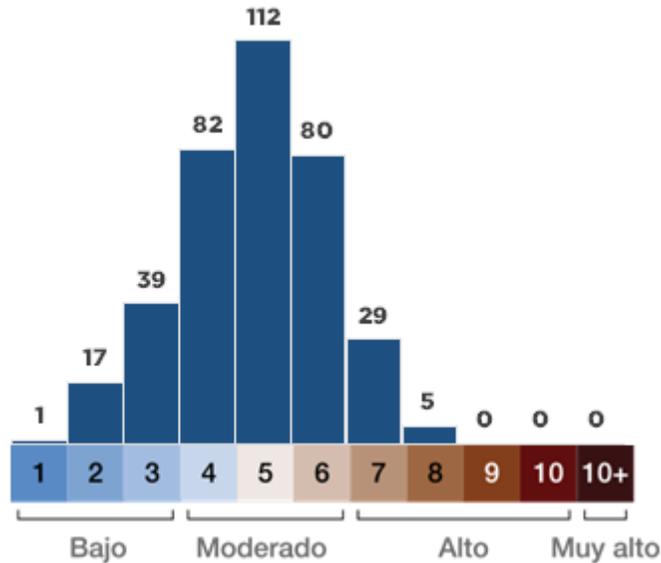


Figura 4.5. Distribución de los días con respecto al valor del índice IRPS para el año 2023

En el análisis mensual, el conteo de días en riesgo Bajo (1 a 3 en la escala) fue en agosto con 11, seguido de octubre y diciembre, con 10 y 9 días, respectivamente. En el riesgo Alto (IRPS de 7 a 10), marzo fue el mes con más días en esta categoría; esto se relaciona con la frecuencia de valores altos durante la temporada de ozono y además, en este mes hubo un evento de contingencia por O_3 (25 al 27 de marzo), lo cual fue detectado por el IRPS ya que durante estos días se obtuvo el máximo del mes con un IRPS de 8, lo cual también se observó el 31 de marzo, que fue otro día con valores altos de ozono. Enero también registró días con riesgo Alto (IRPS 7 a 10) con un total de 6, esto se relaciona con la temporada seca fría que favorece el aumento de $PM_{2.5}$; mayo y junio, presentaron 5 días con riesgo Alto, el caso de junio se relacionó con la onda de calor que favoreció el aumento de O_3 y $PM_{2.5}$.

En la **Figura 4.6** se pueden observar los días de mayor riesgo, con el IRPS más alto durante las últimas semanas de marzo y las primeras de abril, ya que su valor fue de 6 a 8 durante 16 días consecutivos, también se obtuvo IRPS de riesgo Alto durante la primera semana de mayo;

estos días se relacionaron con episodios de alta concentración de ozono, que son frecuentes durante la temporada seca caliente, como fue la contingencia que duró tres días (25 al 27 de marzo). El IRPS también fue alto cuando ocurrió la contingencia del 1° de enero por $PM_{2.5}$, ya que obtuvo un valor de 7; durante ese día, el promedio móvil de 24 h de $PM_{2.5}$ alcanzó un máximo de $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual es casi tres veces el límite de la NOM ($41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio 24 h); por lo que la quema de pirotecnia en los días festivos es un grave problema para la calidad del aire y por lo tanto, la salud de la población.

Este índice es más protector para las personas susceptibles, ya que identifica las concentraciones altas, también detecta las temporadas de ozono y partículas por lo que logra alertar cuando hay un riesgo a la salud. Además, en la época de lluvia o días con buena calidad del aire, permite que las personas susceptibles planifiquen sus actividades al aire libre.

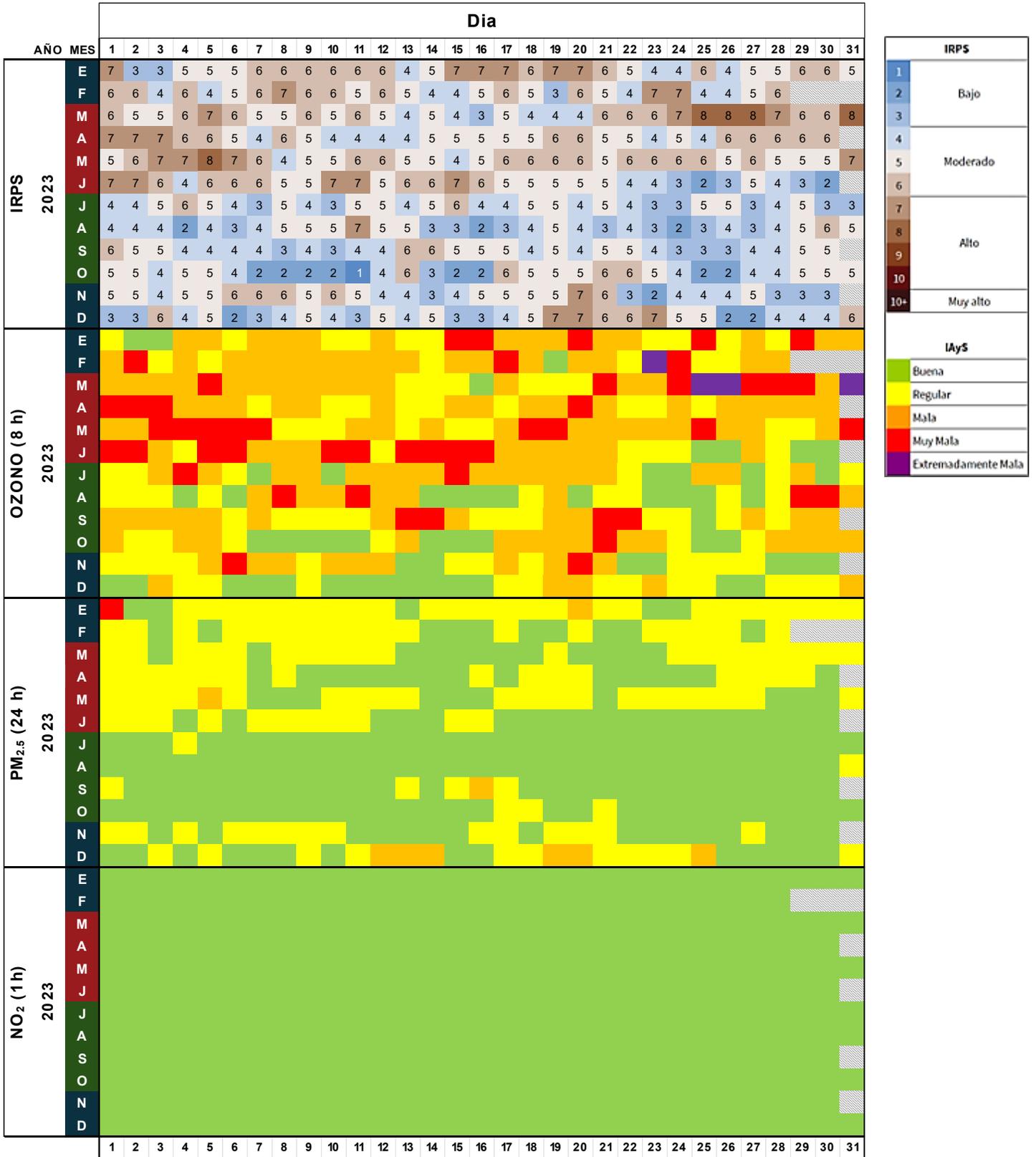
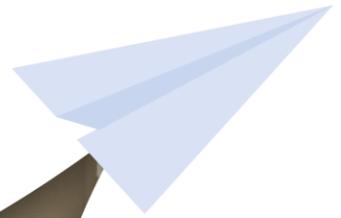


Figura 4.6. Comportamiento del IRPS y comparación con el IAS de O₃ (8 h), PM_{2.5} (24 h) y NO₂ (1 h), durante 2023.

Eventos de alta concentración



Eventos de contingencias atmosféricas en la ZMCM

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se presentan condiciones meteorológicas en ciertos periodos del año que incrementan el riesgo de que ocurran eventos de contingencias atmosféricas. Por ejemplo, en la **temporada seca fría (noviembre a febrero)**, se registran bajas temperaturas, viento débil e inversiones térmicas, que favorecen el estancamiento de los contaminantes, especialmente de partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$), las cuales han alcanzado niveles de contingencia durante las festividades decembrinas (navidad y año nuevo) debido al uso excesivo de pirotecnia y fogatas. Mientras que durante la **temporada seca caliente (marzo a mayo)**, las condiciones cambian y se presentan altas temperaturas, baja humedad en el ambiente, intensa radiación solar, cielos despejados, así como vientos débiles; esto conlleva a mayor generación de ozono (O_3) y, en consecuencia, se alcanzan los niveles de O_3 más altos del año, así como una mayor ocurrencia de sus episodios de contingencia.

Es importante mencionar que los eventos de contingencia son resultado de una combinación específica de factores meteorológicos y de emisiones, lo cual puede ocurrir de forma aleatoria, por lo tanto, son eventos atípicos y difíciles de pronosticar. En la ZMCM se cuenta con un sistema de pronóstico de calidad del aire (**AQFS-CDMX**), el cual es una herramienta para el pronóstico de ozono en la temporada seca caliente y sus episodios de contingencia; el desempeño del AQFS-CDMX se puede consultar en el **capítulo 7** de este informe anual.

En la **Tabla 5.1** se presentan los criterios vigentes en 2023, usados para la activación del Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA), en el cual se especifican las condiciones para cada una de las Fases (preventiva, FI, FII y combinada) por contaminante. Este protocolo es vigente desde mayo del 2019 y la **Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME)**, es la entidad responsable de activar o suspender las contingencias ambientales atmosféricas en la ZMCM; para esta decisión, la CAME utiliza los datos provenientes de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX (SIMAT), así como la revisión de los pronósticos meteorológicos para el día actual y el siguiente; con la finalidad de estimar si las condiciones serán favorables o desfavorables para la dispersión de los contaminantes.

Tabla 5.1. Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) vigente en 2023.

1. FASES PREVENTIVAS

CONTAMINANTE	ACTIVACIÓN	SUSPENSIÓN
Ozono	Pronóstico $O_3 > 142$ ppb Probabilidad de ocurrencia del 70 %.	Al día siguiente (19:00 h) o con la activación de Fase de contingencia.
Partículas	$PM_{10} > 172 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $PM_{2.5} > 81.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Se declarará contingencia regional cuando el valor se registre por lo menos en una estación y una de las cinco regiones de la ZMVM.	$PM_{10} \leq 172 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $PM_{2.5} \leq 81.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Con un pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente o con la activación de Fase de contingencia.

2. FASES DE CONTINGENCIA

CONTINGENCIA	ACTIVACIÓN			SUSPENSIÓN		
	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$	O_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$
FASE I (FI)	> 154 ppb	$> 214 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$> 97.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Concentración menor a la Fase y pronóstico meteorológico favorable para el día siguiente.		
FASE II (FII)	> 204 ppb	$> 354 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$> 150.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$			
FASES COMBINADAS	$O_3 > 154$ ppb + $PM_{10} > 186 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $O_3 > 154$ ppb + $PM_{2.5} > 86.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $O_3 > 142$ ppb + $PM_{10} > 214 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o $O_3 > 142$ ppb + $PM_{2.5} > 97.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$			Concentración menor a la Fase que depende de la combinación de contaminantes y del pronóstico meteorológico para el día siguiente.		

Notas:

- El indicador para ozono es el máximo del promedio horario y en partículas es el máximo del promedio móvil de 24 h.
- El PPRECCA es vigente desde el 29 de mayo del 2019.

Durante 2023 se registraron tres episodios de contingencia (**Figura 5.1**), un evento fue por $PM_{2.5}$ (1 de enero) que se activó con un máximo de $104 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio móvil de 24 h) en la estación Santiago Acahualtepec (SAC) a las 11:00 h. Para ozono, se registraron dos episodios, el 23 de febrero con un valor de activación de 155 ppb (máximo horario) en Ajusco Medio (AJM) y el 25 de marzo, con 161 ppb en FES Acatlán (FAC). El 20 de noviembre también se presentó alta concentración de O_3 , con 158 ppb en la estación Villa de las Flores (VIF); sin embargo, la **CAMe** consideró que se pronosticaban condiciones favorables de dispersión en las siguientes horas y no fue necesaria la activación de la contingencia.

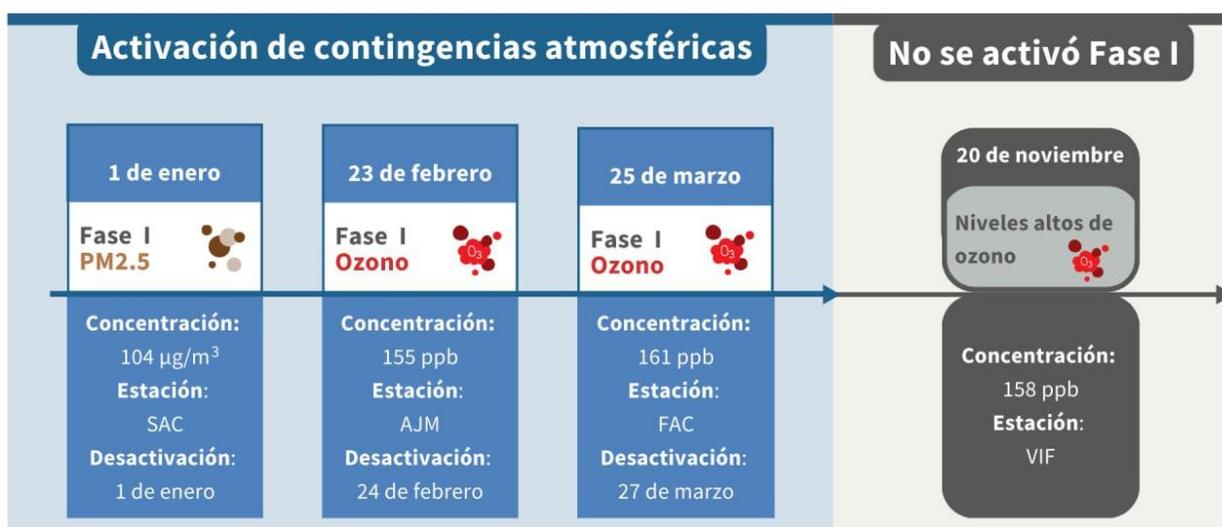


Figura 5.1. Eventos de contingencia atmosférica (azul) y de alta concentración sin contingencia (gris), durante 2023.

En la siguiente sección, se describen las contingencias del 2023, además del episodio del 20 de noviembre. Es importante mencionar que este año hubo menos eventos en comparación con el 2022 que presentó 6 contingencias de O_3 ; lo que puede estar relacionado con la variación de condiciones meteorológicas. Por ejemplo, en la **Figura 5.2** se observa la diferencia de temperaturas durante la temporada seca caliente en 2022 y 2023, donde resalta que fueron más elevadas en 2022 (abril-mayo) y pudo ser uno de los factores que influyeron en la cantidad de contingencias de ese año.



Figura 5.2. Temperatura ambiente promedio (°C) en los meses de seca caliente (marzo-mayo) en 2022 y 2023.

1 de enero: FASE I Regional de PM_{2.5}

El primer episodio de contingencia del 2023 fue por PM_{2.5} durante el 1ro de enero y fue consecuencia del uso de pirotecnia y fogatas en fin de año; esto es común ya que la mayoría de las contingencias por partículas (PM₁₀ o PM_{2.5}) ocurren en navidad y año nuevo. Adicionalmente, de noviembre a febrero es la temporada seca fría, en la que se presentan condiciones meteorológicas que influyen en el estancamiento de contaminantes, como las inversiones térmicas, que son más frecuentes y de mayor duración en este periodo.

Descripción del evento

En la madrugada del 1ro de enero se observó un incremento en PM_{2.5}, con el dato horario y el promedio móvil ponderado de 12 h (**NowCast**), ambos indicadores proporcionan información en **tiempo casi real** y se puede notar el aumento de PM_{2.5} ocasionado por la pirotecnia. El NowCast es utilizado en el Índice AIRE y SALUD (IAS); pero las contingencias se activan con el promedio móvil de 24 h, como aproximación al promedio diario, que está asociado a la norma de partículas (NOM-025-SSA1-2021). El comportamiento de los indicadores de PM_{2.5} (promedio horario, NowCast y promedio móvil de 24h) se presenta en la **Figura 5.3**. Desde las 02:00 h del 1ro de enero, se presentaron máximos de 170 µg/m³ en el promedio horario y 101

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el NowCast, ambos en la estación San Agustín (SAG). A partir de las 03:00 h, los máximos fueron en Santiago Acahualtepec (SAC); sin embargo, varios sitios al oeste de la ZMCM como SAG, Gustavo A. Madero (GAM), FES Aragón (FAR) y Nezahualcóyotl (NEZ); tuvieron concentraciones elevadas de $\text{PM}_{2.5}$. A las 06:00 h, el promedio horario presentó su valor más alto del día, con $269 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el NowCast registró $226 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A las 11:00 h, se presentó el NowCast máximo, con $255 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que el promedio horario fue $257 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En esta misma hora, el promedio móvil de 24 h, obtuvo un valor de $103.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en SAC (Figura 5.4a), que superó el umbral de contingencia ($> 97.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en consecuencia, la CAME emitió el comunicado de activación de la FASE I regional por $\text{PM}_{2.5}$ en el sureste de la ZMCM. Durante el periodo que se registraron los máximos de $\text{PM}_{2.5}$ (05:00 a 11:00 h), también se registró viento débil, que favoreció la acumulación de partículas (Figura 5.4b).

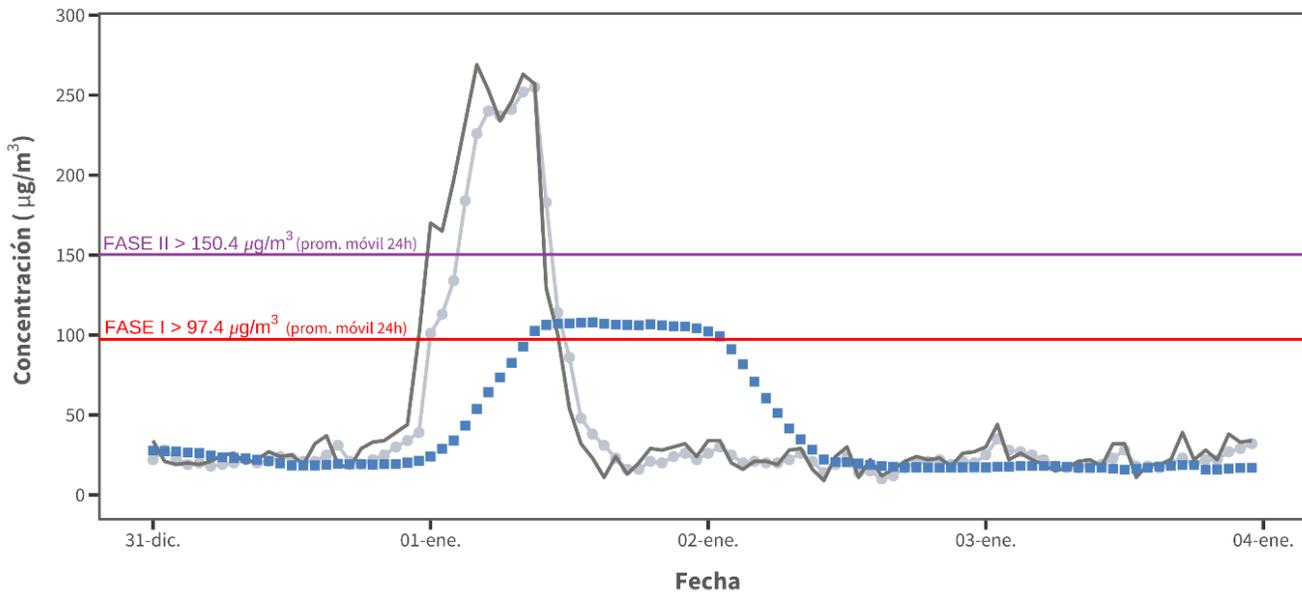


Figura 5.3. Concentración de $\text{PM}_{2.5}$ del 31 de diciembre de 2022 al 3 de enero de 2023: máximo horario (línea gris oscuro), NowCast (línea gris claro) y promedio móvil de 24 h (cuadros azules); este último indicador activa la contingencia. Las líneas horizontales son los umbrales de Fases I y II del PPRECAA.

En la siguiente hora (12:00 h), empezó a descender el promedio horario y NowCast, con 129 y $183 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente; pero el promedio móvil de 24 h incrementó y a medio día alcanzó $107.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A las 15:00 h, SAC registró el máximo del día en el promedio móvil de 24 h, con $108.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$; y la CAME comunicó que la Fase I se mantenía, pero el pronóstico

meteorológico era favorable para la dispersión (CAME, 2023a). El promedio móvil de 24 h se mantuvo con valores superiores al umbral de contingencia en la mayoría del 1ro de enero; sin embargo, la **CAME suspendió la contingencia a las 16:00 h** debido a que las condiciones meteorológicas mejoraron notablemente y hubo mayor dispersión de la contaminación de $PM_{2.5}$.

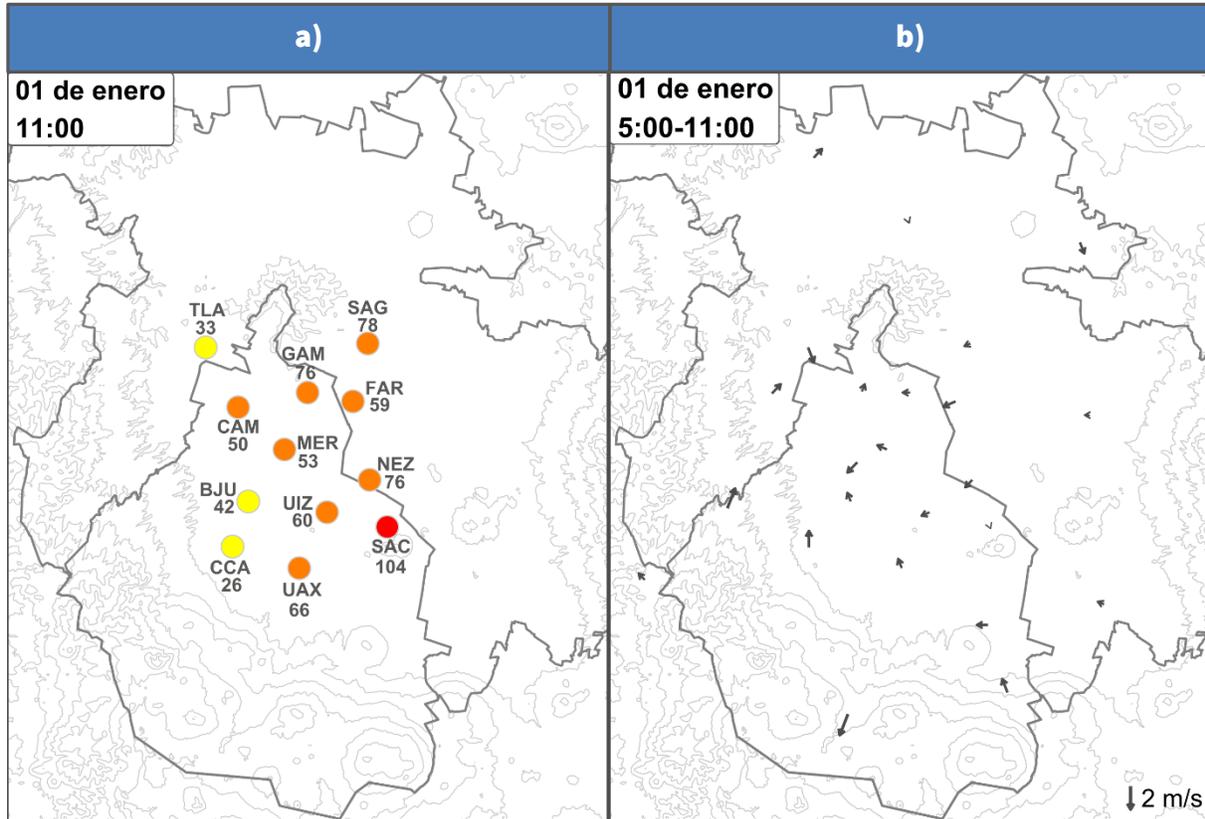


Figura 5.4. a) Máximo del promedio móvil de 24 horas para $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) con su categoría (color) del IAS a las 11:00 h. **b)** Vector promedio del viento durante el 1 de enero entre las 05:00 y 11:00 h.

23 de febrero: FASE I de ozono (O₃)

En la ZMCM, la **temporada de ozono** está definida del **15 de febrero al 15 de junio** de cada año, este periodo presenta características meteorológicas como temperaturas elevadas, cielo despejado, viento débil, alta intensidad solar, entre otros factores; que influyen directamente en la generación de ozono. La primera contingencia de O₃ ocurrió casi al inicio de la temporada, se activó el 23 de febrero en la estación Ajusco Medio (AJM), al suroeste de la ZMCM, y se suspendió al siguiente día (24 de febrero). Este evento fue consecuencia de un sistema de alta presión en el centro de México, el cual ocasionó estabilidad atmosférica con viento débil, poca nubosidad y alta radiación solar. Además, la dirección del viento favoreció la acumulación del O₃ en el suroeste de la ZMCM.

Descripción del evento

En el comportamiento de la concentración de O₃ durante la contingencia (**Figura 5.5 y 5.6**); para el 23 de febrero, se observó que desde las 13:00 h, dos estaciones superaron el límite horario de 90 ppb establecido en la NOM-020-SSA1-2021, con el máximo en 96 ppb en Ajusco Medio (AJM). A las 15:00 h, 18 sitios excedieron el límite normado, con el máximo en AJM, que registró el valor más alto de toda la ZMCM y superó el umbral de contingencia (> 154 ppb) con un máximo de 155 ppb. En este momento **la CAME emitió el comunicado de activación de la contingencia** por ozono (CAME, 2023b) debido a los valores registrados y el pronóstico meteorológico, que indicaba condiciones adversas para la dispersión del contaminante.

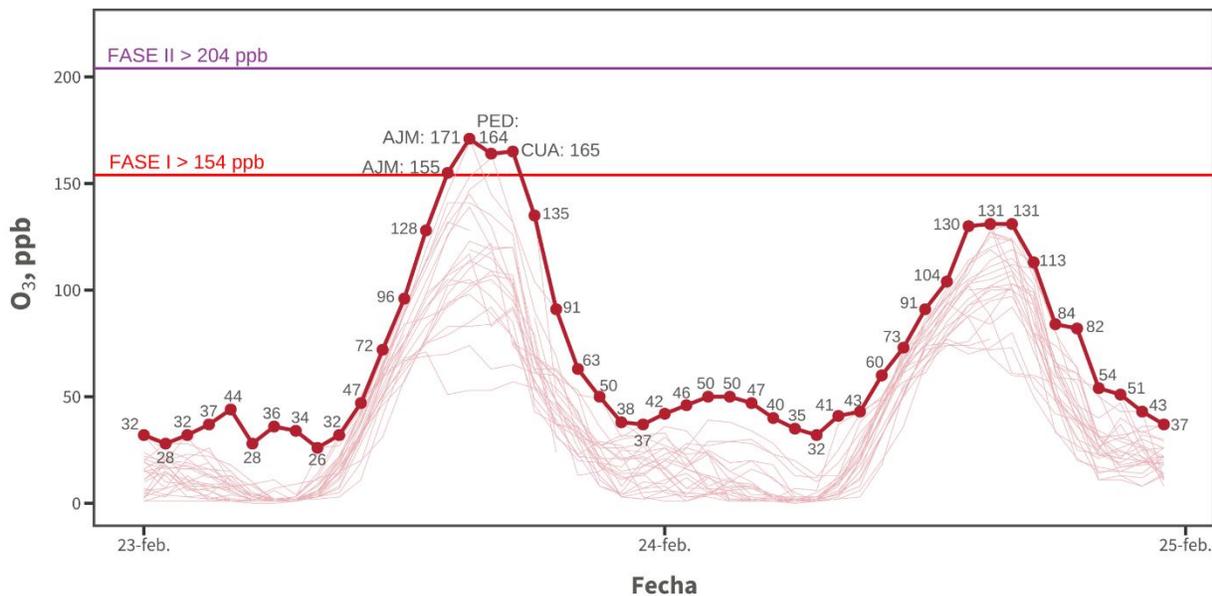


Figura 5.5. Concentración de O₃ del 23 al 24 de febrero de 2023. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son los umbrales de Fases I y II del PPRECAA.



Figura 5.6. Conteo de las estaciones que superaron 90 ppb (NOM, naranja) y 154 ppb (FI, rojo) para el 23 y 24 de febrero.

En la **Figura 5.7a** se presenta la concentración de O₃ durante la hora de activación de la contingencia y se puede observar que el suroeste de la ZMCM fue más afectado ya que presentó los valores más altos, en los sitios AJM, Pedregal (PED), Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y Cuajimalpa (CUA). En el comportamiento de los vientos durante las horas previas a la Fase I (09:00 a 15:00 h), se observó que la dirección del viento fue del norte hacia el suroeste, donde se favoreció la acumulación del O₃ (**Figura 5.7b**).

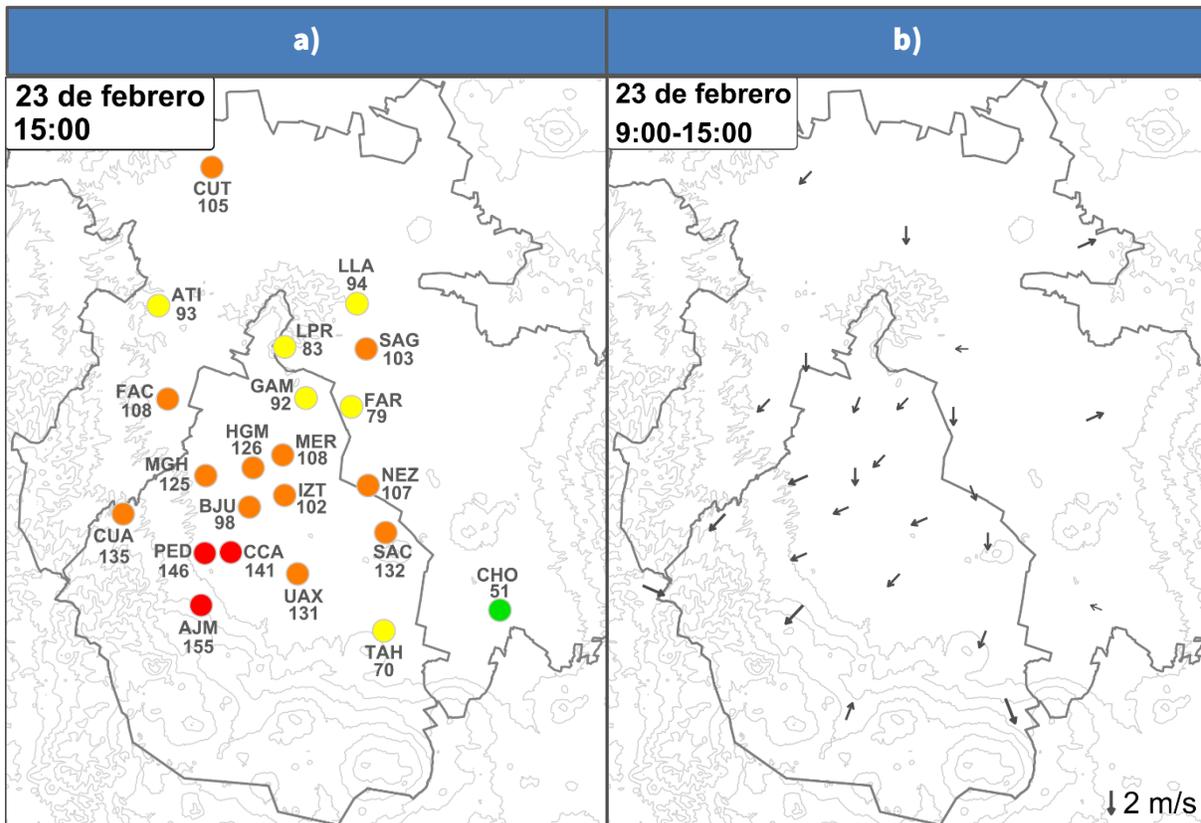


Figura 5.7. a) Máximo de O₃ (ppb) con su categoría (color) del IAS a las 15:00 h. b) Vector promedio del viento del 23 de febrero entre las 09:00 y 15:00 h.

En la siguiente hora, 16:00 h, se presentó el máximo del día, además dos estaciones superaron la Fase I, AJM con 171 ppb y PED con 169 ppb. A las 17:00 h, tres sitios excedían el umbral de contingencia; PED (164 ppb), CUA (162 ppb) y MGH (155 ppb). Para las 18:00 h, CUA registró el dato horario más alto con 165 ppb y en el resto de los sitios, la concentración comenzó a descender gradualmente; sin embargo, 14 estaciones todavía superaban el umbral de la NOM. En la siguiente hora (19:00 h), sólo se registraban valores menores a la Fase I, pero dos sitios todavía excedían el límite normado, con un máximo de 135 ppb en CUA. Finalmente, a las 21:00 h, todas las estaciones presentaron valores menores a la NOM y en el comunicado de la CAME se informó que se mantendría la contingencia para el siguiente día, debido a que el pronóstico meteorológico todavía era poco favorable para la dispersión (CAME, 2023c).

Durante el 24 de febrero, la concentración de ozono incrementó desde las 13:00 h, con un máximo de 91 ppb en PED. Para las 15:00 h, 16 estaciones superaron el límite de la NOM y el valor más alto fue 130 ppb en UAM Xochimilco (UAX). El máximo del día fue 131 ppb y se presentó en dos horas consecutivas, 16:00 (en UAX) y 17:00 h (AJM); adicionalmente, a las 17:00 h, también se registró el mayor número de estaciones que superaron la NOM con 20 sitios.

La concentración de ozono comenzó a descender y a las 18:00 h, el máximo fue 113 ppb en CUA, por lo que la **CAME decidió emitir el comunicado para suspender la contingencia** a esta hora; además, se observó que el sistema de alta presión en el centro del país se debilitó, lo que conllevó a una mayor velocidad del viento que favoreció la dispersión de los contaminantes y también hubo entrada de humedad desde el Pacífico hacia el Valle de México (CAME, 2023d). Finalmente, para las 19:00 h, el valor más alto fue 84 ppb en AJM, por lo que ningún sitio excedió el límite normado.

25 de marzo: FASE I de ozono

La tercera y última contingencia fue dentro de la **temporada de ozono (15 de febrero al 15 de junio)**. Este evento se activó con un máximo de 161 ppb en la estación FES Acatlán (FAC) durante el 25 de marzo, al noroeste de la ZMCM, y se suspendió dos días después (27 de marzo), por lo que fue la contingencia con mayor duración del 2023. Este evento fue consecuencia de la combinación de intensa radiación solar, viento débil y estabilidad atmosférica, provocada por un sistema de alta presión en el centro del país.

Descripción del evento

En el comportamiento de la concentración de O₃ durante este episodio (**Figura 5.8 y 5.9**); el 25 de marzo se registraron máximos superiores a la NOM desde las 12:00 h, en Ajusco Medio (AJM) y Camarones (CAM) con 95 y 93 ppb, respectivamente. En las siguientes horas del día, el sitio FAC presentó los valores más altos de toda la ZMCM; a las 15:00 h su máximo fue 152 ppb y a las 16:00 h superó el umbral de Fase I con 161 ppb, además otras 20 estaciones excedieron el límite normado. En este momento la **CAMe emitió el comunicado de activación de la contingencia** por ozono debido a los datos registrados; además se tenía un pronóstico meteorológico que indicaba condiciones adversas para la dispersión de contaminantes.

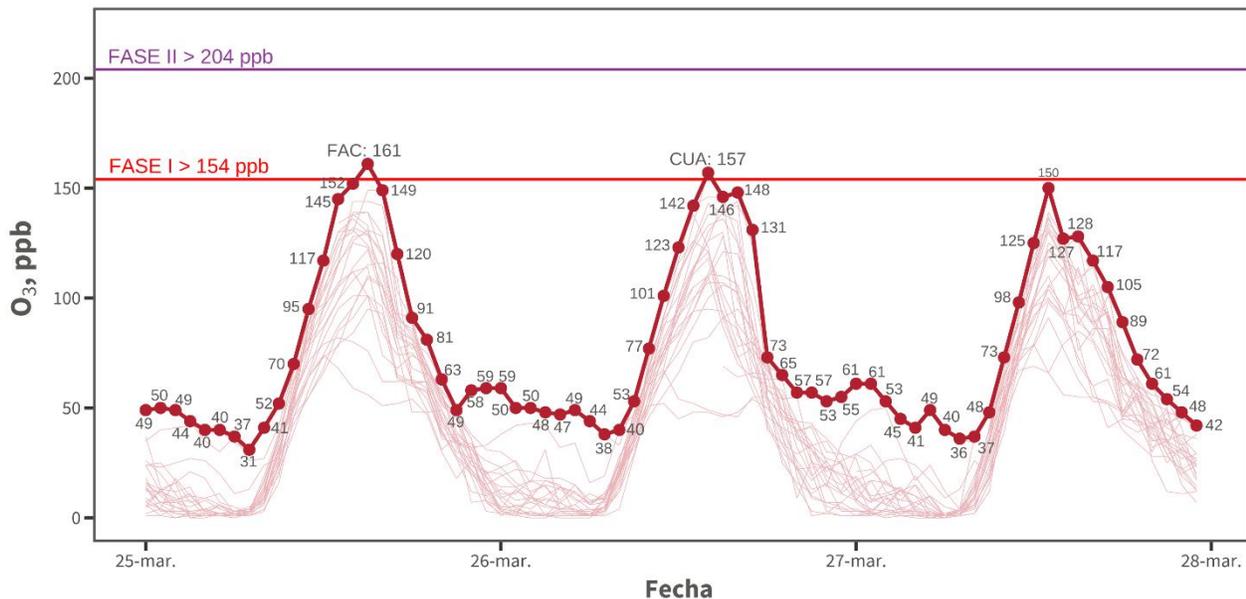


Figura 5.8. Concentración de O₃ del 25 al 27 de marzo de 2023. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son los umbrales de Fases I y II del PPRECAA.

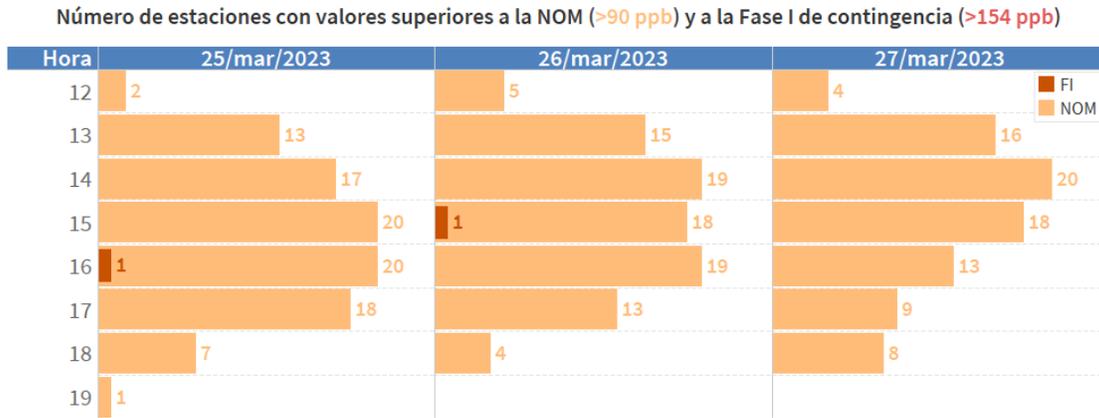


Figura 5.9. Conteo por hora de los sitios que superaron 90 ppb (NOM, naranja) y 154 ppb (FI, rojo) del 25 al 27 de marzo.

En la hora de activación de la contingencia (16:00 h), se observó que el noroeste y centro de la ZMCM presentó las concentraciones más altas (Figura 5.10a), en estaciones como FAC, Tlalnepantla (TLA), CAM, Miguel Hidalgo (MGH) y Hospital General (HGM). El comportamiento de los vientos en las horas previas a la Fase I (10:00 a 16:00 h), presentó un patrón de la dirección del viento del noreste hacia el suroeste y se formaron zonas de confluencia de vientos en el centro-noroeste, donde se registraron los máximos de O₃ (Figura 5.10b).

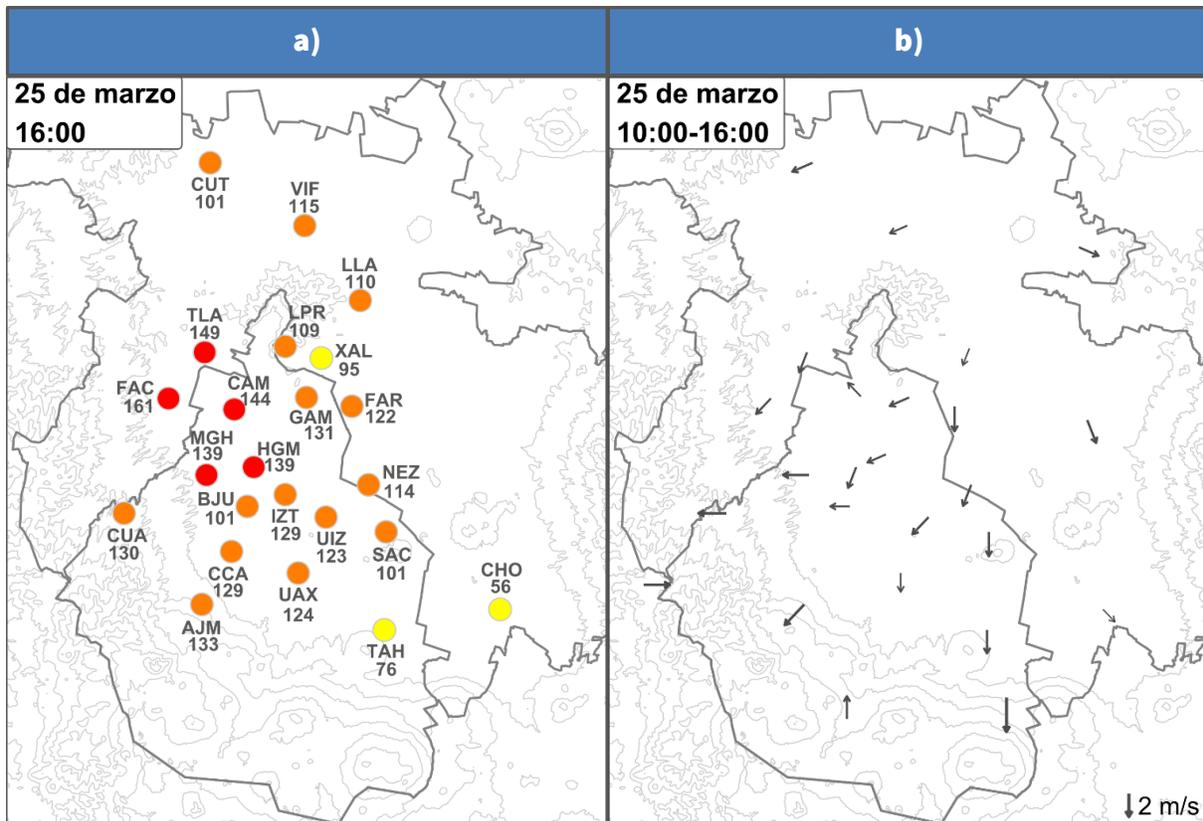


Figura 5.10. a) Máximo de O₃ (ppb) con su categoría (color) del IAS a las 16:00 h. b) Vector promedio del viento del 25 de marzo entre las 10:00 y 16:00 h.

En la siguiente hora, 17:00 h, se registró un máximo de 149 ppb en TLA, seguido de FAC con 148 ppb y un total de 18 sitios excedieron el límite normado. A las 18:00 h, la concentración disminuyó y 7 estaciones tuvieron valores superiores a la NOM, con los máximos en TLA (120 ppb), VIF (109 ppb) y CAM (103 ppb). Para las 19:00 h, HGM registró el valor más alto con 91 ppb y en el resto de los sitios, la concentración fue menor a la NOM; finalmente, en la siguiente hora (20:00 h), todas las estaciones ya presentaron valores debajo del límite normado, con un máximo de 81 ppb en Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA). En el comunicado de la CAME de las 20:00 h, se informó que se mantendría la contingencia para el 26 de marzo, debido a que el pronóstico meteorológico presentaba condiciones adversas para la dispersión (CAME, 2023e).

Durante el 26 de marzo, la concentración de ozono excedió la NOM desde las 12:00 h, con un máximo de 101 ppb en AJM. Para las 14:00 h, 19 estaciones superaron el límite normado y el valor más alto fue 142 ppb en MGH. El máximo del día se presentó a las 15:00 h, con 157 ppb en Cuajimalpa (CUA), con este valor se superó el umbral de Fase I nuevamente y en este momento, otras 18 estaciones superaron la NOM. A esta misma hora, la CAME publicó un comunicado para mantener la contingencia debido a los valores registrados. La concentración comenzó a descender ligeramente en las siguientes horas, para las 16:00 h, el máximo fue 146 ppb en MGH y a las 17:00 h fue 148 ppb en FAC. Para las 18:00 h, el valor más alto fue 131 ppb en CAM con otras 4 estaciones con datos superiores a la NOM. En la siguiente hora (19:00 h), todas las estaciones cumplieron con el límite normado con el máximo de 73 ppb en CCA; en esta misma hora, la CAME emitió un comunicado en el que informó que la contingencia se mantendría ya que se registraron valores de Fase I y el pronóstico meteorológico era poco favorable para la dispersión (CAME, 2023f).

El 27 de marzo, la concentración de O₃ tuvo un comportamiento similar, ya que desde las 12:00 h se superó la NOM en 4 estaciones con un máximo de 98 ppb en UAM Xochimilco (UAX). En las siguientes horas, la concentración incrementó con un máximo de 125 ppb en TLA (13:00 h) y para las 14:00 h, se presentó el máximo del día en Los Laureles (LLA) con 150 ppb, además, otros 19 sitios superaron el límite normado. Después de esta hora, los niveles de O₃ comenzaron a disminuir paulatinamente y a las 15:00 h, se registró un máximo de 127 ppb en HGM y un total de 13 estaciones excedieron la NOM. En este momento, la CAME emitió un comunicado para mantener la contingencia y evaluar las condiciones meteorológicas en el resto del día. A las 17:00 h, 9 sitios superaron el límite normado con un máximo de 117 ppb en UIZ. La concentración continuó en descenso, por lo que la calidad del aire mejoró y para las 19:00 h, todas las estaciones cumplieron con la NOM; finalmente a las 20:00 h, la **CAME emitió el comunicado de suspensión de la contingencia.**

20 de noviembre: Evento de alta concentración de ozono.

El 20 de noviembre se presentó un evento de alta concentración de ozono, en el cual se superó el umbral de contingencia; sin embargo, la CAME no activó la Fase I debido a que las condiciones meteorológicas eran favorables y también el pronóstico de calidad del aire. Este evento se presentó fuera de la temporada de ozono, por lo que se considera atípico y fue resultado de la combinación de alta radiación solar con estabilidad atmosférica que limitó la formación de nubes y ocasionó viento débil; pero en la tarde del mismo día, la velocidad del viento incrementó considerablemente, lo cual favoreció la dispersión del contaminante.

Descripción del evento

En el comportamiento de la concentración de O₃ durante este evento (Figura 5.5 y 5.6), se observó que, para el 20 de noviembre, la concentración de ozono excedió la NOM desde las 12:00 h en la estación Cuajimalpa (CUA), con 91 ppb. En la siguiente hora (13:00 h), se superó el límite normado en 16 sitios, con un máximo de 121 ppb en CUA. La concentración continuó en aumento; para las 14:00 h y 15:00 h, Camarones (CAM) obtuvo los máximos horarios de 147 ppb y 151 ppb, respectivamente; además, en estas horas, un total de 21 estaciones excedieron la NOM. El valor más alto del día se registró a las 17:00 h, en Villa de las Flores (VIF) con 158 ppb, el cual rebasó el umbral de Fase I y otros 10 sitios superaron el límite normado.

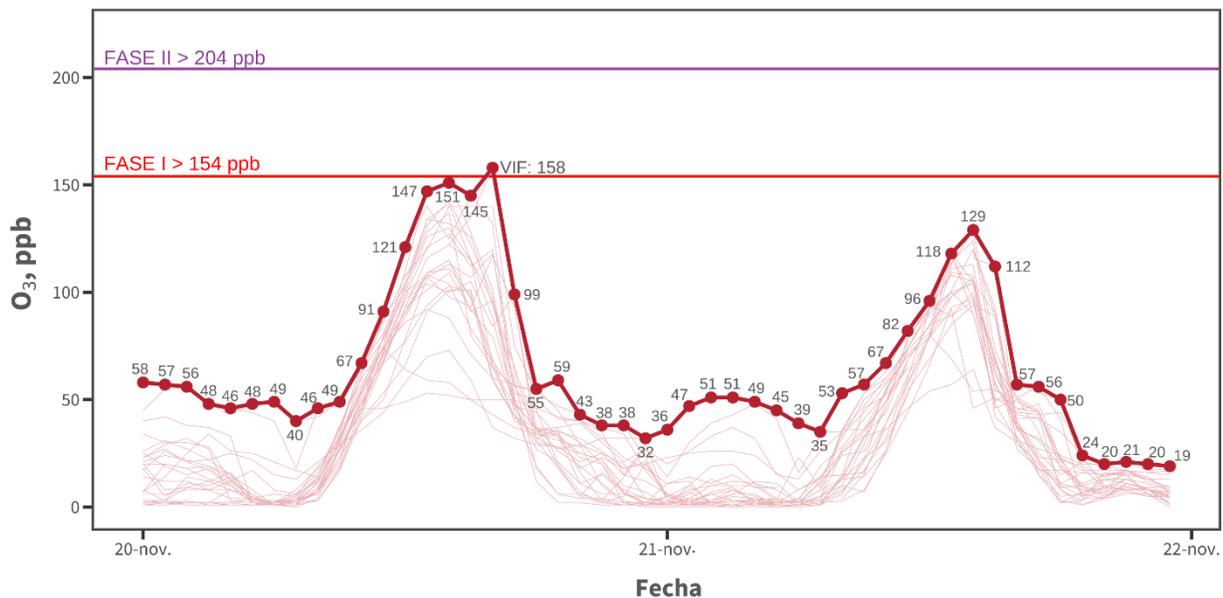


Figura 5.11. Concentración de O₃ del 20 al 21 de noviembre de 2023. Las líneas delgadas corresponden a la concentración horaria por estación y la línea gruesa resalta los máximos por hora. Las líneas horizontales son los umbrales de Fases I y II del PPRECAA.

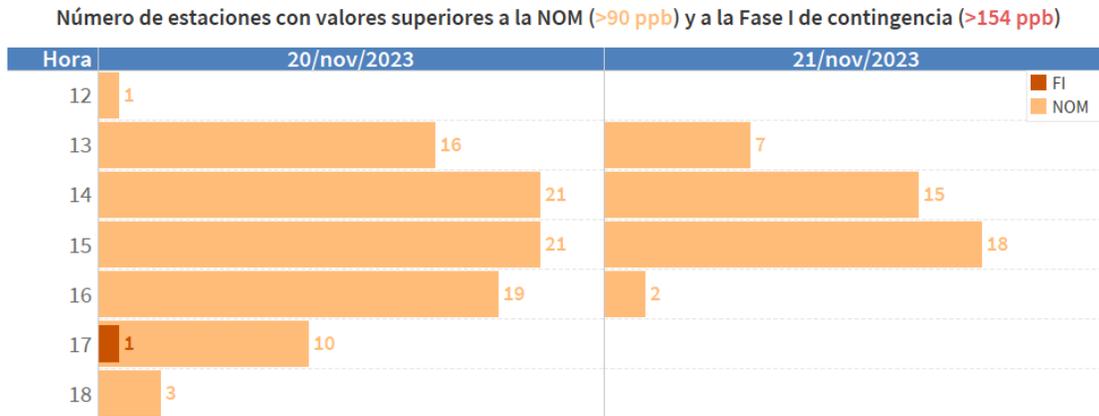


Figura 5.12. Conteo por hora de los sitios que superaron 90 ppb (NOM, naranja) y 154 ppb (FI, rojo) del 20 al 21 de noviembre.

A las 17:00 h, las concentraciones más elevadas fueron en VIF (158 ppb), seguida de AJM (140 ppb), además de otras estaciones como Cuajimalpa (CUA) y FES Acatlán (FAC) con 132 y 120 ppb, respectivamente. En el comportamiento de los vientos antes del máximo de O₃ (11:00 a 17:00 h), se observó un patrón variable en la dirección del viento, con algunas zonas de confluencia de vientos en el norte, oeste y sur, donde se presentaron valores altos de O₃ (Figura 5.13b).

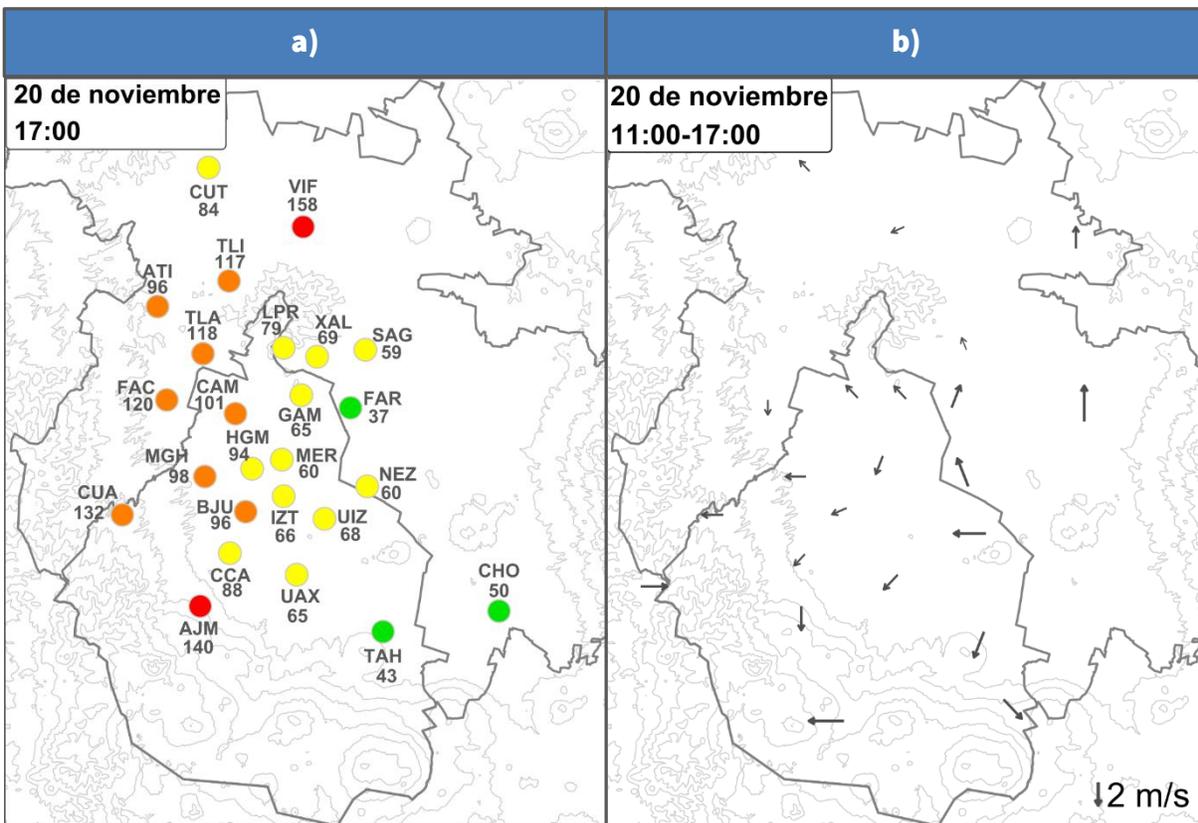


Figura 5.13. a) Máximo de O₃ (ppb) con su categoría (color) del IAS a las 17:00 h. b) Vector promedio del viento del 20 de noviembre entre las 11:00 y 17:00 h.

A las 18:00 h, la concentración disminuyó considerablemente debido a una mayor velocidad del viento y sólo 3 sitios superaron la NOM, con un máximo de 99 ppb en Cuautitlán (CUT). Para la siguiente hora, 19:00 h, se registró un máximo de 55 ppb en la estación UAM Xochimilco (UAX), por lo que todos los sitios cumplieron con el límite normado.

Debido a esta rápida disminución de los niveles de O₃, la CAME consideró que **no ameritaba la activación de la Fase I** de contingencia, ya que las condiciones meteorológicas durante el 20 de noviembre; así como el análisis del pronóstico y de modelos de calidad del aire para el siguiente día, indicaban mejores condiciones para la dispersión de los contaminantes. La CAME publicó una nota informativa que explicaba el descenso del ozono, así como la decisión de no activar la contingencia, de acuerdo con lo que establece el PPREECAA de la ZMVM (CAME, 2023g).

Al siguiente día, el 21 de noviembre, la concentración excedió la NOM desde las 13:00 h en 7 estaciones con un máximo de 96 ppb en el sitio Nezahualcóyotl (NEZ). La concentración más alta del día, se alcanzó a las 15:00 h con 129 ppb en Hospital General (HGM), además otras 17 estaciones superaron la NOM. Después de esta hora, la concentración disminuyó y sólo dos sitios excedieron el límite normado, con un máximo de 112 ppb en Tlalnepantla (TLA) y finalmente, a las 17:00 h, todas las estaciones cumplieron con la NOM.

Depósito Atmosférico



El depósito atmosférico y lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Microplásticos en el depósito atmosférico

Los microplásticos (MP) en la atmósfera fueron identificados a través de los estudios de depósito atmosférico, estos análisis han establecido las bases para entender el transporte global y los impactos de los MP. Es un problema global y ya forman parte del ciclo atmosférico del planeta, la deposición de los MP contribuye a la contaminación incluso en áreas protegidas. Gracias a estos estudios, se encontró que los MP viajan largas distancias por el aire y que provienen principalmente de fuentes urbanas, océanos y suelos erosionados, se depositan en todo el planeta, incluso en zonas remotas, las fibras textiles, los fragmentos de PET y polietileno, son los más comunes, la deposición seca es más relevante en entornos urbanos, sin embargo, la lluvia y la nieve son un mecanismo clave de deposición (Dris et al., 2015; Allen et al., 2019; Bergmann et al., 2019 y Brahney et al., 2020).

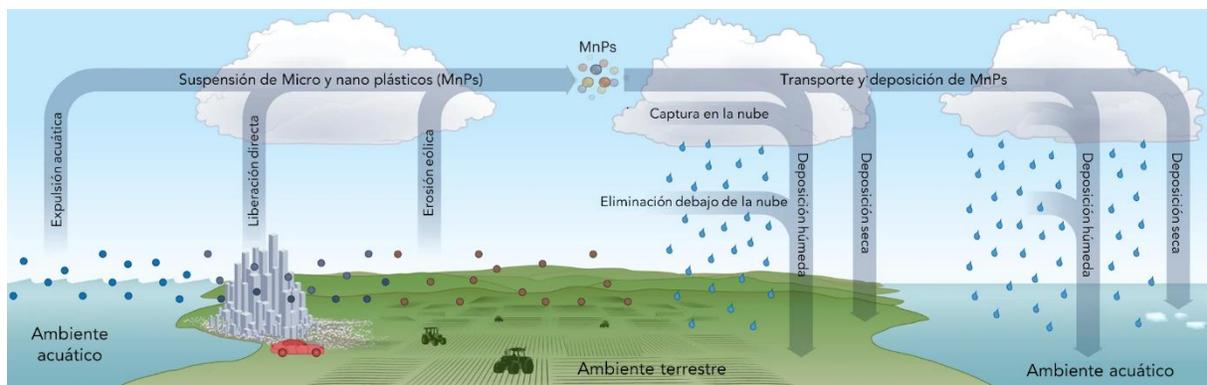


Figura 6.1. Posibles vías de circulación de micro y nanoplasticos (MnPs) en la atmósfera. Las flechas representan vías de suspensión y deposición hacia y desde entornos terrestres y acuáticos. Adaptado de Aeschlimann, et al., 2022.

Una explicación detallada sobre la importancia de la deposición en la contaminación de los microplásticos se analizó en Liu Y, et al (2025). Los microplásticos terrestres son arrastrados a la atmósfera por el viento y transportados a largas distancias. Los microplásticos suspendidos en la atmósfera son luego eliminados de la misma mediante deposición seca y húmeda a los ambientes terrestres y acuáticos (Klein y Fischer, 2019). Los microplásticos depositados pueden regresar a la atmósfera nuevamente mediante la resuspensión y liberación desde el ambiente marino, formando así un ciclo (Catarino et al., 2023). El ciclo global de los microplásticos atmosféricos está estrechamente relacionado con las condiciones meteorológicas. La lluvia es el principal impulsor de la deposición húmeda de microplásticos atmosféricos. Cuando llueve, los microplásticos en el aire son arrastrados por las gotas de lluvia y se convierten en la llamada "lluvia plástica" (Brahney et al., 2020). Varios

estudios han demostrado que la intensidad y el volumen de las precipitaciones tienen una correlación positiva con la deposición de microplásticos (Liu et al., 2022). En el Ártico, la nevada es el principal método de deposición atmosférica de microplásticos (Bergmann et al., 2019) ver [Figura 6.1](#).

La interacción y la consecuencia de las actividades humanas sobre el entorno son evidentes con una alteración observable del ambiente. Sin embargo, también existen efectos menos visibles que, aunque son imperceptibles a simple vista, son indicadores fundamentales de las interacciones humanas, como es la relación entre la calidad del aire y la composición química del agua de lluvia.

En este contexto, a nivel mundial, se han realizado estudios y acciones para implementar medidas de control y mitigación de dichos impactos. En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y sus alrededores, se han hecho investigaciones que profundizan el análisis de los efectos de la urbanización y la industrialización sobre los ecosistemas de esta región. Dichos esfuerzos permitieron generar conocimiento sobre las transformaciones ambientales asociadas a las actividades humanas y su influencia en la dinámica de los ecosistemas locales. Desde los primeros indicios de lluvia ácida en la región, registrados en los años 80, se han implementado iniciativas importantes para comprender la composición del agua de lluvia, la dinámica de los contaminantes atmosféricos, así como su traslado a zonas urbanas y rurales.

La investigación en esta área ha documentado los efectos visibles de la contaminación atmosférica y también ha señalado la necesidad de desarrollar estrategias de monitoreo continuo y acuerdos internacionales para mitigar sus impactos. En estudios recientes, se ha destacado la importancia de las trayectorias de masas de aire sobre la distribución de los contaminantes y se han utilizado especies arbóreas como bioindicadores para evaluar los efectos de la lluvia ácida antes de que se manifiesten daños más visibles (Rodríguez-Sánchez et al., 2020).

En la [Figura 6.2](#), se presenta una perspectiva histórica de los estudios sobre los efectos atmosféricos, así como los procesos químicos asociados a la lluvia ácida en la ZMCM y sus alrededores. Este panorama de la investigación sobre la lluvia ácida refleja el compromiso por entender la problemática y así, gestionar la reducción de contaminantes atmosféricos, lo que representa un gran impacto en la mejora de la calidad del aire y en los efectos sobre los ecosistemas. Los avances en la disminución de contaminantes son el resultado de un esfuerzo interdisciplinario, integral y colaborativo entre la ciencia, política, sectores económicos y sociedad. Un ejemplo de estos esfuerzos es el Programa de gestión para mejorar la calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (PROAIRE), en el cual se plantean metas a corto, mediano y largo plazo para la reducción de emisiones y contaminantes atmosféricos.

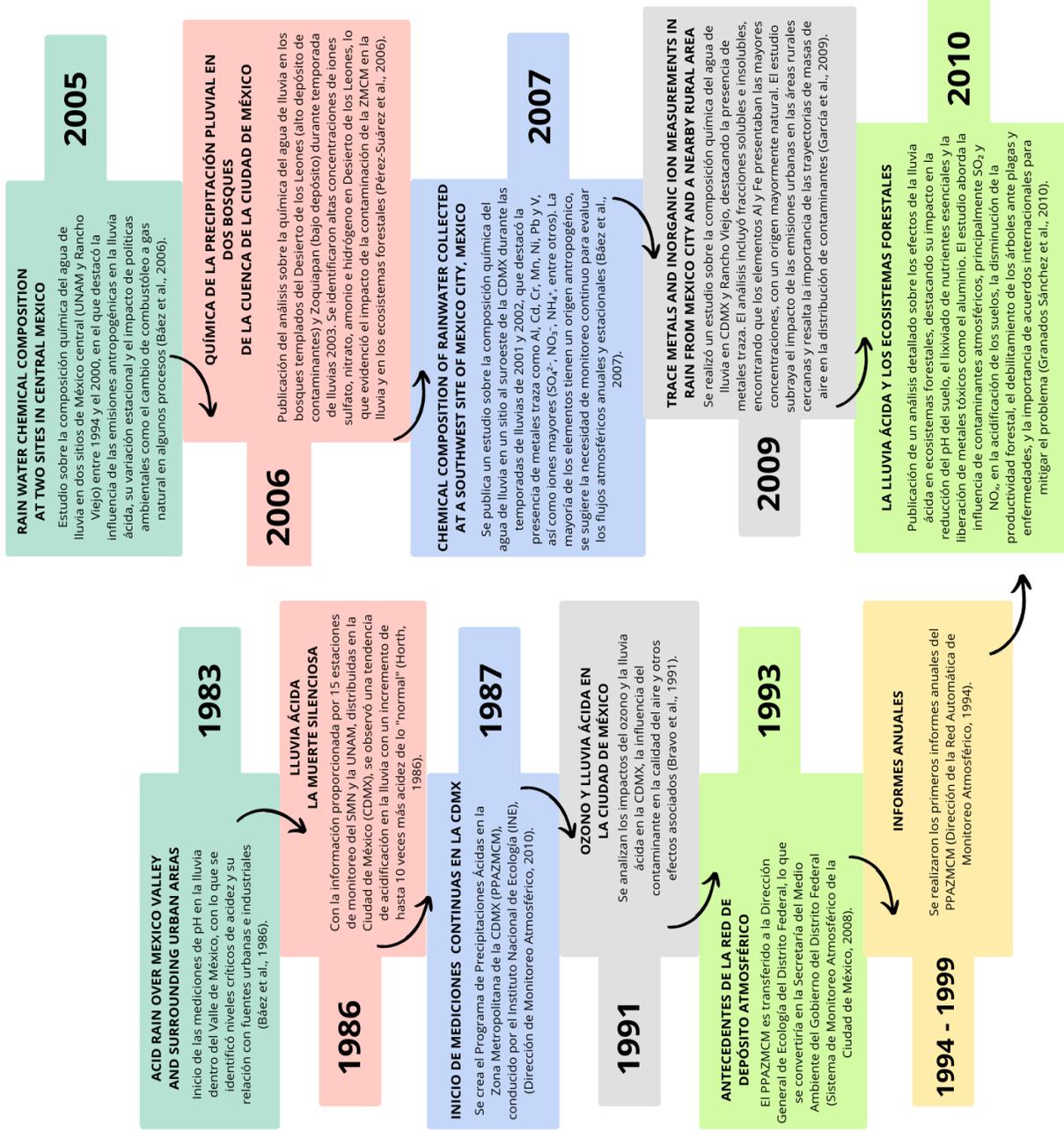


Figura 6.2. Línea del tiempo de investigaciones realizadas en la ZMCM y sus alrededores, relacionadas con el estudio del depósito atmosférico húmedo y la lluvia ácida.

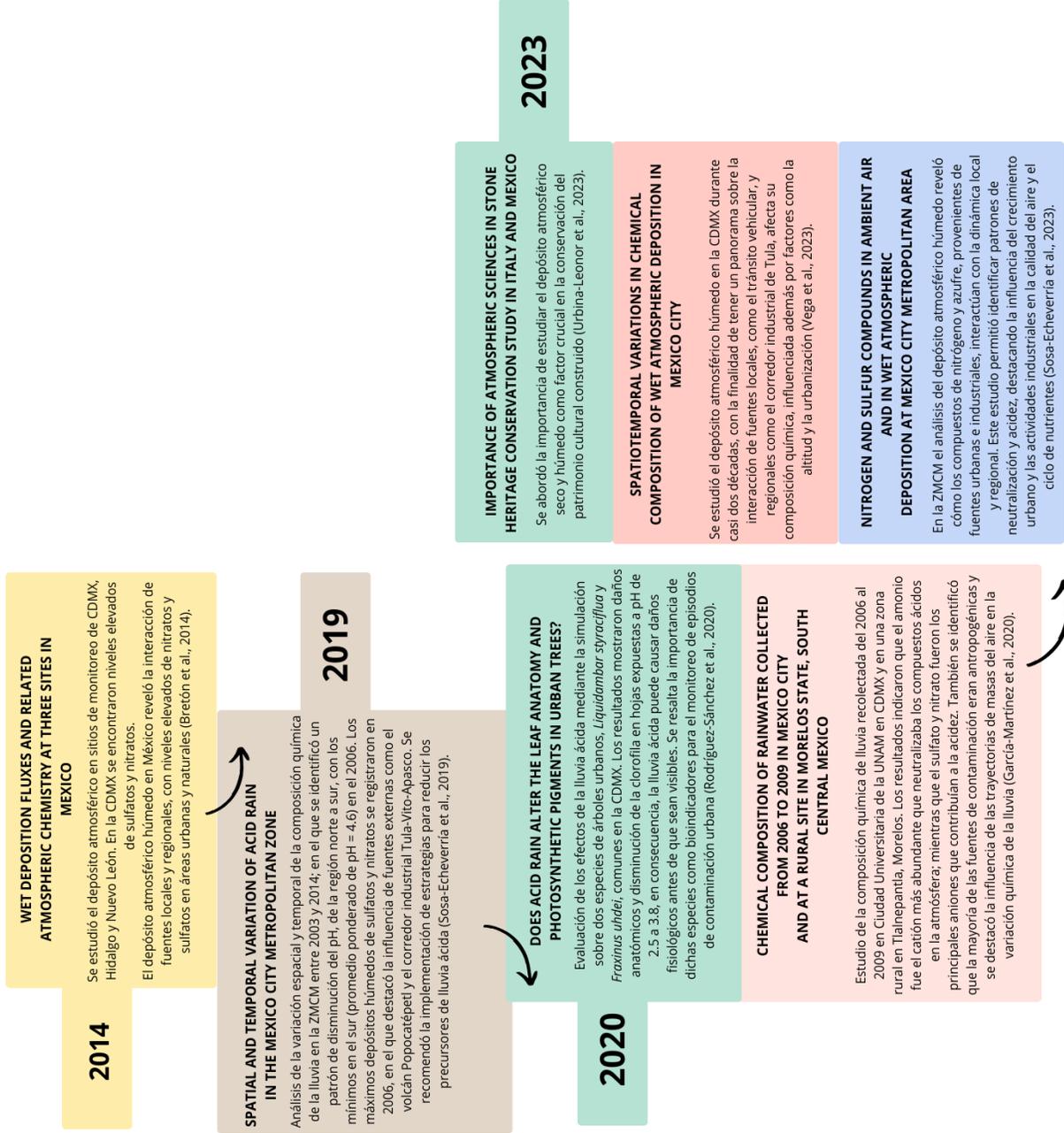


Figura 6.2. (Continuación) Línea del tiempo de investigaciones realizadas en la ZMCM y sus alrededores, relacionadas con el estudio del depósito atmosférico húmedo y la lluvia ácida.

Resultado de la campaña de la Red de Depósito Atmosférico 2023

En el transcurso del 2021 al 2023, se ha logrado la reactivación de la mayoría de los sitios de la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) del SIMAT (Figura 6.3) esto después de los obstáculos derivados de la pandemia COVID-19 (SEDEMA, 2024); excepto la estación San Nicolás Totolapan (SNT), que sigue inactiva debido a que el colector del equipo está averiado. No obstante, la zona suroeste tiene cobertura con las mediciones de los sitios Exconvento Desierto de los Leones (EDL), Ecoguardas Ajusco (EAJ) y Diconsa (DIC).

La suficiencia de datos en la REDDA se evalúa en función del porcentaje de **muestras obtenidas** con respecto al **total esperado** por sitio durante la temporada de lluvias de 2023. La mayoría de los sitios alcanzaron una suficiencia del 70% o superior; excepto en Xalostoc (XAL) con 50%, CORENA (COR) y Museo de la Ciudad de México (MCM) que tuvieron 54%, dichas estaciones presentaron los mínimos de suficiencia (Figura 6.3). La disminución en la suficiencia también se puede relacionar con la ausencia de lluvia o que la cantidad de agua recolectada fue insuficiente para realizar un análisis fisicoquímico confiable.

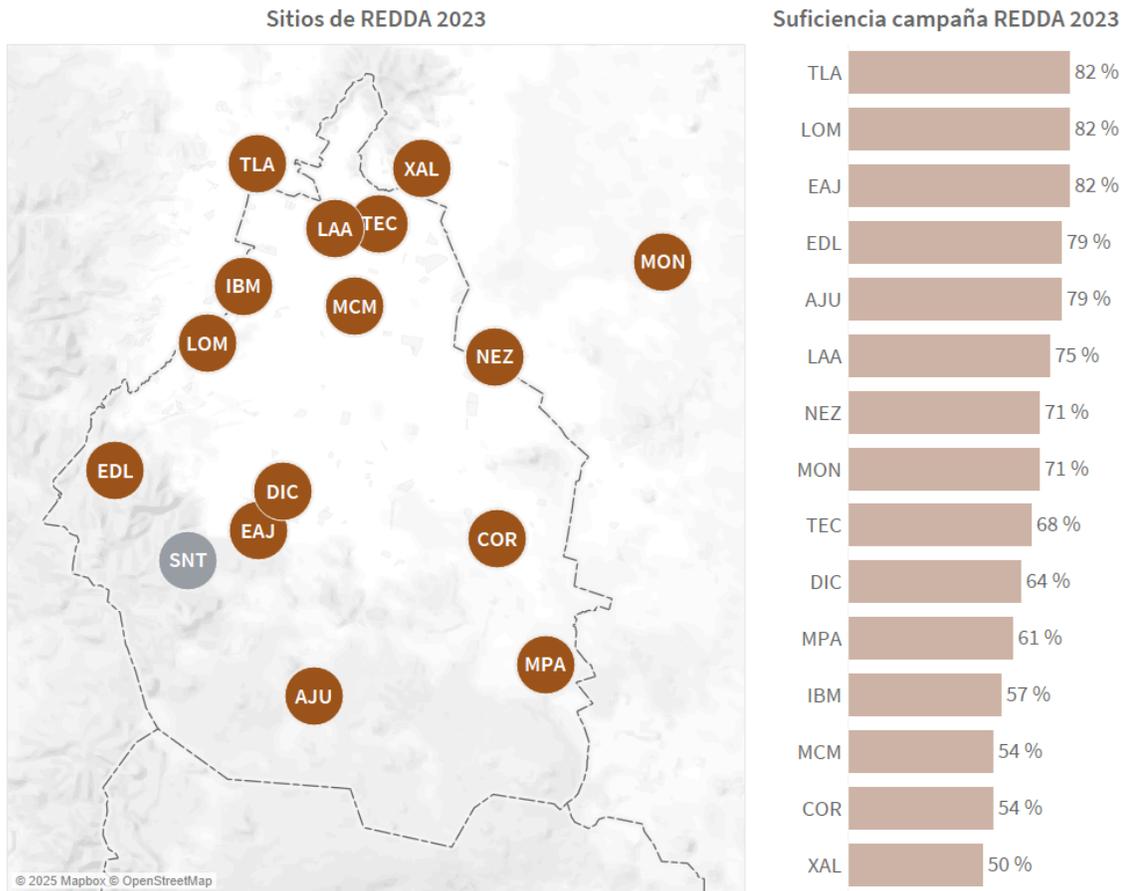


Figura 6.3. Distribución espacial de la REDDA (izquierda); la estación SNT (color gris) estuvo fuera operación en 2023. Suficiencia de datos por sitio durante 2023 (derecha).

Precipitación pluvial

Durante la temporada de lluvias de 2023, la precipitación mensual fue más alta en agosto y julio, con 2,096 y 2,081 mm, respectivamente; mientras que mayo (894 mm) y octubre (459 mm) presentaron valores más bajos, este es un patrón normal, ya que dichos meses están al inicio y final de la temporada de lluvias.

En la **Figura 6.4** se presenta el comportamiento de la precipitación en los sitios de la REDDA, es importante mencionar que la cantidad acumulada de precipitación (mm de lluvia) no está directamente relacionada con la disponibilidad de muestras para los análisis fisicoquímicos, ya que hubo sitios con los mayores acumulados, como EDL con 835 mm, y Ajusco (AJU) que registró 769 mm, que no necesariamente presentaron la suficiencia más alta y viceversa, un ejemplo es Tlalnepantla (TLA) con suficiencia del 82 % pero con un acumulado de 478 mm, uno de los valores mínimos de precipitación. En otros sitios, que también registraron precipitación baja, como COR (334 mm) y XAL (303 mm), se recolectaron muestras cuyo volumen fue insuficiente para la obtención de análisis confiables. Las diferencias observadas entre las estaciones se pueden atribuir a factores locales como el microclima, altitud y cobertura vegetal.

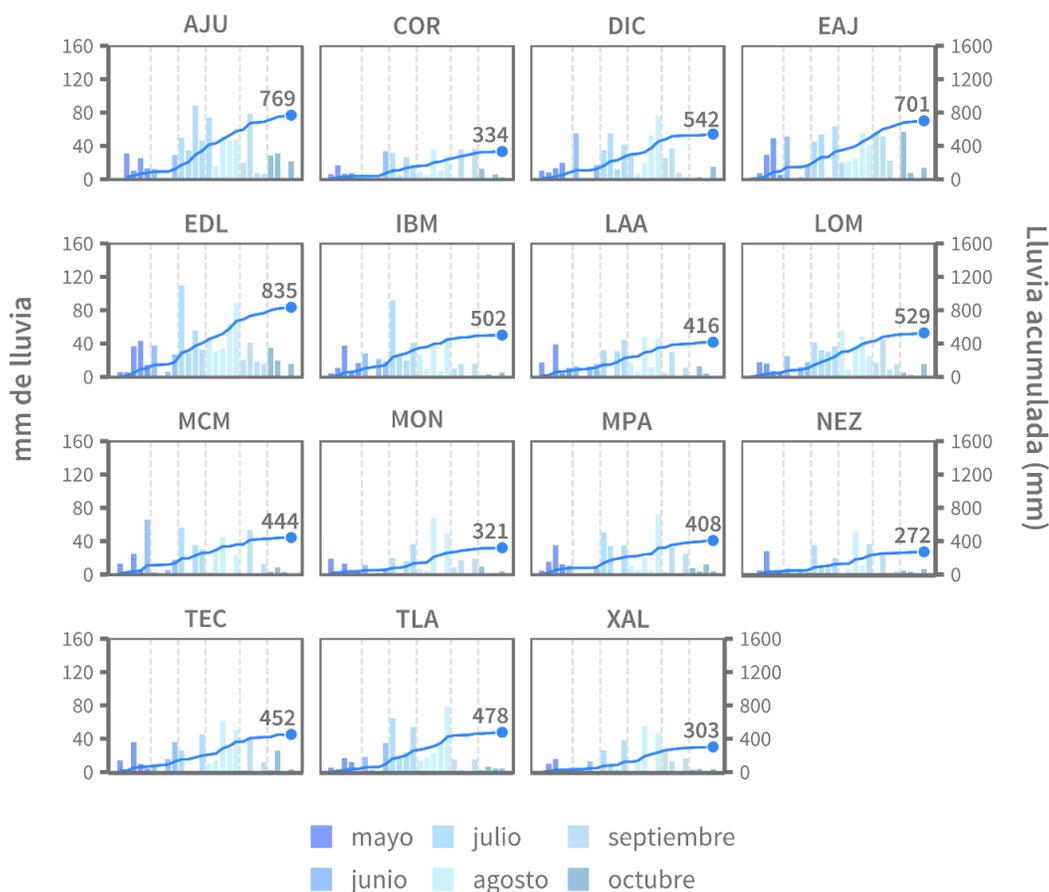


Figura 6.4. Precipitación acumulada por sitio durante la temporada de lluvia 2023 (mayo a octubre). Las barras es la cantidad de lluvia (en milímetros, mm) por mes, la línea azul es la precipitación acumulada (mm) en toda la temporada.

En términos de la distribución espacial, el mapa de interpolación Kriging de la **Figura 6.5**, presenta una notable variación de la precipitación en la CDMX. La mayor cantidad de lluvia se concentra en el sur y suroeste de la CDMX (tonos azul oscuro); por el contrario, las regiones del norte y noreste registraron los mínimos de precipitación (tonos azul claro). Este patrón está asociado a factores geográficos como altitud, latitud, cobertura, urbanización y variaciones del relieve; los cuales influyen en la distribución de las lluvias. Adicionalmente, la trayectoria de las masas de aire y vientos predominantes, pueden trasladar humedad y precipitaciones al suroeste de la CDMX.

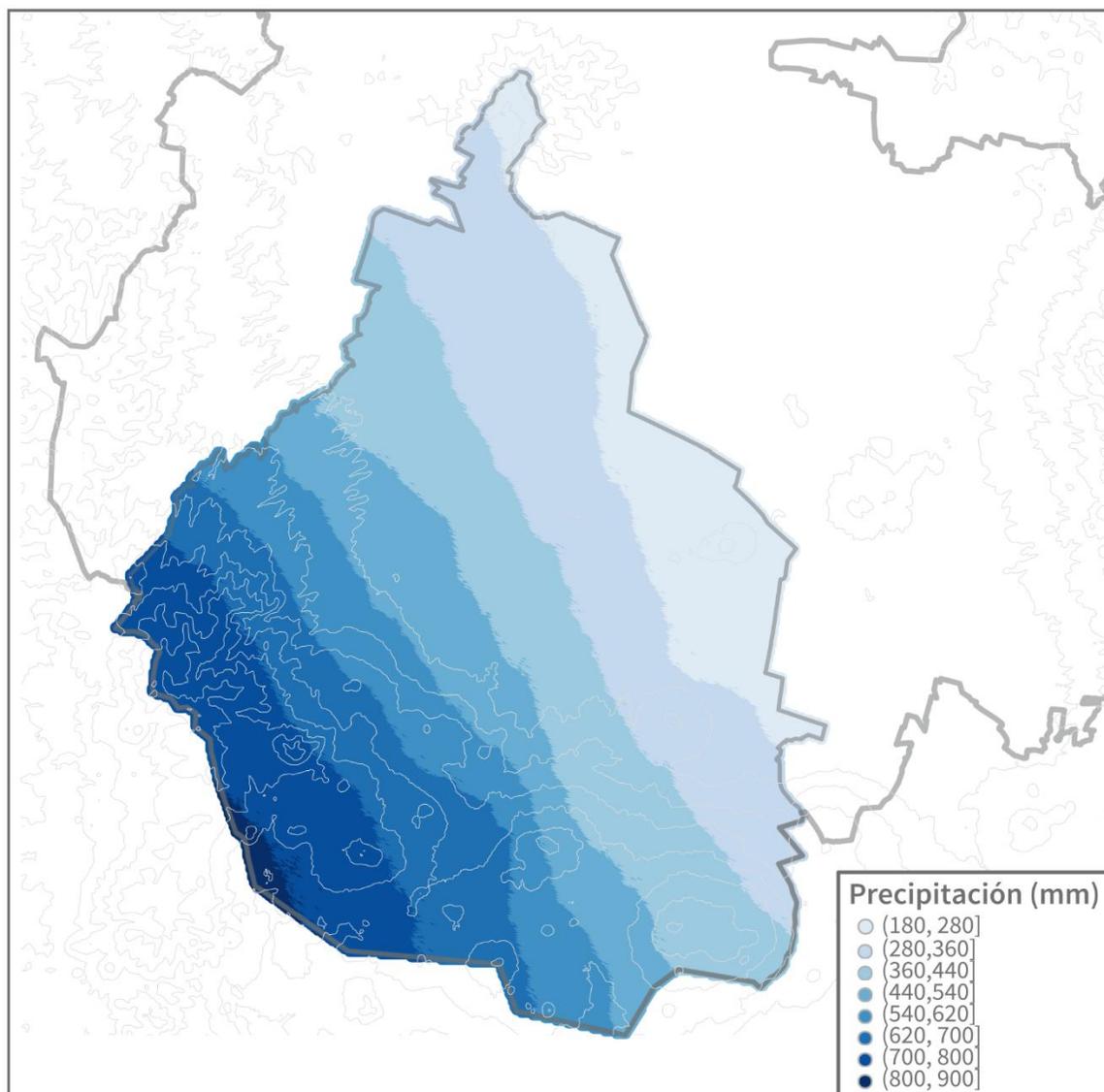


Figura 6.5. Distribución espacial de precipitación en la CDMX durante 2023, realizado con una interpolación con método kriging. Los colores oscuros representan zonas con mayor precipitación (800 – 900 mm), mientras que los tonos claros indican los niveles más bajos (180 – 280 mm).

Comportamiento del pH ácido (eventos de lluvia ácida)

El valor de **pH que indica lluvia ácida es menor a 5.6**; y durante 2023, los datos con **pH ácido** oscilaron de 3.92 a 5.55, especialmente durante los meses de junio a octubre, que registraron más episodios de lluvia ácida. La mayor ocurrencia de estos eventos con pH ácido fue durante julio y agosto con un total de 19 y 18 muestras, respectivamente (**Figura 6.6**); mientras que mayo no registró eventos de lluvia ácida, al contrario, todas sus muestras fueron alcalinas ($\text{pH} > 5.6$), esto se puede relacionar con el inicio de la temporada de lluvia, en la cual hay un efecto de lavado atmosférico y las primeras lluvias arrastran partículas suspendidas (polvo, polen, hollín, etc.) y si predominan compuestos alcalinos en esas partículas, el pH de la lluvia será básico (Zeng et al., 2020; Singh et al. 2016). En la última sección “**Concentración iónica y depósito atmosférico**” de este capítulo, se analiza la cantidad de iones en la lluvia y se observó que mayo registró valores altos en los compuestos alcalinos que contribuyeron a la lluvia con pH básico durante ese mes.

A partir de junio comenzaron los eventos de lluvia ácida con intensidad moderada (con valores ácidos cercanos al límite de 5.6). Esto se observó en sitios como EDL con un pH de 5.21 y en MCM fue de 5.1, mientras que los mínimos del mes fueron en AJU con pH de 4.4 y en DIC con 4.68.

Durante julio se registró el máximo de muestras ácidas de la campaña y hubo mayor variabilidad de pH ácido, desde 4.28 (AJU) hasta 5.46 (EDL), adicionalmente, los sitios como EAJ y EDL también obtuvieron valores bajos de pH, ambos con 4.34; esto representó un incremento en el nivel de acidez en comparación con junio. El mes de agosto obtuvo el segundo conteo más alto de eventos ácidos y sus valores de pH se mantuvieron en un rango entre 4.42 (DIC) y 5.55 (Tlalnepantla, TLA), este último fue el menos ácido de todas las muestras con pH ácido en la temporada 2023.

En septiembre se registró el pH mínimo de todo el periodo, con 3.92 en Milpa Alta (MPA) y se obtuvieron 10 muestras ácidas, las cuales presentaron los valores más bajos de pH de la campaña 2023 y está relacionado con la cantidad de compuestos ácidos (nitratos, sulfatos e hidrógeno) en la lluvia del mes. Para octubre se redujo la cantidad de muestras ácidas con un total de 4 y la mayoría de estas se presentaron en el noreste de la ZMCM. Generalmente, el sur de la ciudad está más afectada por la lluvia ácida, ya que los sitios AJU, DIC y MPA, obtuvieron la mayoría de muestras ácidas y los pH mínimos. En el norte, las estaciones XAL, TLA, TEC e IBM también registraron pH ácido; pero fueron de menor frecuencia y con valores cercanos al pH neutro de la lluvia ($\text{pH}=5.6$). Este patrón se relaciona con el transporte de contaminantes hacia el sur debido a la dirección del viento; así como con las condiciones locales, topográficas y meteorológicas que favorecen la acidificación de la lluvia en la región.

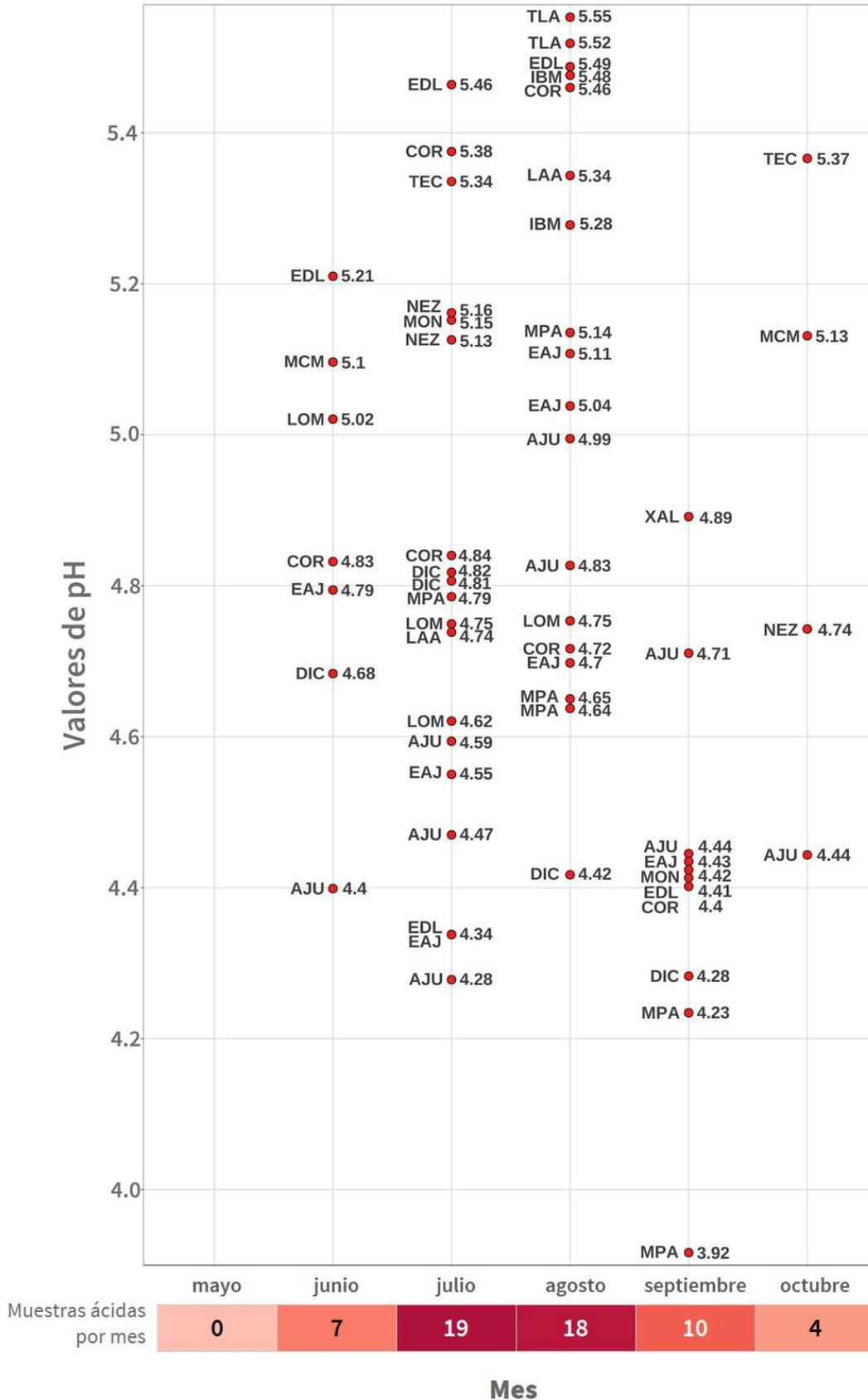


Figura 6.6. Distribución mensual del pH menores a 5.6 (valores ácidos) por sitio de monitoreo. El eje vertical indica el pH ácido. El eje horizontal son los meses de mayo a octubre. Los puntos rojos corresponden a cada muestra con pH ácido por sitio y los cuadros en el eje horizontal indican el total de muestras por mes.

pH ponderado y distribución espacial

El **pH ponderado** o **pH promedio ponderado** es un cálculo que permite reducir el sesgo de la cantidad de lluvia recolectada por sitio, es decir, **ajusta los valores de acidez (H), en función del volumen de precipitación (PP)**. Con esto, el valor obtenido es comparable y representativo de cada estación. En otras palabras, es una forma más justa de representar qué tan ácida fue la lluvia en una zona, considerando cuánta agua cayó en cada estación. Esto es importante porque no todas las estaciones recolectan la misma cantidad de lluvia y si se utiliza un simple promedio del pH, estaría sesgado porque se le daría el mismo peso a volúmenes muy diferentes de agua.

El pH es una magnitud en escala logarítmica, por lo que no se puede sumar o promediar directamente; entonces para hacer el promedio, se usa cada valor de pH y se convierte a la cantidad real de acidez (iones de hidrógeno, H^+), se multiplica esa cantidad de H^+ por el volumen de lluvia de cada muestra; después se suman todos los resultados por estación y se divide entre el total de agua recolectada durante el periodo de análisis. El dato resultante se convierte nuevamente a pH y así, se obtiene un valor que representa mejor la acidez total de la lluvia en el conjunto de estaciones y periodo determinado.

Después de este cálculo, se puede comparar de manera más precisa, la acidez entre distintas zonas o momentos del año, además se puede utilizar el pH resultante para hacer mapas interpolados que muestren la distribución y comportamiento de la lluvia ácida en un territorio. Este procedimiento se realizó con los datos de la REDDA en el periodo del 2012 al 2023, con el objetivo de hacer una comparación espacio – temporal del pH ponderado en la ZMCM para los años mencionados y así, analizar sus cambios a través del tiempo (**Figura 6.7 y 6.8**).

En los resultados de la interpolación del pH ponderado mostraron que del **2012** al **2015** predominaron los valores de pH ácidos (< 5.6), con la mayoría en el rango de 5 a 5.6; sin embargo, también se observaron zonas con pH de 4 a 4.4 (tonos rojos en **Figura 6.7**) y otras regiones con pH ponderado 4.4 a 4.7 (naranja oscuro). En el periodo de **2016** a **2020**, se observó una tendencia de disminución de acidez en el centro, norte y noreste de la ZMCM, ya que se presentó un incremento de regiones con pH más alcalino, es decir, superior a 5.6 (tonos verdes). Los años **2021** y **2022** destacaron como los más alcalinos, ya que casi la totalidad de la ZMCM presentó pH básico (**Figura 6.8**). En **2023** se observó un ligero aumento en la acidez de la lluvia, específicamente en el sur; sin embargo, en términos de valores ácidos (< 5.6), se mantiene una tendencia de pH básico como en los últimos años, por lo tanto, los eventos ácidos no son tan extremos en comparación con el periodo previo al 2016.

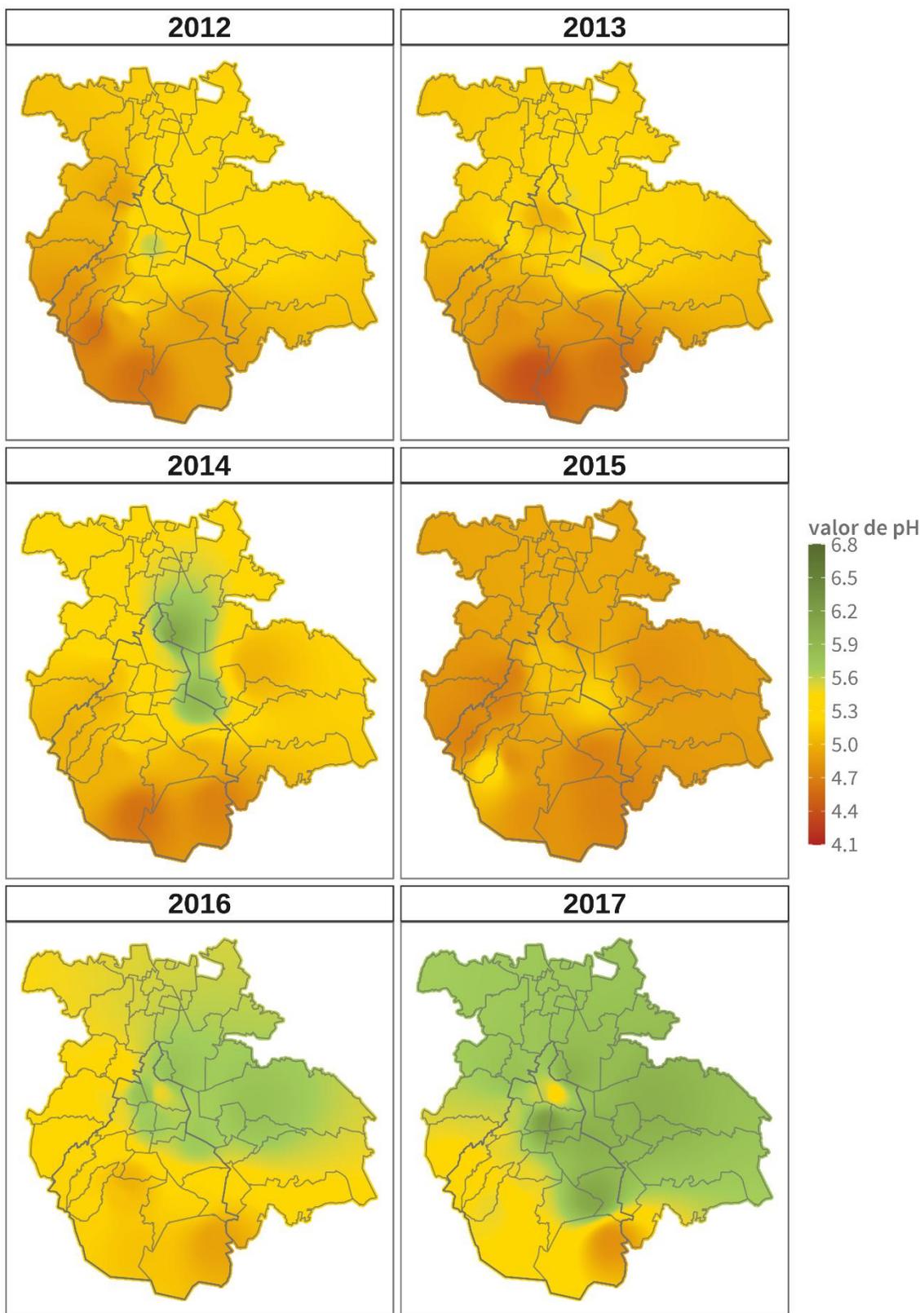


Figura 6. 7. Distribución espacial de la lluvia ácida en la ZMCM del 2012 al 2017. Los tonos rojos, anaranjado y amarillos indican la presencia de lluvia ácida (pH ponderado menor a 5.6).

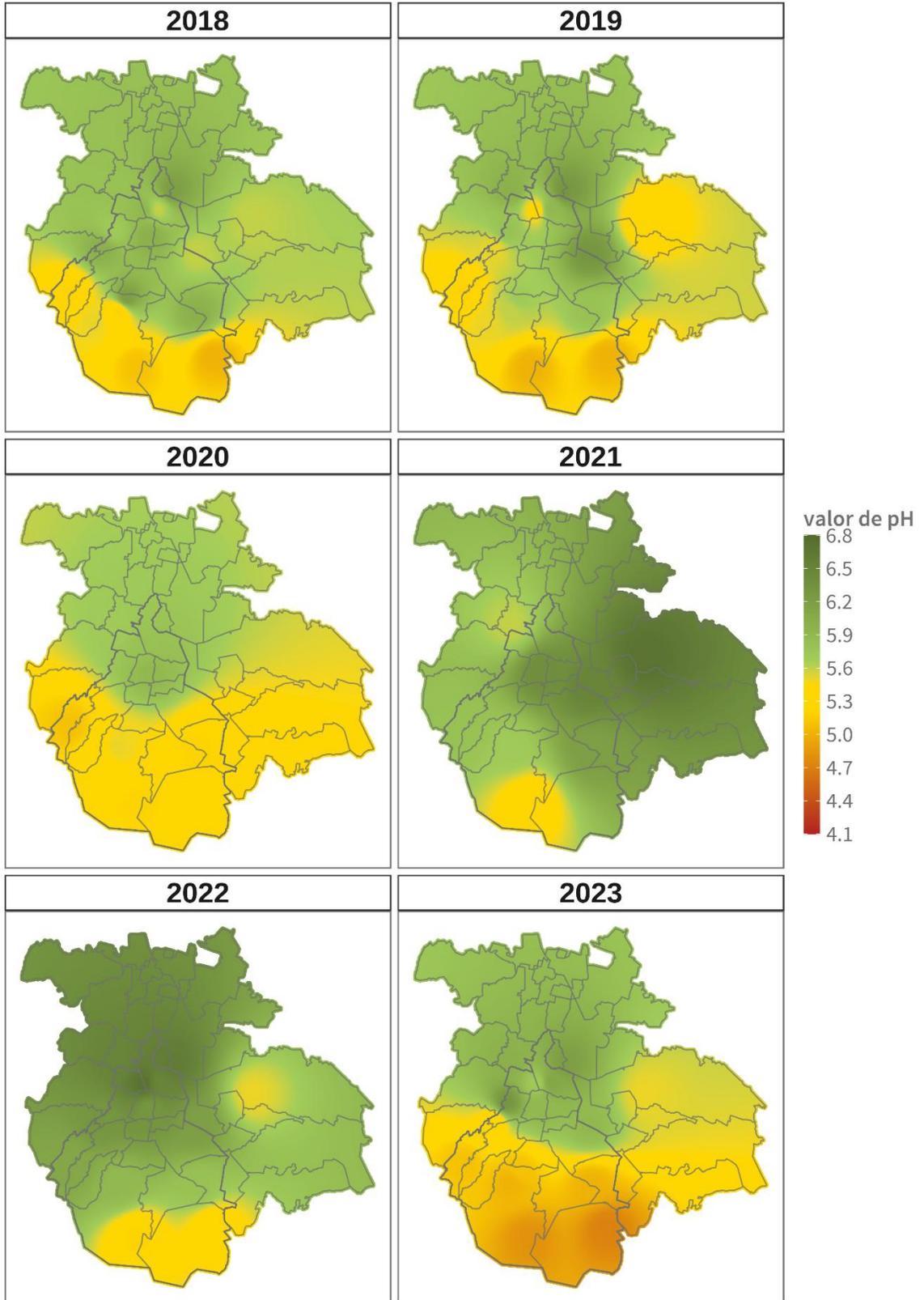


Figura 6. 8. Distribución espacial de la lluvia ácida en la ZMCM del 2018 al 2023. Los tonos rojos, anaranjado y amarillos indican la presencia de lluvia ácida (pH ponderado menor a 5.6).

Concentración iónica y depósito atmosférico

La **concentración de los iones** se expresa en micro equivalentes por litro ($\mu\text{Eq} / \text{L}$), esta unidad mide la **cantidad de un ion disuelto en la lluvia** en función de su carga eléctrica y permite evaluar la **calidad química** de la precipitación. Mientras que el **depósito atmosférico**, representa la **cantidad total de un ion que llega al suelo** en un área determinada. Las unidades que miden el depósito atmosférico son kilogramos por hectárea (kg / Ha); para su cálculo se considera la concentración del ion y el volumen de precipitación.

Los resultados de estas variables en la campaña 2023 de la REDDA, mostraron que la concentración de iones tiende a ser más alta al principio del periodo de lluvias (**Figura 6.9**) posiblemente debido a la acumulación de contaminantes en la atmósfera durante la temporada seca, previa a las lluvias. Este patrón se observó en la mayoría de los iones excepto en H^+ , que durante el primer mes de la temporada (mayo), registró su mínimo de concentración, mientras que su máximo ocurrió en septiembre, estos resultados son congruentes con la cantidad de muestras y los niveles de pH ácido obtenidos.

En términos del depósito atmosférico, se observó un incremento en los meses con mayor precipitación (julio a septiembre), independientemente de la reducción de concentración en los iones (**Figura 6.10**). Esto se puede observar en los iones como sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+), calcio (Ca^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+).

Aunque los iones SO_4^{2-} y NO_3^- presentaron sus concentraciones más altas en los primeros meses de la temporada, su depósito atmosférico fue mayor durante julio y agosto, lo cual se explica por el aumento en el volumen de precipitación registrado en estos meses. Esta contribución total de compuestos acidificantes en el depósito atmosférico incrementó la frecuencia de muestras con pH ácido en julio y agosto, ya que el SO_4^{2-} , NO_3^- y el H^+ , están directamente asociados con la acidez de la lluvia (Rodhe et al., 2002; EPA, 2023).

Por su parte, los iones NH_4^+ y Ca^{2+} , que cumplen una función neutralizante (Zeng et al., 2020) al contrarrestar la presencia de iones hidrógeno (H^+), mostraron concentraciones altas al inicio de la temporada y relativamente estables en el resto del periodo, esta cantidad de iones alcalinos contribuyó a que en el primer mes de la temporada (mayo), todas las muestras tuvieran pH básico. En términos de su depósito atmosférico, también fue mayor en los meses más lluviosos, ya que esta variable depende tanto de la concentración como del volumen de lluvia recolectado (Fenn et al., 2003; Likens & Bormann, 1974). Aunque estos iones aportan alcalinidad a la lluvia y pueden mitigar la acidez de las precipitaciones, su efecto depende de la proporción con respecto a los compuestos acidificantes, de su concentración, solubilidad y reactividad, así como de la química atmosférica.

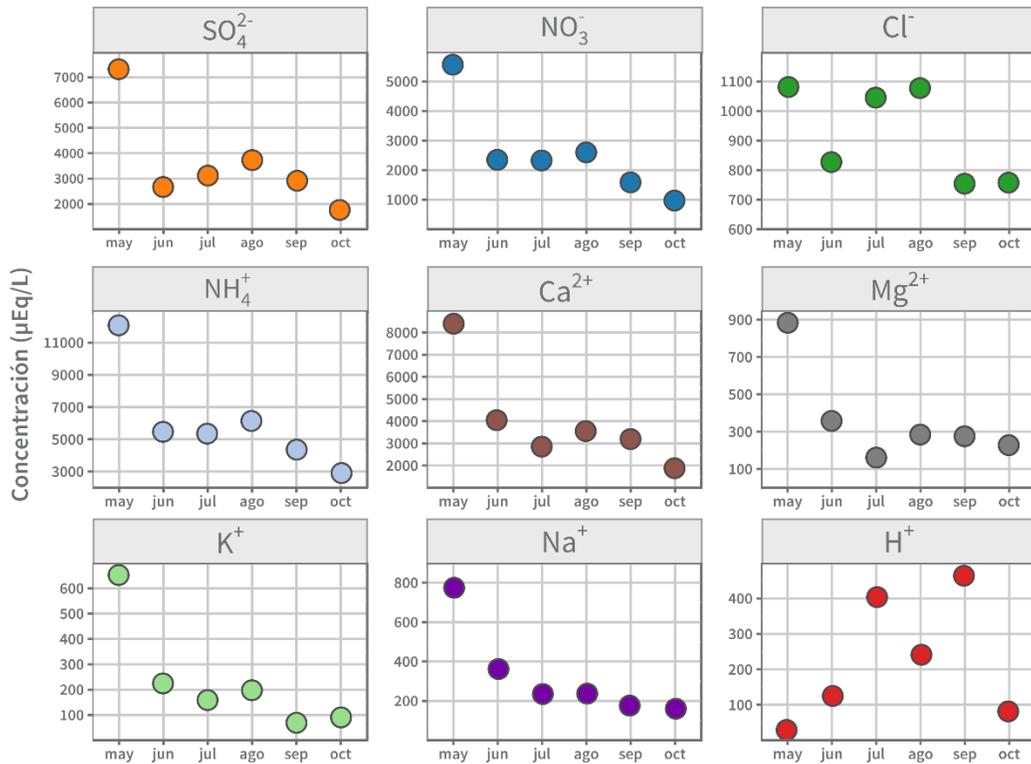


Figura 6.9. Sumatoria de las concentraciones (µEq/L) de los iones por mes.

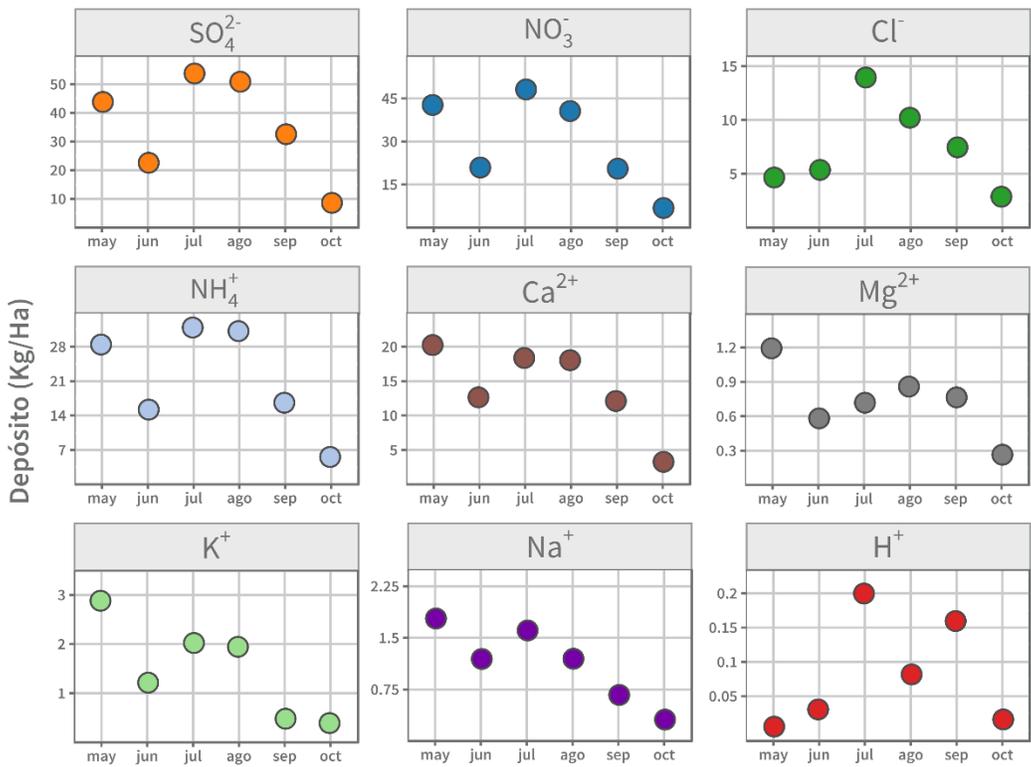


Figura 6.10. Sumatoria del depósito atmosférico (kg/ha) de los iones por mes.

Modelación de la calidad del aire



Evaluación del modelo de pronóstico de ozono

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México cuenta con un modelo numérico de calidad del aire, el AQFS-CDMX (*Air Quality Forecast System - CDMX*) es una herramienta importante en la toma de decisiones que involucran el diseño y evaluación de las estrategias de control de la contaminación atmosférica como las descritas en el ProAire 2021-2030. Así como proporcionar un pronóstico de la calidad del aire, que permite anticipar las condiciones que se presentarán en los próximos días, lo cual es importante para la implementar acciones oportunas que alerten a la población, y tome medidas para la protección de su salud.

Los modelos de calidad del aire son una representación teórica simplificada de los fenómenos atmosféricos y las complejas interacciones fisicoquímicas, por lo tanto, estos modelos están sujetos a un grado de incertidumbre y error. Para reducir estos errores y mejorar el pronóstico de las simulaciones de los modelos, se han desarrollado e implementado métodos de post procesamiento que se aplican a los datos de salida del modelo. A continuación, se explican diferentes métodos que se utilizan, con esta finalidad.

Los **métodos de corrección** en las salidas del modelo utilizan conjuntos de datos históricos (pronosticados y observados) con el objetivo de analizar, detectar y predecir los patrones de las **diferencias entre los valores simulados y observados**, las cuales sirven para ajustar los datos de pronóstico. El objetivo de estos métodos es que los valores corregidos puedan representar el comportamiento observado de los contaminantes con mayor exactitud.

La información generada por la corrección del pronóstico se evalúa para determinar el grado de mejora con la aplicación de los métodos. Además, es necesario analizar la complejidad de las técnicas de post procesamiento en comparación con la reducción del error que ofrecen.

En este capítulo se describen los métodos utilizados para corregir el pronóstico de ozono proveniente del modelo AQFS-CDMX durante la temporada de ozono del 2023 (15 de febrero al 15 de junio). Adicionalmente, se presentan los resultados de la evaluación de estas correcciones y el análisis correspondiente.

Características del pronóstico

El sistema de pronóstico de la calidad del aire para la Ciudad de México (AQFS-CDMX) fue implementado y diseñado para estimar la concentración de los contaminantes atmosféricos con anticipación. Este sistema funciona mediante la simulación numérica que considera la

interacción de factores meteorológicos, cantidad de emisiones y transporte químico. Las salidas del AQFS-CDMX representan la concentración de los contaminantes atmosféricos en la ZMVM para el día actual (pronóstico de 24 horas) y el día siguiente (pronóstico de 48 horas), tienen una resolución espacial y temporal de 1 km² y 1 hora, respectivamente. Los datos de concentración se extraen en las coordenadas de las estaciones de monitoreo y se utilizan para reportar los máximos de ozono pronosticados, así como para evaluar el desempeño del sistema de modelación.

Métodos de correcciones en el post proceso

Filtro de Kalman (KF)

Este método consiste en estimar el sesgo de un pronóstico futuro a partir de los sesgos observados y estimados en el día anterior. Esta operación se realiza de manera recursiva, donde el sesgo del día actual depende del estimado en el día anterior, que a su vez se calculó con el sesgo del día previo y así sucesivamente (Delle Monache et al., 2005). Los sesgos (observado y estimado) se relacionan a través de un factor de ponderación que se calcula con la optimización de una métrica estadística en los datos históricos. Este postproceso se aplica operacionalmente desde la implementación del AQFS-CDMX en 2017.

Mapeo de cuantiles (QM)

Consiste en obtener una función de distribución acumulativa (*Cumulative Distribution Function, CDF*) para un conjunto de datos históricos, pronosticados y observados. La corrección de los valores pronosticados se realiza localizando su posición (percentil) en la CDF de datos simulados, cada valor se reemplaza por el dato observado que tiene la misma posición en la CDF de los observados (Figura 7.1). Este método cumple con la función de corregir el pronóstico y la distribución de los valores simulados.

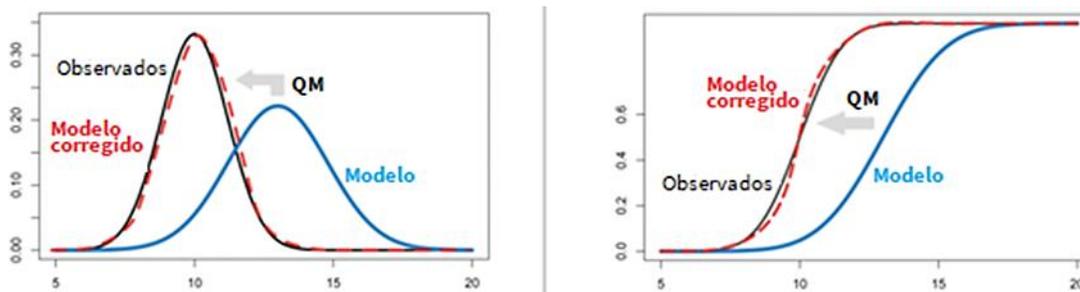


Figura 7.1. Esquema del ajuste de la distribución del pronóstico corregido por mapeo de cuantiles (Feigenwinter et al., 2018).

Media móvil (MA)

En este método, las diferencias entre el valor pronosticado y el observado de los últimos 2 días se promedian y el resultado se le suma al pronóstico actual para corregirlo (Djalalova et al., 2010).

Los métodos QM y MA se aplicaron a los datos del modelo sin corrección y a las que previamente se les aplicó el filtro de Kalman. Por lo tanto, se obtuvieron las siguientes salidas:

- Sin corrección
- QM
- MA
- Kalman
- QM - Kalman
- MA - Kalman

Reporte diario

Durante la temporada de ozono del 2023, se generaron reportes diarios ([Figura 7.2](#)) que contenían los valores máximos de cada pronóstico (para 24 y 48 horas), con la estación que lo presentó, así como el color de la categoría del Índice AIRE y SALUD (IAS) correspondiente al máximo de ozono pronosticado. La finalidad de los reportes fue identificar las diferencias de los métodos de post proceso con respecto al pronóstico sin corrección. Además, se busca detectar oportunamente los días con muy mala calidad del aire o con probabilidad de contingencia con base en las diferentes salidas del modelo.

Después de calcular los pronósticos corregidos, se evalúa su desempeño y se determina su confiabilidad con respecto a los datos medidos en las estaciones. El proceso de evaluación involucra diferentes etapas y métodos estadísticos que sirven para analizar la correspondencia entre valores pronosticados y observados. Los resultados de la evaluación se presentan en la siguiente sección del capítulo.

18 de abril de 2023

Pronóstico para hoy (24 h):

	Sin corrección	QM	MA	Kalman	QM-Kalman	MA-Kalman
Primer máximo	LLA 123	GAM 113	SAG 107	HGM 115	HGM 110	UIZ 104
Segundo máximo	GAM 122	FAR 106	IZT 103	SAG 109	ACO 98	IZT 103

Pronóstico para mañana (48 h):

	Sin corrección	QM	MA	Kalman	QM-Kalman	MA-Kalman
Primer máximo	AJM 152	PED 139	SAG 134	AJM 157	AJM 151	SAG 140
Segundo máximo	PED 150	AJM 135	MPA 112	PED 148	PED 145	MPA 119

Figura 7.2. Reporte diario de los valores máximos pronosticados con cada modelo y corrección para el día actual y siguiente.

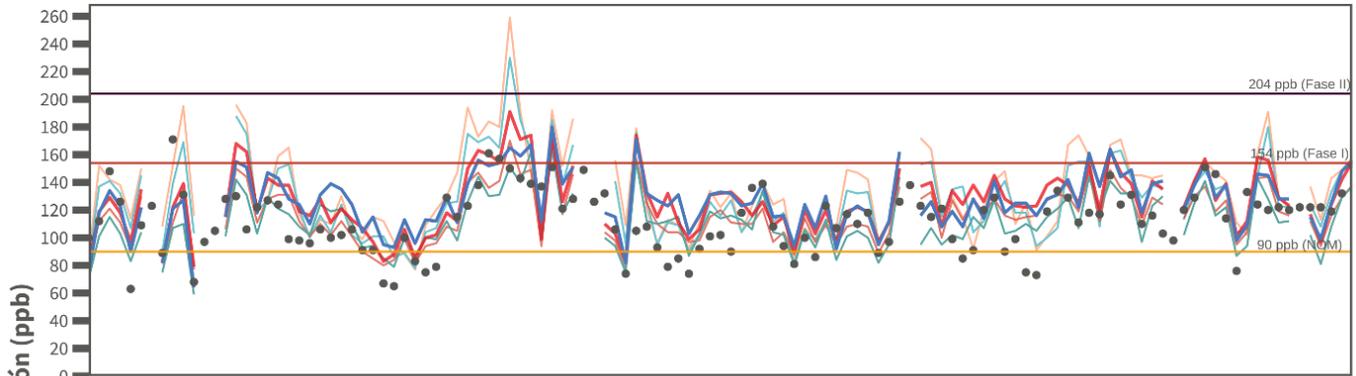
Evaluación de máximos diarios

El valor máximo de la concentración diaria de ozono se utiliza como indicador de la calidad del aire, ya que es un contaminante que constantemente supera la normatividad ambiental. La temporada de ozono 2023 tiene un total de 120 días, de los cuales en 100 días (83%) se superó el límite horario de la NOM (90 ppb) y se alcanzaron máximos de Fase I de contingencia (> 154 ppb) en un total de 3 días.

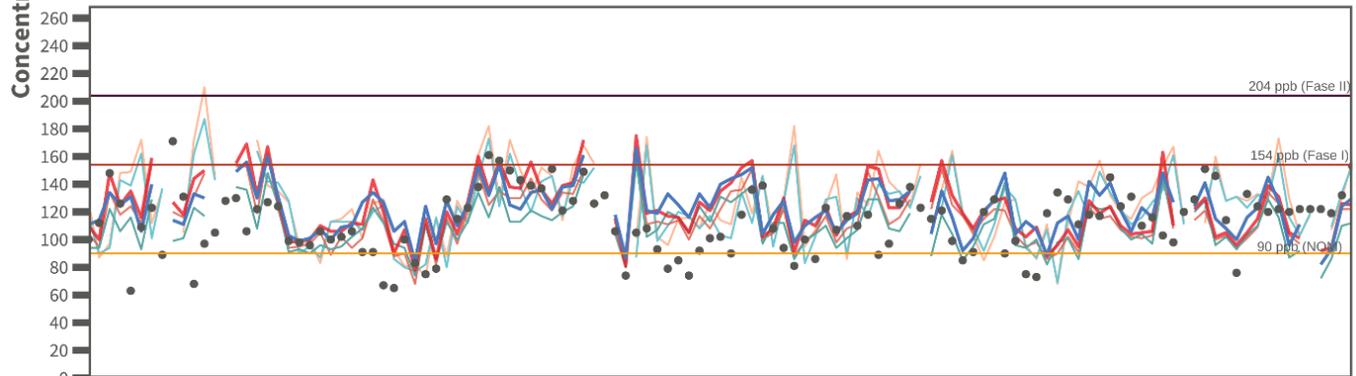
Las series de tiempo de los máximos diarios observados y pronosticados para 24 y 48 horas (**Figura 7.3**), indican que los pronósticos siguen la tendencia de los observados, especialmente en las simulaciones de 24 horas; sin embargo, durante ciertos periodos tienden a sobrestimar la concentración observada, donde el método MA incluso pronostica Fase II de contingencia.

Máximos diarios de la ZMCM

24 horas



48 horas



Fecha

— Sin corr. — QM — MA • Observados
 — Kalman — QM - Kalman — MA - Kalman

Figura 7.3. Serie de tiempo de los máximos diarios observados (puntos) y los pronosticados con cada método. Las líneas horizontales indican los valores de la NOM (90 ppb, amarillo), así como los valores de inicio de la Fase I (154 ppb, rojo) y Fase II (204 ppb, morado) del plan de contingencia.

Las distribuciones de máximos diarios (Figura 7.4) muestran que el pronóstico sin corrección tuvo una mediana mayor y valores superiores a los observados. Los pronósticos con QM presentaron una distribución de datos más cercana a la observada, mientras que las salidas con MA estimaron los valores más altos.

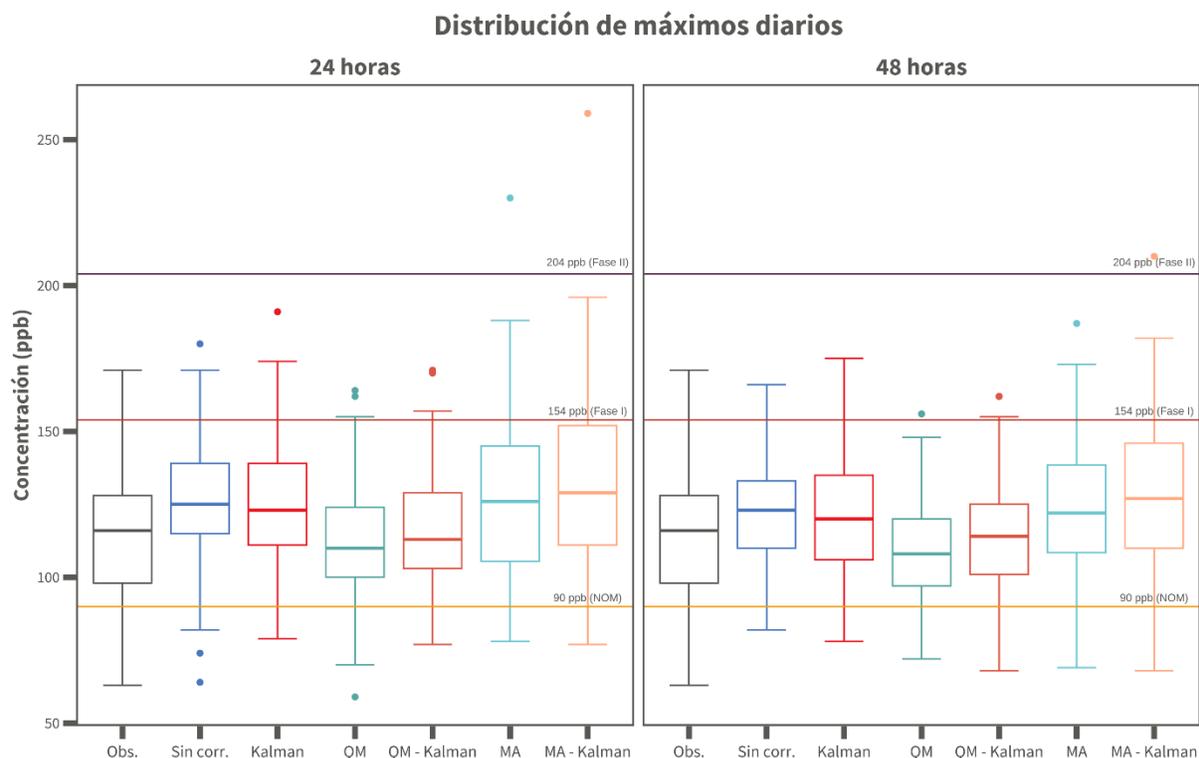


Figura 7.4. Diagramas de caja que representan la distribución de los máximos diarios observados y los pronosticados con cada método. Las líneas horizontales indican los valores de la NOM (90 ppb, amarillo), así como los valores de inicio de la Fase I (154 ppb, rojo) y Fase II (204 ppb, morado) del plan de contingencia.

En las diferencias diarias entre el dato observado y el pronosticado con cada método de la Figura 7.5, se identificó que la mayoría de los pronósticos sobrestimaron el máximo observado (barras por encima del cero) y los métodos QM de 24 horas presentaron las diferencias de menor magnitud (barras más cortas).

El valor absoluto de las diferencias, se utiliza para cuantificar el rendimiento con dos métricas: el **porcentaje de acierto** y el **porcentaje de días con diferencias ≤ 0.2** . El detalle y las fórmulas de estas métricas se pueden consultar en el Informe Anual 2022 (SEDEMA, 2024). El porcentaje de acierto se interpreta como la cercanía del pronóstico a los datos observados, mientras que el porcentaje de días indica el número de días que tuvieron un pronóstico con una diferencia menor o igual al 20% con respecto al máximo de ozono observado.

En los resultados en ambas métricas (**Tabla 7.1**) se identificó que los métodos QM tuvieron mejor rendimiento, excepto para el porcentaje de días en la simulación de 48 horas, donde el pronóstico sin corrección y el método MA, obtuvieron el mejor porcentaje con 59.5 %.

Diferencias de máximos diarios

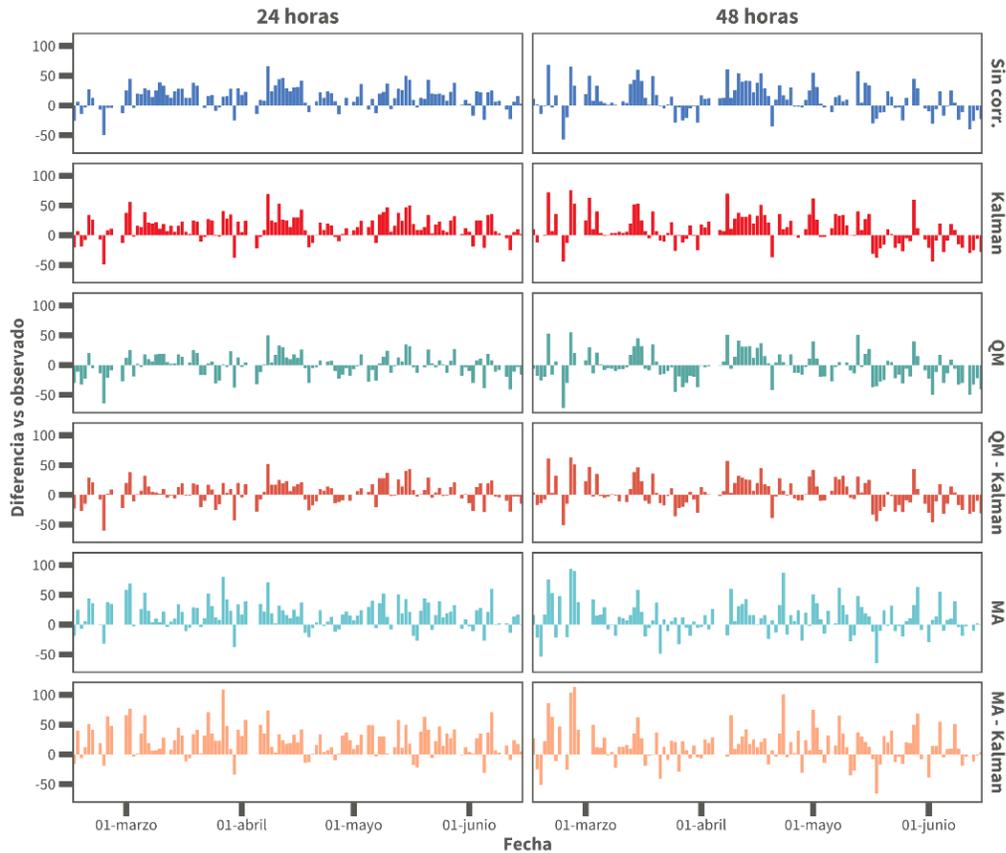


Figura 7.5. Diferencias (sesgo) entre los máximos diarios observados y los pronosticados con cada método.

Tabla 7.1. Métricas de rendimiento general de los pronósticos evaluados.

Pronóstico	Método	% Acierto	% Días $dif \leq 0.2$
24 horas	Sin corrección	84.1	59.5
	Kalman	83.9	57.9
	QM	87.7	70.2
	QM - Kalman	87.8	71.9
	MA	82.2	52.9
	MA - Kalman	78.2	43.0
48 horas	Sin corrección	83.3	59.5
	Kalman	82.6	58.7
	QM	83.5	58.7
	QM - Kalman	84.0	58.7
	MA	81.1	59.5
	MA - Kalman	78.7	51.2

Evaluación estadística

La evaluación mediante el cálculo de métricas estadísticas sirve para cuantificar la correspondencia entre valores pronosticados y observados, desde diferentes perspectivas. Las métricas utilizadas son: el sesgo promedio (**MB**), el error promedio absoluto (**MAE**), la raíz del error cuadrático medio (**RMSE**), el coeficiente de correlación (**r**), el coeficiente de eficiencia (**COE**) y el índice de coincidencia (**IOA**). La descripción detallada de estas métricas se puede consultar en los Informes Anuales de Calidad del Aire 2017 y 2019 (SEDEMA, 2018; 2022).

Los resultados de las métricas estadísticas (**Tabla 7.2**) muestran que se tuvo un mejor desempeño en los pronósticos corregidos con métodos de post procesamiento, en comparación con las salidas sin corrección. Por ejemplo, con la aplicación del QM en el pronóstico 24 h y 48 h, el MB disminuyó de 11.1 hasta -0.1 ppb y de 11.6 a 0.2 ppb, respectivamente. Lo anterior indica que el grado de sobrestimación (sesgo promedio positivo) se compensa y alcanza una ligera subestimación en el mejor de los casos.

En términos del MAE y el RMSE, sus resultados indicaron que la desviación total entre el máximo pronosticado y el observado se redujo con los métodos de corrección. En este caso, el método QM - Kalman (24 horas) obtuvo una menor desviación con ambas métricas, con 10.4 ppb en MAE y 14.2 ppb en RMSE.

El coeficiente de correlación (**r**) indicó una buena correspondencia entre los simulados y observados, ya que alcanzó valores de 0.87 en los métodos con Kalman y QM - Kalman (24 horas). El COE fue superior a 0.5 en la corrección con Kalman y las simulaciones de 24 h con QM; el valor obtenido de esta métrica indica que el patrón diurno de la concentración observada se pronosticó adecuadamente. Adicionalmente, estos métodos (Kalman y QM) presentaron los IOA más altos y, por lo tanto, son los que tuvieron un mejor desempeño general.

Estos resultados en las métricas de evaluación estadística sugieren que los métodos de post procesamiento tienen un efecto de mejora general con respecto al pronóstico sin corrección. Sin embargo, para los datos corregidos con MA, la mejora es poco perceptible e incluso el desempeño fue menor.

Tabla 7.2. Resultados de las métricas estadísticas de los pronósticos evaluados. En negritas se resaltan los dos métodos mejor evaluados en 24 y 48 horas.

Pronóstico	Método	MB	MAE	RMSE	r	COE	IOA
24 horas	Sin corrección	11.1	15.5	19.7	0.83	0.33	0.67
	Kalman	1.0	10.7	14.6	0.87	0.54	0.77
	QM	-0.1	11.3	15.1	0.85	0.51	0.75
	QM - Kalman	-0.6	10.4	14.2	0.87	0.55	0.77
	MA	0.7	11.7	16.1	0.85	0.49	0.75
	MA - Kalman	0.7	13.0	17.9	0.82	0.44	0.72
48 horas	Sin corrección	11.6	16.6	21.1	0.80	0.28	0.64
	Kalman	1.6	12.5	17.2	0.82	0.46	0.73
	QM	0.2	12.3	16.5	0.82	0.47	0.73
	QM - Kalman	-0.4	12.2	16.8	0.82	0.47	0.74
	MA	0.8	14.2	19.5	0.77	0.39	0.69
	MA - Kalman	0.7	14.9	20.7	0.76	0.36	0.48

Comparación general

Para esta sección se realizaron diferentes visualizaciones que proporcionan una idea general del comportamiento de los pronósticos evaluados y que son de utilidad para la comparación con los datos observados.

Los perfiles horarios representan la concentración promedio en cada hora del día durante toda la temporada de ozono. En los perfiles de la [Figura 7.6](#) se puede notar que el pronóstico sin corrección de 24 y 48 horas (línea azul oscuro), es capaz de seguir el patrón horario observado; sin embargo, presentó sobrestimación. Esta sobrestimación se corrige con la aplicación de métodos de post procesamiento. Los métodos QM presentan una ligera subestimación de las 12:00 a 15:00 h, lo cual es importante considerar, ya que normalmente dentro de este periodo se presenta la concentración máxima del día.

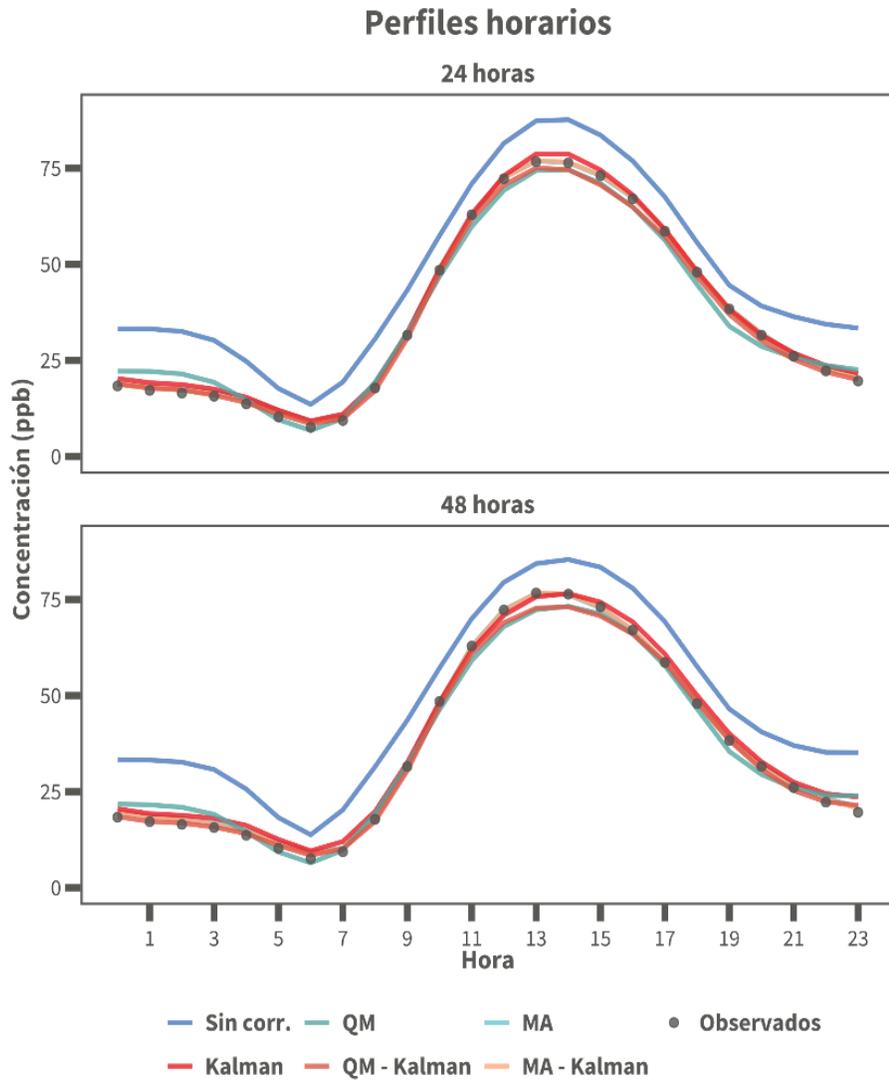


Figura 7.6. Perfiles horarios observados y pronosticados con cada método.

El **diagrama de Taylor** muestra simultáneamente la desviación estándar, el coeficiente de correlación (r) y el RMSE (Carslaw, 2019). De acuerdo con el valor de estas métricas, cada punto dentro del diagrama de la **Figura 7.7** representa un pronóstico. Los pronósticos corregidos con Kalman y QM - Kalman se acercaron más a los datos observados (línea punteada); tuvieron un mayor coeficiente de correlación y un menor RMSE, consistente con los resultados de la **Tabla 7.2**. En contraste, los datos corregidos con MA se separan de la línea de observados, incluso con respecto al pronóstico sin corrección.

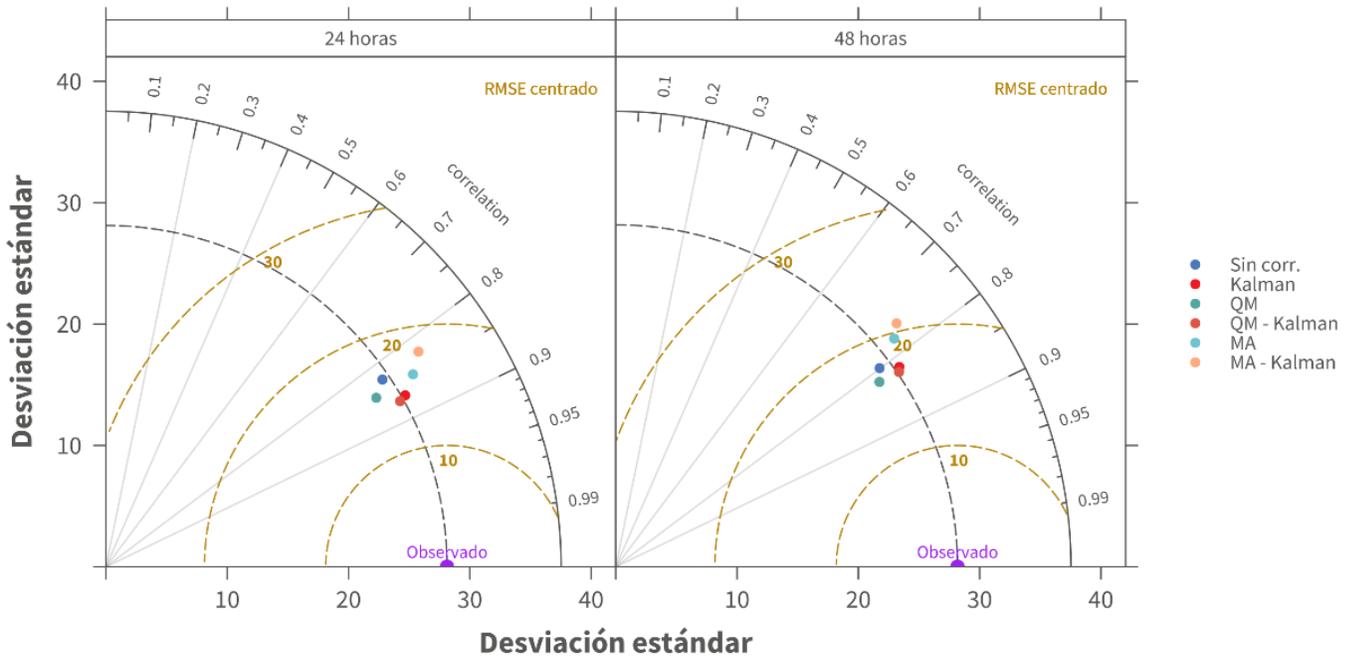


Figura 7.7. Diagramas de Taylor de los pronósticos evaluados.

Los gráficos de **cuantiles condicionales** muestran la distribución de datos observados y simulados divididos en rangos de valores, así como la mediana pronosticada dentro de cada rango (Carslaw, 2019). En la **Figura 7.8** se presentan las gráficas de cuantiles para los pronósticos evaluados, donde se aprecia una correspondencia entre los datos simulados y observados, hasta alrededor de 90 ppb. Cuando se supera este valor, todos los pronósticos tienden a sobrestimar, ya que la línea roja se desvía hacia la derecha de la línea azul que corresponde al modelo perfecto. El pronóstico QM - Kalman (24 horas) fue el de mayor correspondencia, con una ligera sobrestimación en las concentraciones altas. Adicionalmente, en los histogramas se puede ver que los métodos QM y QM - Kalman presentan una mayor similitud con la distribución de los observados (comparación entre histogramas con relleno gris y con el contorno azul). En las correcciones de MA hay mayor sobrestimación, ya que la línea de la mediana está más desviada hacia la derecha, alcanza valores más altos y se ve una menor correspondencia entre los histogramas.

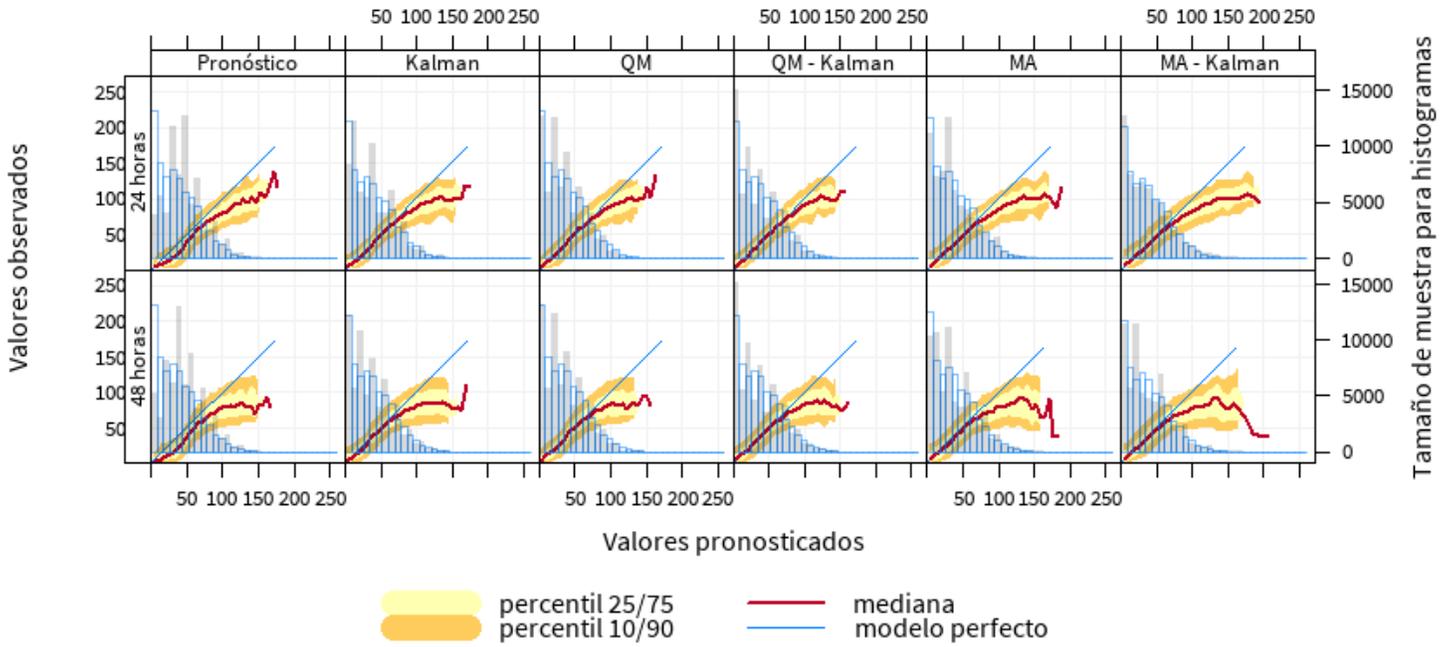


Figura 7.8. Gráficas de cuantiles condicionales de los pronósticos evaluados.

Evaluación categórica

La evaluación categórica determina la capacidad de cada pronóstico para detectar los valores observados que superan un umbral específico. En este análisis, se utilizó el umbral de 90 ppb, correspondiente al valor horario de la NOM vigente para ozono (NOM-020-SSA1-2021). Las métricas usadas para la evaluación categórica fueron: Exactitud (**A**), Precisión (**Pr**), Tasa de aciertos (**H**), Tasa de falsa alarma (**FAR**), Índice de éxito crítico (**CSI**) y Sesgo (**B**).

Se realizó una gráfica de dispersión de datos observados vs. pronosticados, la cual se divide en cuadrantes usando el umbral de 90 ppb y posteriormente se contabilizan los casos dentro de cada cuadrante. La descripción detallada de las métricas categóricas también se puede consultar en los Informes Anuales de Calidad del Aire 2017 y 2019 (SEDEMA, 2018; 2022). En las **Figura 7.9** y **7.10** se presentan las gráficas de dispersión para los pronósticos evaluados en 24 y 48 horas, en las que se puede notar que el cuadrante *b* contiene más casos, esto significa que la mayoría de los días de la temporada de ozono registraron concentración máxima > 90 ppb y fueron correctamente simulados por los diferentes pronósticos evaluados. El cuadrante *a* representa los casos sobrestimados o falsas alarmas, en el cual se observa que todos los métodos de corrección presentaron concentraciones altas que no ocurrieron.

En los resultados para las métricas categóricas de los pronósticos analizados (Tabla 7.3), la mayoría obtuvo una exactitud superior al 80 % (A), excepto en los métodos MA (48 horas). Los pronósticos mejor evaluados con esta métrica fueron Kalman y QM, por lo que detectaron correctamente cuando el máximo observado estuvo por encima o debajo de 90 ppb.

En la precisión (Pr) y la tasa de aciertos (H) se obtuvieron valores altos en todos los pronósticos. El método QM (24 horas) registró la precisión más alta, esto significa que la mayoría de los valores pronosticados superiores a 90 ppb, sí fueron observados. El pronóstico sin corrección y el corregido con Kalman obtuvieron las tasas de aciertos más altas, indicativo de que cuando el máximo observado excedió 90 ppb, entonces fue detectado correctamente en la mayoría de los casos.

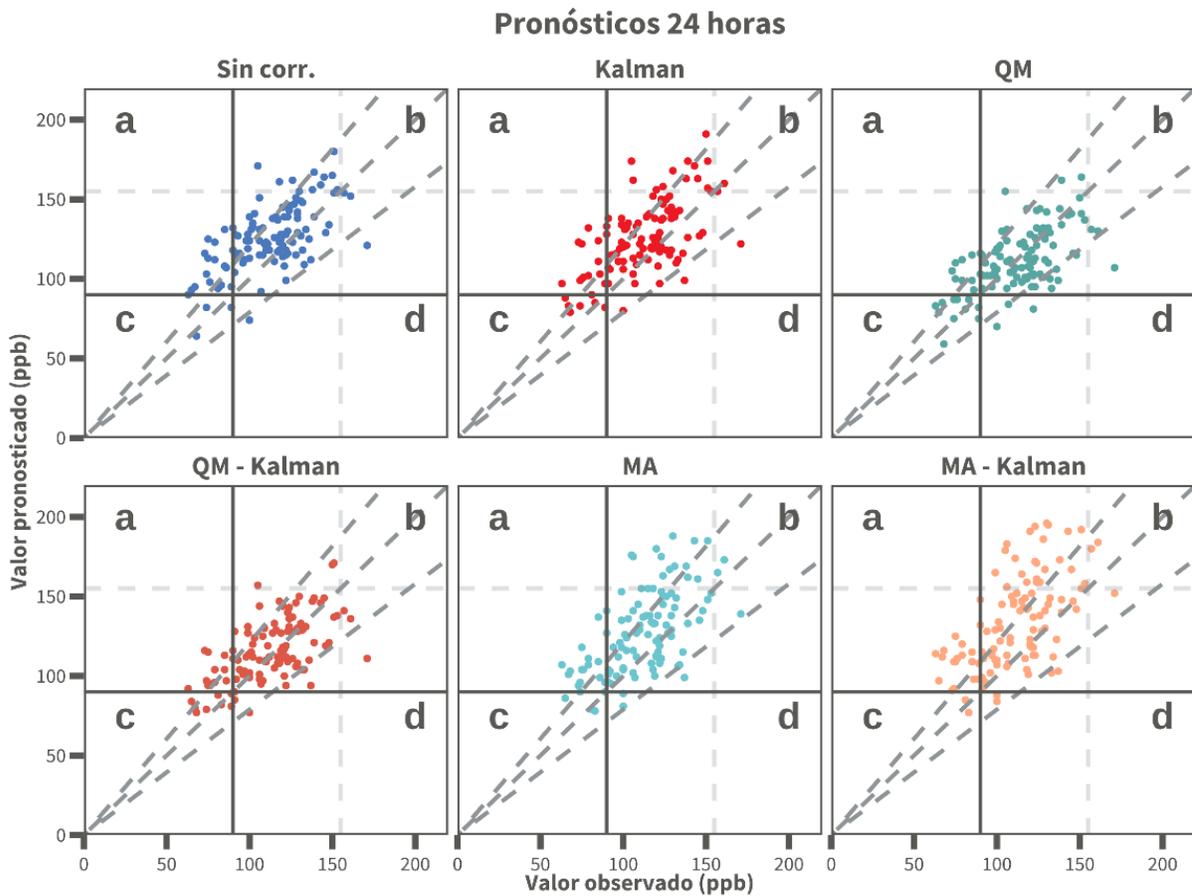


Figura 7.9. Gráficas de dispersión de máximos diarios observados y pronósticos de 24 horas.

El Índice de éxito crítico (CSI) combina las métricas de Precisión (Pr) y la Tasa de aciertos (H), por lo tanto, el CSI obtuvo porcentajes entre el 77 y 87 %, por lo que se confirmó el buen desempeño en la mayoría de los pronósticos. El porcentaje de falsas alarmas (FAR) tuvo un rango del 10 al 18 %, con los mínimos en las correcciones QM, esto debido a que el método QM no tiende a sobrestimar la concentración observada, en consecuencia, simulan pocos días en los que se supera la NOM y que no se observan. Finalmente, los resultados del sesgo (B) muestran valores ligeramente mayores a 1 en todos los pronósticos, esto indica una leve sobrestimación en la ocurrencia de casos que superan la NOM, lo cual se disminuyó con los métodos QM de 24 horas y MA de 48 horas.

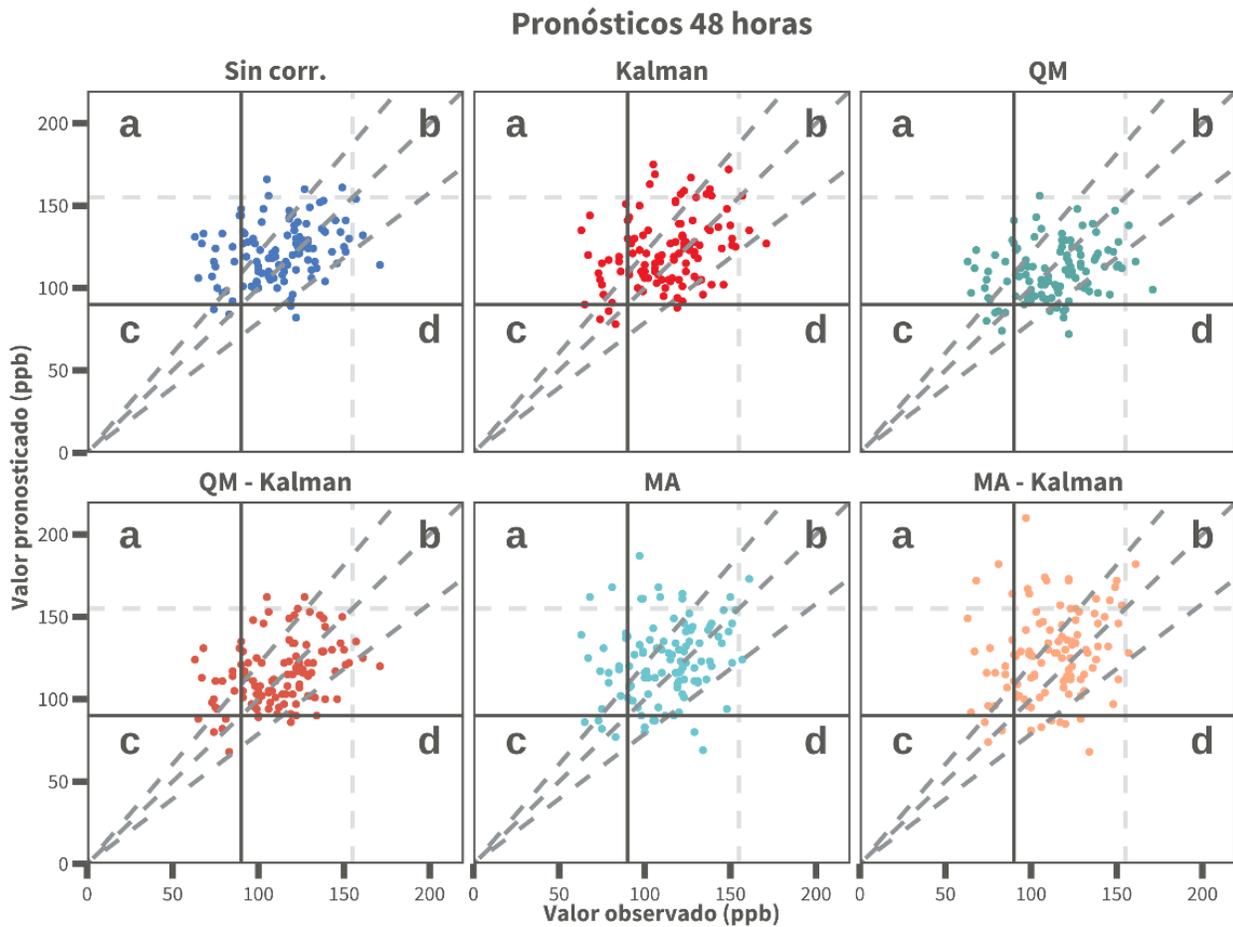


Figura 7.10. Gráficas de dispersión de máximos diarios observados y pronósticos de 48 horas.

Tabla 7.3. Resultados de las métricas de evaluación categórica de los pronósticos evaluados. En negritas se resalta el pronóstico mejor evaluado por cada métrica en 24 y en 48 horas.

Pronóstico	Método	A (%)	Pr (%)	H (%)	FAR (%)	CSI (%)	B
24 horas	Sin corrección	84.1	84.3	98.9	15.7	83.5	1.17
	Kalman	86.7	86.7	98.9	13.3	85.8	1.14
	QM	88.5	89.9	96.7	10.1	87.3	1.08
	QM - Kalman	85.8	87.3	96.7	12.7	84.8	1.11
	MA	83.8	84.6	97.8	15.4	83.0	1.16
	MA - Kalman	81.1	82.2	97.8	17.8	80.7	1.19
48 horas	Sin corrección	82.3	83.5	97.8	16.5	82.0	1.17
	Kalman	85.0	85.2	98.9	14.8	84.4	1.16
	QM	80.5	85.1	92.5	14.9	79.6	1.09
	QM - Kalman	82.3	85.4	94.6	14.6	81.5	1.11
	MA	77.5	83.7	90.1	16.3	76.6	1.08
	MA - Kalman	78.4	83.2	92.3	16.8	77.8	1.11

Comportamiento del pronóstico durante las contingencias de ozono

Durante la temporada de ozono del 2023, se presentaron concentraciones superiores al umbral de activación de contingencia (FI >154 ppb) en un total de 3 días: 23 de febrero, 25 y 26 de marzo. De estas fechas, sólo el 25 y 26 de marzo **fueron correctamente detectadas** por los pronósticos con Kalman, MA y MA-Kalman (24 horas). El pronóstico sin corrección alcanzó máximos cercanos a FI, pero no superó el valor de activación de contingencia. En las simulaciones de 48 horas, solamente con el método MA se logró anticipar las concentraciones altas para el día 25 de marzo; mientras que el Kalman pudo predecir los niveles del día 26 (Tabla 7.4).

Tabla 7.4. Concentración máxima observada y pronosticada (ppb) en las fechas que se alcanzó la Fase I de contingencia.

Pronóstico	Fecha	Observado	Sin Corrección	Kalman	QM	QM-Kalman	MA	MA-Kalman
24 horas	2023-02-23	171	117	117	102	108	138	152
	2023-03-25	161	152	160	130	136	173	184
	2023-03-26	157	154	155	131	141	165	180
48 horas	2023-02-23	171	114	127	99	120	-	-
	2023-03-25	161	132	135	116	125	173	182
	2023-03-26	157	154	156	138	135	124	128

En el análisis del total de días que cada método estimó valores superiores a 154 ppb (**Tabla 7.5**), se determinó que la mayoría de las correcciones pronosticaron más días con FI, en comparación con los que realmente ocurrieron. La corrección con Kalman (24 h) acertó en 2 de 15 casos en los que pronosticó contingencia, por lo que fue el método con mayor porcentaje de acierto para detectar los días con FI.

Tabla 7.5. Desempeño de los pronósticos evaluados en días de contingencia.

Pronóstico	Método	Días >154 ppb	Días con acierto	% acierto
24 horas	Sin corrección	11	0	0 %
	Kalman	15	2	13 %
	QM	3	0	0 %
	QM - Kalman	3	0	0 %
	MA	18	2	11 %
	MA - Kalman	27	2	7 %
48 horas	Sin corrección	4	0	0 %
	Kalman	12	1	8 %
	QM	1	0	0 %
	QM - Kalman	3	0	0 %
	MA	11	1	9 %
	MA - Kalman	17	1	6 %

Estos resultados son consistentes con la gráfica de cuantiles condicionales (**Figura 7.6**), en las que hay una mayor correspondencia con lo observado hasta alrededor de 100 ppb, pero cuando se supera este valor, la mayoría de los pronósticos tienden a sobrestimar la concentración. En consecuencia, el rendimiento de los pronósticos decrece en las concentraciones muy altas, pues están en el límite de los valores atípicos.

Discusión

Los métodos de corrección del pronóstico realizan un ajuste de los datos del modelo AQFS-CDMX considerando distintas propiedades de los datos. Por ejemplo, el filtro de Kalman y el método de MA, corrigen el pronóstico desde el sesgo observado en los días anteriores; mientras que el método QM ajusta los valores y su distribución. Debido a esto, hay diferencias en el desempeño de cada método, ya que algunos compensan el sesgo y otros dependen de los datos históricos de pronósticos y observados.

En este análisis se observó que los pronósticos corregidos por QM presentan un mejor desempeño en las métricas generales, pero es complicado que puedan anticipar un episodio de alta concentración el cual es considerado un dato atípico, como son registros que detona una contingencia ambiental (FI). Por su parte, los métodos Kalman y MA pronosticaron algunos días en los que se llegó a una F1; sin embargo, también predicen días concentraciones altas de F1 sin que estas ocurran, lo que ocasiona un sobre alertamiento de dichos eventos.

De acuerdo con los resultados de la evaluación, se concluye que los métodos de corrección sí mejoran el desempeño, en comparación con el pronóstico sin corrección. En términos de los patrones diurnos y el comportamiento horario, los métodos de corrección presentaron una mejora notable, pero en todos se complica pronosticar correctamente los eventos de alta concentración, ya que son valores atípicos.

Los métodos de corrección han demostrado mejorar el desempeño del modelo AQFS-CDMX; sin embargo, para lograr una mayor aproximación con los datos reales, también se deben considerar los aspectos y características en la construcción de un modelo de calidad del aire, ya que son los factores que más influyen en los resultados del pronóstico. Por ejemplo, para mejorar el pronóstico también es necesario optimizar la calidad de los datos de entrada (meteorología y emisiones) o modificar parámetros operacionales. Finalmente, es importante mencionar que los pronósticos solamente son **recursos complementarios** que dan guía a los expertos en calidad del aire tomen decisiones con el objetivo de tener la menor incertidumbre posible y así, ofrecer mejor calidad de información para la protección a la salud de la población.

Referencias



Referencias

- Aeschlimann, M., Li, G., Kanji, Z. A., & Mitrano, D. M. (2022). Microplastics and nanoplastics in the atmosphere: the potential impacts on cloud formation processes. *Nature Geoscience*, *15*(12), 967–975. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01051-9>
- Akhbarizadeh, R., Dobaradaran, S., Amouei Torkmahalleh, M., Saeedi, R., Aibaghi, R., & Faraji Ghasemi, F. (2021). Suspended fine particulate matter (PM_{2.5}), microplastics (MPs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air: Their possible relationships and health implications. *Environmental Research*, *192*(110339), 110339. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110339>
- Allen, D., Allen, S., Le Roux, G., Simonneau, A., Galop, D., & Phoenix, V. R. (2021). Temporal archive of atmospheric microplastic deposition presented in ombrotrophic peat. *Environmental Science & Technology Letters*, *8*(11), 954–960. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00697>
- Allen, Deonie, Allen, S., Abbasi, S., Baker, A., Bergmann, M., Brahney, J., Butler, T., Duce, R. A., Eckhardt, S., Evangeliou, N., Jickells, T., Kanakidou, M., Kershaw, P., Laj, P., Levermore, J., Li, D., Liss, P., Liu, K., Mahowald, N., ... Wright, S. (2022). Microplastics and nanoplastics in the marine-atmosphere environment. *Nature Reviews. Earth & Environment*, *3*(6), 393–405. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00292-x>
- Allen, S., Allen, D., Karbalaeei, S., Maselli, V., & Walker, T. R. (2022). Micro(nano)plastics sources, fate, and effects: What we know after ten years of research. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *6*(100057), 100057. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100057>
- Allen, S., Allen, D., Moss, K., Le Roux, G., Phoenix, V. R., & Sonke, J. E. (2020). Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. *PloS One*, *15*(5), e0232746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, *12*(5), 339–344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- 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. ISSN 22120955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101096>
- Amador-Muñoz, O., Martínez-Domínguez, Y. M., Gómez-Arroyo, S., & Peralta, O. (2020). 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>
- Amato-Lourenço, L. F., Dos Santos Galvão, L., de Weger, L. A., Hiemstra, P. S., Vijver, M. G., & Mauad, T. (2020). An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *The Science of the Total Environment*, *749*(141676), 141676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141676>
- American Lung Association. (2023a). Sulfur dioxide. <https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/sulfur-dioxide>
- American Lung Association. (2023b). Nitrogen dioxide. <https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/nitrogen-dioxide>
- Anenberg, S. C., Mohegh, A., Goldberg, D. L., Kerr, G. H., Brauer, M., Burkart, K., Hystad, P., Larkin, A., Wozniak, S., & Lamsal, L. (2022). Long-term trends in urban NO₂ concentrations and associated paediatric asthma incidence: estimates from global datasets. *The Lancet Planetary Health*, *6*(1), e49–e58. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(21\)00255-2](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00255-2)
- Arndt, J. A., Aulinger, A., & Matthias, V. (2019). Quantification of lightning-induced nitrogen oxide emissions over Europe. *Atmospheric Environment*, *202*, 128–141. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.059>

- Báez, A. P., Padilla, H. G., & De González, O. G. (1986). Acid rain over México City valley and surrounding rural areas. *Geofísica Internacional*, 25(2), 315–346. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1986.25.2.847>
- Báez, A., Belmont, R., García, R., Padilla, H., & Torres, M. (2007). Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmospheric Research*, 86(1), 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.03.005>
- Báez, A., Belmont, R., García, R., Torres, M., & Padilla, H. (2006). Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmospheric Research*, 80(1), 67–85. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.06.008>
- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R. F., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagaña, X., Tonne, C., Antó, J. M., & Achebak, H. (2023). Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nature Medicine*, 29(7), 1857–1866. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2009). Atmosphere, weather and climate. In *Routledge eBooks*. <https://doi.org/10.4324/9780203871027>
- Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M. B., Trachsel, J., & Gerdts, G. (2019). White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Science Advances*, 5(8), eaax1157. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1157>
- Bermúdez, J. R., & Swarzenski, P. W. (2021). A microplastic size classification scheme aligned with universal plankton survey methods. *MethodsX*, 8(101516), 101516. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101516>
- Bornman, J. F., Barnes, P. W., Robson, T. M., Robinson, S. A., Jansen, M. A. K., Ballaré, C. L., & Flint, S. D. (2019). Linkages between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. *Photochemical & Photobiological Sciences: Official Journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology*, 18(3), 681–716. <https://doi.org/10.1039/c8pp90061b>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. *Science (New York, N.Y.)*, 368(6496), 1257–1260. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Bravo, H., Sosa, R., & Torres, R. (1991). Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México. *Revista ciencias*, 22(abril). <https://www.revistacienciasunam.com/en/170-revistas/revista-ciencias-22/1536-ozono-y-lluvia-%C3%A1cida-en-la-ciudad-de-m%C3%A9xico.html>
- Bretón, R. M. C., Bretón, J. G. C., Uacán, C. a. A., Lara, E. R., Álvarez, J. a. O., Romero, C. M., & Pat, C. G. C. (2014). Wet deposition fluxes and related atmospheric chemistry at three sites in Mexico. *Open Journal of Air Pollution*, 03(01), 1–9. <https://doi.org/10.4236/ojap.2014.31001>
- California Air Resources Board, CARB. (2024a). *Monóxido de carbono y salud*. <https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/carbon-monoxide-and-health>
- California Air Resources Board, CARB. (2024b). *Materia particulada respirable y salud*. <https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/inhalable-particulate-matter-and-health>
- Carlini, G. (2023). Breathing Plastic: The Health Impacts of Invisible Plastics in the Air. Center for International Environmental Law. <https://www.ciel.org>
- Carslaw, D.C. (2019). *Openair: Tools for the analysis of air pollution data*. Manual for version 2.6-6, University of York. <https://davidcarslaw.com/files/openairmanual.pdf>
- Catarino, A. I., León, M. C., Li, Y., Lambert, S., Vercauteren, M., Asselman, J., Janssen, C. R., Everaert, G., & De Rijcke, M. (2023). Micro- and nanoplastics transfer from seawater to the atmosphere through aerosolization under controlled laboratory conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 192(115015), 115015. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115015>

- Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., & Henry, T. B. (2018). Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 237, 675–684. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.069>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2024). *Carbon monoxide poisoning*. U.S. Department of Health & Human Services. <https://www.cdc.gov/carbon-monoxide/about/index.html>
- 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>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023a). *Se activa Fase I de contingencia ambiental atmosférica regional por partículas PM_{2.5} en la zona sureste del Valle de México* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activa-fase-i-de-contingencia-ambiental-atmosferica-regional-por-particulas-pm2-5-en-la-zona-sureste-del-valle-de-mexico?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023b). *Se mantiene Fase I de contingencia ambiental atmosférica regional por partículas PM_{2.5} en la zona sureste del Valle de México* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-mantiene-la-contingencia-ambiental-atmosferica-regional-por-particulas-pm2-5-en-la-zona-sureste-del-valle-de-mexico-322794?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023c). *Se suspende Fase I de contingencia ambiental atmosférica regional por partículas PM_{2.5} en la zona sureste del Valle de México* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-suspende-la-contingencia-ambiental-atmosferica-regional-por-particulas-pm2-5-en-la-zmvm?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023d). *Se activa contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activa-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-zmvm-327470?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023e). *Se mantiene contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-mantiene-la-fase-i-de-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-327519?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023f). *Se suspende contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-suspende-la-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zmvm-327622?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023g). *Se activa contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activa-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-zmvm-329961?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023h). *Se mantiene contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-mantiene-la-fase-i-de-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zmvm-329972?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023i). *Se mantiene contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-mantiene-la-fase-i-de-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zmvm-329987?idiom=es>

- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023j). *Se mantiene contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-mantiene-la-fase-i-de-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zmvm-329988?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023k). *Se mantiene contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-mantiene-la-fase-i-de-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zmvm-330062?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023l). *Se suspende contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-suspende-la-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zmvm-330077?idiom=es>
- Comisión Ambiental de la Megalópolis, CAME. (2023m). *Nota de calidad del aire - ozono, Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)* [Comunicado oficial]. Recuperado de <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/nota-de-calidad-del-aire-ozono-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-zmvm?idiom=es>
- D’Orazio, J., Jarrett, S., Amaro-Ortiz, A., & Scott, T. (2013). UV radiation and the skin. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(6), 12222–12248. <https://doi.org/10.3390/ijms140612222>
- Delle Monache, L., Nipen, T., Deng, X., Zhou, Y., & Stull, R. (2006). Ozone ensemble forecasts: 2. A Kalman filter predictor bias correction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5). <https://doi.org/10.1029/2005JD006311>
- Djalalova, I., Wilczak, J., McKeen, S., Grell, G., Peckham, S., Pagowski, M., DelleMonache, L., McQueen, J., Tang, Y., & Lee, P. (2009). Ensemble and bias-correction techniques for air quality model forecasts of surface O₃ and PM_{2.5} during the TEXAQS-II experiment of 2006. *Atmospheric Environment*, 44(4), 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.007>
- Dos Santos Galvão, L., Fernandes, E. M. S., Ferreira, R. R., Dos Santos Rosa, D., & Wiebeck, H. (2022). Critical steps for microplastics characterization from the atmosphere. *Journal of Hazardous Materials*, 424(Pt C), 127668. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127668>
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., & Tassin, B. (2015). Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry (Collingwood, Vic.)*, 12(5), 592. <https://doi.org/10.1071/en14167>
- European Environment Agency. (2023). Air quality in Europe — 2023 report (Report No. 24/2023). Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-air-quality-status-2023>
- Facciolà, A., Visalli, G., Pruiti Ciarello, M., & Di Pietro, A. (2021). Newly emerging airborne pollutants: Current knowledge of health impact of micro and nanoplastics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 2997. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062997>
- Feigenwinter, I., Kotlarski, S., Casanueva, A., Fischer, A. M., Schwierz, C., & Liniger, M. A. (2018). *Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland* (Technical Report No. 270). MeteoSwiss. https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:1b810050-11a2-415d-b439-3b2eb75f9693/MeteoSchweiz_Fachbericht_270_final.pdf
- García, R., Belmont, R., Padilla, H., Torres, M. C., & Báez, A. (2009). Trace metals and inorganic ion measurements in rain from Mexico City and a nearby rural area. *Chemistry and Ecology*, 25(2), 71–86. <https://doi.org/10.1080/02757540902758776>
- García-Martínez, R., Carrillo-Chavez, A., Torres-Jardón, R., Ramirez-Guzmán, A., & López-Carrasco, M. (2020). Chemical composition of rainwater collected from 2006 to 2009 in Mexico City and at a rural site at Morelos State,

south central Mexico. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 37(1), 1–8. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.1.1101>

- Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J., & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
- GBD 2021 Carbon Monoxide Poisoning Collaborators. (2023). Global, regional, and national mortality due to unintentional carbon monoxide poisoning, 2000–2021: Results from the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet Public Health*, 8(11), e839–e849. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(23\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(23)00185-8)
- 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>
- Hamra, G. B., Guha, N., Cohen, A., Laden, F., Raaschou-Nielsen, O., Samet, J. M., Vineis, P., Forastiere, F., Saldiva, P., Yorifuji, T., & Loomis, D. (2014). Outdoor Particulate Matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Health Perspectives*. <https://doi.org/10.1289/ehp.1408092>
- Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Dugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L., & Wagner, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- Health Effects Institute. (2024). *State of global air 2024*. https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/documents/2024-06/soga-2024-report_0.pdf
- Hodzic, A., & Madronich, S. (2018). Response of surface ozone over the continental United States to UV radiation declines from the expected recovery of stratospheric ozone. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0045-5>
- Holton, J. R., & Hakim, G. J. (2013). *An Introduction to Dynamic Meteorology* (5ª ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63394-8>
- Honour, S. L., Bell, J. N. B., Ashenden, T. W., Cape, J. N., & Power, S. A. (2008). Responses of herbaceous plants to urban air pollution: Effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. *Environmental Pollution*, 157(4), 1279–1286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.11.049>
- Hoth, J. (1986). *Lluvia ácida: La muerte silenciosa*. https://www.researchgate.net/profile/Juergen-Hoth-Von-Der-Meden/publication/235918596_1986_Hoth_Lluvia_Acida_MexicoAcid_rain_Mexico_City/links/0046351425876dda53000000/1986-Hoth-Lluvia-Acida-Mexico-Acid-rain-Mexico-City.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. (2023). <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- International Agency for Research on Cancer, IARC. (2013, October 17). *Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths* (Press Release No. 221). World Health Organization, WHO. https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr221_E.pdf
- Jacob, D. (1999). *Introduction to atmospheric chemistry*. Princeton University Press.
- Jasaitis, D., Vasiliauskienė, V., Chadyšienė, R., & Pečiulienė, M. (2016). Surface ozone concentration and its relationship with UV radiation, meteorological parameters and radon on the Eastern coast of the Baltic Sea. *Atmosphere*, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/atmos7020027>

- Kang, D., Eder, B.K., Mathur, R., Yu, S., Schere, K.L. (2007). An Operational Evaluation of ETA-CMAQ Air Quality Forecast Model. In: Borrego, C., Norman, AL. (eds) Air Pollution Modeling and Its Application XVII. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1_63
- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M. J., & Colvile, R. N. (2007). Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 41(23), 4781–4810. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.002>
- Klein, M., & Fischer, E. K. (2019). Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany. *The Science of the Total Environment*, 685, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.405>
- La Nasa, J., Lomonaco, T., Manco, E., Ceccarini, A., Fuoco, R., Corti, A., Modugno, F., Castelvetro, V., & Degano, I. (2021). Plastic breeze: Volatile organic compounds (VOCs) emitted by degrading macro- and microplastics analyzed by selected ion flow-tube mass spectrometry. *Chemosphere*, 270(128612), 128612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128612>
- Lang, P. E., Carslaw, D. C., & Moller, S. J. (2019). A trend analysis approach for air quality network data. *Atmospheric Environment: X*, 2(100030), 100030. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100030>
- Li, J., Sun, S., Tang, R., Qiu, H., Huang, Q., Mason, T., & Tian, L. (2016). Major air pollutants and risk of COPD exacerbations: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of COPD, Volume 11*, 3079–3091. <https://doi.org/10.2147/copd.s122282>
- Li, Y., Shao, L., Wang, W., Zhang, M., Feng, X., Li, W., & Zhang, D. (2020). Airborne fiber particles: Types, size and concentration observed in Beijing. *The Science of the Total Environment*, 705(135967), 135967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135967>
- Liang, D., Shi, L., Zhao, J., Liu, P., Sarnat, J. A., Gao, S., Schwartz, J., Liu, Y., Ebel, S. T., Scovronick, N., & Chang, H. H. (2020). Urban air pollution may enhance COVID-19 Case-Fatality and mortality rates in the United States. *The Innovation*, 1(3), 100047. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100047>
- Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., & Li, D. (2019). Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *The Science of the Total Environment*, 675, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>
- Liu, Q., Wu, H., Chen, J., Guo, B., Zhao, X., Lin, H., Li, W., Zhao, X., Lv, S., & Huang, C. (2022). Adsorption mechanism of trace heavy metals on microplastics and simulating their effect on microalgae in river. *Environmental Research*, 214(Pt 1), 113777. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113777>
- Liu, Y., Nie, Z., Meng, Y., Liu, G., Chen, Y., & Chai, G. (2025). Influence of meteorological conditions on atmospheric microplastic transport and deposition. *Environmental Research*, 265(120460), 120460. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120460>
- Lopez-Chaves, C., Soto-Alvaredo, J., Montes-Bayon, M., Bettmer, J., Llopis, J., & Sanchez-Gonzalez, C. (2018). Gold nanoparticles: Distribution, bioaccumulation and toxicity. In vitro and in vivo studies. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2017.08.011>
- Marquès, M., Correig, E., Ibarretxe, D., Anoro, E., Arroyo, J. A., Jericó, C., Borrallo, R. M., Miret, M., Näf, S., Pardo, A., Perea, V., Pérez-Bernalte, R., Ramírez-Montesinos, R., Royuela, M., Soler, C., Urquizu-Padilla, M., Zamora, A., Pedro-Botet, J., Masana, L., & Domingo, J. L. (2021). Long-term exposure to PM10 above WHO guidelines exacerbates COVID-19 severity and mortality. *Environment International*, 158, 106930. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106930>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023, June 6). *The Earth-Atmosphere Energy Balance*. <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/energy>

- Newell, K., Kartsonaki, C., Lam, K. B. H., & Kurmi, O. P. (2017). Cardiorespiratory health effects of particulate ambient air pollution exposure in low-income and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Planetary Health*, 1(9), e368–e380. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(17\)30166-3](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(17)30166-3)
- NOAA National Centers for Environmental Information. (2024). *Monthly Global Climate Report for Annual 2023*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00672>
- O'Brien, S., Rauert, C., Ribeiro, F., Okoffo, E. D., Burrows, S. D., O'Brien, J. W., Wang, X., Wright, S. L., & Thomas, K. V. (2023). There's something in the air: A review of sources, prevalence and behaviour of microplastics in the atmosphere. *The Science of the Total Environment*, 874(162193), 162193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162193>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Orellano, P., Reynoso, J., & Quaranta, N. (2021). Short-term exposure to sulphur dioxide (SO₂) and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 150, 106434. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106434>
- Organización Mundial de la Salud, (OMS). (2003). Índice UV Solar Mundial. Guía Práctica. Documento WHO/SDE/OEH/02.2. Recomendación conjunta de Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9241590076>
- Paoletti, E. (2008). Ozone and urban forests in Italy. *Environmental Pollution*, 157(5), 1506–1512. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.019>
- *Particulate Matter (PM) Air Quality Standards | US EPA*. (2025, January 16). US EPA. <https://www.epa.gov/naaqs/particulate-matter-pm-air-quality-standards>
- Pérez-Suárez, M., Cetina-Alcalá, V. M., Aldrete, A., Fenn, M. E., & Landois-Palencia, L. L. (2006). Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México. *Agrociencia*, 40(2), 239–248. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-31952006000200239&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Rappazzo, K. M., Nichols, J. L., Rice, R. B., & Luben, T. J. (2021). Ozone exposure during early pregnancy and preterm birth: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 198, 111317. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111317>
- Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., Athey, S., Huntington, A., Mcllwraith, H., Munno, K., De Frond, H., Kolomijeca, A., Erdle, L., Grbic, J., Bayoumi, M., Borrelle, S. B., Wu, T., Santoro, S., Werbowski, L. M., ... Hung, C. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(4), 703–711. <https://doi.org/10.1002/etc.4371>
- Rodríguez-Sánchez, V. M., Rosas, U., Calva-Vásquez, G., & Sandoval-Zapotitla, E. (2020). Does acid rain alter the leaf anatomy and photosynthetic pigments in urban trees? *Plants*, 9(7), 862. <https://doi.org/10.3390/plants9070862>
- Schikowski, T., Sugiri, D., Ranft, U., Gehring, U., Heinrich, J., Wichmann, H., & Krämer, U. (2005). Long-term air pollution exposure and living close to busy roads are associated with COPD in women. *Respiratory Research*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/1465-9921-6-152>
- Secretaría de Salud. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021. *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O₃). Valores normados para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.* (NOM-020-SSA1-2021). Diario Oficial de la Federación, DOF. (2021). https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0

- Secretaría de Salud. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021. *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO). Valores normados para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.* (NOM-021-SSA1-2021). Diario Oficial de la Federación, DOF. (2021). [\[https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0\]](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0)
- Secretaría de Salud. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021. *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de nitrógeno (NO₂). Valores normados para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.* (NOM-023-SSA1-2021). Diario Oficial de la Federación, DOF. (2021). [\[https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0\]](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
- Secretaría de Salud. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021. *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.* (NOM-025-SSA1-2021). Diario Oficial de la Federación, DOF. (2021). [\[https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0\]](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
- 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. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2017/mobile/
- 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. Informe anual 2019. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2019.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, SEDEMA. (2024). Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2022. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. Informe anual 2022. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2022.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (1994). *Informe anual de lluvia ácida 1994.* http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_lluvia_acida_1994/#p=1
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Dirección de Monitoreo Atmosférico. (2010). *Línea del Tiempo del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT).* Recuperado el 20 de enero de 2025, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-cartel-linea-tiempo.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. (2008). *Estado de la lluvia ácida en la Zona Metropolitana del Valle de México.* Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. http://centro.paot.org.mx/documentos/simat/edo_lluvia_acida_zmvm.pdf
- SEDEMA (2023). Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020.* Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México (2023). <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2020/inventario-emisiones-cdmx-2020.pdf>
- SEDEMA (2024). Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2022.* Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire (2024). <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/informe-anual-calidad-del-aire-2022.pdf>
- Segovia-Mendoza, M., Nava-Castro, K. E., Palacios-Arreola, M. I., Garay-Canales, C., & Morales-Montor, J. (2020). How microplastic components influence the immune system and impact on children health: Focus on cancer. *Birth Defects Research*, 112(17), 1341–1361. <https://doi.org/10.1002/bdr2.1779>
- Segovia-Mendoza, M., Palacios-Arreola, M. I., Monroy-Escamilla, L. M., Soto-Piña, A. E., Nava-Castro, K. E., Becerril-Alarcón, Y., Camacho-Beiza, R., Aguirre-Quezada, D. E., Cardoso-Peña, E., Amador-Muñoz, O., Garduño-García, J. de J., & Morales-Montor, J. (2022). Association of serum levels of plasticizers compounds, phthalates and bisphenols,

in patients and survivors of breast cancer: A real connection? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 8040. <https://doi.org/10.3390/ijerph19138040>

- Segovia-Mendoza, M., Palacios-Arreola, M. I., Pavón, L., Becerril, L. E., Nava-Castro, K. E., Amador-Muñoz, O., & Morales-Montor, J. (2022). Environmental pollution to blame for depressive disorder? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1737. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031737>
- Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G., & Shelby, J. (2018). The national solar radiation data base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>
- Servicio Meteorológico Nacional, (SMN). (2023). Reporte del Clima en México: Reporte Mensual Noviembre 2023. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, año 13, núm. 11. Gerencia de Meteorología y Climatología. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Noviembre23.pdf>
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN. (2024). *Reporte del clima en México: Anual 2023*. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico%20Atmosférico/Reporte%20del%20Clima%20en%20México/Anual2023.pdf>
- Shen, S., Li, X., Yuan, C., Huang, Q., Liu, D., Ma, S., Hui, J., Liu, R., Wu, T., & Chen, Q. (2020). Association of short-term exposure to sulfur dioxide and hospitalization for ischemic and hemorrhagic stroke in Guangzhou, China. *BMC Public Health*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12889-020-8354-0>
- Shruti, V. C., Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., & Martínez, I. E. (2022). Occurrence and characteristics of atmospheric microplastics in Mexico City. *The Science of the Total Environment*, 847(157601), 157601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157601>
- Singh, S., Elumalai, S. P., & Pal, A. K. (2016). Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study. *The Science of the Total Environment*, 563–564, 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.066>
- Sosa Echeverría, R., Alarcón Jiménez, A. L., Torres Barrera, M. del C., Sánchez Alvarez, P., Granados Hernandez, E., Vega, E., Jaimes Palomera, M., Retama, A., & Gay, D. A. (2023). Nitrogen and sulfur compounds in ambient air and in wet atmospheric deposition at Mexico city metropolitan area. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 292(119411), 119411. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119411>
- Sosa-Echeverría, R., Alarcón-Jiménez, A. L., Del Carmen Torres-Barrera, M., Jaimes-Palomera, M., Retama-Hernández, A., Sánchez-Álvarez, P., Granados-Hernández, E., & Bravo-Álvarez, H. (2019). Spatial and temporal variation of acid rain in the Mexico City Metropolitan Zone. *Atmósfera*, 32(1), 55–69. <https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.01.05>
- Sridharan, S., Kumar, M., Singh, L., Bolan, N. S., & Saha, M. (2021). Microplastics as an emerging source of particulate air pollution: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 418(126245), 126245. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126245>
- Stubbins, A., Law, K. L., Muñoz, S. E., Bianchi, T. S., & Zhu, L. (2021). Plastics in the Earth system. *Science (New York, N.Y.)*, 373(6550), 51–55. <https://doi.org/10.1126/science.abb0354>
- Sun, Y., Ren, X., Rene, E. R., Wang, Z., Zhou, L., Zhang, Z., & Wang, Q. (2021). The degradation performance of different microplastics and their effect on microbial community during composting process. *Bioresource Technology*, 332(125133), 125133. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125133>
- U.S. Environmental Protection Agency (2024). *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Table*. U.S. EPA. (2024). <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>

- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Integrated science assessment (ISA) for particulate matter (final report, December 2019)* (EPA/600/R-19/188). U.S. Environmental Protection Agency. <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534>
- UCAR Center for Science Education. (2024). *Carbon monoxide*. University Corporation for Atmospheric Research. <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/carbon-monoxide>
- Urbina Leonor, L. M., Sosa Echeverría, R., Perez, N. A., Vega, E., Kahl, J. D. W., Solano Murillo, M., & Soto Ayala, R. (2023). Importance of atmospheric sciences in stone heritage conservation study in Italy and Mexico. *Sustainability*, 15(6), 5321. <https://doi.org/10.3390/su15065321>
- Valtierra M. M. (2010). Diseño y Estandarización de un método analítico para la determinación de disruptores endocrinos en partículas suspendidas $\leq 2.5 \mu\text{m}$ [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Tesis UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/items/044e351a-12b1-473b-9fb2-a33f82b06a38>
- Van Eeden, S. F., Tan, W. C., Suwa, T., Mukae, H., Terashima, T., Fujii, T., Qui, D., Vincent, R., & Hogg, J. C. (2001). Cytokines involved in the systemic inflammatory response induced by exposure to particulate matter air pollutants (PM₁₀). *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 164(5), 826–830. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.164.5.2010160>
- van Sebille, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., van Franeker, J. A., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F., & Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental research letters*, 10(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
- Vega, E., Wellens, A., Alarcón, A. L., Sosa, R., Solano, M., & Jaimes-Palomera, M. (2023). Spatiotemporal variations in chemical composition of wet atmospheric deposition in Mexico City. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(9), 230023. <https://doi.org/10.4209/aaqr.230023>
- Vethaak, A. D., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. *Science (New York, N.Y.)*, 371(6530), 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd ed.). Academic Press. ISBN-10: 012732951X / ISBN-13: 978-0127329512
- Wang, L., & Yu, J. (2023). Principles of photocatalysis. En *Interface Science and Technology* (pp. 1–52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18786-5.00002-0>
- Wang, M., Li, H., Huang, S., Qian, Y., Steenland, K., Xie, Y., Papatheodorou, S., & Shi, L. (2021). Short-term exposure to nitrogen dioxide and mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Research*, 202, 111766. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111766>
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (2a ed., Vol. 91). Academic Press. <https://www.elsevier.com/books/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences/wilks/978-0-12-815823-4>
- World Health Organization (WHO). 2022. Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health. Geneva. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240054608>
- World Health Organization, WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- World Meteorological Organization. (2024). *State of the global climate 2023*. World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/records/item/68835-state-of-the-global-climate-2023>

- Wu, F., Fang, X., Yang, Y., Dupont-Nivet, G., Nie, J., Fluteau, F., Zhang, T., & Han, W. (2022). Reorganization of Asian climate in relation to Tibetan Plateau uplift. *Nature Reviews. Earth & Environment*, 3(10), 684–700. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00331-7>
- Xu, A., Shi, M., Xing, X., Su, Y., Li, X., Liu, W., Mao, Y., Hu, T., & Qi, S. (2022). Status and prospects of atmospheric microplastics: A review of methods, occurrence, composition, source and health risks. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 303(119173), 119173. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119173>
- Yang, L., & Ma, C. (2023). Toward a better understanding of microalgal photosynthesis in medium polluted with microplastics: a study of the radiative properties of microplastic particles. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1193033. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1193033>
- Zeng, J., Yue, F.-J., Li, S.-L., Wang, Z.-J., Wu, Q., Qin, C.-Q., & Yan, Z.-L. (2020). Determining rainwater chemistry to reveal alkaline rain trend in Southwest China: Evidence from a frequent-rainy karst area with extensive agricultural production. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 266(Pt 3), 115166. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115166>
- Zhang, M., Gao, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Gao, Y., Cheng, B., & Li, Z. (2021). Preparation and properties of polyphenylene sulfide/oxidized-polyphenylene sulfide composite membranes. *Reactive & Functional Polymers*, 160(104842), 104842. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104842>
- Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., & Sillanpää, M. (2019). Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 254(Pt A), 112953. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.121>
- Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 203(103118), 103118. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>
- Zhu, K., Jia, H., Jiang, W., Sun, Y., Zhang, C., Liu, Z., Wang, T., Guo, X., & Zhu, L. (2022). The first observation of the formation of persistent aminoxyl radicals and reactive nitrogen species on photoirradiated nitrogen-containing microplastics. *Environmental Science & Technology*, 56(2), 779–789. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05650>

Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX



SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO (SIMAT)

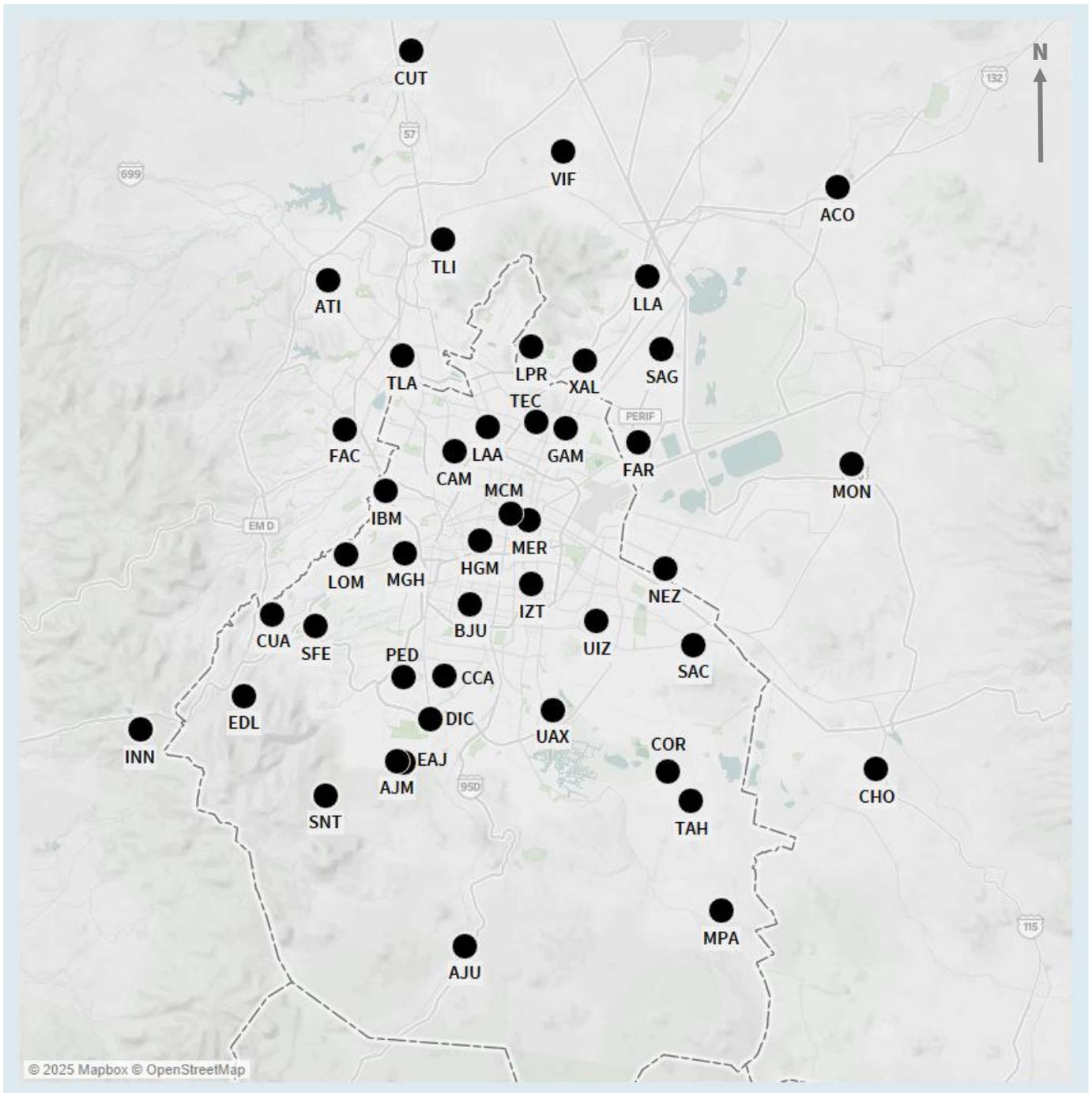
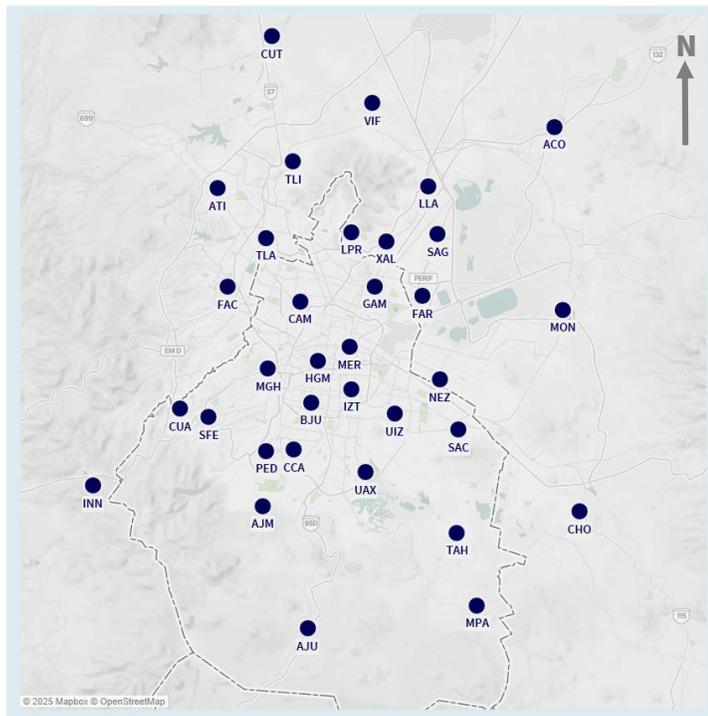
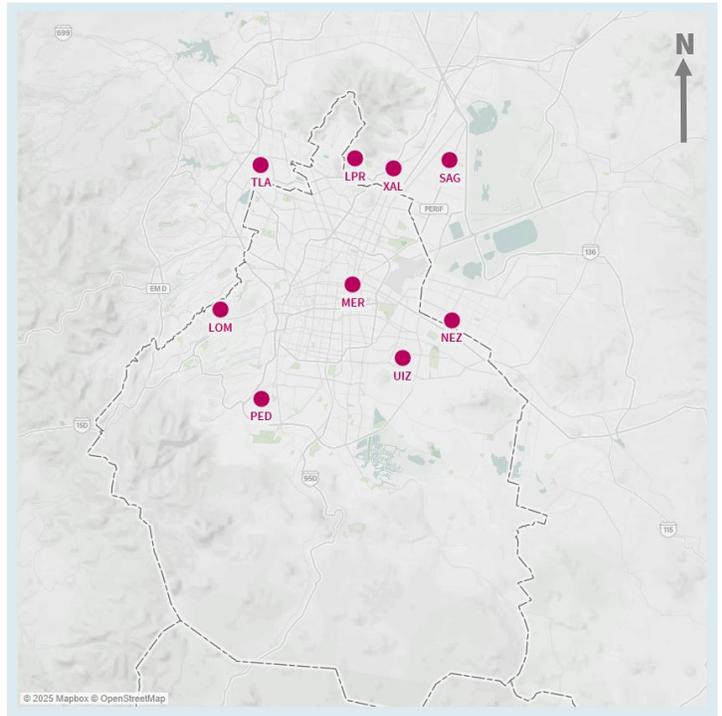


Figura A1.1. Distribución de los sitios del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la CDMX.

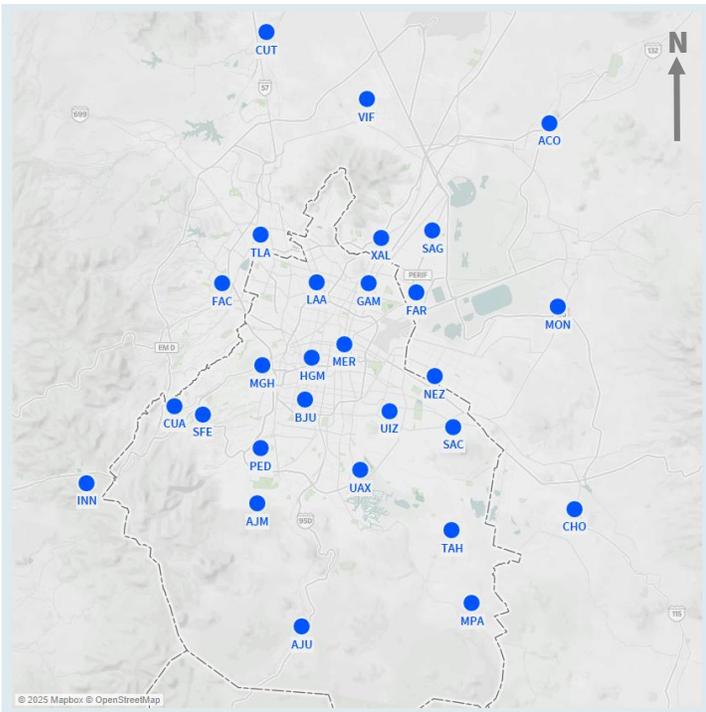
Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA)



Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA)



Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)



Red de Depósito Atmosférico (REDDA)

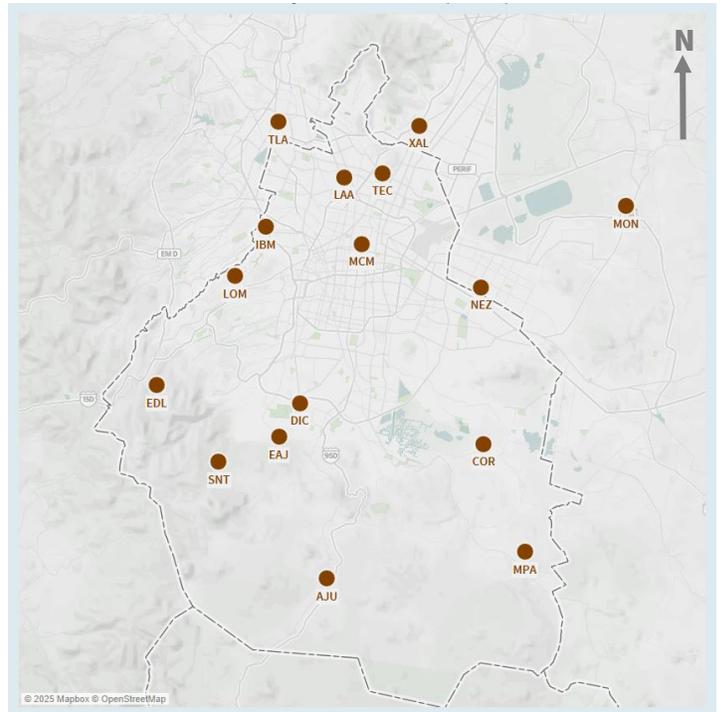


Figura A1.2. Distribución de las redes de monitoreo que conforman el SIMAT.

Tabla A1.1. Estaciones que integran la RAMA en la CDMX y el EDOMEX.

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros									
					O ₃	NO _x	NO ₂	NO	CO	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{co}	
CDMX	Álvaro 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	H. Gral. de México	HGM	Feb-2012										
	Gustavo 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											
EDOMEX	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										
	Tepotztlán	Cuautitlán	CUT	Feb - 2012										
	Texcoco	Montecillo	MON	Nov - 1993										
	Tlalneantla	La Presa	LPR	Ene - 1986										
Tlalneantla		TLA	Ene - 1986											
Tultitlán	Tultitlán	TLI	Nov - 1993											

Tabla A1.2. Estaciones que integran la REDMA en la CDMX y el EDOMEX

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetros		
					PST	PM ₁₀	PM _{2.5}
CDMX	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene - 1989			
	Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	Ene - 1989			
	Miguel Hidalgo	Lomas	LOM	Ene - 1989			
	Venustiano Carranza	Merced	MER	Ene - 1989			
EDOMEX	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 A1.3. Estaciones que integran la REDDA en la CDMX y el EDOMEX

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

PP: precipitación pluvial; CE: Conductividad Eléctrica

Tabla A1.4. Estaciones que integran la REDMET en la CDMX y el EDOMEX

Entidad	Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Inicio de operación	Parámetro									
					WSP	WDR	TMP	RH	UV-A	UV-B	RADG	PA		
CDMX	Álvaro Obregón	Pedregal	PED	Ene - 1986										
	Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	Ago - 2015										
	Coyoacán	UAM Xochimilco	UAX	Feb - 2012										
	Cuajimalpa	Cuajimalpa	CUA	Jun - 2000										
	Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	Feb - 2012										
	Cuauhtémoc	Hospital General de México	HGM	Feb - 2012										
	Gustavo A. Madero	Gustavo A. Madero	GAM	Dic - 2015										
		Lab. 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											
EDOMEX	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										
	Cuautitlán Izcalli	Cuautitlán	CUT	Feb - 2012										
	Texcoco	Montecillo	MON	Jun - 2000										
Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	Ene - 1986											

Operación del SIMAT



OPERACIÓN DEL SIMAT

Tabla A2.1. Períodos sin datos por mantenimiento u otra causa, en estaciones de la RAMA y REDMET durante 2023 en la CDMX.

Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Á. Obregón	Pedregal	PED	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	19/02/23	12:00	12/05/23	01:00	Mantenimiento
				NO ₂ , NO, NO _x	01/03/23	12:00	09/05/23	01:00	Mantenimiento
				SO ₂	21/03/23	14:00	09/05/23	01:00	Mantenimiento
				CO	05/09/23	14:00	24/10/23	01:00	Mantenimiento
Azcapotzalco	Camarones	CAM	RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂	14/04/23	17:00	28/06/23	07:00	Falla aire acondicionado
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	14/04/23	16:00	25/05/23	02:00	Falla aire acondicionado
Benito Juárez	Benito Juárez	BJU	REDMET	RH, TMP	23/08/23	00:00	09/10/23	22:00	Falla de sensor
Coyoacán	Centro de Ciencias de la Atmósfera	CCA	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	27/09/23	12:00	26/10/23	14:00	Mantenimiento
	UAM Xochimilco	UAX	RAMA	SO ₂	07/10/23	01:00	31/12/23	23:00	Mantenimiento
Cauhtémoc	Hospital General de México	HGM	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	01/01/23	01:00	11/10/23	01:00	Falla sistema comunicación
				PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	02/04/23	10:00	31/12/23	23:00	Falla sistema de comunicación
				O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂	06/04/23	23:00	13/10/23	04:00	Falla sistema de comunicación
Cuajimalpa	Santa Fe	SFE	RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	01/01/23	01:00	31/12/23	23:00	Falla de sistema eléctrico
			REDMET	RH, TMP, WDR, WSP	01/01/23	01:00	31/12/23	23:00	Falla de sistema eléctrico
Iztacalco	Iztacalco	IZT	RAMA	SO ₂	28/01/23	05:00	20/05/23	01:00	Falla del equipo
Iztapalapa	UAM Iztapalapa	UIZ	RAMA	O ₃ , SO ₂	12/01/23	13:00	15/02/23	04:00	Mantenimiento
				NO ₂ , NO, NO _x	22/03/23	12:00	27/05/23	01:00	Sin acceso al sitio
				SO ₂	22/03/23	12:00	27/05/23	01:00	Falla aire acondicionado
				O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	18/08/23	12:00	27/09/23	16:00	Mantenimiento
	Santiago Acahualtepec	SAC	RAMA	RH, TMP	19/08/23	12:00	06/10/23	01:00	Falla sensores
				WDR, WSP	19/08/23	12:00	21/11/23	01:00	Falla sensores
				SO ₂	01/01/23	01:00	31/08/23	01:00	Cambio de equipo
Miguel Hidalgo	Miguel Hidalgo	MGH	RAMA	SO ₂	26/01/23	14:00	08/03/23	01:00	Retiro de equipo
			REDMET	RH	29/07/23	20:00	14/10/23	01:00	Falla de sensor
				TMP	01/08/23	01:00	31/12/23	23:00	Falla de sensor
Milpa Alta	Milpa Alta	MPA	RAMA	CO	28/05/23	01:00	14/07/23	01:00	Falla de analizador
			REDMET	PM _{2.5}	19/06/23	12:00	10/08/23	08:00	Falla de analizador
				TMP	26/05/23	01:00	05/08/23	09:00	Falla sensor
Tlalpan	Ajusco Medio	AJM	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{CO}	01/01/23	01:00	27/03/23	24:00	Mantenimiento
				O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x	09/08/23	13:00	09/10/23	24:00	Falla aire acondicionado
Xochimilco	Tláhuac	TAH	RAMA	CO, SO ₂	18/04/23	12:00	13/09/23	15:00	Falla aire acondicionado
				O ₃	18/04/23	15:00	23/08/23	14:00	Falla aire acondicionado
				NO ₂ , NO, NO _x	18/04/23	12:00	10/10/23	15:00	Falla aire acondicionado
				PM ₁₀	14/06/23	22:00	11/11/23	01:00	Falla aire acondicionado

Tabla A2.2. Períodos sin datos por mantenimiento u otra causa, en estaciones de la RAMA y REDMET durante 2023 en el EDOMEX.

Alcaldía o Municipio	Estación	Clave	Red	Parámetro	Inicio	Hora	Fin	Hora	Motivo
Acolman	Acolman	ACO	RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀	15/03/23	11:00	19/07/23	15:00	Falla aire acondicionado
			REDMET	RH	01/06/23	01:00	09/08/23	06:00	Falla de comunicación
Chalco	Chalco	CHO	RAMA	RH, TMP, WDR, WSP	20/11/23	16:00	31/12/23	23:00	Obras cerca del sitio
			RAMA	SO ₂	31/03/23	10:00	01/06/23	24:00	Falla de equipo
			REDMET	TMP	13/09/23	20:00	17/10/23	17:00	Falla de equipo
Coacalco	Villa de las Flores	VIF	RAMA	WDR, WSP	12/11/23	21:00	31/12/23	23:00	Falla de equipo
			REDMET	RH, TMP	29/11/23	01:00	31/12/23	23:00	Falla de equipo
			RAMA	O ₃	28/11/23	15:00	31/12/23	23:00	Mantenimiento
Cuautitlán	Cuautitlán	CUT	REDMET	WDR, WSP	07/05/23	07:00	07/09/23	01:00	Falla sensor
			RAMA	RH, TMP	20/07/23	17:00	31/12/23	23:00	Falla sensor
			RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x	08/04/23	20:00	10/05/23	12:00	Falla aire acondicionado
Ecatepec	Los Laureles	LLA	RAMA	SO ₂	08/04/23	20:00	02/06/23	01:00	Falla equipo
			REDMET	TMP	05/10/23	01:00	11/11/23	01:00	Falla equipo
	San Agustín	SAG	RAMA	CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂	01/01/23	01:00	31/12/23	23:00	Falla sistema comunicación
			RAMA	O ₃	09/05/23	16:00	31/12/23	23:00	Falla sistema comunicación
			RAMA	CO	27/06/23	01:00	13/09/23	04:00	Falla de equipo
	Xalostoc	XAL	RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	29/01/23	01:00	13/09/23	04:00	Obras cerca del sitio
			RAMA	O ₃ , NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂	06/07/23	13:00	26/08/23	07:00	Falla aire acondicionado
			RAMA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	01/01/23	01:00	31/12/23	23:00	Retiro de equipo
			RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂	01/04/23	22:00	16/09/23	04:00	Falla aire acondicionado
REDMET	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂	14/08/23	01:00	13/09/23	15:00	Falla aire acondicionado			
REDMET	RH, TMP, WDR, WSP	01/01/23	01:00	31/12/23	23:00	Retiro de equipo			
Nezahualcóyotl	Nezahualcóyotl	NEZ	RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	06/05/23	20:00	15/06/23	04:00	Falla suministro eléctrico
	FES Aragón	FAR	RAMA	PM _{2.5}	25/05/23	11:00	02/07/23	16:00	Mantenimiento
Ocoyoacac	Investigaciones Nucleares	INN	REDMET	TMP	16/10/23	01:00	31/12/23	23:00	Falla de equipo
			RAMA	NO ₂ , NO, NO _x	01/01/23	01:00	31/12/23	23:00	Falla de equipo
			RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	09/05/23	13:00	31/12/23	23:00	Falla aire acondicionado
Texcoco	Montecillo	MON	REDMET	RH, TMP, WDR, WSP	15/09/23	18:00	09/11/23	01:00	Falla sistema comunicación
			RAMA	PM _{2.5}	03/04/23	13:00	24/06/23	01:00	Mantenimiento
			RAMA	PM _{2.5}	05/11/23	08:00	31/12/23	24:00	Mantenimiento
Tlalnepantla	Tlalnepantla	TLA	RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{co}	19/05/23	16:00	01/07/23	01:00	Falla aire acondicionado
			REDMET	RH, TMP, WSP, WDR	01/01/23	01:00	28/10/23	23:00	Mantenimiento
Tultitlán	Tultitlán	TLI	RAMA	O ₃ , CO, NO ₂ , NO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀	01/01/23	01:00	28/10/23	01:00	Falla aire acondicionado

Estaciones fuera de operación



ESTACIONES DE MONITOREO FUERA DE OPERACIÓN EN 2023

La estación **San Nicolás Totolapan (SNT)** se ubica en el parque ejidal. Los equipos quedaron fuera de operación debido a una falla mayor de los equipos, y no ha sido posible rehabilitarlos, por lo que el muestreo del depósito atmosférico quedó interrumpido.

Tabla A3.1. Datos generales de San Nicolás Totolapan (SNT)

Municipio	Estación	Clave	No. Id.	Estatus
Magdalena Contreras CDMX	San Nicolás Totolapan	SNT	484090080104	Pausa

Tabla A3.2. Ubicación de la estación SNT

Domicilio	Edificio	Latitud	Longitud	Altitud (*msnm)
Km. 11.5 carretera Picacho-Ajusco, C.P. 10900, CDMX	Parque ejidal de San Nicolás Totolapan	19.250385	-99.256462	2,946

*msnm: metros sobre el nivel del mar

Tabla A3.3. Parámetros monitoreados en Acolman (ACO)

Subred	Parámetros que monitorea
REDDA	pH, iones y cationes, precipitación



Figura A3.1. Equipos de la estación San Nicolás Totolapan (SNT)

La estación **Santa Fe (SFE)** se ubica en el relleno sanitario de Santa Fe. Administrado por la Dirección Ejecutiva de Disposición de Residuos sólidos y urbanos (SOBSE). La energía eléctrica que se proporcionaba a la estación era del predio donde se ubica la estación, en noviembre de 2022, el transformador que suministra energía a la estación de monitoreo sufrió daños irreparables y la CFE se negó a remplazarlo debido al adeudo de SOBSE por los últimos ajustes a sus suministros eléctricos. Al no contar con energía eléctrica se interrumpió la continuidad del monitoreo.

Tabla A3.3. Datos generales de Acolman (ACO)

Alcaldía	Estación	Clave	No. Id.	Representatividad						Estatus
				O ₃	CO	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	
Cuajimalpa CDMX	Santa Fe	SFE	484090040309	4	3	4	3	3	4	Pausa

Escala representatividad: 1 - Micro (hasta 100 m); 2 - Media (>100 m a 1 km); 3 - Vecinal (1 a 4 km); 4 - Urbana (de 4 a 20 km); 5 - Regional (>20km)

Tabla A3.4. Ubicación de la estación SFE

Domicilio	Edificio	Latitud	Longitud	Altitud (*msnm)
Av. Carlos Lazo s/n, entre Tamaulipas y Sta. Fe, Col. Prados de la Montaña, C.P. 05619	Palacio Municipal	19.357357	-99.262865	2,599

*msnm: metros sobre el nivel del mar

Tabla A3.3. Parámetros monitoreados en Santa Fe (SFE)

Subred	Parámetros que monitorea
RAMA	O ₃ , NO _x , NO ₂ , NO, CO, SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM _{10.2.5}
REDMET	WS, WD, TMP, HR, RADG, UVB, UVA



Figura A3.2. Caseta de la estación Santa Fe (SFE)

Estadística básica



Tabla A4.1. Estadísticas básicas para **dióxido de azufre (SO₂)** en la **CDMX y EDOMEX** (unidades en ppb). Para la evaluación de la NOM se utilizaron las estaciones que cumplen los criterios de suficiencia de datos para los indicadores trianuales de 1 h y de 24 h de la NOM-022-SSA1-2019.

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con ≥75% de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo promedio 24 h	Máximo promedio 1 h	Cumple
CDMX	Ajusco Medio	AJM	79	3	54	3	0	4	2	1	1	1	3	6	13	30	I
	Benito Juárez	BJU	90	3	54	3	0	5	2	1	1	2	3	8	22	49	Sí
	Camarones	CAM	73	3	74	5	0	7	3	1	1	2	4	12	33	67	I
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	74	3	46	3	0	4	2	1	1	2	3	5	15	40	I
	Cuajimalpa	CUA	92	4	54	2	0	4	2	1	1	1	3	5	13	36	I
	Hospital General	HGM	46	2	71	5	0	7	4	1	1	2	5	14	18	57	I
	Iztacalco	IZT	61	2	55	4	0	5	2	1	1	2	3	9	0	40	I
	Merced	MER	88	3	63	4	0	5	3	1	1	2	4	9	29	52	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	82	3	53	3	0	5	2	0	1	1	3	7	24	48	Sí
	Milpa Alta	MPA	81	3	31	2	0	2	1	0	1	1	2	4	11	28	I
	Pedregal	PED	69	2	39	2	0	3	1	0	1	1	2	5	14	31	Sí
	Santiago Acahualtepec	SAC	32	1	46	3	0	4	2	1	1	1	3	7	0	66	I
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	32	I
	Tláhuac	TAH	55	2	47	2	0	2	1	1	1	1	2	4	9	21	I
	UAM Xochimilco	UAX	71	3	39	2	0	3	1	0	1	1	2	3	13	26	I
UAM Iztapalapa	UIZ	59	1	41	3	0	4	2	1	1	1	3	7	27	43	I	
EDOMEX	Acolman	ACO	68	2	51	1	0	2	0	0	1	1	1	2	0	32	I
	Atizapán	ATI	57	3	91	5	0	7	4	1	1	2	5	12	0	58	I
	Chalco	CHO	65	2	73	2	0	3	1	1	1	1	2	3	0	21	I
	Cuautitlán	CUT	78	3	103	4	0	7	3	1	1	2	4	10	28	71	I
	FES Acatlán	FAC	94	4	84	4	0	5	3	1	1	2	4	8	23	63	Sí
	FES Aragón	FAR	83	3	46	2	0	4	1	1	1	1	2	5	23	43	Sí
	Investigaciones Nucleares	INN	34	1	21	1	0	1	1	1	1	1	2	2	17	21	I
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
	La Presa	LPR	93	4	53	3	0	3	2	1	1	2	3	6	19	40	Sí
	Montecillo	MON	84	3	65	2	0	2	1	1	1	1	2	3	0	20	I
	Nezahualcóyotl	NEZ	86	3	100	3	0	4	2	1	1	1	3	6	40	63	I
	San Agustín	SAG	77	3	79	4	0	6	2	1	1	2	3	7	0	66	I
	Tlalnepantla	TLA	79	3	91	5	0	8	5	1	1	3	6	13	42	78	NO*
	Tultitlán	TLI	16	0	107	8	0	12	9	1	1	4	10	24	0	98	I
Villa de las Flores	VIF	91	4	119	5	0	8	3	1	1	2	4	9	31	86	I	
Xalostoc	XAL	72	2	70	3	0	4	3	1	1	2	4	7	14	50	I	

I : **Dato inválido**

* **TLA** no cumplió con el numeral A.1.2.2.1.1.c) del indicador trianual de 24h; sin embargo, se consideró por principio precautorio.

Tabla A4.2. Estadísticas básicas para dióxido de nitrógeno (NO₂) en la CDMX y EDOMEX (unidades en ppb).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo horario	Promedio anual	Cumple
CDMX	Ajusco Medio	AJM	80	3	77	16	1	9	12	6	9	15	21	28	77	16	SÍ
	Ajusco	AJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
	Benito Juárez	BJU	93	4	94	25	2	12	17	10	15	23	32	41	94	25	NO
	Camarones	CAM	74	3	103	29	3	13	16	14	20	27	36	46	103	29	I
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	92	4	83	21	1	11	14	9	13	19	27	35	83	21	NO
	Cuajimalpa	CUA	91	4	82	18	1	11	13	7	10	15	23	33	82	18	SÍ
	Gustavo A. Madero	GAM	65	2	106	26	3	14	20	9	15	25	35	45	106	26	I
	Hospital General.	HGM	41	2	105	31	4	13	17	16	22	30	39	48	105	31	I
	Iztacalco	IZT	90	4	106	29	0	13	17	13	19	27	36	46	106	29	NO
	Merced	MER	90	4	107	32	0	14	17	17	23	30	40	50	107	32	NO
	Miguel Hidalgo	MGH	95	4	93	27	3	13	17	13	18	25	35	44	93	27	NO
	Milpa Alta	MPA	87	4	71	7	0	6	7	2	3	5	10	15	71	7	SÍ
	Pedregal	PED	68	1	87	20	2	11	14	8	12	18	26	34	87	20	I
	Santiago Acahualtepec	SAC	74	2	106	23	1	13	18	8	13	21	31	41	106	23	I
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
Tláhuac	TAH	48	2	71	18	1	11	15	5	10	18	25	33	71	18	I	
UAM Xochimilco	UAX	80	3	87	21	0	11	16	7	12	20	28	35	87	21	SÍ	
UAM Iztapalapa	UIZ	58	0	94	26	1	13	18	10	15	25	33	42	94	26	I	
EDOMEX	Acolman	ACO	78	3	68	15	2	8	12	6	9	14	21	27	68	15	SÍ
	Atizapán	ATI	57	3	89	20	2	11	13	8	12	18	25	35	89	20	I
	Chalco	CHO	80	4	81	20	2	10	14	8	12	18	26	33	81	20	SÍ
	Cuautitlán	CUT	86	3	113	21	3	12	14	9	12	18	26	35	113	21	NO
	FES Acatlán	FAC	94	4	113	23	2	13	16	9	14	21	30	41	113	23	NO
	FES Aragón	FAR	88	3	81	20	2	12	17	6	10	18	27	35	81	20	SÍ
	Investigaciones Nucleares	INN	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
	La Presa	LPR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
	Montecillo	MON	82	3	53	15	0	9	14	4	7	12	21	28	53	15	SÍ
	Nezahualcóyotl	NEZ	85	3	97	23	0	12	16	9	14	21	30	40	97	23	NO
	San Agustín	SAG	78	3	72	23	3	11	16	10	14	22	30	38	72	23	NO
	Tlalnepantla	TLA	79	3	91	28	4	13	16	14	19	26	35	45	91	28	NO
	Tultitlán	TLI	17	0	98	27	4	13	16	12	18	25	34	44	98	27	I
Villa de las Flores	VIF	86	4	79	19	2	12	18	6	9	16	27	36	79	19	SÍ	
Xalostoc	XAL	69	2	118	30	4	13	18	15	20	28	38	47	118	30	I	

I : Dato Inválido

Tabla A4.3. Estadísticas básicas para monóxido de carbono en la CDMX y el EDOMEX (unidades en ppm).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Máximo horario	Máximo promedio 8h	Cumple
CDMX	Ajusco Medio	AJM	79	3	1.4	0.3	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.4	1	Sí
	Benito Juárez	BJU	91	3	3.5	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	3.5	2.2	Sí
	Camarones	CAM	71	3	4.3	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1	4.3	1.9	I
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	93	4	2.5	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	2.5	1.3	Sí
	Cuajimalpa	CUA	93	4	2.5	0.4	0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	2.5	1.2	Sí
	Hospital General	HGM	46	2	3.0	0.5	0	0.4	0.5	0.2	0.3	0.4	0.7	1	3	1.8	I
	Iztacalco	IZT	87	4	3.4	0.5	0	0.4	0.4	0.2	0.3	0.5	0.7	1	3.4	1.8	Sí
	Merced	MER	87	3	3.7	0.6	0	0.4	0.5	0.2	0.3	0.5	0.7	1.1	3.7	2	Sí
	Miguel Hidalgo	MGH	90	3	3.0	0.5	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	3	1.6	Sí
	Milpa Alta	MPA	81	3	1.2	0.3	0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	1.2	1	Sí
	Pedregal	PED	72	2	2.0	0.3	0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	2	1.2	I
	Santiago Acahualtepec	SAC	72	3	4.0	0.5	0	0.5	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.1	4	2.3	I
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
	tláhuac	TAH	55	2	3.1	0.4	0	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	3.1	1.2	I
	UAM Xochimilco	UAX	81	3	2.8	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	2.8	1.8	Sí
UAM Iztapalapa	UIZ	76	2	3.2	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	3.2	2.4	NO	
EDOMEX	Acolman	ACO	78	3	1.5	0.2	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	1.5	0.9	Sí
	Atizapán	ATI	57	3	4.1	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	4.1	1.7	I
	Chalco	CHO	88	4	4.2	0.5	0	0.4	0.4	0.2	0.3	0.4	0.6	1	4.2	1.9	Sí
	Cuautitlán	CUT	84	3	2.6	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	2.6	1.6	Sí
	FES Acatlán	FAC	95	4	4.4	0.5	0	0.5	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1.1	4.4	2.1	Sí
	FES Aragón	FAR	88	3	3.0	0.4	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	3	1.6	Sí
	Investigaciones Nucleares	INN	34	1	0.6	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.6	0.5	I
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	I
	La Presa	LPR	95	4	4.1	0.6	0	0.4	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	4.1	2.3	Sí
	Montecillo	MON	84	3	4.1	0.3	0	0.3	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.7	4.1	2.7	Sí
	Nezahualcóyotl	NEZ	84	3	4.4	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	4.4	2.3	Sí
	San Agustín	SAG	68	3	3.1	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	1	3.1	1.9	I
	Tlalnepantla	TLA	79	3	3.2	0.5	0	0.4	0.4	0.1	0.3	0.4	0.6	1	3.2	1.7	Sí
	Tultitlán	TLI	17	0	2.7	0.6	0	0.4	0.4	0.2	0.3	0.5	0.7	1.1	2.7	1.9	I
Villa de las Flores	VIF	91	4	3.3	0.4	0	0.4	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	3.3	2.3	Sí	
Xalostoc	XAL	66	2	5.0	0.6	0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.5	0.8	1.3	5	3.6	I	

I : Dato Inválido

Tabla A4.4. Estadísticas básicas para ozono (O₃) en la CDMX y el EDOMEX (unidades en ppb).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con ≥75% de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM			
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Núm. horas > 90 ppb	Máximo horario	Máximo promedio 8h	Cumple
CDMX	Ajusco Medio	AJM	79	3	171	45	1	26	33	16	26	40	59	82	449	171	128	NO
	Ajusco	AJU	94	4	150	35	1	25	37	8	15	29	52	72	221	150	106	NO
	Benito Juárez	BJU	92	4	143	30	0	26	37	2	8	22	45	71	228	143	100	NO
	Camarones	CAM	73	3	151	25	0	27	35	1	4	15	39	67	191	151	118	I
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	93	4	143	33	0	29	41	3	10	25	51	78	440	143	116	NO
	Cuajimalpa	CUA	94	4	165	38	1	25	31	10	20	33	51	74	352	165	127	NO
	Gustavo A. Madero	GAM	65	2	145	30	0	29	44	1	4	20	48	76	268	145	113	I
	Hospital General	HGM	46	2	143	29	0	29	40	2	5	18	45	74	211	143	113	I
	Iztacalco	IZT	86	4	150	28	0	28	37	2	6	19	43	71	278	150	108	NO
	Merced	MER	86	3	132	25	0	26	35	1	4	15	39	65	180	132	104	NO
	Miguel Hidalgo	MGH	89	3	155	31	0	28	38	2	8	22	46	74	362	155	113	NO
	Milpa Alta	MPA	86	3	132	43	1	21	27	18	28	41	55	71	182	132	107	NO
	Pedregal	PED	77	2	169	34	0	28	36	5	13	26	49	76	354	169	122	I
	Santiago Acahualtepec	SAC	73	3	137	34	0	28	42	2	10	27	52	75	246	137	98	I
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Tláhuac	TAH	59	2	110	29	0	23	34	4	10	22	44	62	41	106	83	I	
UAM Xochimilco	UAX	82	3	145	36	0	30	46	3	10	27	56	80	455	145	116	NO	
UAM Iztapalapa	UIZ	77	2	151	32	0	29	43	2	7	23	50	77	306	151	112	I	
EDOMEX	Acolman	ACO	77	3	120	30	0	23	36	3	10	26	46	65	81	120	91	I
	Atizapán	ATI	57	3	130	25	0	22	25	3	9	18	34	57	69	130	87	I
	Chalco	CHO	83	4	109	27	0	22	35	2	8	23	43	59	13	109	88	NO
	Cuautitlán	CUT	84	3	139	29	0	23	30	5	11	21	41	64	144	139	111	NO
	FES Acatlán	FAC	93	4	161	30	0	26	34	3	10	22	44	69	272	161	120	NO
	FES Aragón	FAR	88	3	134	25	0	22	29	2	8	19	37	57	76	134	106	NO
	Investigaciones Nucleares	INN	34	1	92	35	3	14	17	20	26	33	43	54	1	92	69	I
	Los Laureles	LLA	82	3	131	28	0	25	37	2	7	21	44	66	140	131	101	NO
	La Presa	LPR	96	4	125	25	0	23	32	1	6	20	38	59	102	125	91	NO
	Montecillo	MON	84	3	122	33	0	26	44	2	9	29	53	71	160	122	93	NO
	Nezahualcóyotl	NEZ	86	3	126	31	0	26	39	2	9	23	48	71	214	126	97	NO
	San Agustín	SAG	76	3	133	28	0	25	37	2	7	21	44	67	138	133	100	I
	Tlalnepantla	TLA	79	3	149	28	0	26	36	3	7	19	43	68	236	149	118	NO
	Tultitlán	TLI	17	0	117	20	1	22	27	2	3	11	30	54	16	117	90	I
	Villa de las Flores	VIF	87	3	158	32	0	26	39	2	10	26	49	71	209	158	111	NO
Xalostoc	XAL	66	1	127	23	0	22	32	1	4	17	36	57	56	127	86	I	

I : Dato Inválido

Tabla A4.5. Estadísticas básicas para óxidos de nitrógeno (NOx) en la CDMX y el EDOMEX (unidades en ppb).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Ajusco Medio	AJM	80	3	108	20	1	13	16	6	10	17	26	37
	Ajusco	AJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Benito Juárez	BJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Camarones	CAM	74	3	411	47	3	40	33	16	23	35	56	93
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	92	4	227	29	1	22	22	10	14	22	36	55
	Cuajimalpa	CUA	91	4	242	24	1	20	17	8	12	18	29	46
	Hospital General	HGM	41	2	290	47	6	32	32	18	26	38	58	87
	Iztacalco	IZT	90	4	283	41	0	30	30	14	21	32	51	78
	Merced	MER	90	4	329	53	0	40	39	19	27	42	66	103
	Miguel Hidalgo	MGH	95	4	399	45	5	40	32	15	21	32	53	93
	Milpa Alta	MPA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	68	1	156	26	2	18	20	9	13	21	33	49
	Santiago Acahualtepec	SAC	74	2	309	36	1	35	29	9	14	24	43	77
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	TLáhuac	TAH	48	2	175	25	1	18	22	6	11	21	33	47
UAM Xochimilco	UAX	80	3	311	31	0	29	25	8	13	23	38	63	
UAM Iztapalapa	UIZ	58	0	284	37	1	30	32	11	17	29	49	73	
EDOMEX	Acolman	ACO	78	3	148	21	2	17	18	7	10	16	28	44
	Atizapán	ATI	57	3	198	30	3	26	21	10	14	22	35	64
	Chalco	CHO	80	4	408	37	3	35	26	12	16	25	42	76
	Cuautitlán	CUT	86	3	319	29	4	25	21	10	14	22	35	55
	FES Acatlán	FAC	94	4	314	40	3	37	30	11	17	27	47	85
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	La Presa	LPR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Montecillo	MON	82	3	370	26	1	33	21	5	8	14	29	61
	Nezahualcóyotl	NEZ	85	3	309	34	0	30	26	11	16	26	42	66
	San Agustín	SAG	78	3	305	37	4	32	29	11	16	27	45	76
	Tlalnepantla	TLA	79	3	319	48	6	36	32	18	25	37	57	91
	Tultitlán	TLI	17	0	308	48	5	43	35	14	22	32	57	100
	Villa de las Flores	VIF	86	4	282	31	2	32	27	7	11	20	38	74
Xalostoc	XAL	69	2	491	58	5	52	43	19	26	40	69	116	

Tabla A4.6. Estadísticas básicas para óxido nítrico (NO) en la CDMX y en el EDOMEX (unidades en ppb).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Ajusco Medio	AJM	80	3	55	4	0	6	3	0	1	1	4	10
	Ajusco	AJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Benito Juárez	BJU	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Camarones	CAM	74	3	355	18	0	33	17	1	2	6	19	50
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	92	4	178	8	0	16	6	0	1	2	7	22
	Cuajimalpa	CUA	91	4	181	6	0	13	5	0	1	2	6	14
	Hospital General	HGM	41	2	234	16	0	24	17	1	2	5	19	44
	Iztacalco	IZT	90	4	236	12	0	22	12	0	1	4	13	35
	Merced	MER	90	4	281	21	0	32	22	1	3	9	25	56
	Miguel Hidalgo	MGH	95	4	353	18	0	33	15	2	3	6	18	51
	Milpa Alta	MPA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	68	1	117	6	0	11	4	0	1	2	5	15
	Santiago Acahualtepec	SAC	74	2	258	12	0	25	10	0	1	2	11	36
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Tláhuac	TAH	48	2	137	6	0	11	5	0	1	2	6	18
UAM Xochimilco	UAX	80	3	275	10	0	22	8	0	1	2	9	28	
UAM Iztapalapa	UIZ	58	0	237	12	0	21	13	1	1	3	14	33	
EDOMEX	Acolman	ACO	78	3	121	6	0	11	5	0	1	2	6	18
	Atizapán	ATI	57	3	158	10	0	19	7	1	1	3	8	28
	Chalco	CHO	80	4	364	17	0	30	12	2	3	6	15	46
	Cuautitlán	CUT	86	3	267	8	0	16	7	1	1	3	8	21
	FES Acatlán	FAC	94	4	279	16	0	28	14	1	2	5	16	45
	Los Laureles	LLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	La Presa	LPR	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Montecillo	MON	82	3	336	11	0	28	7	0	0	1	7	35
	Nezahualcóyotl	NEZ	85	3	271	11	0	22	9	0	1	3	10	28
	San Agustín	SAG	78	3	274	14	0	25	11	1	2	4	13	40
	Tlalnepantla	TLA	79	3	262	19	0	28	17	2	4	9	21	48
	Tultitlán	TLI	17	0	261	21	0	36	19	1	2	6	21	59
	Villa de las Flores	VIF	86	4	245	12	0	24	9	0	1	2	10	38
Xalostoc	XAL	69	2	439	28	0	45	25	2	5	10	30	73	

Tabla A4.7. Estadísticas básicas para **muestreo manual de partículas suspendidas totales (PST)** para CDMX y EDOMEX (unidades en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, calculadas a condiciones locales de presión y temperatura)

Entidad	Estaciones	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	UAM Iztapalapa	UIZ	68	165	74	22	37	53	31	46	64	99	129
EDOMEX	Tlalnepantla	TLA	98	171	99	43	31	43	58	77	96	119	143
	Xalostoc	XAL	98	422	119	37	59	65	63	78	111	143	185

Tabla A4.8. Estadísticas básicas para **PM₁₀** del **monitoreo manual**, método de referencia (FRM de US EPA), para CDMX y EDOMEX (unidades en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, calculadas a condiciones **locales** de presión y temperatura). En la evaluación de la **NOM**, se usaron las estaciones con $\geq 75\%$ de muestreos válidos y de suficiencia trimestral (3 de 4 trimestres válidos).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio anual	Máximo promedio 24 h	Cumple
CDMX	Lomas	LOM	88	4	63	33	9	13	18	18	23	31	41	50	32	63	Sí
	Merced	MER	85	3	77	39	13	15	22	20	27	37	48	58	37	77	NO
	Pedregal	PED	98	4	64	31	9	13	21	16	20	30	40	48	31	64	Sí
	UAM Iztapalapa	UIZ	77	2	83	41	13	18	24	20	28	41	52	65	33	83	I
EDOMEX	La Presa	LPR	95	4	98	51	16	21	33	24	35	51	68	78	51	98	NO
	Nezahualcóyotl	NEZ	100	4	80	42	10	17	23	20	30	41	53	63	42	80	NO
	Tlalnepantla	TLA	98	4	92	50	21	18	26	26	36	51	61	75	51	92	NO
	Xalostoc	XAL	93	4	109	57	15	24	34	29	39	56	73	93	58	109	NO

I : Dato Inválido

Tabla A4.9. Estadísticas básicas de la concentración horaria de PM₁₀ en la CDMX y el EDOMEX reportada por los equipos de monitoreo continuo (unidades en µg/m³, calculadas a condiciones locales de presión y temperatura).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con ≥75% de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Ajusco Medio	AJM	69	3	184	26	2	14	17	10	16	23	33	43
	Benito Juárez	BJU	87	4	159	37	2	18	24	16	23	34	47	60
	Camarones	CAM	77	3	161	39	2	19	24	19	26	37	50	64
	Cuajimalpa	CUA	91	4	185	30	1	16	21	11	18	28	39	51
	Gustavo A. Madero	GAM	45	1	288	51	2	24	28	25	35	48	63	81
	Hospital General	HGM	22	1	122	37	3	19	24	16	24	34	48	63
	Iztacalco	IZT	52	1	224	43	1	26	33	15	24	38	57	77
	Merced	MER	83	4	264	38	2	19	24	17	24	35	48	62
	Miguel Hidalgo	MGH	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Milpa Alta	MPA	73	2	245	32	2	19	23	12	18	29	41	55
	Pedregal	PED	63	2	120	28	2	15	20	11	17	25	37	50
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Tláhuac	TLA	44	0	257	56	1	32	39	20	33	51	72	97
UAM Iztapalapa	UIZ	83	3	216	41	3	20	24	19	27	38	51	65	
EDOMEX	Acolman	ACO	77	2	428	46	1	29	36	16	25	40	61	82
	Atizapán	ATI	55	1	318	35	1	24	27	11	19	30	46	65
	Chalco	CHO	75	1	629	51	1	30	35	19	31	46	66	87
	Cuautitlán	CUT	73	2	373	44	1	31	35	13	22	36	57	82
	FES Acatlán	FAC	78	2	243	37	1	28	33	9	17	31	50	72
	Investigaciones Nucleares	INN	33	1	121	27	2	15	18	11	17	25	35	46
	Nezahualcóyotl	NEZ	87	3	417	42	1	27	33	14	23	37	56	75
	San Agustín	SAG	27	1	254	53	3	28	34	24	34	49	68	87
	Tlalnepantla	TLA	76	2	230	48	3	23	30	22	31	44	61	78
	Tultitlán	TLI	17	0	215	51	1	32	39	17	28	46	67	93
	Villa de las Flores	VIF	76	3	394	56	1	42	47	15	27	45	74	109
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla A4.10. Estadísticas básicas para **PM_{2.5}** monitoreo **manual**, método de referencia (FRM de U.S. EPA), para **CDMX y EDOMEX** (unidades en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, calculadas a condiciones **locales** de presión y temperatura). En la evaluación de la **NOM**, se usaron las estaciones con $\geq 75\%$ de muestreos válidos y de suficiencia trimestral (3 de 4 trimestres válidos).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS										CUMPLIMIENTO NOM		
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Promedio anual	Máximo promedio 24 h	Cumple
CDMX	Merced	MER	98	4	43	19	5	8	12	9	13	19	24	28	19	43	NO
	Pedregal	PED	98	4	43	15	5	6	8	8	10	15	18	21	15	43	NO
	UAM Iztapalapa	UIZ	77	2	42	17	4	8	12	9	11	18	23	26	17	42	I
EDOMEX	San Agustín	SAG	87	4	34	17	4	7	12	7	10	17	22	26	17	34	NO
	Tlalnepantla	TLA	85	3	45	20	7	8	12	12	14	20	26	29	20	45	NO
	Xalostoc	XAL	97	4	44	21	4	9	13	10	14	21	27	32	21	44	NO

Tabla A4.11. Estadísticas básicas de la concentración **horaria de PM_{2.5}** en la **CDMX y el EDOMEX**, reportada por los equipos de monitoreo **continuo** (unidades en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, calculadas a condiciones locales de presión y temperatura).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Ajusco Medio	AJM	69	3	89	17	1	10	12	6	10	15	22	29
	Ajusco	AJU	75	3	102	17	1	11	13	5	9	15	22	30
	Benito Juárez	BJU	87	4	144	20	1	12	14	7	12	18	26	35
	Camarones	CAM	77	3	139	21	1	12	15	8	12	18	27	35
	C. Ciencias de la Atmósfera	CCA	90	3	94	17	1	9	11	7	11	16	22	29
	Gustavo A. Madero	GAM	45	1	225	24	1	15	15	10	15	22	30	40
	Hospital General	HGM	22	1	89	20	1	13	16	7	11	17	27	37
	Merced	MER	83	4	146	21	1	12	15	7	12	19	27	36
	Miguel Hidalgo	MGH	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Milpa Alta	MPA	73	2	129	17	1	10	12	6	10	16	22	30
	Pedregal	PED	63	2	87	17	1	11	13	6	9	15	22	31
	Santiago Acahualtepec	SAC	83	3	269	24	1	16	16	8	14	21	30	41
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	UAM Xochimilco	UAX	77	2	128	20	1	11	14	7	12	19	26	33
UAM Iztapalapa	UIZ	83	3	172	21	1	12	13	8	13	19	26	35	
EDOMEX	FES Aragón	FAR	83	3	154	18	1	11	12	6	11	17	23	30
	Investigaciones Nucleares	INN	33	1	72	14	1	8	9	5	9	13	18	24
	Montecillo	MON	53	2	148	19	1	12	15	6	10	17	25	34
	Nezahualcóyotl	NEZ	86	3	190	19	1	13	14	6	10	16	24	34
	San Agustín	SAG	27	1	213	24	1	18	17	9	13	21	30	41
	Tlalnepantla	TLA	76	2	105	22	1	12	15	8	13	20	28	38
Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

Tabla A4.12. Estadísticas básicas de la concentración horaria de **PMcoarse** en la **CDMX** y el **EDOMEX**, reportada por los equipos de monitoreo **continuo** (unidades en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, calculadas a condiciones locales de presión y temperatura).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	Trimestres con $\geq 75\%$ de datos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
					Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Ajusco Medio	AJM	69	3	173	9	1	6	7	3	5	8	12	17
	Benito Juárez	BJU	87	4	101	17	1	10	13	6	9	15	22	29
	Camarones	CAM	77	3	97	19	1	11	13	7	11	17	24	32
	Gustavo A. Madero	GAM	45	1	221	27	2	14	16	12	18	25	34	45
	Hospital General	HGM	22	1	63	17	1	9	11	7	11	15	22	29
	Merced	MER	83	4	238	17	1	10	12	7	10	15	22	30
	Miguel Hidalgo	MGH	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Milpa Alta	MPA	73	2	218	14	1	12	12	4	7	11	19	29
	Pedregal	PED	63	2	75	11	1	7	9	4	6	10	15	21
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
UAM Iztapalapa	UIZ	83	3	189	20	1	12	14	7	11	17	25	35	
EDOMEX	Investigaciones Nucleares	INN	33	1	105	13	1	9	10	4	7	11	17	24
	San Agustín	SAG	27	1	128	29	2	17	22	10	17	26	39	52
	Tlalnepantla	TLA	76	2	206	26	1	16	18	10	16	24	34	45
	Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Tabla A4.13. Estadísticas básicas para **temperatura ambiente en la CDMX y en el EDOMEX** (unidades en °C).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Ajusco Medio	AJM	99.0	29.6	12.9	-3.7	5.3	7.6	6.6	9.1	12.2	16.7	20.5
	Ajusco	AJU	96.0	25.0	11.0	-3.3	5.1	7.1	3.8	7.6	11.0	14.7	17.6
	Benito Juárez	BJU	87.0	31.7	18.4	5.5	4.6	6.5	12.6	15.1	17.9	21.6	25.0
	Cuajimalpa	CUA	98.0	28.5	15.7	4.3	4.0	5.5	10.8	12.9	15.1	18.4	21.4
	Gustavo A. Madero	GAM	78.0	31.1	18.8	5.5	4.7	6.5	12.9	15.6	18.3	22.1	25.5
	Hospital General	HGM	23.0	28.9	17.8	5.8	4.7	7.1	11.6	14.1	17.5	21.2	24.5
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	67.0	33.0	19.8	6.6	4.8	7.1	14.1	16.3	19.2	23.4	26.8
	Merced	MER	93.0	31.5	19.4	6.6	4.4	5.9	13.8	16.5	18.9	22.4	25.8
	Miguel Hidalgo	MGH	56.0	31.6	19.3	3.1	4.7	6.8	13.5	16.0	18.7	22.8	26.0
	Milpa Alta	MPA	77.0	30.3	15.5	0.9	5.3	7.8	9.0	11.5	15.0	19.3	23.3
	Pedregal	PED	88.0	29.6	16.7	3.7	4.5	6.2	11.3	13.6	16.1	19.8	23.1
	Santiago Acahualtepec	SAC	83.0	32.8	16.5	1.2	5.6	8.0	10.0	12.5	15.6	20.5	24.7
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Tláhuac	TAH	98.0	31.4	16.6	1.3	4.9	6.8	10.5	13.2	16.0	20.0	23.5
	UAM Xochimilco	UAX	89.0	31.0	17.3	3.8	4.7	6.7	11.6	14.0	16.8	20.7	23.9
UAM Iztapalapa	UIZ	81.0	32.3	18.4	4.6	4.9	6.7	12.2	15.1	17.9	21.8	25.3	
EDOMEX	Acolman	ACO	79.0	31.4	17.2	-0.3	6.0	8.9	9.4	13.0	16.7	21.9	25.7
	Chalco	CHO	82.0	31.6	17.6	1.4	5.2	7.2	10.9	14.3	17.4	21.5	24.5
	Cuautitlán	CUT	90.0	34.6	16.6	-1.0	6.3	8.7	8.8	12.4	15.9	21.1	25.6
	FES Acatlán	FAC	100.0	33.7	17.0	-1.8	6.4	9.4	9.0	12.4	16.1	21.8	26.2
	FES Aragón	FAR	78.0	33.9	20.6	5.0	4.9	6.7	14.7	17.4	20.2	24.1	27.4
	Investigaciones Nucleares	INN	83.0	25.4	11.6	-0.8	5.0	7.1	5.0	8.1	11.2	15.2	18.4
	Montecillo	MON	93.0	32.0	17.0	0.3	5.4	7.7	10.0	13.3	16.6	21.0	24.5
	Nezahualcóyotl	NEZ	96.0	33.0	18.9	6.0	4.5	6.1	13.4	15.9	18.4	22.0	25.3
	San Agustín	SAG	99.0	33.0	19.1	5.2	4.8	6.3	13.3	16.0	18.6	22.3	25.9
	Tlalnepantla	TLA	64.0	31.5	18.4	4.9	4.8	6.8	12.7	15.1	17.9	21.9	25.1
	Villa de las Flores	VIF	52.0	35.3	17.7	-0.9	6.9	9.9	8.7	12.9	17.1	22.8	27.2
Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

Tabla A4.14. Estadísticas básicas para **humedad relativa en la CDMX y en el EDOMEX** (unidades en %).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Ajusco Medio	AJM	99	100	55	2	23	38	26	36	54	74	86
	Ajusco	AJU	92	100	76	6	23	37	38	60	83	97	100
	Benito Juárez	BJU	87	87	47	1	19	32	21	31	46	63	72
	Cuajimalpa	CUA	94	91	53	1	20	34	26	36	53	70	80
	Gustavo A. Madero	GAM	78	95	53	4	20	34	25	36	54	70	79
	Hospital General	HGM	23	78	35	3	15	22	16	23	34	45	58
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	65	90	44	3	19	31	20	29	43	60	70
	Merced	MER	93	89	50	1	19	32	23	34	51	66	74
	Miguel Hidalgo	MGH	77	100	44	1	23	35	16	26	41	61	76
	Milpa Alta	MPA	97	100	55	2	21	36	27	37	54	73	84
	Pedregal	PED	93	89	50	1	19	31	24	35	50	66	76
	Santiago Acahualtepec	SAC	96	100	50	1	21	34	22	33	50	67	77
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Tláhuac	TAH	98	86	48	1	19	30	21	33	48	63	72
	UAM Xochimilco	UAX	89	97	51	2	20	32	23	35	52	67	77
UAM Iztapalapa	UIZ	83	100	54	2	22	38	24	35	54	73	83	
EDOMEX	Acolman	ACO	68	100	56	2	25	44	21	34	59	78	89
	Chalco	CHO	84	90	52	4	19	32	26	36	53	68	78
	Cuautitlán	CUT	100	91	52	1	21	36	22	34	54	70	79
	FES Acatlán	FAC	100	90	51	1	22	39	19	32	53	71	79
	FES Aragón	FAR	99	91	49	1	20	33	21	33	50	66	76
	Investigaciones Nucleares	INN	83	94	66	4	22	36	32	49	71	85	90
	Montecillo	MON	96	100	56	2	22	36	25	38	59	74	84
	Nezahualcóyotl	NEZ	99	86	47	3	18	30	21	32	48	62	70
	San Agustín	SAG	99	100	55	3	23	38	23	36	57	74	83
	Tlalnepantla	TLA	64	84	43	3	19	31	18	28	42	59	69
	Villa de las Flores	VIF	55	88	42	1	20	34	16	26	41	60	71
Xalostoc	XAL	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

Tabla A4.15. Estadísticas básicas para **velocidad del viento en la CDMX y en el EDOMEX** (unidades en m/s)

Entidad	Estaciones	Clave	Altura del equipo* (m)	Estadísticas básicas											Viento	
				% Datos válidos	Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	% calmas	Dirección**
CDMX	Ajusco Medio	AJM	4.5	98.0	13.5	2.9	0	1.6	1.8	1.3	1.8	2.5	3.6	5.1	0.4	NNO
	Ajusco	AJU	15.0	96.0	9.1	2.2	0	1.2	1.3	0.8	1.4	2.1	2.7	3.8	1.6	NE
	Benito Juárez	BJU	8.1	100.0	6.2	1.8	0	0.9	1.1	0.8	1.1	1.6	2.2	3.0	0.1	NNE
	Cuajimalpa	CUA	11.5	99.0	7.1	2.1	0.3	0.9	1.2	1.1	1.4	2.0	2.6	3.3	0	NNO
	Gustavo A. Madero	GAM	12.5	78.0	7.6	1.8	0	1.1	1.2	0.6	1.0	1.6	2.2	3.4	2.3	ENE
	Hospital General	HGM	8.5	23.0	8.6	2.2	0.3	1.3	1.5	1.0	1.3	1.8	2.8	4.2	0	N
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	8.0	92.0	7.1	1.8	0	1.0	1.3	0.5	1.1	1.7	2.4	3.1	2.4	NNO
	Merced	MER	8.5	97.0	7.8	2.1	0.1	1.1	1.4	0.9	1.3	1.9	2.7	3.7	0.1	N
	Miguel Hidalgo	MGH	8.1	96.0	6.7	2.0	0	1.0	1.2	0.8	1.3	1.9	2.5	3.4	0.5	NNO
	Milpa Alta	MPA	5.3	99.0	9.7	2.8	0	1.4	1.7	1.3	1.8	2.5	3.5	4.6	0.6	SSO
	Pedregal	PED	9.0	93.0	9.8	1.9	0	0.9	0.9	0.9	1.3	1.7	2.2	3.0	0.4	ONO
	Santiago Acahualtepec	SAC	11.0	92.0	8.8	2.3	0	1.4	1.8	0.7	1.3	2.0	3.1	4.3	3.1	NE
	Santa Fe	SFE	9.8	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	NA
	Tláhuac	TAH	6.2	98.0	7.7	2.0	0	1.2	1.5	0.6	1.1	1.8	2.6	3.7	2.8	NO
	UAM Xochimilco	UAX	6.6	89.0	7.4	2.1	0.2	1.1	1.2	1.0	1.3	1.8	2.5	3.7	0	ESE
UAM Iztapalapa	UIZ	5.0	72.0	7.8	2.0	0	1.1	1.2	1.0	1.3	1.7	2.5	3.6	0.1	ESE	
EDOMEX	Acolman	ACO	5.7	84.0	8.4	2.4	0.1	1.3	1.7	1.1	1.4	2.1	3.1	4.4	0	NNO
	Chalco	CHO	9.8	82.0	6.3	1.6	0	1.2	1.7	0.4	0.7	1.1	2.4	3.4	2.6	SE
	Cuautitlán	CUT	11.5	96.0	6.5	1.9	0	0.9	1.0	0.9	1.3	1.6	2.3	3.1	0.2	NO
	FES Acatlán	FAC	9.5	100.0	6.1	1.7	0.1	0.9	1.2	0.7	1.0	1.6	2.2	3.0	0.2	O
	FES Aragón	FAR	9.0	99.0	8.6	2.4	0.2	1.3	1.6	1.1	1.5	2.1	3.1	4.3	0.1	ENE
	Investigaciones Nucleares	INN	8.7	83.0	6.7	1.5	0	1.1	1.5	0.3	0.7	1.3	2.2	3.0	7.7	SE
	Montecillo	MON	9.5	98.0	8.2	2.1	0	1.6	2.2	0.3	0.8	1.7	3.0	4.6	8.7	E
	Nezahualcóyotl	NEZ	9.9	99.0	8.0	2.5	0.1	1.3	1.8	1.1	1.5	2.2	3.3	4.5	0	NE
	San Agustín	SAG	3.5	100.0	6.4	1.5	0	0.9	1.1	0.5	0.9	1.4	2.0	2.7	4.5	NNE
	Tlalnepantla	TLA	5.7	64.0	8.9	2.5	0.4	1.2	1.6	1.2	1.6	2.3	3.2	4.2	0	NNO
	Villa de la Flores	VIF	9.5	55.0	6.3	1.8	0	1.1	1.2	0.7	1.1	1.6	2.3	3.4	0.7	NNO
Xalostoc	XAL	6.4	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	NA	

*La altura se refiere a la distancia desde el equipo de medición a la caseta del sitio de monitoreo.

**Se considera la dirección de donde proviene el viento.

ANEXO 4. ESTADÍSTICAS BÁSICAS

Tabla A4.16. Estadísticas básicas para radiación ultravioleta A en la CDMX y en el EDOMEX (unidades en W/cm²).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Lab. Análisis Ambiental	LAA	97.0	3.973	0.852	0	1.199	1.687	0	0	0.002	1.687	2.961
	Merced	MER	94.0	4.539	0.965	0	1.355	1.912	0	0	0.006	1.912	3.363
	Milpa Alta	MPA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	95.0	4.583	1.009	0	1.406	1.966	0	0	0.012	1.966	3.493
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
EDOMEX	Chalco	CHO	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Cuautitlán	CUT	100.0	4.721	1.030	0	1.449	2.007	0	0	0.002	2.007	3.572
	FES Acatlán	FAC	100.0	3.396	0.758	0	1.053	1.495	0	0	0.005	1.495	2.614
	Montecillo	MON	93.0	4.316	0.960	0	1.334	1.961	0	0	0.001	1.961	3.309
	San Agustín	SAG	100.0	5.086	1.045	0	1.488	2.056	0	0	0.001	2.056	3.713
Tlalnepantla	TLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

Tabla A4.17. Estadísticas básicas para radiación ultravioleta B en la CDMX y en el EDOMEX (unidades en W/cm²).

Entidad	Estación	Clave	% Datos válidos	ESTADÍSTICAS BÁSICAS									
				Máximo	Promedio	Mínimo	Desviación estándar	Rango intercuartílico	Percentil 10	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90
CDMX	Lab. Análisis Ambiental	LAA	98.0	4.174	0.038	0	0.061	0.062	0	0	0	0.062	0.147
	Merced	MER	94.0	4.597	0.041	0	0.067	0.065	0	0	0	0.065	0.163
	Milpa Alta	MPA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Pedregal	PED	95.0	4.801	0.045	0	0.072	0.070	0	0	0	0.070	0.179
	Santa Fe	SFE	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
EDOMEX	Chalco	CHO	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Cuautitlán	CUT	100.0	4.396	0.041	0	0.067	0.063	0	0	0	0.063	0.160
	FES Acatlán	FAC	100.0	3.857	0.039	0	0.061	0.064	0	0	0	0.064	0.154
	Montecillo	MON	94.0	3.890	0.038	0	0.061	0.062	0	0	0	0.062	0.148
	San Agustín	SAG	100	4.297	0.041	0	0.065	0.065	0	0	0	0.065	0.159
Tlalnepantla	TLA	0	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	

Tabla A4.18. Estadísticas básicas para depósito atmosférico húmedo en la CDMX y en el EDOMEX.

Entidad	Estaciones	Clave	pp	pH			Depósito total (kg/ha)									
							Aniones				Cationes					
				Precipitación total (mm de lluvia)	Mínimo pH	Promedio pH	Porcentaje eventos de lluvia ácida (%)	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	F ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	H ⁺	Mg ²⁺
CDMX	Ajusco	AJU	769	4.28	5.79	40.91	15.74	18.31	5.46	0.70	9.97	6.32	1.06	0.110	0.51	0.62
	Corena	COR	334	4.40	5.99	40.00	5.78	7.24	2.78	0.37	4.94	2.16	0.22	0.031	0.11	0.17
	Diconsá	DIC	542	4.28	6.08	27.78	16.03	19.21	4.07	0.53	11.06	7.90	0.81	0.043	0.29	0.53
	Ecoguardas Ajusco	EAJ	701	4.34	6.14	30.43	17.03	20.65	4.21	0.51	11.68	7.51	0.92	0.072	0.30	0.66
	Ex Desierto de los Leones	EDL	835	4.34	6.18	22.73	18.35	22.59	5.03	0.54	13.57	8.07	1.10	0.073	0.65	0.63
	Legaria	IBM	502	5.28	6.45	12.50	10.08	12.41	1.94	0.32	7.63	5.02	0.37	0.003	0.23	0.41
	Lab. Análisis Ambiental	LAA	416	4.74	6.58	9.52	11.21	13.42	1.57	0.34	8.40	6.41	0.52	0.008	0.27	0.45
	Lomas	LOM	529	4.62	6.35	17.39	13.91	16.61	3.10	0.45	9.69	7.36	0.38	0.026	0.29	0.52
	Museo CDMX	MCM	444	5.10	6.38	13.33	12.11	13.82	2.57	0.31	8.92	5.83	0.65	0.005	0.28	0.42
	Milpa Alta	MPA	408	3.92	5.80	35.29	9.07	10.80	4.02	0.52	6.40	3.10	0.46	0.084	0.18	0.26
	San Nicolás Totolapan	SNT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Cerro del Tepeyac	TEC	452	5.34	6.54	10.53	11.86	14.43	2.03	0.36	8.65	6.19	0.52	0.004	0.29	0.48	
EDOMEX	Montecillo	MON	321	4.42	6.43	10.00	10.20	12.10	2.36	0.26	7.31	3.79	0.47	0.010	0.26	0.34
	Nezahualcóyotl	NEZ	272	4.74	6.54	15.00	7.23	8.41	1.44	0.21	5.84	3.58	0.49	0.004	0.19	0.31
	Tlalnepantla	TLA	478	5.52	6.63	8.70	11.25	13.63	1.71	0.27	8.25	6.15	0.38	0.006	0.21	0.44
	Xalostoc	XAL	303	4.89	6.63	7.14	7.89	8.36	1.68	0.20	5.81	4.42	0.49	0.002	0.29	0.47

Historia de las contingencias ambientales



PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES ATMOSFÉRICAS

Tabla A5.1. Activación de la fase de Precontingencia a partir de 2001 (derogada en 2016).

Año	Contaminante	ACTIVACIÓN			DESACTIVACIÓN	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
2001	Ozono	13-ene 15:00	TPN	209	13-ene 18:00	3 h
	Ozono	17-ene 15:00	AZC	220	17-ene 19:00	4 h
	Ozono	29-ene 15:00	AZC	231	29-ene 18:00	3 h
	Ozono	13-feb 16:00	AZC	208	13-feb 18:00	2 h
	Ozono	07-mar 14:00	CUA	201	07-mar 17:00	3 h
	Ozono	02-may 14:00	BJU	219	02-may 16:00	2 h
	Ozono	02-may 14:00	PLA	214	02-may 16:00	2 h
	Ozono	24-may 15:00	BJU	205	24-may 17:00	2 h
	Ozono	28-may 16:00	CUA	213	28-may 18:00	2 h
	Ozono	07-jun 15:00	TAC	209	07-jun 16:00	1 h
	Ozono	07-jun 16:00	PLA	213	07-jun 18:00	2 h
	Ozono	21-jul 15:00	CUA	206	21-jul 18:00	3 h
	Ozono	04-ago 15:00	SUR	203	04-ago 17:00	2 h
	Ozono	18-ago 15:00	SUR	209	18-ago 17:00	2 h
2002	Ozono	16-ene 15:00	PED	219	16-ene 18:00	3 h
	Ozono	15-feb 16:00	PED	209	15-feb 18:00	2 h
	Ozono	15-mar 17:00	TAC	204	15-mar 18:00	1 h
	Ozono	02-abr 14:00	PLA	208	02-abr 16:00	2 h
	Ozono	20-abr 16:00	PLA	207	20-abr 18:00	2 h
	Ozono	22-abr 15:00	AZC	202	22-abr 17:00	2 h
	Ozono	22-abr 16:00	PED	210	22-abr 17:00	1 h
	Ozono	18-sep 15:00	PED	232	18-sep 18:00	Pasó a Fase I
	Ozono	23-oct 15:00	PED	202	23-oct 17:00	2 h
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
2004	PM ₁₀	25-dic 09:00	XAL	164	25-dic 12:00	Pasó a 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
2008	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
	Ozono	08-abr 16:00	EAC	172	09-abr 16:00	24 h
	Ozono	10-may 17:00	COY	172	11-may 17:00	24 h
2009	Ozono	13-feb 17:00	PED	180	16-feb 17:00	72 h
	PM ₁₀	03-nov 22:00	XAL	164	05-nov 09:00	48 h
	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 A5.1. (Continuación) Activación de la fase de Precontingencia a partir de 2001 (derogada en 2016).

Año	Contaminante	ACTIVACIÓN			DESACTIVACIÓN	
		Fecha y hora	Estación	Valor IMECA	Fecha y hora	Duración
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
	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
	PM ₁₀	25-dic 08:00	VIF	151	26-dic 12:00	28 h
2016	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 umbral de activación de la Fase I y se dejó como límite de 155 ppb que correspondía al valor de Pre contingencia; por esto desaparece la Fase de Pre contingencia.

Tabla A5.2. Activación de la Fase I, II, Regional o Extraordinaria entre 2001 y 2023.

Año	Contaminante	ACTIVACIÓN				DESACTIVACIÓN	
		Fecha y hora	Estación	Valor* (ppb o µg/m ³)	Fase	Fecha y hora	Duración
2001	—	—	—	—	—	—	—
2002	Ozono	18-sep 16:00	PED	284	FI	19-sep 16:00	24 h
2003	PM ₁₀	25-dic 12:00	XAL	302	FI	26-dic 12:00	24 h
2004	—	—	—	—	—	—	—
2005	PM ₁₀	01-ene 08:00	VIF	312	Regional	02-ene 08:00	24 h
2006 al 2015	—	—	—	—	—	—	—
2016	Ozono	14-mar 16:00	CUA	198	FI	17-mar 16:00	72 h
	Ozono	05-abr 17:00	AJM	160	FI	06-abr 17:00	24 h
	Ozono	02-may 15:00	BJU	165	FI	05-may 17:00	74 h
	Ozono	14-may 17:00	TAH	161	FI	15-may 15:00	22h
	Ozono	20-may 15:00	SFE	182	FI	21-may 17:00	26 h
	Ozono	24-may 15:00	CAM	155	FI	24-may 21:00	06 h
	Ozono	27-may 15:00	GAM	169	FI	28-may 18:00	27 h
	Ozono	31-may 16:00	MGH	159	FI	01-jun 18:00	26 h
	Ozono	08-jul 17:00	SFE	156	FI	09-jun 15:00	22 h
2017	Ozono	11-ago 16:00	AJM	155	FI	12-ago 17:00	25 h
	PM ₁₀	06-ene 09:00	XAL	157	FI Regional	07-ene 09:00	24 h
	Ozono	15-may 16:00	AJM	155	FI	21-may 19:00	147 h
	Ozono	22-may 15:00	GAM	166	FI	24-may 18:00	51 h
2018	PM ₁₀	14-dic 11:00	SAG	158	FI Regional	15-dic 09:00	22 h
	Ozono	06-jun 16:00	PED	165	FI*	07-jun 16:00	24 h
	PM ₁₀	25-dic 11:00	VIF	156	FI Regional	26-dic 10:00	23 h
2019	PM ₁₀	01-ene 09:00	VIF	161	FI Regional	02-ene 10:00	25 h
	Ozono	30-mar 15:00	PED	159	FI	31-mar 15:00	24 h
	Ozono	10-abr 17:00	PED	156	FI	11-abr 15:00	22 h
	Ozono	16-abr 17:00	CAM	158	FI	18-abr 15:00	46 h
	PM _{2.5} y Ozono*	14-may 15:00	NEZ PED	108.3 144	Extraordinaria	17-may 19:00	74 h
2020	PM _{2.5}	25-dic 11:00	NEZ	101.8	FI Regional	26-dic 10:00	23 h
	Ozono	11-nov 16:00	CCA	159	FI	12-nov 01:00	20 h
2021	Ozono	21-abr 18:00	TLI	160	FI	22-abr 20:00	26 h
	Ozono	26-abr 16:00	CCA	159	FI	27-abr 18:00	24 h
	Ozono	08-jun 16:00	CCA	157	FI	08-jun 20:00	04 h
	PM _{2.5}	25-dic 11:00	SAC	99.9	FI Regional	26-dic 03:00	28 h
2022	Ozono	29-mar 16:00	SFE	162	FI	30-mar 17:00	25 h
	Ozono	02-may 17:00	BJU-CCA	169	FI	04-may 20:00	51 h
	Ozono	05-may 16:00	BJU	168	FI	06-may 20:00	26 h
	Ozono	20-may 15:00	CUA	160	FI	21-may 17:00	26 h
	Ozono	07-jun 17:00	SFE	156	FI	08-jun 15:00	22 h
	Ozono	12-nov 15:00	CCA	155	FI	14-nov 17:00	50 h
2023	PM ₁₀	01-ene 11:00	SAC	104	FI Regional	01-ene 16:00	4 h
	Ozono	23-feb 15:00	AJM	155	FI	24-feb 18:00	27 h
	Ozono	25-mar 16:00	FAC	161	FI	27-mar 18:00	46 h

*Desde la implementación del **Índice AIRE y SALUD** en 2020; las contingencias se declaran con la concentración equivalente a los 151 puntos del Índice de Calidad del Aire (antes IMECA) de la NADF-009-AIRE-2017, que en el caso de **O₃** la **Fase I > 154 ppb** (máx. 1h); **PM₁₀ FI > 214 µg/m³** (promedio móvil 24h) y **PM_{2.5} FI > 97.4 µg/m³** (móvil 24h).

— No se activó contingencia

Mosaicos de calidad del aire



MOSAICOS

Partículas menores a 2.5 µm (PM_{2.5})

LEYENDA	
Concentración	Color
0 - 10 µg/m ³	[Color más claro]
11 - 20 µg/m ³	[Color claro]
21 - 30 µg/m ³	[Color medio claro]
31 - 40 µg/m ³	[Color medio]
41 - 50 µg/m ³	[Color medio oscuro]
51 - 60 µg/m ³	[Color oscuro]
61 - 70 µg/m ³	[Color muy oscuro]
71 - 80 µg/m ³	[Color negro]
81 - 90 µg/m ³	[Color negro]
> 90 µg/m ³	[Color negro]

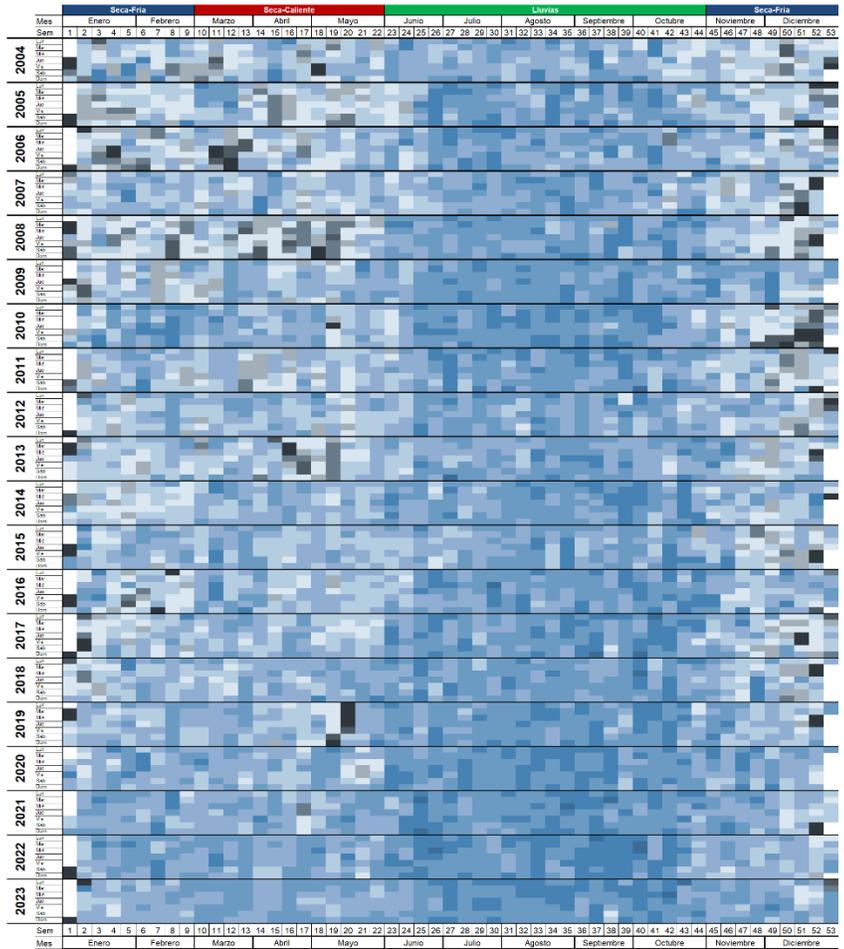
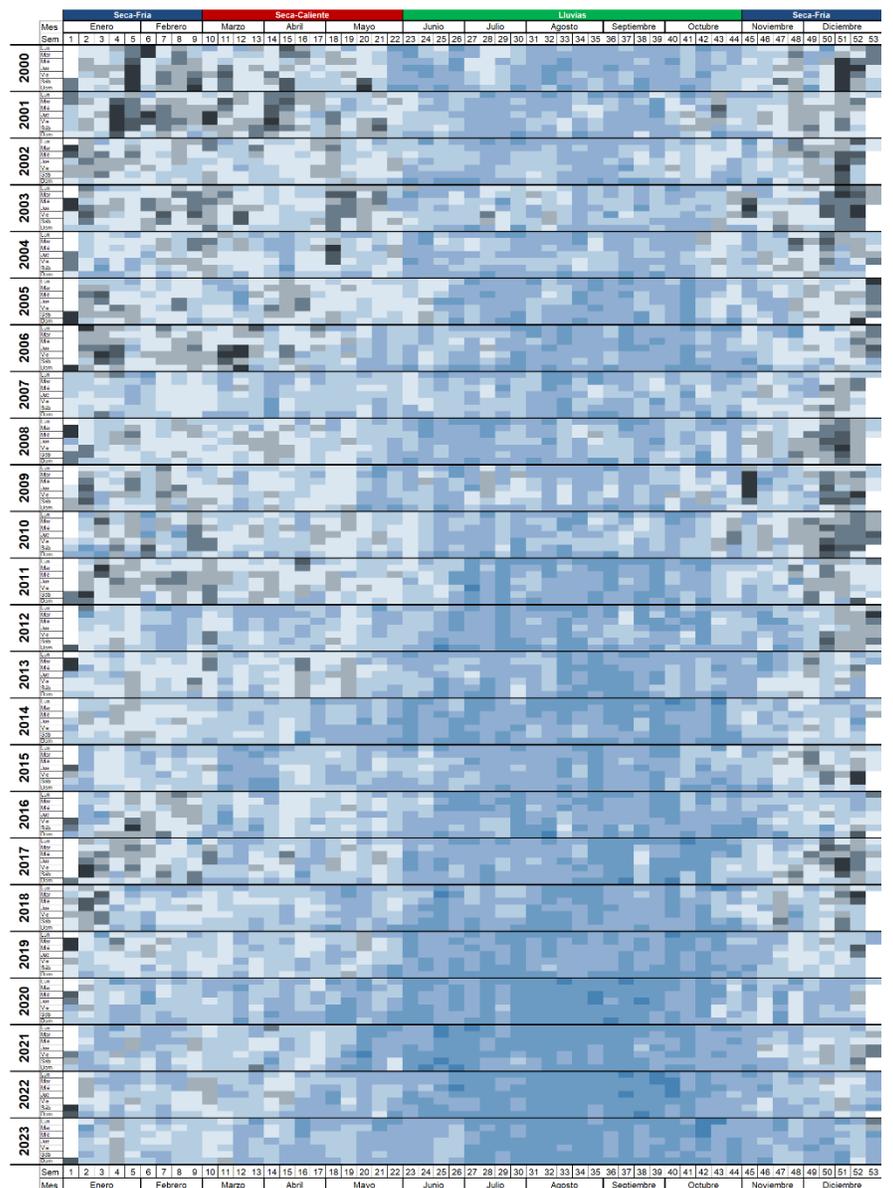


Figura A6.1. Mosaico de PM_{2.5}. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 2004 al 2023. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de PM_{2.5} de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.

Partículas menores a 10 µm (PM₁₀)

LEYENDA	
Concentración	Color
0 - 25 µg/m ³	[Color más claro]
26 - 50 µg/m ³	[Color claro]
51 - 75 µg/m ³	[Color medio claro]
76 - 100 µg/m ³	[Color medio]
101 - 125 µg/m ³	[Color medio oscuro]
126 - 150 µg/m ³	[Color oscuro]
151 - 175 µg/m ³	[Color muy oscuro]
176 - 200 µg/m ³	[Color negro]
> 200 µg/m ³	[Color negro]

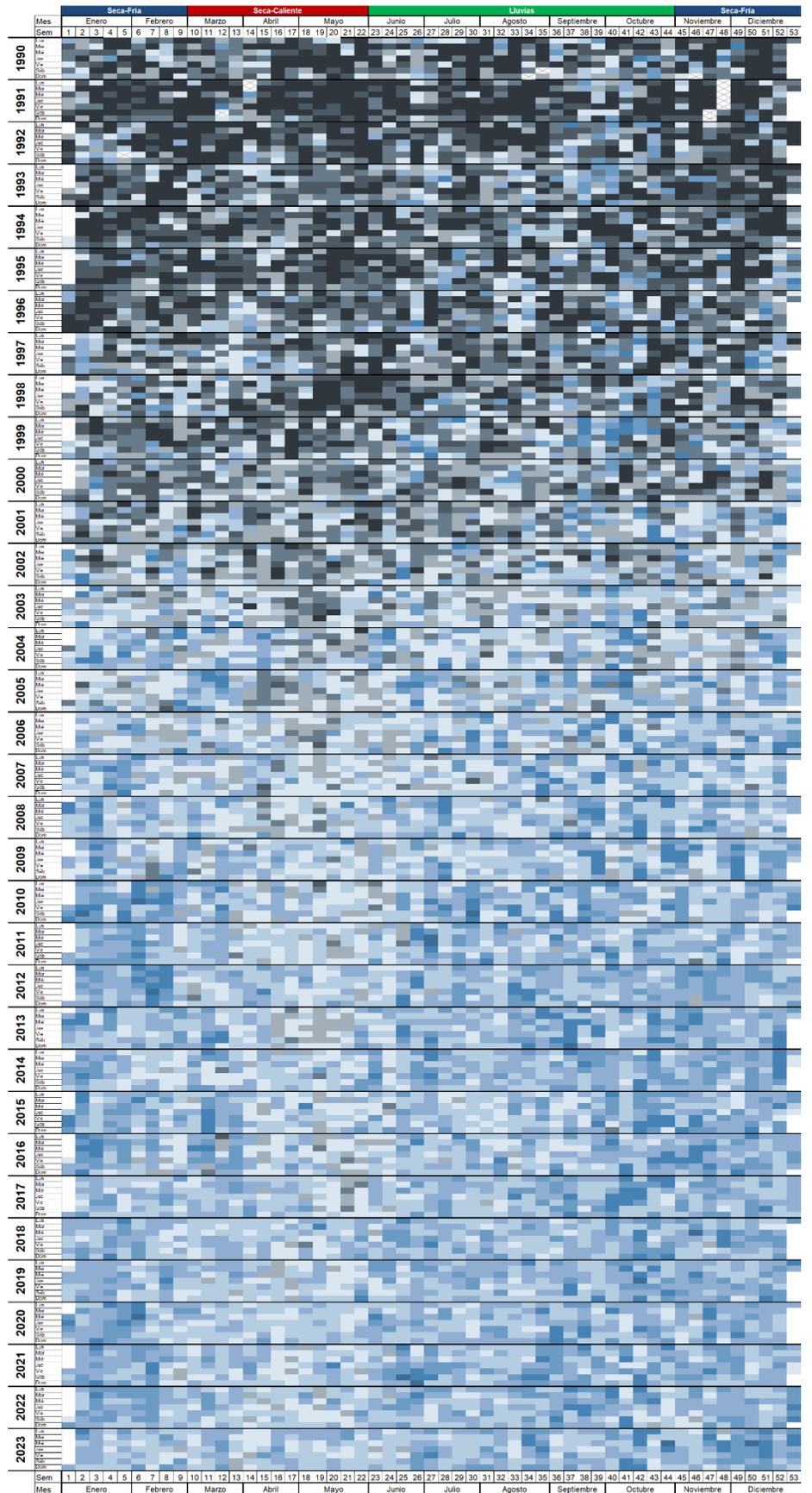
Figura A6.2. Mosaico de PM₁₀. Cada celda es el máximo diario del promedio de 24 h del 2000 a 2023. Para fines comparativos, el color de la celda indica la concentración de PM₁₀ de acuerdo con los intervalos y a los colores de la escala.



Ozono (O₃)

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

Figura A6.3. Mosaico de O₃. Cada celda es el máximo diario del promedio 1 h de 1990 al 2023. 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.



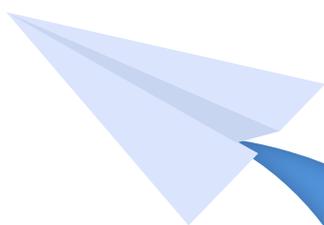


GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

SEDEMA



CALIDAD
DEL AIRE



www.aire.cdmx.gob.mx



@Aire_CDMX



App: AIRE

Disponible para:  