

# Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis



Molina Center for  
Energy and the Environment



# Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis

**Luisa T. Molina, Armando Retama y Miguel Zavala**

Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2)

Preparado para la

**Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME)**

Boston, Massachussets

Mayo de 2023

Fotografía de la portada: A. Retama.

2023 Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment

Citar como:

Molina, L. T., Retama, A., Zavala, M. (2023) Diagnóstico sobre el Conocimiento Actual de las Bases Científicas para la Gestión de la Calidad del Aire en la Región de la Megalópolis. Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment. Boston, MA, mayo de 2023.



**CC-BY-NC:** se permite el uso y la distribución de este trabajo con propósitos no comerciales y con la debida atribución a los autores.

## CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>9</b>
<b>ACRÓNIMOS, ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS QUÍMICOS</b>	<b>11</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>58</b>
1.1. Antecedentes	58
1.2. Instituciones medioambientales en México	61
1.3. Población y desarrollo urbano de la ZMVM y la Megalópolis	62
1.4. Topografía y meteorología de la ZMVM y la región de la Megalópolis	63
1.5. Infraestructura y herramientas de gestión de la calidad del aire	64
1.6. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis	69
1.7. Investigación sobre los impactos de la contaminación del aire en la salud en la Megalópolis	73
1.8. Programas de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis	73
<b>CAPÍTULO 2. EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA MEGALÓPOLIS</b>	<b>77</b>
2.1. El monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México y su zona metropolitana	77
2.1.1. Sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México	77
2.1.2. Situación de la calidad del aire de acuerdo con los datos del monitoreo	79
2.1.3. Efectos de la contaminación del aire en la composición y acidez del agua de lluvia	82
2.1.4. Influencia de la meteorología en la contaminación del aire	83
2.2. El monitoreo de la calidad del aire en el resto de las entidades de la Megalópolis	86
2.2.1. Estado de México	87
2.2.2. Hidalgo	91

2.2.3. Morelos	94
2.2.4. Puebla	97
2.2.5. Querétaro	100
2.2.6. Tlaxcala	101
2.3. Comparación de la calidad del aire en las ciudades de la Megalópolis	103
2.4. El Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis	110
2.5. Observaciones satelitales	111
2.5.1. Capacidades en México para el uso y explotación de los datos satelitales	112
2.6. Sistemas de monitoreo híbrido	112
2.7. Retos y recomendaciones del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis	113
2.7.1. Retos del monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México	113
2.7.2. Retos del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis	114
2.7.3. Recomendaciones para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis	115
ANEXO A. Tecnologías emergentes para complementar el monitoreo de la calidad del aire	118
A1. Sensores de bajo costo	118
A2. Productos satelitales	120
ANEXO B. Series de tiempo para los promedios diarios de los contaminantes medidos en los sistemas de monitoreo de Hidalgo, Puebla y Querétaro	122
<b>CAPÍTULO 3. EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA MEGALÓPOLIS</b>	<b>139</b>
3.1. Desarrollo de inventarios de emisiones en la Megalópolis	139
3.2. Inventario nacional de emisiones	140
3.3. Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México	142
3.4. Retos y recomendaciones para mejorar la estimación de emisiones	146

<b>CAPÍTULO 4. INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ATMOSFÉRICA EN LA MEGALÓPOLIS</b>	<b>155</b>
4.1. Procesos atmosféricos	155
4.2. Desafíos científicos de la caracterización de los contaminantes atmosféricos	156
4.2.1. Caracterización del ozono en la Megalópolis	156
4.2.2. Caracterización de partículas en la Megalópolis	159
4.3. Caracterización de gases y partículas en la Megalópolis	163
4.3.1. Compuestos orgánicos volátiles	163
4.3.2. Compuestos reactivos de nitrógeno atmosférico	168
4.3.3. Partículas suspendidas: fuentes, composición y propiedades	171
4.3.4. Propiedades ópticas de los aerosoles	179
4.3.5. Investigación científica en los otros estados de la Megalópolis	180
4.4. Climatología urbana y calidad del aire	185
4.4.1. Calentamiento urbano y cambio climático	185
4.4.2. Influencia de la capa límite planetaria en la calidad del aire	190
4.4.3. Contaminación del aire y la radiación ultravioleta superficial	193
4.5. Forzadores climáticos de vida corta	195
4.5.1. Emisiones de carbono negro de vehículos diésel en carretera y fuera de carretera	197
4.5.2. Emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales	197
4.5.3. Emisiones de metano de la fermentación entérica del ganado	199
4.6. Modelación y pronóstico de la calidad del aire en la Megalópolis	200
4.7. Impacto del COVID-19 en la calidad del aire de la Megalópolis	204
4.7.1. Pandemia de COVID-19 en México	204
4.7.2. Calidad del aire en la Ciudad de México y otras regiones durante el confinamiento por COVID-19	206

4.7.3. Cambios en la generación de emisiones en la ZMVM durante la pandemia de COVID-19	208
4.7.4. Impacto del COVID-19 en la química atmosférica de la Megalópolis	209
4.8. Lecciones aprendidas, brechas de conocimiento y necesidades de investigación	210
4.8.1. Fuentes y procesamiento de los contaminantes atmosféricos	210
4.8.2. Meteorología local y calidad del aire	213
4.8.3. Forzadores climáticos de vida corta	214
4.8.4. Modelación de la calidad del aire y pronóstico	215
4.8.5. Impacto de COVID-19 en la calidad del aire	216
<b>CAPÍTULO 5. ESTUDIOS DE SALUD PÚBLICA Y LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA MEGALÓPOLIS</b>	<b>219</b>
5.1. Introducción	219
5.2. Estado actual del conocimiento sobre los impactos de la contaminación atmosférica en la salud pública en la Megalópolis	221
5.2.1. Estudios epidemiológicos de la exposición a los contaminantes del aire	221
5.2.2. Estudios toxicológicos de las partículas suspendidas	223
5.2.3. Estudios de exposición a contaminantes del aire	225
5.3. Los costos-beneficios y la comunicación de riesgos	226
5.4. Lecciones aprendidas	227
5.5. Preguntas científicas clave	228
5.6. Retos científicos y recomendaciones	229
<b>CAPÍTULO 6. PROGRAMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA MEGALÓPOLIS</b>	<b>232</b>
6.1 Proceso de gestión de la calidad del aire y el papel de la investigación científica	232
6.2. Programas de gestión de la calidad del aire en la ZMVM	234
6.3. Gestión de la calidad del aire en la Megalópolis	238



6.4. Evaluación de los principales programas de calidad del aire	242
6.4.1. Integración del transporte-uso del suelo-gestión de la calidad del aire en la Megalópolis	242
6.4.2. Emisiones de fuentes domésticas e informales	251
6.4.3. Reducción de emisiones en industrias y servicios	252
6.4.4. El Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas	253
6.4.5. Planes de mitigación del cambio climático	256
6.4.6. Análisis de costo-beneficio para la aplicación de las medidas de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis	257
6.5. Comunicación, educación y desarrollo de capacidades	263
6.5.1. La comunicación de riesgos	264
6.6. Retos y recomendaciones	267
<b>CAPÍTULO 7. RETOS, LECCIONES APRENDIDAS, Y RECOMENDACIONES</b>	<b>275</b>
7.1. Monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis	275
7.2. Emisiones de contaminantes atmosféricos en la Megalópolis	278
7.3. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis	286
7.4. Estudios de salud pública y contaminación del aire en la Megalópolis	294
7.5. Gestión de la calidad del aire en la Megalópolis	298
<b>REFERENCIAS</b>	<b>305</b>
<b>APÉNDICE. AGENDA Y RESÚMENES</b> “Taller virtual: Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis”	<b>349</b>



## AGRADECIMIENTOS

El presente documento “Diagnóstico sobre el Conocimiento Actual de las Bases Científicas de la Gestión de la Calidad del Aire en la Región de la Megalópolis” fue elaborado por el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2). El equipo agradece a la Coordinación Ejecutiva de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) por su apoyo y colaboración, al igual que a Erik Velasco, Álvaro Osornio y Benjamín de Foy por su revisión y discusión.

El documento se basa en la revisión de las presentaciones y discusiones del taller virtual "Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis" que se realizó los días 21 y 22 de abril de 2022, así como la revisión de artículos de literatura publicados e informes técnicos relevantes disponibles.

El taller virtual fue organizado conjuntamente por el MCE2 y la CAME, con la colaboración de la SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México), la SMAGEM (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México), la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), el INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), el ICAYCC-UNAM (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México). A continuación se enumera una lista completa de las personas que participaron en el taller.

**Comité Organizador:** Alejandro Villegas López, Daniel López Vicuña, Hugo Landa Fonseca, Jorge Zavala Hidalgo, Gloria Julissa Calva Cruz, Luis Gerardo Ruiz, Luisa Tan Molina, Olivia Rivera Hernández, Ramiro Barrios Castrejón, Sergio Zirath Hernández, Víctor Hugo Páramo Figueroa.

**Moderadores:** Alejandro Villegas López, Armando Retama, Daniel López Vicuña, Erik Velasco, Gloria Julissa Calva Cruz, Horacio Riojas Rodríguez, Hugo Landa Fonseca, Jorge Zavala Hidalgo, José Agustín García Reynoso, Luisa Tan Molina, Michel Grutter de la Mora, Miguel Zavala, Omar Amador Muñoz, Ramiro Barrios Castrejón, Víctor Hugo Páramo Figueroa,

**Panelistas:** Adalberto Noyola Robles, Adriana Ipiña, Alberto Mendoza Domínguez, Alejandra Méndez Girón, Alejandro Déciga Alcaráz, Alvaro Lomelí Covarrubias, Andrea Burgos Cuevas, Andrea de Vizcaya Ruíz, Angélica Guadarrama Chávez, Armando Retama, Beatriz Herrera Gutierrez, Beatriz Manrique Guevara, Benjamin de Foy, Bernhard Rappenglück, Claudia Inés Rivera Cárdenas, Daniel López Vicuña, Dara Salcedo González, Dzoara Damaris Tejeda Honstein, Erik Velasco, Erika Danaé López Espinoza, Francisco Hernandez Ortega, Graciela Velasco Herrera, Gustavo Enrique Sosa Iglesias, Hugo Landa Fonseca, Iván Yasmani Hernández Paniagua,

Jorge Luis García Franco, Jorge Zavala Hidalgo, José Abraham Ortíz Álvarez, José Agustín García Reynoso, José Luis Galindo Cortéz, José Luis Guevara Muñoz, José Luis Texcalac Sangrador, Karen Elizabeth Nava Castro, Karla Cervantes Martínez, Kate Bloomberg, Laura Noemí Muñoz Benitez, Leonora Rojas Bracho, Leticia Hernandez Cadena, Luis Gerardo Ruiz Suárez, Magali Hurtado Díaz, Manuel Suárez Lastra, Marco Antonio del Prete Tercero, Marco Mora, María del Carmen Calderón Ezquerro, María Eugenia Ibararán Viniegra, Mauro Alvarado Castillo, Michel Grutter de la Mora, Miguel Zavala, Mónica del Carmen Jaimes Palomera, Octavio A. Castelán-Ortega, Olivia Rivera Hernández, Omar Amador Muñoz, Oscar Peralta Gutiérrez, Patricia Camacho Rodríguez, Ramiro Barrios Castrejón, Ricardo Torres Jardón, Rodolfo Iniestra Gómez, Rodolfo Sosa Echeverría, Salvador Blanco Jiménez, Salvador Medina Ramírez, Sergio Israel Mendoza, Sergio Zirath Hernández Villaseñor, Stephan Brodziak de los Reyes, Stephanie Montero Bending, Verónica Garibay, Víctor Almanza Veloz, Victor Torres Meza, Violeta Mugica Álvarez, Zuhelen Verónica Padilla Barrera.

**SopORTE logístico:** Ana Lilia Ubaldo Moreno, Eduardo Alberto Durán Rodríguez, Elizabeth Méndez Márquez, Israel Hupio Montesinos, Jennifer Sandra García Escalante, Julia Jiménez Bejarano, Mónica Palomero Rivero, Ricardo Daniel Ramírez Pérez, Valeria Navarro Pérez de León, Yeni Solís Reyes.

## ACRÓNIMOS, ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS QUÍMICOS

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Microgramos por metro cúbico
AERAS	AERosoles AtmosféricoS
AOD	Aerosol optical depth (siglas en inglés)
ASEA	Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente
AQFS-Mex	Air Quality Forecasting System – Mexico City (siglas en inglés)
BC	Black carbon (siglas en inglés)
BrC	Brown carbon (siglas en inglés)
BUAP	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
CAA	Clean Air Act (siglas en inglés)
CAM	Comisión Ambiental Metropolitana
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis
CARB	California Air Resources Board (siglas en inglés)
CCAC	Climate and Clean Air Coalition (siglas en inglés)
CDMX	Ciudad de México
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CH <sub>4</sub>	Metano
CLP	Capa límite planetaria
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CN	Carbono negro
CNG	Compressed natural gas (siglas en inglés)
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COA	Cédula de Operación Anual
COT	Compuestos orgánicos totales
COVID-19	Coronavirus disease of 2019 (siglas en inglés)
COV	Compuestos orgánicos volátiles
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DDF	Departamento del Distrito Federal
DGGCARETC	Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
DGIELGCA	Dirección General de Industria, Energías Limpias y Gestión de la Calidad del Aire
DMCA	Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire

DOF	Diario Oficial de la Federación
EC	Elemental carbon (siglas en inglés)
EdoMex	Estado de México
EPA	Environmental Protection Agency (siglas en inglés)
FCVC	Forzadores climáticos de vida corta
FTIR	Fourier-transform infrared spectroscopy (siglas en inglés)
GAW	Global Atmospheric Watch (siglas en inglés)
GEI	Gases de efecto invernadero
GLP	Gas licuado de petróleo
GMAO	Global Modeling and Assimilation Office (siglas en inglés)
GNC	Gas natural comprimido
GTZ	Agencia Alemana de Cooperación Técnica
GyCEI	Gases y Compuestos de Efecto Invernadero
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrógeno
HAPs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HCHO	Formaldehído
HERMES	High-Selective Resolution Modeling Emission System (siglas en inglés)
HFC	Hidrofluorocarbonos
Hg	Mercurio
HNO <sub>2</sub>	Ácido nitroso
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (siglas en inglés)
ICAyCC	Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático
ICM	Iniciativa Climática de México
IE-ZMVM	Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM
IEA	International Energy Agency (siglas en inglés)
IMADA-AVER	Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico-Aerosol and Visibility Evaluation
INE	Instituto Nacional de Ecología
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INEGYCEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero
INEM	Inventario Nacional de Emisiones de México
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública
IPCC	International Panel on Climate Change (siglas en inglés)
JICA	Japan International Cooperation Agency (siglas en inglés)
LGCC	Ley General de Cambio Climático
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

LIDAR	Light detection and ranging (siglas en inglés)
LPG	Liquified petroleum gas (siglas en inglés)
LTMCE2	LTM Center for Energy and the Environment (siglas en inglés)
MARI	Mexico City Air Quality Research Initiative (siglas en inglés)
MCCM	Multiscale Climate Chemistry Model (siglas en inglés)
MCE2	Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (siglas en inglés)
MCMA	Mexico City Metropolitan Area (siglas en inglés)
MCMA-2003	Mexico City Metropolitan Area-2003 Campaign (siglas en inglés)
MEGAN	Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (siglas en inglés)
MILAGRO	Megacity Initiative: Local And Global Research Observations (siglas en inglés)
MIT	Massachusetts Institute of Technology (siglas en inglés)
MOE	Material orgánico extraíble
MOVES	Motor Vehicle Emissions Simulator (siglas en inglés)
Mt	Millones de toneladas o Megatoneladas
NASA	National Aeronautics and Space Administration (siglas en inglés)
NDC	National Determination Contribution (siglas en inglés)
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
Ni	Níquel
NO	Óxido nítrico
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
NRC	National Research Council (siglas en inglés)
O <sub>3</sub>	Ozono
OH	Radical hidroxilo
OMS	Organización Mundial de la Salud
PAN	Peroxyacetyl nitrate (siglas en inglés)
Pb	Plomo
PCAA	Programa de Contingencia Ambiental Atmosférica
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PFC	Perfluorocarbonos
PM <sub>0.1</sub>	Partículas con diámetros de 0.1 micrómetros o menores
PM <sub>10</sub>	Partículas con diámetros de 10 micrómetros o menores
PM <sub>2.5</sub>	Partículas con diámetros de 2.5 micrómetros o menores
ppm	Partes por millón
PPRECCA	Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas

ProAire	Programa Para Mejorar la Calidad del Aire
PST	Partículas suspendidas totales
Pt	Platino
PTAR	Plantas de tratamiento de aguas residuales
PVVO	Programa de Verificación Vehicular Obligatorio
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEMARNATH	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México
SINAICA	Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire
SLCF	Short-lived Climate Forcers (siglas en inglés)
SLCP	Short-lived Climate Pollutants (siglas en inglés)
SMAGEM	Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SNAP	Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants (siglas en inglés)
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
SRV	Sistemas de Recuperación de Vapores
SUV	Sport Utility Vehicle (siglas en inglés)
TAG-GC/MS	Thermal Desorption Aerosol - Gas Chromatography /Mass Spectrometer (siglas en inglés)
TEMPO	Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution (siglas en inglés)
TROPOMI	TROPOspheric Monitoring Instrument (siglas en inglés)
UHI	Urban Heat Island (siglas en inglés)
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNEP	United Nations Environment Programme (siglas en inglés)
UV	Ultravioleta
WHO	World Health Organization (siglas en inglés)
WMO	World Meteorological Organization (siglas en inglés)
WRI	World Resources Institute (siglas en inglés)
WRF-ARW	Weather Research and Forecasting - Advanced Research (siglas en inglés)
WRF-Chem	Weather Research and Forecasting with Chemistry (siglas en inglés)
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
Zn	Zinc



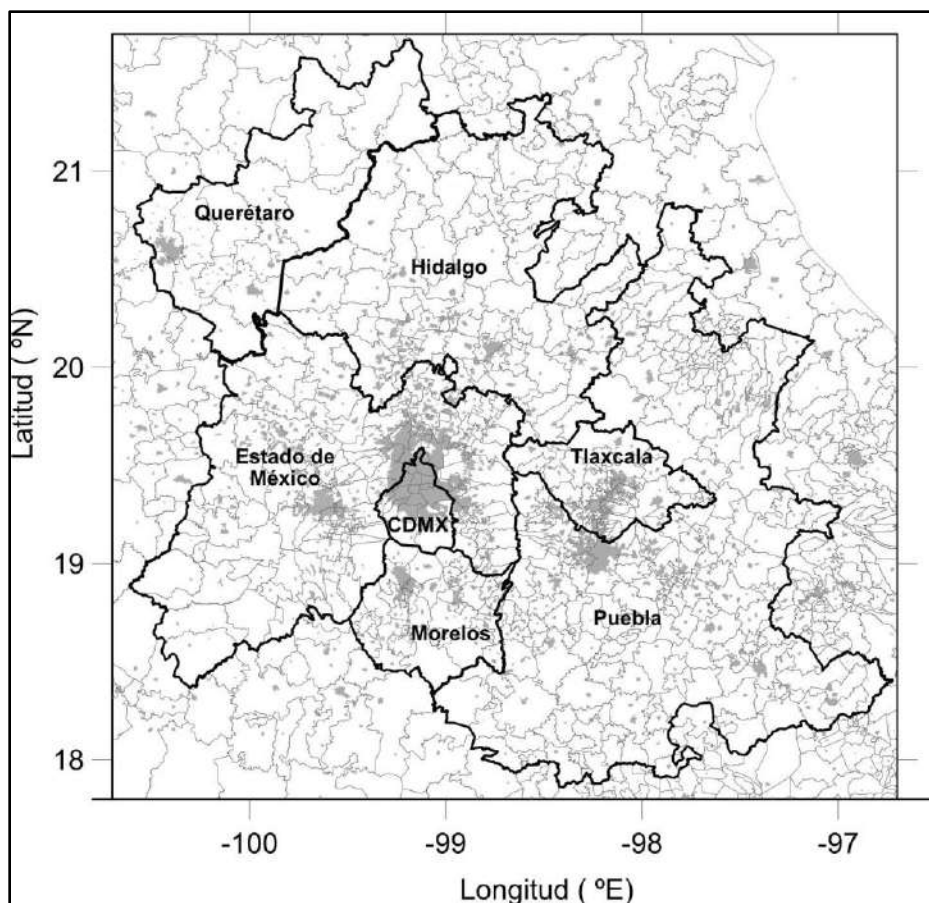
# RESUMEN EJECUTIVO

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Con más de veintiún millones de habitantes, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una de las megaciudades más grandes del mundo y el área metropolitana más poblada de América del Norte. La Ciudad de México y su área metropolitana han experimentado una transformación masiva en la urbanización y la demografía a lo largo de su historia. La población pasó de menos de tres millones de habitantes en 1950 a más de dieciocho millones en el año 2000, lo que corresponde a un incremento aproximado de seis veces en cincuenta años. La extensión urbana continua pasó en el mismo periodo de 690 km<sup>2</sup> a ~1500 km<sup>2</sup>, extendiendo la zona urbana más allá de los límites del Distrito Federal (ahora Ciudad de México) hacia el Estado de México, así como a algunas partes del Estado de Hidalgo, integrando lo que ahora se conoce como la ZMVM. La tasa de crecimiento de la población de la Ciudad de México se mantiene estable desde el año 2000, mientras que la población urbana del Estado de México continúa aumentando, debido a la agregación de más municipios del Estado de México a la ZMVM. Actualmente, la zona metropolitana cuenta con más de 21.7 millones de habitantes, de los cuales 9.0 millones viven en la Ciudad de México y 12.6 millones en 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo. Las áreas metropolitanas vecinas (Puebla, Tlaxcala, Cuernavaca, Pachuca y Toluca) también muestran un rápido crecimiento demográfico. Esta expansión múltiple ha integrado un complejo urbano contiguo conocido como la "Megalópolis" de México la cual incluye a la Ciudad de México y los municipios de cinco estados contiguos México, Puebla, Tlaxcala, Morelos e Hidalgo, con una población estimada de aproximadamente treinta y cinco millones en las áreas urbanizadas. Para propósitos de gestión ambiental el estado de Querétaro se considera también como parte de esta Megalópolis. La Figura 1 muestra un mapa de la Megalópolis.

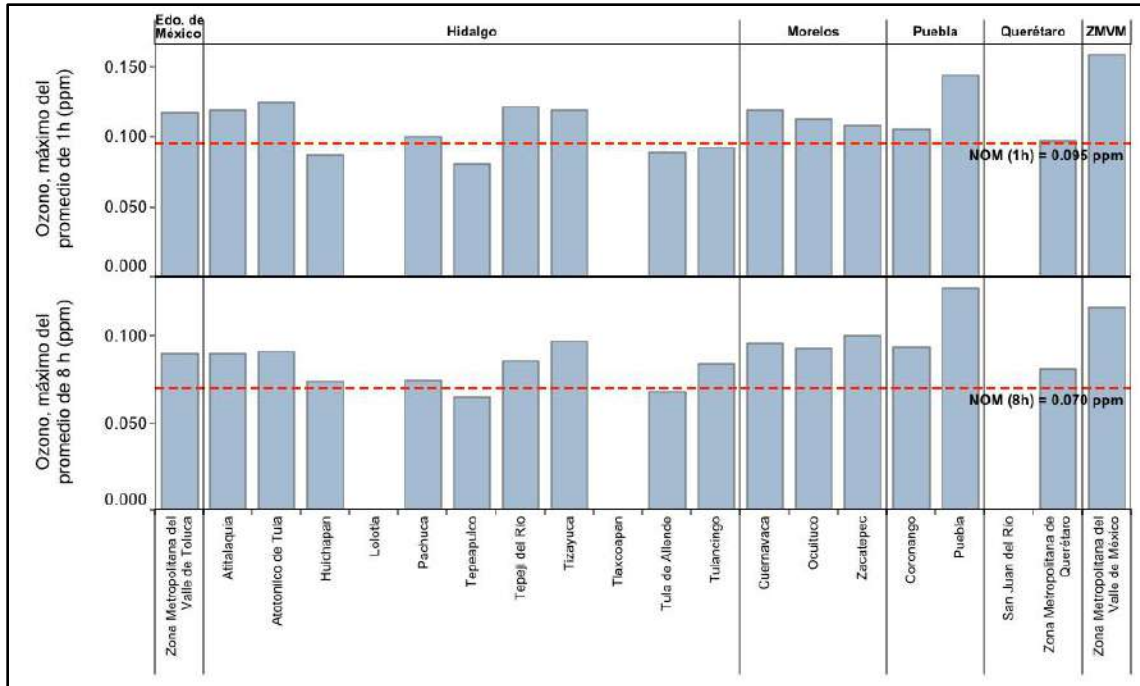
La combinación del rápido crecimiento de la población, la expansión urbana descontrolada, el aumento del consumo de energía y la motorización, así como una cuenca a gran altitud rodeada de montañas y la intensa radiación solar, provocaron graves problemas de contaminación del aire en la zona metropolitana de la Ciudad de México en la década de 1980. En respuesta a la creciente preocupación pública sobre la mala calidad del aire, el gobierno mexicano anunció acciones de reducción de emisiones, fortaleció el marco legal que definía las responsabilidades a nivel federal, estatal y local, y estableció varias agencias administrativas para abordar los problemas ambientales, incluida la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) en 1996 para coordinar los diversos niveles de gobierno que se ocupaban de los problemas ambientales metropolitanos. Posteriormente, la CAM fue reemplazada en 2013 por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) para atender los problemas ambientales en la Megalópolis.



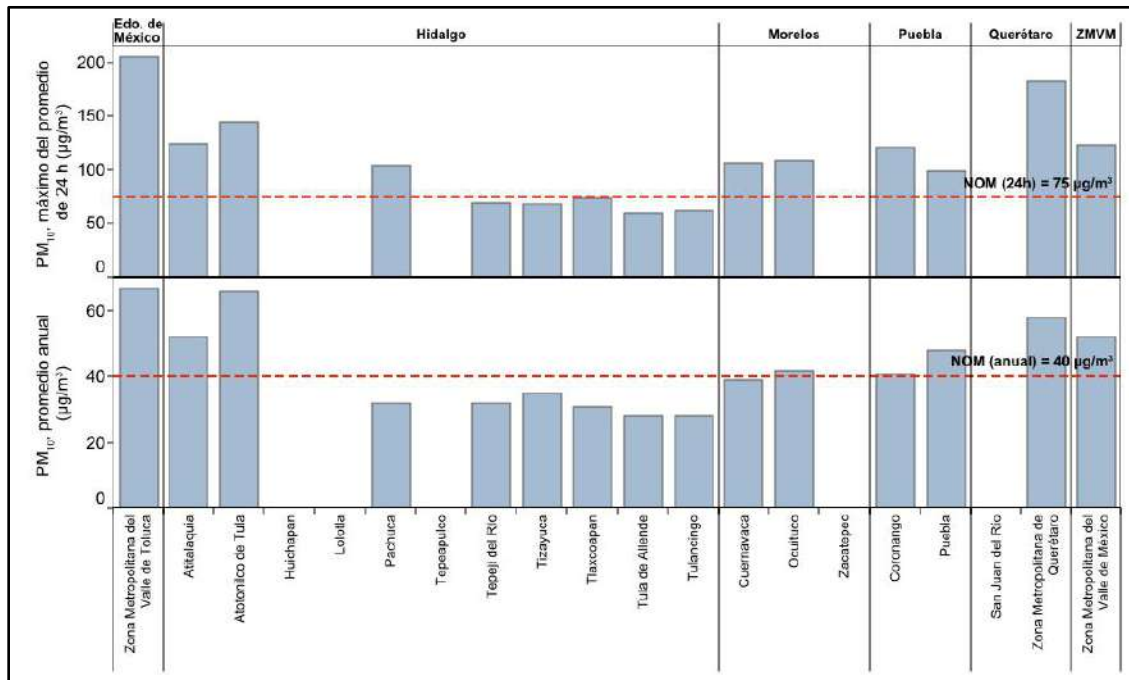
**Figura 1.** Mapa de la Megalópolis, los límites estatales se indican con una línea negra gruesa, mientras que los municipales con líneas más delgadas, las áreas urbanizadas se destacan con un sombreado gris.

A partir de la década de 1980 se buscó establecer programas integrales de gestión de la calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales y políticas; la ZMVM logró reducir drásticamente los contaminantes del aire y mejorar la salud pública. A principios de este siglo, las concentraciones atmosféricas de plomo (Pb), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) se redujeron drásticamente hasta alcanzar niveles por debajo de los valores límite establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de calidad del aire. Las concentraciones de ozono (O<sub>3</sub>), PM<sub>10</sub> (partículas suspendidas con diámetros de 10 micrómetros y menores) y PM<sub>2.5</sub> (partículas suspendidas con diámetros de 2.5 micrómetros y menores) también disminuyeron, pero aún se encuentran en niveles superiores a los de las respectivas NOM.

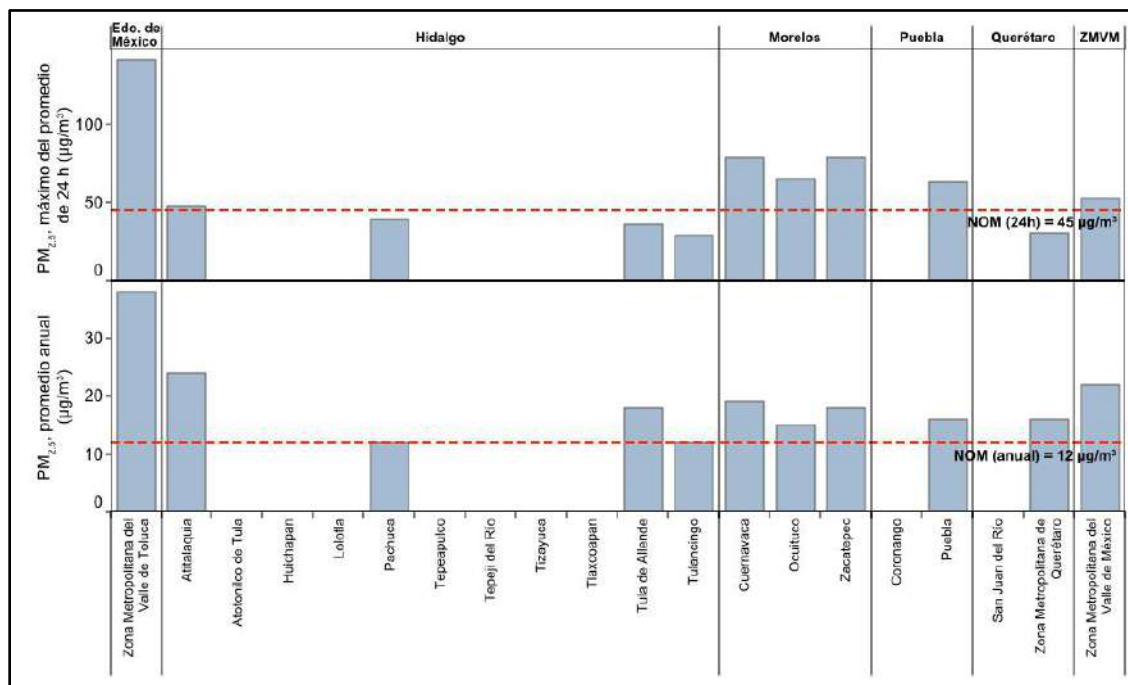
Los sistemas de vigilancia de la calidad del aire de las entidades que rodean a la Ciudad de México reportan concentraciones de O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> que superan con frecuencia los valores límite de las NOM. Las concentraciones promedio de algunos centros urbanos igualan o superan las observadas en la Ciudad de México, exhibiendo la escala regional del deterioro de la calidad del aire. En los informes anuales de calidad del aire del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) se puede encontrar información detallada sobre la situación de la calidad del aire en las entidades de la Megalópolis. Las Figuras 2 a 4 muestran la comparación entre las concentraciones máximas reportadas por las diferentes redes de monitoreo de la región CAME en 2020 y los valores límite de las NOM para O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, respectivamente.



**Figura 2.** Comparación de las concentraciones máximas de O<sub>3</sub> para el promedio de 1 hora (superior) y de 8 horas (inferior) reportadas por las diferentes redes de monitoreo en la región de la Megalópolis durante 2020. Los valores límite de la NOM-020-SSA1-2021 se indican con la línea roja discontinua (Fuente: elaborada con los datos del INECC empleados en el Informe Nacional de Calidad del Aire 2020).



**Figura 3.** Comparación de las concentraciones máximas de PM<sub>10</sub> para el promedio de 24 horas (superior) y anual (inferior) reportadas por las diferentes redes de monitoreo en la región de la Megalópolis durante 2020. Los valores límite de la NOM-025-SSA1-2021 se indican con la línea roja discontinua (Fuente: elaborada con los datos del INECC empleados en el Informe Nacional de Calidad del Aire 2020).



**Figura 4.** Comparación de las concentraciones máximas de PM<sub>2.5</sub> para el promedio de 24 horas (superior) y anual (inferior) reportadas por las diferentes redes de monitoreo en la región de la Megalópolis durante 2020. Los valores límite de la NOM-025-SSA1-2021 se indican con la línea roja discontinua (Fuente: elaborada con los datos del INECC empleados en el Informe Nacional de Calidad del Aire 2020).

En los últimos años, se han registrado episodios con altas concentraciones de O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> en la ZMVM y en otras entidades de la Megalópolis, asociados a eventos meteorológicos desfavorables para la dispersión de la contaminación. Además, los incendios forestales regionales intensificados durante los períodos de sequías cada vez más frecuentes e intensas han inducido episodios severos de contaminación por partículas. Las medidas de confinamiento promulgadas en respuesta a la pandemia de COVID-19 demostraron que, incluso las reducciones drásticas en las actividades económicas y el tráfico vehicular tienen impactos relativamente menores en la disminución de los niveles de O<sub>3</sub> en la Megalópolis. Esta experiencia tiene profundas implicaciones para la gestión de la calidad del aire, ya que las políticas básicas de control tienen como objetivo reducir las emisiones del tráfico y la industria para proteger la salud pública y el medio ambiente.

A fin de guiar el diseño de nuevas políticas de mejora de la calidad del aire en la región de la Megalópolis, se requiere de información científica actualizada y generada localmente sobre los cambios en los perfiles de emisión resultantes de las nuevas medidas regulatorias y las mejoras tecnológicas, los cambios en la climatología urbana provocados por la creciente urbanización y las alteraciones en los procesos físicos y químicos atmosféricos bajo un clima cambiante.

Para lograr este objetivo, el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2) elaboró el presente documento. El texto incluye un diagnóstico del conocimiento técnico y científico actual sobre las fuentes emergentes de emisiones, el monitoreo y las mediciones de la calidad del aire en la Megalópolis, los cambios en la química atmosférica a lo largo de los años,

los impactos de los contaminantes en la salud pública y el cambio climático, y los impactos de la pandemia de COVID-19 en la calidad del aire.

El documento se basa en los resultados de la revisión y análisis de artículos científicos publicados recientemente y de informes técnicos relevantes, además integra los hallazgos clave del “Taller virtual: Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis” (en adelante, “el Taller virtual”), que se realizó los días 21 y 22 de abril de 2022.

El Taller virtual fue organizado conjuntamente por el MCE2 y la Coordinación Ejecutiva de la CAME, con la colaboración de la SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México), la SMAGEM (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México), la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), el INECC, y el ICAYCC-UNAM (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México).

El objetivo del Taller virtual fue identificar los avances recientes y las brechas en el conocimiento científico y técnico sobre la calidad del aire, y los desafíos que enfrentan los tomadores de decisiones en la implementación de políticas en esta materia. Los participantes del Taller virtual fueron especialistas en temas de contaminación atmosférica que participan en instancias académicas, gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil, que presentaron y debatieron los resultados de sus estudios científicos y técnicos, así como autoridades de los organismos federales y locales, que compartieron sus conocimientos y las barreras en la aplicación de las políticas de mejora de la calidad del aire. La agenda, la lista de panelistas y el resumen de las presentaciones y discusiones se incluyen como apéndice en este documento.

## **1.2. El papel de la ciencia en la gestión de la calidad del aire**

La investigación científica ha desempeñado un papel importante para ayudar a las autoridades ambientales de la ZMVM a caracterizar las fuentes de emisión de especies contaminantes, su transporte y transformación en la atmósfera, sus efectos sobre la salud humana y en el medio ambiente, y la identificación de estrategias eficaces de reducción de emisiones.

Como se muestra en la Figura 5, la gestión de calidad del aire es un proceso iterativo y dinámico que se puede representar como un ciclo de elementos interrelacionados. Por lo general, el proceso inicia con una institución gubernamental que establece objetivos, metas y estándares de calidad del aire, y fija concentraciones umbral para contaminantes clave que protegerán la salud pública y el medio ambiente. Los administradores de la calidad del aire, mediante la aplicación de diversas herramientas de evaluación entre los que se incluyen los inventarios de emisiones, el monitoreo de la calidad del aire y la modelación, deberán estimar las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con los estándares y objetivos. Durante el desarrollo de las estrategias de control, los administradores de la calidad del aire deben incluir el presupuesto requerido, los mecanismos de implementación, las agencias responsables de las acciones, y un cronograma con los planes de cumplimiento e implementación. Para alcanzar las metas de reducción requeridas, deben implementar los programas propuestos, hacer cumplir las reglas y regulaciones, mantener una

evaluación continua de la efectividad de las estrategias y medir el progreso hacia el cumplimiento de los objetivos de calidad del aire. Un elemento clave en este proceso es la contribución de la ciencia y la tecnología en todo el ciclo a través del monitoreo, análisis, investigación y desarrollo, para proporcionar a los administradores de calidad del aire los conocimientos fundamentales para tomar decisiones informadas.



**Figura 5.** El proceso de la gestión de la calidad del aire (Adaptado de NRC, 2004 y Bachman, 2007).

Estudios científicos como la evaluación integral de la calidad del aire en la Ciudad de México realizado en 2000 (Programa Estratégico de Gestión Integral de la Calidad del Aire en el Valle de México para el período 2001-2010), y las campañas intensivas de mediciones de campo, MARI (*Mexico City Air Quality Research Initiative*) en 1994, IMADA-AVER (*Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico-Aerosol and Visibility Research*) en 1997, las campañas MCMA-2002 y MCMA-2003, y MILAGRO (*Megacity Initiative: Local and Global Research Observations*) en 2006, proporcionaron información exhaustiva sobre las emisiones, el



transporte y la transformación de contaminantes en la atmósfera suprayacente de la ZMVM, así como de sus impactos a escala regional. Sus resultados mejoraron significativamente la comprensión de los procesos meteorológicos y fotoquímicos que contribuyen a la formación de O<sub>3</sub>, aerosoles secundarios y otros contaminantes. Los hallazgos científicos clave y las implicaciones políticas se incorporaron en el diseño de los programas integrales de mejora de la calidad del aire previos. Salvo algunos estudios especiales realizados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT), el INECC, el MCE2, universidades e investigadores independientes, desde la campaña MILAGRO se han realizado relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM y en otras regiones de la Megalópolis.

Este documento describe la comprensión científica actual de la calidad del aire y de la gestión en la ZMVM y otras regiones de la Megalópolis. El Capítulo 2 proporciona una descripción detallada del estado actual del conocimiento sobre el monitoreo de la calidad del aire, mientras que la caracterización de las emisiones, la investigación científica atmosférica y los estudios de impacto en la salud se presentan en los Capítulos 3, 4 y 5, respectivamente. El Capítulo 6 describe algunos de los principales programas de gestión de la calidad implementados en la ZMVM y la región de Megalópolis. El documento concluye resumiendo los desafíos y lecciones aprendidas en la implementación de políticas de control de emisiones en la región de la Megalópolis (Capítulo 7), con base en la información más reciente disponible.

## **2. HALLAZGOS CLAVE**

### **2.1. Monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis**

Las entidades que integran la Megalópolis cuentan con sistemas de monitoreo de la calidad del aire equipados con instrumentos para la medición continua de los contaminantes criterio. Entre ellos se encuentra el SIMAT, que concentra la mayor infraestructura y capacidad técnica con una cobertura espacial adecuada para la Ciudad de México y parte del área conurbada, y está diseñado para servir a diversos objetivos de monitoreo. La calidad de los datos que genera cumple con estándares técnicos para atender las necesidades de gestión ambiental, así como para la investigación científica. El resto de las entidades de la Megalópolis cuenta con sistemas de monitoreo, la mayoría de sus estaciones de monitoreo están ubicadas en las ciudades capitales y algunos asentamientos urbanos principales. Gran parte del territorio de las entidades y las extensiones interurbanas no dispone de datos sobre la calidad del aire. En la mayoría de los casos, la operación está bajo la responsabilidad de las autoridades estatales y se cuenta con poca participación de las autoridades municipales.

La experiencia muestra que existe una correlación entre la edad y la complejidad de los sistemas de monitoreo, donde los sistemas más antiguos tienen un mayor número de estaciones, más y mejores equipos, y personal experimentado, como es el caso de los sistemas en las áreas metropolitanas de Toluca y Puebla. Los sistemas más recientes, como los existentes en Morelos y Tlaxcala, aún están en proceso de consolidación. También existe una relación entre la calidad de los datos, el nivel de madurez y las capacidades de la red. Desafortunadamente, a excepción de los datos generados por el SIMAT, existen dudas sobre la calidad de los datos que generan los otros sistemas, lo que pone en cuestionamiento su propósito. La falta de un presupuesto adecuado para

las actividades de operación y mantenimiento, las limitaciones en la renovación de equipos, la falta de personal capacitado, y la disparidad en la calidad de los datos son aspectos importantes que requieren atención inmediata. En los últimos años, la CAME promovió la adquisición de nueva instrumentación para el refuerzo de las redes locales. En materia de monitoreo de la calidad del aire, el INECC cuenta con la infraestructura y conocimiento para realizar capacitación, auditorías técnicas y la transferencia de estándares, además de realizar proyectos de investigación en varios tópicos ambientales. La experiencia y capacidad del INECC podría ser utilizada para subsanar las limitaciones identificadas.

La difusión de los datos sobre el estado de la calidad del aire se realiza a través de los medios de comunicación oficiales como los sitios web de las autoridades ambientales locales, el Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA), aplicaciones móviles y, en algunos casos, mediante las redes sociales. El uso del Índice Aire y Salud integra los reportes de las diferentes entidades, sin embargo, es imprescindible avanzar en la armonización de los criterios de revisión y validación de los datos, así como su publicación oportuna.

## **2.2. Inventario de emisiones**

Desde principios de la década de 1990, la SEDEMA publica cada dos años el Inventario de Emisiones para la Zona Metropolitana del Valle de México (IE-ZMVM), el cual abarca cuatro categorías generales: fuentes puntuales (industria), fuentes de área (servicios y residenciales), fuentes móviles (transporte) y fuentes naturales (vegetación y suelo). La versión más reciente del IE-ZMVM está disponible para el año base 2018 (el inventario de emisiones 2020 se encuentra en elaboración y será publicado durante el segundo semestre de 2023), que también incluye emisiones de contaminantes tóxicos, carbono negro (CN), y los gases de efecto invernadero (GEI), así como la variabilidad diurna y espacial de las emisiones. Las estimaciones de este inventario se utilizaron para diseñar las estrategias de reducción de emisiones y la priorización de las medidas y acciones del ProAire 2021-2030.

A nivel federal, la Dirección General de Industria, Energías Limpias y Gestión de la Calidad del Aire (DGIELGCA) de la SEMARNAT es responsable de elaborar el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), cuya versión más reciente es del año 2016. En la elaboración del INEM, colabora con otras dependencias adscritas al Gobierno Federal y las autoridades ambientales de los estados y municipios, así como con organizaciones académicas y no gubernamentales. Actualmente, la DGIELGCA colabora con la CAME en la elaboración del inventario de fuentes móviles carreteras para la Megalópolis, año base 2018, que incluye la actualización del modelo MOVES-México y la incorporación de las motocicletas; también participan en el inventario de emisiones regional que armoniza los contaminantes criterio por tipo de fuente. Es importante que la experiencia adquirida en la elaboración del inventario de emisiones se transfiera al personal técnico de las entidades. A nivel de la Megalópolis, se identificó la necesidad de contar con factores de emisión actualizados para el parque vehicular que circula en la región, además de aumentar la resolución espacial del inventario de emisiones e incluir fuentes emergentes de contaminación. Actualmente, sólo la ZMVM cuenta con un inventario de emisiones con alta resolución y mantiene un esfuerzo continuo para identificar y cuantificar nuevas fuentes de emisión, considerando el uso de observaciones en la estimación de perfiles de emisión y su



variabilidad temporal. El INEM realiza esfuerzos para la construcción de un inventario actualizado con resoluciones espaciales y temporales en todas las fuentes y listo para modelación.

Además del INEM, el INECC es responsable del desarrollo del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), el cual es una herramienta esencial de gestión ambiental para desarrollar políticas relacionadas con la mitigación del cambio climático y forma parte de los compromisos internacionales que México presentó a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El INEGYCEI se desarrolla siguiendo los criterios establecidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y se actualiza periódicamente para ser presentado en las Comunicaciones Nacionales de México ante la CMNUCC. El inventario contiene las estimaciones de las emisiones y absorciones de gases y compuestos de efecto invernadero derivados de la generación de energía, los procesos industriales, el uso de productos de consumo, la agricultura, la silvicultura y otros usos del suelo, y los residuos. La versión más reciente del INEGYCEI incluye estimaciones de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y CN para el período 1990 a 2019. México fue el primer país en comprometerse a reducir el CN como parte de su compromiso con la Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP21) celebrada en París en diciembre de 2015. Durante la COP 26 en Glasgow, Escocia, en noviembre de 2021, México se unió a más de 100 países para comprometerse a reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> en un 30% para 2030. Los resultados de los estudios de campo realizados en México para caracterizar las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la fermentación entérica del ganado, indicaron que las metodologías del IPCC representan una herramienta imprecisa para estimar los GEI locales; es importante determinar factores de emisión específicos y datos de actividad para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. De manera similar, los estudios de campo mostraron la importancia de obtener los factores de emisión de CN y los contaminantes asociados, en condiciones reales de operación de vehículos dentro y fuera de la carretera, así como de los hornos de ladrillos y estufas, para mejorar las estimaciones de emisiones (ver Capítulo 4, Sección 4.5).

### **2.3. La modelación y el pronóstico de la calidad del aire**

La modelación numérica es una herramienta esencial para apoyar a los tomadores de decisiones en el diseño de políticas de calidad del aire y en la evaluación de medidas de control en escenarios climáticos y de emisiones presentes y futuros, así como en la previsión de la calidad del aire. El pronóstico de la calidad del aire en tiempo real juega un papel muy importante para informar a la población sobre concentraciones potencialmente dañinas de contaminantes como el O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>2</sub>. Esta información permite al gobierno y al público desarrollar medidas de prevención, como restringir la circulación de vehículos con el propósito de limitar las emisiones y minimizar las actividades al aire libre para limitar la exposición a niveles insalubres de contaminación del aire.

Actualmente, el gobierno de la Ciudad de México ha implementado un sistema de pronóstico de calidad del aire para alertar al público sobre la posible presencia de altos niveles de contaminación por O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> con 24 horas de anticipación, y para la evaluación de políticas de reducción de

emisiones para mejorar la calidad del aire y otros beneficios colaterales. El sistema tiene un buen desempeño en el pronóstico de las concentraciones máximas de O<sub>3</sub>, sin embargo, tiene dificultades para pronosticar los eventos de muy alta contaminación que suelen activar las contingencias ambientales atmosféricas en la ZMVM, y tiene un menor desempeño para el pronóstico de las PM<sub>2.5</sub>. El ICAyCC-UNAM cuenta con un modelo de pronóstico de 72 horas para contaminantes criterio que cubre las ciudades de Toluca, Cuernavaca, Tlaxcala, Puebla y Ciudad de México. Similar al desempeño del sistema de pronóstico de la SEDEMA, el modelo del ICAyCC-UNAM subestima las concentraciones durante los eventos de alta contaminación por O<sub>3</sub>.

A nivel de la Megalópolis, aún existen desafíos sustanciales para la implementación de un sistema de pronóstico debido a la necesidad de mejores datos, tanto del monitoreo como del inventario de emisiones, e infraestructura y personal técnico calificado. Con la colaboración del ICAyCC-UNAM, la CAME pretende desarrollar e implementar un sistema de modelación y pronóstico, iniciando con un curso-taller de pronóstico de la calidad del aire dirigido a las entidades de la Megalópolis.

## **2.4. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis**

El estudio de los procesos atmosféricos constituye una actividad fundamental para comprender las fuentes, las transformaciones e impactos de la contaminación y evaluar las mejores opciones de mitigación. En la ZMVM se estudiaron con gran detalle los procesos físicos y químicos que controlan la emisión, transformación y transporte de los contaminantes atmosféricos durante los estudios de campo intensivos colaborativos MCMA-2002/2003 y MILAGRO-2006. Desde entonces, se han efectuado relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM, mientras que en otras regiones de la Megalópolis la investigación es casi nula. La mayoría de estos estudios han sido realizados por el SIMAT, universidades, el MCE2, el INECC e investigadores independientes, incluyendo la caracterización de los compuestos orgánicos volátiles (COV), la producción de O<sub>3</sub>, el SO<sub>2</sub>, los compuestos reactivos de nitrógeno atmosférico, la composición de los aerosoles y sus propiedades ópticas, los bioaerosoles, los metales tóxicos, los forzadores climáticos de vida corta (CN y CH<sub>4</sub>), la exposición personal, la epidemiología ambiental y toxicología, así como la meteorología urbana.

Una revisión de la investigación científica atmosférica, que se describe con mayor detalle en los Capítulos 2 y 4, muestra que no se han logrado progresos sustanciales en el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMVM en la última década. Las tendencias de la concentración de O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> se han estancado, y la evidencia reciente sugiere que la producción de contaminantes secundarios ha aumentado junto con la expansión urbana, una creciente flota vehicular y la mayor relevancia de fuentes emergentes de COV. Ante la emisión continua de grandes cantidades de contaminantes, el clima cambiante puede desencadenar eventos graves de contaminación. Los serios episodios de contaminación del aire por O<sub>3</sub> ocurridos en 2016 se asociaron con eventos meteorológicos regionales, que suprimieron la ventilación de la cuenca de la ciudad y afectaron la evolución de la capa límite planetaria, la recirculación atmosférica y la acumulación de contaminantes emitidos y producidos localmente. Los episodios de partículas ocurridos en mayo de 2019 fueron causados por las emisiones provenientes de incendios forestales dentro y fuera de la Megalópolis, que podrían volverse más intensos y frecuentes debido al cambio climático.

La atmósfera de la ZMVM ha experimentado un calentamiento progresivo en las últimas décadas, posiblemente debido a la interacción sinérgica entre el aumento de la modificación de la cubierta terrestre, los nuevos materiales empleados en la construcción, el calor antropogénico y los cambios de temperatura asociados al cambio climático global. Se ha observado una tendencia creciente similar en la temperatura ambiente de otras entidades de la Megalópolis. También se ha identificado un incremento en la intensidad de la radiación solar ultravioleta (UV) en la ZMVM, lo que podría intensificar la producción de contaminantes secundarios, así como aumentar los riesgos para la salud humana, por ejemplo, cataratas, cáncer de piel. Estos aspectos se describen con mayor detalle en el Capítulo 4, Sección 4.4.

Una consecuencia no esperada relacionada con las restricciones por la pandemia de COVID-19 fue la reducción de las emisiones provenientes de los automóviles, algunos sectores industriales y actividades comerciales, en una escala sin precedentes en México, ofreciendo a los científicos atmosféricos y administradores de la calidad del aire una oportunidad única para estudiar los efectos de las reducciones extraordinarias en las actividades antropogénicas sobre la calidad del aire. La evaluación de los datos de calidad del aire en la ZMVM y de los estudios de modelación durante la pandemia, confirmaron que la aplicación de las restricciones condujo a reducciones en los niveles promedio de CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente, mientras que para el O<sub>3</sub> aumentaron. La experiencia durante las restricciones confirmó el papel de las emisiones vehiculares, principalmente vehículos particulares y las emisiones industriales en el deterioro de la calidad del aire, pero también planteó interrogantes sobre la efectividad de las estrategias de mitigación y el esquema de gestión actual. No es suficiente con controlar las emisiones del tráfico vehicular y de las actividades manufactureras, se debe considerar una regulación integral de los gases precursores provenientes de todas las posibles fuentes de emisión. Urge un análisis más detallado de lo ocurrido durante la pandemia y extraer lecciones que contribuyan a la identificación de nuevas políticas que complementen la propuesta del ProAire 2021-2030 (ver Capítulo 4, Sección 4.7).

El conocimiento científico promueve la gestión efectiva de la calidad del aire a través de la identificación de fuentes prioritarias, la interpretación de los procesos de transporte y transformación de los contaminantes y la guía para el diseño de las acciones de control. Frente a los retos que tiene la Megalópolis para la gestión de la calidad del aire y el limitado avance de la investigación científica, es necesario orientar esfuerzos y destinar recursos para realizar estudios de campo de magnitud y objetivos similares a las grandes campañas de 2003 y 2006, para actualizar el conocimiento científico e impulsar una mejor gestión de la calidad del aire en la región.

## **2.5. Investigación sobre los impactos de la contaminación del aire en la Megalópolis**

La contaminación del aire tiene una diversidad de impactos en la salud humana, que incluye entre otros, la reducción del crecimiento y la función pulmonar, las infecciones respiratorias y el asma agravado en los niños; mientras que la cardiopatía isquémica y el accidente cerebrovascular son las causas más comunes de muerte prematura en adultos. Hay evidencia reciente de otros efectos tales como la diabetes y las afecciones neurodegenerativas. La base de evidencia de los daños

causados por la contaminación del aire en la salud pública está creciendo rápidamente y apunta a daños significativos causados incluso por niveles bajos de muchos contaminantes del aire. Lo anterior ha conducido a estimaciones de riesgo cada vez más grandes asociadas con la contaminación del aire en la Carga Global de Enfermedades, a la publicación en 2021 por parte de la Organización Mundial de la Salud de pautas de calidad del aire más estrictas y a la actualización de las NOM de calidad del aire en México. Esto se vuelve aún más relevante en la región de la Megalópolis porque presenta problemas importantes de contaminación del aire, los cuales se reflejan en el incumplimiento frecuente de las normas, los impactos en la salud, los costos económicos directos e indirectos y el daño a los ecosistemas.

Desde la década de 1980 en México, se han realizado estudios epidemiológicos y toxicológicos especializados para mejorar el conocimiento sobre los impactos de los contaminantes del aire en la salud, y los resultados clave se han incorporado en políticas y programas para el control de la calidad del aire. Por ejemplo, los estudios sobre los efectos nocivos del plomo fueron importantes para cambiar las normas oficiales en las que se eliminaba el plomo de los combustibles. Otros estudios incluyen la relación entre los contaminantes del aire y el asma, las tasas de mortalidad, los efectos cardiovasculares, el desarrollo pulmonar en niños, enfermedades metabólicas, el cáncer y, más recientemente, la relación entre los niveles de contaminación y los impactos en la salud por COVID-19. Además de los impactos en la salud de los contaminantes criterio, en México se han realizado estudios de exposición a partículas ultrafinas y a contaminantes del aire no regulados, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Algunos de estos estudios se describen en los Capítulos 4 y 5.

Además de los impactos en la salud humana, los contaminantes atmosféricos tienen efectos en los cultivos reduciendo su rendimiento y aumentando el riesgo para la seguridad alimentaria. También pueden afectar a los bosques y los ecosistemas al disminuir la calidad y cantidad de los servicios ambientales que proporcionan a la sociedad. La mayoría de los estudios en México se han centrado en comprender los impactos de los contaminantes del aire en la salud pública, no obstante, todavía hay lagunas de información sobre los impactos en los cultivos, los bosques, los ecosistemas, el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada.

## **2.6. Programas de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis**

En México, el Gobierno Federal ha seguido un enfoque de gestión de la calidad del aire a través de los ProAire (Programa Para Mejorar la Calidad del Aire), que responde a la necesidad de cada uno de los 32 estados que conforman el país, de contar con un instrumento de carácter preventivo y/o correctivo en materia de calidad del aire y protección de la salud, así como para cumplir con el marco legal aplicable. A escala de la Megalópolis, en agosto de 2017 se publicó el Programa Federal de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017-2030 (ProAire de la Megalópolis 2017-2030), con el objetivo principal de mejorar la calidad del aire en la región con un enfoque en las fuentes de jurisdicción federal.

En la década de 1990, debido al grave problema de la contaminación del aire en el Distrito Federal (hoy Ciudad de México) y a que su administración era parte del gobierno federal, las actividades iniciales de la gestión de la calidad del aire se centraron en ella y su zona metropolitana. El primer

programa de gestión de la calidad del aire en la ZMVM, PICCA (Programa Integral contra la Contaminación del Aire), fue desarrollado e implementado en 1990, seguido por los ProAire 1995-2000, ProAire 2002-2010, y ProAire 2011-2020. El más reciente ProAire 2021-2030 para la ZMVM se publicó en diciembre de 2021 e incluye medidas de política y acciones destinadas a prevenir, controlar y reducir las emisiones de fuentes prioritarias, al tiempo que aborda temas transversales para fortalecer la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos, la participación ciudadana, los arreglos institucionales, el monitoreo, la coordinación metropolitana y la investigación científica.

Al igual que en muchos grandes centros urbanos de todo el mundo, el sector transporte continúa como una fuente importante de contaminación del aire en la ZMVM y la región de la Megalópolis. La mayoría de los programas de mejora de la calidad del aire tienen como objetivo reducir las emisiones relacionadas con el transporte a través de restricciones de circulación, cambios tecnológicos, planes de movilidad eléctrica (vehículos eléctricos como automóviles, furgonetas, camionetas de carga, autobuses y motocicletas), promoción de la movilidad sostenible (caminar, andar en bicicleta, usar el transporte público y de personal) y el teletrabajo.

Como las medidas específicas para reducir las emisiones de escape han sido exitosas, han cobrado mayor relevancia las relacionadas con el control de las emisiones de los sistemas que no son de escape (uso y desgaste de neumáticos, frenos, motores, evaporación de gasolinas y líquidos refrigerantes, etc.) y que también son fuentes importantes de contaminación. Los vehículos eléctricos son una alternativa para reducir drásticamente la contaminación en un corto plazo, no obstante, existe preocupación por la producción y disposición de las baterías. En la producción de energía eléctrica, será necesario explotar las fuentes renovables para reducir las emisiones a la atmósfera de las centrales eléctricas a base de combustibles fósiles. El uso y la disposición final de baterías de los vehículos eléctricos deberá regularse para evitar la contaminación que pudiera producir su manejo inadecuado.

Para fomentar el uso de vehículos de bajas emisiones, la CAME anunció en 2019 algunos cambios al programa "Hoy No Circula" (HNC) que se aplica en la ZMVM. Todos los vehículos eléctricos e híbridos están exentos de las restricciones de conducción. En la actualización del HNC se consideraron incentivos a los vehículos con menores emisiones de contaminantes criterio y de compuestos y gases de efecto invernadero.

Para proteger al público de la exposición a contaminantes nocivos, en la ZMVM, el PCAA (Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas), en funcionamiento desde 1986, fue reemplazado por el PPRECAA (Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas) en 2019, que actualiza los umbrales de activación para O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub>, además de incorporar criterios para PM<sub>2.5</sub> y contingencias combinadas por O<sub>3</sub> y PM<sub>10</sub> o PM<sub>2.5</sub>. En el resto de las entidades existen también PCAAs, pero con algunas diferencias con respecto al PPRECAA. Actualmente la CAME realiza esfuerzos hacia la armonización de estos programas.

### **3. DESAFÍOS, LECCIONES APRENDIDAS Y RECOMENDACIONES**

A continuación se resumen algunos de los principales desafíos, lecciones aprendidas, brechas de conocimiento y necesidades de investigación con respecto al estado actual del monitoreo, la construcción de inventarios de emisiones, el desarrollo de modelos de pronóstico, la investigación en ciencias atmosféricas y en salud pública en la ZMVM y el resto de la Megalópolis, así como algunas opciones de política pública para mejorar la calidad del aire y proteger a la población de los efectos de la contaminación.

#### **3.1. Monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis**

##### **Retos del monitoreo de la calidad del aire**

El SIMAT ha mantenido una calidad constante en su trabajo durante las últimas dos décadas, lo que permite contar con tendencias confiables sobre la contaminación del aire para evaluar objetivamente la evolución de los impactos del desarrollo urbano y los resultados de la gestión. A pesar de la creciente importancia del SIMAT para la gestión ambiental y la contribución a la protección y mejora de la salud de la gran población de la ZMVM, los recursos humanos y el presupuesto anual asignados para el monitoreo son limitados y podrían afectar el cumplimiento de las necesidades básicas de operación y mantenimiento. Por ello, es necesario explorar mecanismos de cooperación para incrementar la participación técnica y económica entre las entidades que conviven en la ZMVM.

El monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis se ha enfocado principalmente en los centros urbanos. Por lo tanto, hay poca información sobre la representatividad espacial de las redes/estaciones en función de los objetivos del monitoreo y de la situación de la calidad del aire en los asentamientos urbanos periféricos, zonas rurales y las áreas naturales. A pesar de que en la mayoría de las entidades que conforman la Megalópolis se realiza el monitoreo desde hace más de una década, los sistemas de monitoreo presentan diferentes niveles de madurez lo que se refleja directamente en su operación y desempeño, con una disparidad significativa en la calidad de los datos. La mayoría de las redes no cuenta con objetivos del monitoreo y de calidad de los datos, ni planes o protocolos adecuados para el control y aseguramiento de la calidad. Se desconoce la representatividad espacial de las redes/estaciones en función de los objetivos del monitoreo, así como las métricas para la evaluación de la calidad durante el monitoreo y la validación de los datos. Existe poca información sobre el nivel de certidumbre de los datos y el impacto de estas limitaciones en la toma de decisiones y en el cumplimiento de las metas de gestión.

Si bien, este documento no pretende realizar una evaluación del desempeño de las redes de monitoreo, de la revisión de los datos públicos surgieron algunos aspectos que requieren la atención de las autoridades ambientales los cuales se mencionan a continuación:

- La región de la Megalópolis está subrepresentada por el monitoreo atmosférico. Existen importantes brechas en el conocimiento sobre la distribución espacial de los contaminantes del aire, tanto a escala urbana como regional. Existe poca evidencia sobre la situación de la calidad del aire en zonas rurales, áreas de valor ecológico, extensiones agrícolas (importantes para la seguridad alimentaria) y poblaciones pequeñas.

- Existen desafíos para reducir la disparidad en la calidad de los datos entre los diferentes sistemas de monitoreo. En algunos casos los datos tienen incertidumbres difíciles de cuantificar, limitando severamente su uso para la gestión de la calidad del aire y la información pública.
- Algunos sistemas de monitoreo de calidad del aire no realizan una validación adecuada, antes de publicar sus datos en sus repositorios locales o en el SINAICA (Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire). Los datos con deficiencias deben identificarse e invalidarse durante el proceso del monitoreo, antes de su publicación. Por otro lado, la aprobación y publicación de estos datos en el repositorio del SINAICA da una falsa sensación de confianza para aquellas redes de monitoreo que están produciendo datos deficientes.
- La falta de recursos económicos, técnicos o humanos es una constante en todos los sistemas de monitoreo. Esta es una limitación muy importante que debe ser atendida, ya que la gestión de la calidad del aire depende de ellos y también son una herramienta para la protección de la salud pública.
- La mayoría de los sistemas de monitoreo no tienen un programa de gestión de la calidad de los datos adecuado.
- Todos los sistemas de monitoreo reportan concentraciones que exceden los valores límite de las Normas Oficiales Mexicanas, principalmente para ozono (O<sub>3</sub>), partículas menores a 10 µm (PM<sub>10</sub>) y partículas menores a 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>). Las mayores concentraciones de O<sub>3</sub> se observan de marzo a mayo, mientras que las de partículas en suspensión entre noviembre y mayo, durante la estación seca. Entre junio a octubre, durante la temporada de lluvia, los niveles de contaminación disminuyen en toda la región. Es importante tener en cuenta que dos de los días más contaminados en todas las entidades suelen presentarse en Navidad y Año Nuevo debido a la quema de pirotecnia y fogatas.
- La lluvia ácida continua como un problema en el territorio de la Ciudad de México, no obstante, la gestión ambiental ha sido omisa y se desconoce cuál es la situación en las otras entidades de la Megalópolis.

### **Recomendaciones para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis**

Las recomendaciones que se presentan a continuación tienen el propósito de invitar a las autoridades locales y federales a que realicen un diagnóstico sobre cómo están operando las redes de monitoreo y de la calidad de los datos que están colectando. Esto les permitirá tomar las acciones necesarias para mejorar el desempeño del monitoreo atmosférico en la región de la Megalópolis. La lista de recomendaciones expuestas aquí no es exhaustiva, pero sí cubre las mayores deficiencias encontradas en las redes de monitoreo de la calidad del aire durante la elaboración de este documento.

- **Implementar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas.** Realizar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas de las redes de monitoreo con el propósito de identificar sus capacidades y deficiencias en cada etapa del proceso. Estas evaluaciones deben realizarse con personal especializado, preferiblemente por terceros independientes ajenos a los programas de monitoreo. Con base en los resultados, establecer metas y planes de

trabajo realistas para garantizar la mejora continua y permanente de la operación adecuada en el corto plazo.

- **Implementar planes de control de calidad.** Diseñar y establecer planes estandarizados para el aseguramiento y control de la calidad en las diferentes etapas del monitoreo, con el propósito de avanzar hacia la armonización de la calidad de los datos generados en la región. Establecer métricas de calidad para evaluar la calidad del trabajo realizado por las redes de monitoreo.
- **Definir objetivos y métricas de validación.** Definir objetivos, criterios y métricas para la validación de datos; elaborar protocolos o procedimientos de validación de datos tanto del lado del productor de los datos, como del SINAICA. La validación debe ser trazable y auditable.
- **Evaluar la representatividad espacial.** Desarrollar protocolos para la evaluación de la representatividad espacial y a partir de ellos realizar una revisión de la ubicación y de los contaminantes medidos en todas las estaciones de monitoreo en la región. En aquellas donde su ubicación comprometa los objetivos del monitoreo, realizar las acciones necesarias para su reubicación, utilizando procedimientos armonizados basados en evidencia científica (por ejemplo, modelos regionales de calidad del aire).
- **Incorporar mecanismos de financiamiento a largo plazo.** Garantizar la sostenibilidad de las redes de monitoreo con presupuestos apropiados que incluyan participaciones estatales, municipales y federales. Explorar mecanismos de financiamiento, por ejemplo, fondos fiduciarios, así como la participación de recursos privados, como fundaciones, que permitan el funcionamiento de las redes de monitoreo a largo plazo.
- **Establecer el monitoreo en áreas no-urbanas.** Considerar el establecimiento de estaciones de monitoreo para cubrir las brechas espaciales, generar datos sobre niveles de contaminación en áreas rurales y en áreas de interés ecológico. Incorporar criterios de justicia ambiental en la selección de los sitios de monitoreo.
- **Validación retrospectiva de datos.** Con base en los objetivos del monitoreo, realizar un análisis retrospectivo de los datos generados por los diferentes sistemas de monitoreo e identificar con banderas apropiadas aquellos datos de calidad dudosa.
- **Fortalecer la infraestructura de monitoreo.** A través del Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis se destinaron 150 millones de pesos para fortalecer la infraestructura de monitoreo y apuntalar un Sistema Megalopolitano de Monitoreo de la Calidad del Aire. Hasta diciembre de 2022 el programa presentaba un avance físico y financiero del 94%. Si bien, existe la confirmación de la compra de los equipos e infraestructura, aún está pendiente la presentación de la evidencia clara y objetiva de los beneficios alcanzados en el monitoreo, la calidad de los datos, y la difusión de la información por parte de las entidades financiadas.
- **Ampliar las capacidades técnicas.** Desarrollar programas de capacitación continua para incrementar las capacidades técnicas del personal de las redes de monitoreo atmosférico.
- **Incorporar mediciones satelitales.** La creciente disponibilidad de datos satelitales y una nueva generación de monitoreo satelital de la calidad del aire puede proporcionar a los científicos y responsables del diseño de políticas información adicional sobre las



concentraciones de contaminantes criterio, que puede ser valiosa para regiones de la Megalópolis fuera de la cobertura espacial de las redes de monitoreo. Sin embargo, los datos satelitales no reemplazarán el monitoreo en la superficie, sino que son complementarios. Es necesario establecer nuevas estaciones y continuar el monitoreo de la calidad del aire ambiente de manera rutinaria con instrumentos de grado regulatorio en tales áreas.

- **Incorporar monitores de bajo costo calibrados y validados.** Los desarrollos recientes en la tecnología de sensores han mejorado el desempeño de los monitores de bajo costo y permiten que se utilicen en condiciones particulares para complementar los sistemas de monitoreo actuales y crear nuevas aplicaciones para informar mejor sobre el estado de la calidad del aire. Sin embargo, esto solo será posible si se implementa un esquema sólido de calibración de los dispositivos y de validación de datos para reducir las incertidumbres en sus mediciones.
- **Difusión pública de la información.** Es importante mantener la difusión permanente de los resultados del monitoreo a la población a través de medios de comunicación masiva, sitios web, aplicaciones y redes sociales.

### 3.2. Emisiones de contaminantes atmosféricos en la Megalópolis

#### **Retos y recomendaciones para mejorar la estimación de las emisiones**

- **Incorporación de métodos de control de calidad durante la construcción de inventarios de emisiones.** Es importante que los grupos de trabajo responsables del desarrollo de inventarios de emisiones relevantes para la Megalópolis, implementen las metodologías de control de calidad adecuadas durante la preparación de los inventarios de emisiones. La aplicación sistemática del control de calidad durante la elaboración de un inventario es crucial para obtener coherencia, integridad, comparabilidad, representatividad y transparencia de la información obtenida.

La aplicación de controles de calidad permitirá identificar las principales áreas con incertidumbre en el inventario, así como los retos existentes para mejorar las estimaciones en cada versión sucesiva. El control de calidad debe incorporarse con técnicas estadísticamente robustas paralelas a la preparación del inventario y no después. Uno de los principales desafíos para incorporar sistemáticamente los procesos de control de calidad es institucionalizar el apoyo a los grupos de trabajo en términos de asignación de los recursos financieros, de infraestructura y de capacitación necesarios.

- **Evaluación independiente de inventarios.** El INEM, el INEGYCEI y el IE-ZMVM generalmente utilizan una combinación de métodos para estimar las emisiones, que incluyen: (1) muestreo directo de fuentes (principalmente para fuentes industriales); (2) estimaciones indirectas utilizando una combinación de técnicas de balance de masa y modelos, por ejemplo, MOVES-México, el Modelo Mexicano de Biogás, el modelo *Non-Road* para fuentes fuera de carretera, y el Sistema de Modelación de Emisiones y Dispersión (EDMS), etc.; (3) técnicas de extrapolación para la combinación de factores de emisión con datos de actividad; y (4) las directrices del IPCC para estimar las emisiones de los GEI.

La aplicación conjunta de diversos métodos representa un esfuerzo significativo para obtener, procesar y analizar la información necesaria para elaborar los inventarios de emisiones. Sin embargo, es necesario incorporar técnicas para evaluar la incertidumbre y revisiones independientes. Las emisiones estimadas en los inventarios deben basarse en la verificación y análisis independientemente de la fuente de información utilizada. El primer desafío por resolver es la promoción sistemática del trabajo y la colaboración continua con instituciones y agencias federales, estatales y locales que generan y procesan la información de datos de actividad, para garantizar la coherencia entre los datos reportados, las aproximaciones utilizadas y los datos obtenidos en condiciones reales de operación.

La experiencia de las campañas de medición de campo en la ZMVM en 2002, 2003 y 2006 mostró que la información integral obtenida de estudios de campo, actividades de modelación, redes de monitoreo, consultas dirigidas y visitas guiadas, es una herramienta importante que puede utilizarse con éxito para la evaluación y el análisis de las emisiones estimadas en los inventarios locales. Algunas herramientas valiosas para la evaluación independiente de las emisiones utilizan métodos indirectos como la modelación independiente de emisiones en combinación con campañas de medición, así como estudios a largo plazo con la aplicación conjunta de diversas técnicas, incluidos sensores remotos para fuentes móviles e industriales, técnicas de modelación inversa, procesamiento de información satelital, torres de flujo de covarianza de vórtices turbulentos (*eddy covariance*) para fuentes de área, muestreo en túneles y con sistemas portátiles para emisiones vehiculares, etc.

- **Actualización de factores de emisión y datos de actividad.** Debido a los continuos cambios en la tecnología, los requisitos regulatorios de combustibles y los cambios en los procesos, es necesario realizar la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad. Es indispensable que los tomadores de decisiones y las autoridades ambientales de la Megalópolis promuevan estudios de campo y encuestas para actualizar la información utilizada en los inventarios.

Hay fuentes de emisión clave que deben priorizarse para la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad, ejemplos de estas fuentes incluyen: los vehículos de gasolina, los vehículos fuera de carretera, las motocicletas, los vehículos diésel pesados y los empleados en el transporte de pasajeros y carga. Algunas fuentes clave con una alta incertidumbre en sus estimaciones y que deben revisarse continuamente incluyen a las emisiones de resuspensión de polvo en las carreteras, las de los COV provenientes de las pinturas, el manejo de solventes, desinfectantes, limpiadores, impermeabilizantes y desechos infecciosos, así como las emisiones de la cocción en el sector informal y de los servicios.

- **Coordinación entre autoridades ambientales y grupos de trabajo que desarrollan inventarios de emisiones.** Se ha observado que cada entidad que conforma la Megalópolis es tanto emisora como receptora de contaminantes, por lo que es necesario fortalecer la coordinación entre las diferentes entidades para mejorar las estimaciones de emisiones a nivel regional. Además, es imprescindible mejorar la coordinación entre los grupos de trabajo que elaboran los inventarios de emisiones lo que permitirá que la generación, procesamiento y análisis de la información sea eficiente y transparente. Esto contribuirá a mejorar la gestión de la calidad del aire y reducir los niveles de contaminación en la Megalópolis. Es importante comprender la emisión y el transporte regional de

contaminantes para coordinar las medidas de control dentro de la Megalópolis. Muchas de las políticas públicas sólo podrán maximizar su beneficio si existe coordinación entre las dependencias gubernamentales de las diferentes entidades.

- **Aumentar y ampliar las capacidades técnicas.** Como parte de la implementación de un proceso para mejorar la coordinación entre las autoridades ambientales, también es importante aumentar y ampliar las capacidades técnicas para la elaboración de inventarios por parte de los grupos de trabajo de las diferentes entidades de la Megalópolis a nivel federal, estatal y municipal. Se requiere de una mejor coordinación y capacidad técnica para generar (en versiones sucesivas) un inventario regional de emisiones para la Megalópolis que sea integral, robusto, preciso, confiable y que sirva de apoyo en la modelación, el pronóstico y el diseño de programas que permitan mejorar la calidad del aire. Es necesario que sean de acceso público los informes de los inventarios de emisiones, la metodología de cálculo y el manejo de las incertidumbres.
- **Mejorar la estimación de fuentes móviles.** En el caso de las emisiones de vehículos, la mayoría de los inventarios desarrollados actualmente en México, utilizan el modelo MOVES-México, el cual es una adaptación del modelo MOVES (*Motor Vehicle Emissions Simulator*) de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés). El modelo MOVES-México permite estimar las emisiones ajustando los cálculos con bases de datos locales como datos de campañas de monitoreo con sensores remotos, datos de programas de verificación vehicular, pruebas de emisiones en vehículos nuevos y formulación de combustible, además de las condiciones climáticas y características locales y regionales. Sin embargo, un desafío importante en la adaptación es la representación adecuada de las condiciones reales de manejo. Por lo tanto, debido a las particularidades del tránsito que tienen las distintas ciudades deben mejorarse las estimaciones de los factores de emisión y datos de actividad.

La primera versión del MOVES-México fue usada en el país en el año 2016, realizando ajustes al modelo MOVES de Estados Unidos versión 2014a, para la estimación de emisiones de vehículos en carretera. En el año 2022, se actualizó el modelo para México llamándolo MOVES-México 2022, ajustando las bases de datos con información reciente de sensores remotos, programas de verificación vehicular, flota y actividad vehicular. El modelo estará disponible públicamente durante el segundo semestre de 2023.

MOVES-México 2022 se basó en el modelo MOVES de Estados Unidos 2014b, en lugar del MOVES3, que fue publicado por la EPA en 2022 e incluyó el estado de la ciencia sobre las emisiones de fuentes móviles. Sin embargo, las modificaciones de MOVES3 no aplicarían en México, ya que presentan nuevas mediciones de emisiones en Estados Unidos y también ajustes a las emisiones de vehículos fuera de carretera cuyos factores de emisión no han sido evaluados para México.

Como parte de la campaña de forzadores climáticos de vida corta (FCVC o SLCF, por sus siglas en inglés), coordinada por el MCE2 en la Ciudad de México en 2013, se determinaron los componentes de las partículas suspendidas (CN, carbono orgánico y otros componentes inorgánicos de PM<sub>2.5</sub>) y los gases (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y COV) presentes en las emisiones de varios vehículos diésel (autobuses, camiones de carga) con diferentes años modelo y tecnologías de control de emisiones, en condiciones reales de conducción utilizando la técnica de persecución con el Laboratorio Móvil Aerodyne (ver Capítulo 4,

Sección 4.5). La comparación de los resultados con el modelo US-EPA MOVES 2014b mostró desacuerdos para varias especies, demostrando la necesidad de utilizar una base de datos con factores de emisión obtenidos localmente para reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones. Es necesario considerar no solo el ajuste del modelo MOVES-México a las condiciones locales, también la actualización de su versión base para mejorar las estimaciones.

También en 2014, se obtuvieron factores de emisión para gases (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) y partículas suspendidas (el componente CN y la concentración total) para una variedad de vehículos diésel fuera de carretera (equipos de construcción y agrícolas) con y sin filtro de partículas diésel (DPF, por sus siglas en inglés) utilizando la técnica de Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés) en alta resolución temporal. Los resultados mostraron que las reducciones de los factores de emisión de CN fueron significativamente mayores (>99%) con filtros instalados. A diferencia de los vehículos en carretera, aún no existe una regulación para los niveles de emisiones de los vehículos fuera de carretera, pero se encuentra en proceso la elaboración de una NOM. Sus contribuciones relativas aumentan con el tiempo a medida que las emisiones de los vehículos de carretera continúan reduciéndose gracias al uso de mejores tecnologías. Existe una gran necesidad de aumentar la base de datos de factores de emisión para los vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo y de continuar estudiando los beneficios de las tecnologías de control de emisiones de estos vehículos en la Megalópolis.

Además de las emisiones de los sistemas de escape de automóviles, es importante caracterizar las emisiones evaporativas del sistema de combustible y aquellas provenientes del uso y desgaste de neumáticos, frenos y otros sistemas que no son de escape, los cuales incluyen a los metales tóxicos.

Actualmente se encuentra en ejecución el proyecto *Inventario de emisiones contaminantes de fuentes móviles carreteras para la Megalópolis con año base 2018 y la actualización del modelo MOVES México*, por parte de la CAME y SEMARNAT financiado con recursos del Fideicomiso Ambiental (FIDAM-1490). Este proyecto apoyará y brindará capacitación a las siete entidades que conforman la CAME para el desarrollo y actualización de su inventario de emisiones.

- **Mejorar la estimación de las emisiones evaporativas de los combustibles fósiles.** El control de las pérdidas de combustible por evaporación durante los procesos de trasiego y suministro debe basarse en una estrategia integral de regulación, optimización, actualización y mejora en las diferentes fases de la distribución, desde las refinerías, las terminales de almacenamiento y las estaciones de servicio, así como en la aplicación de métodos técnicos para medir las emisiones y evaluar su eficiencia. Es necesario garantizar la reducción de las emisiones durante el almacenamiento, trasiego y expendio mediante el uso de Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV), cuyo funcionamiento debe ser continuo y eficiente de acuerdo con la NOM-004-ASEA-2017. La NOM-006-ASEA-2017 establece las especificaciones, criterios técnicos y requisitos para la seguridad industrial, la seguridad operacional y la protección del medio ambiente que deben realizarse en las instalaciones terrestres de almacenamiento de petróleo y productos petrolíferos. La norma indica que las instalaciones deben controlar los vapores de gasolina durante la carga de camiones cisterna con una eficiencia igual o superior al 95%, pero no establece los métodos de prueba, por lo que no hay evidencia de su funcionamiento ni cuantificación del control

de emisiones. De igual forma, la NOM-005-ASEA-2016 indica que las estaciones de servicio deben contar con dispositivos herméticos para controlar los vapores de gasolina durante la descarga de camiones cisterna. Sin embargo, la norma no establece los parámetros ni métodos de prueba. Actualmente, mediante un proyecto de la CAME se evalúa la cobertura y desempeño de los SRV en gasolineras y propondrá modificaciones a las NOM-005-ASEA-2016 y NOM-006-ASEA-2017.

- **Mejorar las estimaciones de las fuentes industriales.** En las estimaciones se aplican principalmente los factores de emisión de la US EPA, los cuales no necesariamente son aplicables a las condiciones de operación y tecnológicas de los procesos industriales en México. Más aún, cuando no se sigue un control de calidad riguroso los cálculos suelen tener errores, y la gran mayoría de los datos registrados en las Cédulas de Operación Anual (COA) no tienen la representatividad de operación necesaria para los inventarios de emisiones. Los datos son recalculados tomando en cuenta los datos de actividad, información histórica y otras fuentes de información, debido a que los reportes de la industria tienen múltiples errores. Varias entidades no cuentan con los reportes anuales de la industria de jurisdicción estatal o éstas no reportan anualmente o de manera confiable. También hay una gran incertidumbre respecto de las emisiones fugitivas y la eficiencia de operación de los sistemas de control que reporta la industria. Estas limitaciones subrayan la necesidad de reducir la incertidumbre en las estimaciones de fuentes industriales.
- **Mejorar las estimaciones de las fuentes área.** Las fuentes del área son pequeñas pero numerosas y contribuyen significativamente a PM, CO<sub>2</sub>, COV, amoníaco (NH<sub>3</sub>), SO<sub>2</sub> y compuestos tóxicos emitidos por diversas fuentes, incluyendo: almacenamiento, distribución y trasiego de gasolina y gas licuado de petróleo (GLP), uso comercial y doméstico de solventes, productos de consumo, gestión de residuos (rellenos sanitarios, quema de basura a cielo abierto, tratamiento de aguas residuales, aguas residuales no tratadas), actividades agrícolas (quema de cultivos, labranza, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, corrales de engorda de ganado, fermentación entérica, manejo del estiércol), resuspensión de polvo, entre otros. A diferencia de las grandes fuentes estacionarias, las fuentes de área generalmente deben cumplir con límites de emisiones menos estrictos. Muchas de las microindustrias pertenecen al sector de la industria informal que no está regulado eficazmente; son pequeñas y numerosas para ser inventariadas, lo que contribuye a una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de emisiones. Por ejemplo, las fuentes de área contribuyeron al 66% de los COV en la ZMVM en 2018. Existen numerosos talleres pequeños de manufactura, pintura, servicios mecánicos, entre otros, que forman parte del sector informal que en conjunto pueden tener aportes significativos de algunos contaminantes como los COV. A medida que las emisiones de COV urbanos procedentes de fuentes relacionadas con el transporte han disminuido debido a los avances tecnológicos y las medidas reglamentarias, los productos químicos volátiles procedentes de fuentes como el cuidado personal y los productos para el hogar, el recubrimiento de aerosoles, la pintura, el uso de disolventes y los plaguicidas, han ganado importancia, lo que pone de relieve la necesidad de adoptar medidas regulatorias para controlar las fuentes. Como se describe a continuación en categorías específicas (COV, quema de biomasa, gases de efecto invernadero), es importante apoyar las mediciones de campo para estimar los factores de emisión para las fuentes de área, así como los estudios para mejorar la estimación de los datos de actividad.

- **Caracterización de emisiones de COV y compuestos orgánicos tóxicos.** Los COV son de interés en parte porque participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas que contribuyen a la formación de O<sub>3</sub> y tienen un rol en la formación de aerosoles orgánicos secundarios. Además, se sabe que muchos COV individuales son perjudiciales para la salud humana (tóxicos del aire).

El inventario de emisiones de COV tiene una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de las emisiones. Durante 2018, los COV en la ZMVM se emitieron desde una variedad de fuentes, incluidos vehículos motorizados, instalaciones de fabricación de productos químicos, refinerías, fábricas, productos comerciales y de consumo, y fuentes naturales (biogénicas) (principalmente isopreno y monoterpenos de árboles). Alrededor de dos tercios de las emisiones totales (66%) son generadas por fuentes de área, incluido el uso comercial y doméstico de solventes, junto con fugas de GLP (principalmente propano y butano).

El uso comercial y doméstico de disolventes contribuye con aproximadamente el 32% de las emisiones totales de COV. Dentro de esta actividad, ciertos productos tienen un mayor aporte, como productos de cuidado personal, pesticidas y otros productos para consumo doméstico, limpiadores industriales, recubrimientos arquitectónicos y productos para el cuidado automotriz. Con esto en mente, se debe alentar la creación de estándares que limiten el contenido de COV en productos prioritarios, al tiempo que se promueve la adquisición de mercancías con menor contenido de estas sustancias. Los esfuerzos para controlar las emisiones de COV también deben centrarse en abordar las fugas de GLP en hogares, empresas, servicios e industrias, que en conjunto generan el 20% de las emisiones. Se requieren medidas para reducir las fugas, promover el consumo responsable de esta energía y avanzar hacia combustibles más respetuosos con el medio ambiente y tecnologías de energía renovable, como el sistema de calefacción y calentadores solares de agua.

Los contaminantes tóxicos son compuestos que tienen la capacidad de producir directamente efectos adversos sobre la salud de la población o el medio ambiente. La mayoría de estos contaminantes son COV como el tolueno y los xilenos, aunque la clasificación también incluye elementos como el plomo, otros metales pesados, fósforo y sus compuestos.

En la ZMVM, los compuestos orgánicos tóxicos representan el 29% de las emisiones totales de COV y las fuentes de área son la principal fuente de emisión, con una contribución del 69% del total de tóxicos. Las principales actividades emisoras están relacionadas con el uso doméstico y comercial de disolventes, la gestión de residuos urbanos y la distribución de gasolina.

En la actualidad se realizan esfuerzos por mejorar la caracterización de los compuestos orgánicos tóxicos no regulados en la Megalópolis. Un ejemplo de ello es el empleo de técnicas como el termodesorbido de aerosoles – cromatógrafo de gases – espectrómetro de masas (TAG-GC-MS, por sus siglas en inglés) por el Laboratorio de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos del ICAyCC-UNAM. El objetivo es mejorar el entendimiento del origen de los compuestos tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y su relación con fuentes móviles, industriales, solventes, productos del hogar, pinturas, impermeabilizantes, basura y de productos de uso personal, entre otros.

Debido a su relevancia en la química atmosférica y sus efectos tóxicos, es importante mantener y aumentar el apoyo para los estudios dirigidos a la caracterización de las emisiones de COV y de los compuestos orgánicos tóxicos. Además de caracterizar la especiación química de los COV, los estudios deben priorizar un mejor entendimiento de las distribuciones espaciales y temporales de los compuestos orgánicos en la Megalópolis.

- **Emisiones de motocicletas.** Un desafío importante es la regulación del uso y mejoramiento de la estimación de las emisiones provenientes de las motocicletas en la Megalópolis. En los últimos años el crecimiento en el uso de motocicletas en la región ha sido explosivo. Entre otros factores, se debe a la versatilidad de este tipo de unidades para circular en condiciones de alta congestión vehicular (generalmente haciendo caso omiso al reglamento de tránsito), el menor precio de adquisición y la falta de regulación adecuada. La importancia de reglamentar el uso y mantenimiento de las motocicletas, así como mejorar las estimaciones de sus emisiones, radica en el hecho de que en su mayoría circulan con tecnologías emisoras altamente contaminantes y potencialmente pueden impactar negativamente en la calidad del aire. Actualmente no hay regulaciones para las emisiones de motocicletas, pero la SEMARNAT coordina un grupo de trabajo para la preparación de un proyecto de NOM para limitar sus emisiones.
- **Mejorar las estimaciones de los incendios, la quema de biomasa y las tolvánicas.** La quema de biomasa es una de las mayores fuentes de gases traza y aerosoles emitidos a la atmósfera global y es la fuente dominante de CN y aerosoles orgánicos primarios. El humo del fuego también es una fuente importante de gases de efecto invernadero, incluidos el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Otros contaminantes emitidos incluyen CO, compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y no volátiles, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, cianuro de hidrógeno (HCN) y ácido nitroso (HONO). Hay muchas fuentes y tipos de incendios relacionados con las emisiones de quema de biomasa; algunas son fuentes naturales como los incendios forestales no controlados y no planificados, mientras que otras, como las emisiones de la quema de residuos de cultivos, los desechos sólidos municipales, la quema de madera residencial para cocinar y calentar, y el biocombustible para la producción de ladrillos, son el resultado de actividades humanas. Se han utilizado diferentes enfoques para estimar los factores de emisión para la quema de biomasa en la Ciudad de México y la región circundante, incluidas las mediciones directas sobre incendios en experimentos de campo, mediciones de aeronaves y mediciones de laboratorio como parte de las campañas MILAGRO y FCVC. A pesar de los importantes avances en las mediciones de los factores de emisión, la detección y la cuantificación de la quema de biomasa, es necesario mejorar la precisión de las estimaciones de actividad, tanto para la quema a cielo abierto como para el uso de biocombustibles.

La evidencia sugiere que los episodios excepcionales con concentraciones elevadas de contaminación en la región están vinculados a condiciones meteorológicas particulares, junto con la contribución de grandes fuentes de emisión regionales, como la quema de biomasa (agrícola y forestal) y las emisiones de partículas provenientes del suelo descubierto y erosionado. Es importante promover y apoyar estudios de campo, monitoreo, satelitales y modelación para caracterizar mejor las emisiones de estas fuentes y así gestionar los procedimientos a seguir por la población y las autoridades ambientales durante las contingencias ambientales.

- **Mejorar las estimaciones de gases de efecto invernadero.** Las directrices del IPCC se utilizan generalmente para estimar las emisiones de los GEI con técnicas comparables en todos los países, incluido México. Como parte de la campaña FCVC, coordinada por el MCE2, para caracterizar las principales fuentes de CN, CH<sub>4</sub> y contaminantes asociados, los estudios de campo realizados en México para estudiar las emisiones de CH<sub>4</sub> de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la fermentación entérica del ganado, indicaron que las metodologías del IPCC son una herramienta inexacta para estimar los gases de efecto invernadero locales (ver Capítulo 4, Sección 4.5). Es importante determinar factores de emisión específicos a cada fuente emisora localmente para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. Con base en estas mejores estimaciones, se pueden identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

Además, los estudios de campo demostraron la importancia de obtener factores de emisión de CN y contaminantes asociados en condiciones reales de operación provenientes de vehículos en y fuera de carretera, hornos de ladrillos, estufas, para mejorar las estimaciones de emisiones, ya que México fue el primer país comprometido a reducir el CN como parte de su NDC (siglas en inglés para Contribución Nacional Determinada) presentada a la CMNUCC.

- **Incorporación de datos satelitales y de percepción remota para la evaluación de emisiones.** Existen esfuerzos por parte del sector académico en conjunto con autoridades ambientales por incorporar el uso de información satelital como una herramienta de evaluación de los inventarios de emisiones. Un ejemplo de ello es el uso de columnas de NO<sub>2</sub> y formaldehído (HCHO) del instrumento TROPOMI de Sentinel-5P para evaluar cambios en las emisiones en regiones de la Megalópolis. Debido a su gran potencial para evaluar las estimaciones de las emisiones en los inventarios, es importante que se expanda el uso de estas técnicas en México. La incorporación de datos satelitales para la evaluación de emisiones debe también incluir la aplicación de técnicas que caracterizan la estructura vertical, los procesos de mezcla, ventilación y dispersión de la atmósfera tales como mediciones con ceilómetro, radiosondeos, lidars Doppler y ejercicios de modelación. La integración de estas técnicas es necesaria para comprender y predecir la interacción entre las emisiones, la meteorología y los niveles de contaminación de la Megalópolis.

### **3.3. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis**

#### **Fuentes y procesamiento de contaminantes atmosféricos**

##### *Lecciones aprendidas*

- Los estudios MCMA-2003 y MILAGRO sugerían que, durante la primera década de este siglo, en el núcleo urbano de la ZMVM la atmósfera era altamente sensible a los COV, pero en la región periférica podría ser sensible a los COV o NO<sub>x</sub>, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Estudios recientes indican que es probable que exista una variación espacial sustancial en la sensibilidad del O<sub>3</sub> a los COV, incluyendo diferencias importantes en diversas áreas de la Ciudad de México y su periferia.
- Los niveles de contaminantes primarios (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) en la ZMVM son altamente sensibles a los cambios en las emisiones antropogénicas. Esto se demostró durante los



problemas de suministro de combustible en enero de 2019 y en los efectos de la suspensión de actividades y restricciones de movilidad durante la pandemia de COVID-19 después de marzo de 2020.

- La experiencia obtenida de los cambios en las emisiones resultantes de las medidas drásticas emprendidas por los gobiernos durante la pandemia de COVID-19, muestra que la formación de contaminantes secundarios como el O<sub>3</sub> no fue controlada por las reducciones en los contaminantes primarios. Además, eso resalta la importancia de comprender los efectos de la meteorología y las contribuciones episódicas al evaluar la calidad del aire cuando ocurren grandes reducciones de emisiones. Durante la pandemia se modificaron los patrones de actividad y distribución de la flota vehicular, así como la actividad doméstica y de servicios, esto pudo tener impactos en la concentración y variedad de los precursores y, en consecuencia, en la reactividad química de la atmósfera.
- Deben investigarse las relaciones no lineales entre los contaminantes precursores y la formación de compuestos secundarios (incluidos sus efectos sobre las concentraciones máximas) en diversas condiciones meteorológicas, junto con el cambio climático y los factores socioeconómicos que podrían afectar a la calidad del aire en la Megalópolis en el futuro.
- Deben investigarse los efectos en las relaciones de los precursores y las variaciones en la composición química de los perfiles de emisión de COV (tanto los de la combustión de combustibles fósiles, como de los procesos de evaporación) en la formación de contaminantes secundarios, en diversas condiciones meteorológicas en la Megalópolis.
- La producción de aerosoles secundarios responde a cambios en la composición de sus precursores y las condiciones meteorológicas, por lo que se debe investigar su sensibilidad a diferentes compuestos gaseosos en distintos contextos meteorológicos.

### ***Brechas de conocimiento***

- ¿Qué procesos meteorológicos controlan la distribución temporal y espacial de los contaminantes gaseosos y particulados en la atmósfera?
- ¿Cuáles son los factores emergentes (por ejemplo, regulaciones para nuevas emisiones, cambios tecnológicos, comportamiento social) que intervienen en la formación de contaminantes en la Megalópolis y cómo se pueden controlar?
- ¿Ha cambiado la producción de O<sub>3</sub> en la ZMVM? ¿En qué sectores de la ciudad la producción de O<sub>3</sub> es sensible a COV o NO<sub>x</sub>? ¿Hay transiciones estacionales, semanales y diurnas entre los regímenes químicos?
- ¿Cuáles son los perfiles actuales y la distribución espacial de mezclas de COV, de los compuestos orgánicos semivolátiles, y los compuestos orgánicos persistentes en la Megalópolis? ¿Cuáles son las contribuciones de estos compuestos a la formación de O<sub>3</sub> y aerosoles orgánicos secundarios (SOA, por sus siglas en inglés)?
- ¿Cuáles son los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas naturales de la Megalópolis?

- A partir de la experiencia durante la pandemia ¿cómo modifican la reactividad química de la atmósfera los cambios en la flota vehicular y de la actividad doméstica?

### **Impactos del corredor industrial de Tula-Tepeji en la calidad del aire en la ZMVM y la región de la Megalópolis**

- ¿Por qué no ha mejorado la calidad del combustible en el corredor Tula-Tepeji?
- ¿Es posible establecer un sistema de vigilancia para las emisiones provenientes del complejo industrial? ¿Cuáles son las alternativas viables para reducir emisiones de las fuentes prioritarias?
- ¿Cuál es el contenido de compuestos tóxicos presentes en las plumas que transportan contaminantes del aire desde Tula?
- ¿Cómo contribuyen las emisiones a la carga de enfermedad asociada con la contaminación del aire en Tula y sus alrededores, así como en las trayectorias de las plumas?
- ¿Cómo afectan las emisiones del corredor industrial a otras ciudades de la región, por ejemplo, Toluca, Pachuca, Tulancingo, San Juan del Río?
- ¿Hay algún impacto de la deposición ácida atmosférica en áreas agrícolas y suelo de conservación en las entidades de la Megalópolis?
- Además del corredor industrial Tula-Tepeji, ¿existen otras fuentes de contaminación antropogénica con impactos regionales?
- ¿Cómo afectan a los objetivos de gestión las contribuciones regionales de contaminantes antropogénicos en las entidades de la Megalópolis?

### **Investigación científica regional**

- La información disponible del monitoreo indica que algunas ciudades dentro de la Megalópolis tienen niveles de contaminación similares e incluso mayores que los observados en la ZMVM.
- Los programas de gestión de la calidad del aire requieren de un sólido respaldo científico actualizado para el desarrollo y la evaluación de estrategias de control para mejorar la calidad del aire regional.
- Los estudios científicos que permiten entender los procesos de transporte y transformación de los contaminantes son escasos fuera de la ZMVM. Es necesario avanzar en el estudio de los fenómenos meteorológicos asociados al transporte regional de contaminantes, la identificación de fuentes naturales y antropogénicas con impacto regional, los efectos sobre la salud y los ecosistemas, los impactos en las metas locales de gestión y el diseño de estrategias para mitigar las emisiones regionales.
- La información sobre los efectos de la contaminación en la salud humana fuera de la ZMVM es escasa. Es prioritario conocer la situación en las demás entidades de la Megalópolis.
- El monitoreo de la calidad del aire en la región es limitado, es necesario incrementar la cobertura espacial con un enfoque en los contaminantes prioritarios en las diferentes

regiones y mejorar la difusión de la información, con fines de protección de la salud, incluidas las zonas no urbanas y de interés para la protección de cultivos y recursos forestales, modelación o validación de datos satelitales.

- Es necesario promover esfuerzos institucionales, financieros y técnicos para reducir la disparidad en las actividades de monitoreo, inventario de emisiones, modelación, investigación científica y gestión en la región, bajo la coordinación de la CAME.

## **Meteorología local y calidad del aire**

### ***Lecciones aprendidas***

- Es necesario estudiar las características de la capa límite planetaria (o atmosférica) y sus efectos en la contaminación del aire. Los perfiladores meteorológicos (por ejemplo, viento, temperatura, humedad) y de aerosoles han demostrado ser una herramienta robusta para medir e investigar con una resolución temporal alta el comportamiento de diversas variables en la capa límite planetaria. El estudio de las propiedades de la capa límite requiere de múltiples técnicas, combinando la teledetección con observaciones de radiosondeos, donde cada una de ellas proporcionará información diferente sobre los procesos de mezcla, ventilación y dispersión.
- Quedan preguntas abiertas sobre los diferentes procesos en la capa límite que controlan la mezcla y las concentraciones superficiales de contaminantes, así como la interacción de las capas límite entre cuencas vecinas, por lo que se necesitan diferentes instrumentos síncronos en múltiples localidades para comprender mejor su variabilidad temporal y espacial.
- Los estudios presentados en la Sección 4.4.2 del Capítulo 4 describen el conocimiento reciente sobre la capa de mezclado, su variabilidad diaria y estacional, y los usos potenciales del ceilómetro para comprender mejor la relación entre la capa de mezcla y la calidad del aire. Sin embargo, aún quedan por investigar preguntas sobre cómo esta interacción influye en los eventos de contaminación extrema en el contexto de un clima cambiante.
- El posible efecto de la radiación sobre la formación de O<sub>3</sub> es un aspecto relevante para la gestión, se ha observado que con el incremento de la radiación solar aumenta también la producción de O<sub>3</sub>.
- El ProAire 2021-2030 considera una reducción de aerosoles, sin embargo, esto podría inducir un aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub> por el incremento en la radiación solar que alcanza la superficie. Por otra parte, el clima cambiante podría impactar en los procesos de formación de los contaminantes secundarios.

### ***Brechas de conocimiento y necesidades de investigación***

- ¿Cuál es la intensidad del calentamiento urbano en los diferentes conglomerados urbanos de la Megalópolis?
- ¿Cómo afecta el calentamiento urbano a la micrometeorología de las ciudades de la Megalópolis?
- ¿Qué impactos tiene el calentamiento urbano en el clima regional y la química atmosférica?

- ¿Deberían los planes de gestión considerar los efectos del calentamiento urbano en los objetivos de reducción de contaminantes? ¿Deberían incluir acciones para su mitigación?
- ¿Cuáles son los efectos esperados del cambio climático sobre la meteorología y la calidad del aire en regiones urbanas y no urbanas en las entidades que conforman la Megalópolis?
- La evidencia disponible indica con cierto grado de certeza que el incremento de la temperatura traerá cambios en la química de la atmósfera y en la producción de O<sub>3</sub>, sin embargo, existe una gran incertidumbre en la magnitud. El concepto de penalización climática se refiere al posible incremento en la concentración de O<sub>3</sub> en ambientes con altos niveles de sus precursores. En este sentido ¿cómo afectará la penalización climática a los objetivos de reducción de los diferentes planes de gestión? ¿Deberían los planes de gestión incluir la penalización climática?

### **Forzadores climáticos de vida corta**

#### ***Emisiones de carbono negro del sector vehículos diésel en carretera y fuera de carretera***

- Los resultados de los estudios de campo en la ZMVM resaltan la necesidad de utilizar bases de datos de factores de emisión obtenidos localmente para los países en desarrollo, con el propósito de reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones y mejorar la evaluación de la eficacia de las medidas de reducción.
- La estimación de las emisiones de los vehículos fuera de carretera que se usan para la construcción y la agricultura es un desafío, ya que el conjunto de datos de factores de emisión disponibles es considerablemente menor en comparación con los disponibles para vehículos en carretera.
- Debido a su durabilidad, los vehículos fuera de carretera a menudo se mantienen en servicio durante varias décadas y sus contribuciones relativas a las emisiones aumentan con el tiempo, mientras que las emisiones de los vehículos en carretera se reducen por la mayor frecuencia de renovación y las mejoras tecnológicas. Por lo tanto, los vehículos fuera de carretera son potencialmente grandes contribuyentes a las emisiones de CN en muchos centros urbanos, destacando la importancia de diseñar estrategias de control de emisiones y la gran necesidad de incrementar las bases de datos de factores de emisión para vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo.

#### ***Emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales***

- El drenaje y las plantas de tratamiento son fuentes importantes de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.
- Adoptar sistemas de tratamiento con bajo consumo de energía, ya que esto representa más del 60% de las emisiones totales de CH<sub>4</sub>.
- Mejorar el funcionamiento de la sedimentación primaria (purgas frecuentes).
- Se debe dar un tratamiento adecuado de los lodos, preferiblemente uno que considere la producción y el uso de biogás.
- Las metodologías de Tier 1 del IPCC (2006 y 2019) son una herramienta inexacta, ya que subestiman las emisiones.

- Es importante determinar factores de emisión específicos para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. En base a esto, se podrán identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

### ***Emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica del ganado***

- Es necesario continuar con los estudios sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica del ganado bovino bajo diferentes sistemas de producción y de alimentación de México, incluyendo otras especies de rumiantes como ovinos y caprinos.
- Fortalecer los estudios para la determinación de factores de emisión específicos de CH<sub>4</sub> para el manejo de estiércol para México.
- Es necesario diseñar estrategias de mitigación de emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica del ganado bovino aplicables a escala comercial.
- Fortalecer los estudios para la determinación de factores de emisión específicos de N<sub>2</sub>O para México. En este aspecto, el progreso ha sido mínimo.
- Realizar análisis del ciclo de vida de los GEI originarios del sector agrícola.

### **Modelación de la calidad del aire y pronóstico**

#### ***Mejorar el desarrollo y la aplicación de modelos***

- Emplear modelación inversa para complementar la evaluación de los inventarios *bottom-up*, teniendo en cuenta su potencial para mejorar la resolución espacial y temporal del inventario, y para estimar la ubicación e intensidad de las fuentes de emisión conocidas y emergentes.
- Asignar recursos para reducir las incertidumbres en los inventarios, mejorar los perfiles y estimaciones basados en mediciones, y avanzar en el conocimiento sobre la participación de los COV en la producción de aerosoles y contaminantes gaseosos de origen fotoquímico.
- Obtener datos sobre las características de los aerosoles primarios para diferentes ambientes representativos de la Megalópolis. Obtener datos meteorológicos y de calidad del aire fuera de las zonas urbanas.
- Explorar las mejores parametrizaciones del modelo para las diferentes regiones de interés en la Megalópolis, producir u obtener los datos con las resoluciones adecuadas para la entrada y evaluación del modelo.
- Considerar las necesidades de modelación dentro de los proyectos de investigación y las políticas de gestión, aumentar la resolución espacial y temporal de las mediciones de calidad del aire y meteorológicas. Incluir las necesidades de modelación en el diseño de sistemas de monitoreo.
- Fortalecer las capacidades de modelación de la región a través de la construcción de un ensamble de modelos que incluya los modelos actualmente disponibles (SEDEMA, ICAyCC, Querétaro, etc.), así como posibles desarrollos futuros.
- Apoyar los esfuerzos de la Ciudad de México para asegurar la mejora continua de su sistema de pronóstico y garantizar su sostenibilidad.

- Avanzar hacia la asimilación de datos de productos satelitales y de otras redes de observación y perfiladores, que pueden utilizarse tanto para estudios de casos como de pronóstico. Con una capacidad informática adecuada, es posible pasar de modelos de área limitada a modelos globales multiescala y así estudiar la contaminación atmosférica en el contexto del cambio climático.
- Coordinar esfuerzos interinstitucionales en la producción, gestión y tratamiento de datos para generar productos útiles para la gestión de la calidad del aire.
- Aplicar algoritmos de aprendizaje automático para mejorar las parametrizaciones físicas de los modelos, en la estimación de emisiones, en el análisis de imágenes satelitales y salidas de modelos para ajustar los resultados, y con ello obtener mejores predicciones.

### ***Fortalecer los recursos humanos***

- Formar investigadores en el área de asimilación de datos, uso de información satelital, evaluación de modelos, evaluación del uso y aplicación del aprendizaje automático en los procesos realizados por los modelos, así como en la evaluación y post-procesamiento de los productos obtenidos en la modelación.
- Es necesario incrementar el número de personal técnico para el mantenimiento de la infraestructura de supercómputo y uso del software.

### ***Desarrollar infraestructura***

- Centralización de la infraestructura informática y virtualización de la prestación de servicios para dotar a entidades o instituciones de capacidades informáticas, o en su defecto asignar recursos a las entidades de la Megalópolis para la adquisición de la infraestructura.

## **Impacto de COVID-19 en la calidad del aire**

### ***Brechas de conocimiento y necesidades de investigación***

- Se necesitan estimaciones precisas de las emisiones de NO<sub>x</sub> y COV en la ZMVM y las regiones circundantes, para comprender los cambios en la formación de O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y otros contaminantes secundarios durante el período de confinamiento por el COVID-19.
- La experiencia durante la pandemia mostró un nuevo escenario que confirmó la compleja interacción entre las emisiones, la meteorología y la química atmosférica en la atmósfera urbana de la ZMVM.
- Comprender cómo cambió la composición química de los COV durante la pandemia.
- Existe evidencia suficiente de que, durante el confinamiento por COVID, el sector del transporte se vio fuertemente afectado, reduciendo sustancialmente la congestión vehicular, pero al mismo tiempo, incrementando el tránsito de vehículos de reparto de mercancías a domicilio. En términos generales el sector industrial también disminuyó sus actividades, algunas industrias más que otras. Se modificaron las actividades de preparación de alimento en el hogar, en la venta informal y el sector restaurantero. Sin embargo, aumentaron las emisiones de productos para uso personal, productos para el hogar, pinturas, agentes impermeabilizantes, basura doméstica, desechos, desinfectantes,

limpiadores, etc. Es necesario evaluar cómo modificaron sus operaciones los sectores de servicios y comercios.

- Es necesario comprender cómo la contribución de las emisiones domésticas (por ejemplo, productos de limpieza, preparación de alimentos, quema y fugas de GLP y gas natural, etc.) y de fuentes distintas a los automóviles y la industria (por ejemplo, incendios agrícolas y forestales, emisiones biogénicas, emisiones evaporativas de otras fuentes, etc.) contribuyen a la contaminación del aire e influyen en la producción de O<sub>3</sub> y aerosoles secundarios.
- Con base en lo que se observó durante las restricciones de COVID-19 en la ZMVM, los resultados indicaron que las reducciones en las emisiones de los vehículos e industrias provocaron la disminución de las concentraciones de los contaminantes primarios en el aire ambiente, sin embargo, para el O<sub>3</sub> no se observó una reducción en las concentraciones ¿por qué? ¿Cómo podría esto afectar las metas de gestión de la calidad del aire y las acciones que se aplican durante las contingencias ambientales?
- Dadas las reducciones observadas en PM<sub>2.5</sub>, es necesario comprender cómo las disminuciones en las emisiones de precursores modificaron la química de la formación secundaria de aerosoles.
- Transporte regional de contaminantes atmosféricos durante el período de confinamiento:
  - ¿Cómo contribuyeron las fuentes de emisión de los estados cercanos a los niveles de contaminación del aire en la ZMVM?
  - ¿Cómo contribuyeron las emisiones de la ZMVM a los niveles de contaminación en los estados cercanos?
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la reactividad atmosférica, la disponibilidad de los radicales y la formación de contaminantes secundarios, durante el período de confinamiento a través de estudios de modelación para comprender la calidad del aire durante el confinamiento.
- La disponibilidad de la especiación integral de los COV durante el confinamiento por COVID-19 permitirá evaluar los cambios en la reactividad de OH-COV.
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la meteorología local y regional, y los diferentes escenarios durante el confinamiento para identificar cualquier mejora potencial en la ventilación (es decir, condiciones de viento) o condición favorable para la fotoquímica (es decir, radiación solar más intensa).
  - ¿Cuáles fueron las condiciones meteorológicas que contribuyeron a la alta producción/acumulación de O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> durante los días de alta contaminación?
  - ¿Qué patrones de viento regionales y locales ayudaron a dispersar los contaminantes durante el confinamiento?

### 3.4. Estudios de salud pública y contaminación atmosférica en la Megalópolis

#### Lecciones aprendidas

- ***Incorporación de resultados de estudios en salud en programas del control de la contaminación del aire.*** Los resultados de estudios recientes muestran evidencia de las correlaciones entre diversos tipos de morbilidad y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, principalmente para PM<sub>2.5</sub>. La investigación de los impactos en la salud incluye: efectos a nivel celular y ácido desoxirribonucleico (ADN), enfermedades pulmonares crónicas, diferentes tipos de cáncer, enfermedades metabólicas, efectos neurológicos, funciones de concentración-respuesta, y el valor estadístico de la vida. Existe un rango amplio de estudios que proveen evidencia de los impactos en salud por contaminantes atmosféricos. Sin embargo, es importante que estos resultados puedan incorporarse como soporte del diseño de normatividad y programas para reducir la contaminación atmosférica. Para ello, la comunidad científica en México debe abordar el tema de la representatividad y robustez de los resultados, para que puedan aportar al establecimiento de una base científica para el diseño de estrategias de control de la contaminación. Más aun, se deben crear mecanismos para reducir las brechas para una integración eficiente de los resultados de los estudios en salud en el diseño de políticas públicas, incluyendo las actividades para la prevención, y la disminución de la exposición a contaminantes dañinos a la salud.
- ***Divulgación de información para disminuir la exposición.*** Otro avance substancial ha sido la divulgación en tiempo real sobre las condiciones de la calidad del aire y sus posibles impactos en la salud en la población de la Megalópolis, con base en la información proveniente de las redes de monitoreo atmosférico disponibles. La divulgación continua de la información a través de aplicaciones, reportes públicos, medios informativos y de las redes sociales ayuda a la población a tomar decisiones informadas para la realización de sus actividades en espacios interiores y exteriores que permitan disminuir la exposición a contaminantes del aire, mejorando con ello la salud y la calidad de vida de las personas. Estas acciones han sido claves antes, durante y después de la declaración de las contingencias ambientales de O<sub>3</sub> y de partículas suspendidas en los programas de contingencias ambientales para alertar e informar a la población. Las actividades de divulgación de la información forman parte de las acciones listadas en los ProAire para la Megalópolis.
- ***La evidencia epidemiológica señala que no existe un umbral de exposición segura a material particulado y contaminantes gaseosos.*** De acuerdo con los resultados presentados, existe evidencia que sugiere que los efectos en la salud por la contaminación atmosférica no están relacionados a límites específicos. La mezcla de contaminantes atmosféricos en las diferentes zonas urbanas de la Megalópolis puede ser compleja, su caracterización química y los posibles efectos en la salud son retos importantes. Esto sugiere que la exposición a concentraciones de material particulado, incluso por debajo de las guías de calidad del aire de la OMS puede ser peligrosa para la salud de la población.

#### Preguntas científicas clave

- ***Representatividad de los estudios de morbilidad.*** Una pregunta clave tiene que ver con la necesidad de entender mejor la representatividad de los resultados obtenidos en los estudios



de morbilidad, tales como enfermedades metabólicas, diabetes, y efectos en el desarrollo neurológico, entre otras. Es importante saber si los resultados obtenidos en los estudios de morbilidad son lo suficientemente robustos para sustentar el desarrollo de nuevas iniciativas para políticas públicas y nuevas regulaciones.

- ***La integración de los resultados de estudios de salud en el diseño de políticas públicas.*** Un tema que debe abordarse entre la comunidad científica y los tomadores de decisiones es el establecimiento de los mecanismos para integrar los resultados de los estudios de salud en la agenda pública. Más allá del establecimiento científico de las relaciones entre efectos en la morbilidad y la exposición a contaminantes atmosféricos, es vital que la información generada asista en el desarrollo de estrategias de mejoramiento de la calidad del aire.
- ***Estudios de salud por exposición a otros contaminantes.*** Tradicionalmente los estudios en salud se han enfocado en contaminantes criterio como el O<sub>3</sub> y el material particulado. Sin embargo, la población en zonas urbanas típicamente se encuentra expuesta a complejas mezclas de gases y partículas. Así, existe la necesidad de expandir los estudios de los efectos en la salud por exposición a las mezclas químicas de COV, HAPs, contaminantes tóxicos, metales, nanopartículas y las complejas combinaciones de compuestos en el material particulado. Estas investigaciones son necesarias no solo para estudios de mortalidad sino también de morbilidad.
- ***Estudios de exposición.*** Es necesario aumentar y mejorar nuestro entendimiento de las características de la exposición a los contaminantes atmosféricos. Esto incluye también mejorar los mecanismos para generar la información necesaria para los estudios de exposición a nivel local y regional. Es importante determinar si los resultados de esos estudios pueden utilizarse para mejorar nuestro entendimiento de la exposición a los contaminantes del aire.
- ***Integración de otras metodologías.*** La mejora de las evaluaciones de exposición implica también reforzar la colaboración entre las agencias que generan la información, así como la integración de otras metodologías de generación de datos tales como información satelital, monitoreo personal, inventarios de emisiones, y de modelación de la calidad del aire. La integración de estas metodologías permitiría mejorar substancialmente la disponibilidad de las bases de datos necesarias para entender la exposición a contaminantes atmosféricos.

### **Retos científicos y necesidades de investigación**

- ***Perfiles toxicológicos.*** Los resultados de los estudios toxicológicos muestran evidencia de causas biológicas y mecanismos que pueden explicar impactos en salud agudos, crónicos, y transgeneracionales. Existe sin embargo el reto de determinar los perfiles toxicológicos del contenido orgánico del material particulado en diferentes partes de la Megalópolis. Es importante conocer las diferencias regionales de los perfiles toxicológicos para correlacionarlos con impactos en salud específicos para grupos poblacionales en la Megalópolis.
- ***Impactos por mezclas de contaminantes atmosféricos y patógenos.*** El estudio de los impactos en salud por mezclas o combinación de contaminantes del aire con patógenos

(p.ej., virus) es todavía un reto importante que debe ser abordado por la comunidad científica. Esto incluye también la necesidad de desarrollar los métodos toxicológicos necesarios a utilizar para abordar el problema. La complejidad de este reto aumenta en la medida que la variabilidad de las distribuciones espaciales de los microorganismos patógenos y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos sea grande dentro de la Megalópolis.

- ***Interacción entre el cambio climático, la calidad del aire y salud.*** Existe una compleja interacción en múltiples escalas entre el cambio climático y la calidad del aire. Sin embargo, es muy clara la conexión entre las fuentes de contaminación del aire local y las emisiones que impulsan el cambio climático. Además de los efectos adversos de los contaminantes antropogénicos en la salud humana, los contaminantes atmosféricos naturales como el polen, los compuestos orgánicos volátiles biogénicos, el humo de los incendios forestales y el polvo arrastrado por el viento pueden verse afectados por el cambio climático y convertirse en un riesgo cada vez mayor para la salud. La modificación del clima también inducirá cambios en los hábitos de la población, por ejemplo, el tiempo que los individuos permanecen en el interior, así como también modificará la disponibilidad y distribución de alérgenos derivados de plantas y hongos, esto tendrá efectos sobre el asma y la rinitis alérgica en niños y adultos, en consecuencia, será necesario abordar los ajustes de políticas y los cambios de estilo de vida necesarios para mitigar estos efectos nocivos.

Al estimar el impacto futuro en la salud, además de la incertidumbre en las concentraciones de O<sub>3</sub> y partículas suspendidas, existen incertidumbres en las estimaciones de riesgo, como la modificación del efecto por la temperatura en las relaciones entre contaminantes y en la respuesta humana, alterando la posible adaptación futura resultante de estos cambios y un potencial nuevo riesgo asociado a la exposición. Es necesario comenzar a evaluar las implicaciones del cambio climático en la salud humana y orientar las políticas hacia la mitigación del cambio climático y la contaminación del aire, potenciando así los beneficios para la salud y optimizando recursos y costos.

- ***Sistema de monitoreo de la salud.*** Una propuesta interesante es la de diseñar e implementar un sistema de monitoreo de la salud en conjunto con las redes de monitoreo ambiental existentes en la Megalópolis. La integración de los sistemas podría ayudar sustancialmente a la identificación temprana de acciones para mitigar la exposición a contaminantes del aire, incluyendo eventos extraordinarios como los presentados durante la pandemia de COVID-19. Más aun, la integración propuesta puede ayudar a mejorar la evaluación de la efectividad de los programas de control de la calidad del aire.
- ***Composición química del material particulado y tóxicos emergentes.*** Las asociaciones entre los impactos en salud y la toxicidad de las diferentes especiaciones químicas en el material particulado deben continuar y aumentarse, sobre todo para los componentes de HAPs, metales, CN y componentes orgánicos. Esto permitirá entender cómo la agregación química y la formación de aerosoles determinan la activación molecular de procesos fisiopatológicos de enfermedades agudas y crónicas. Se requiere también llevar a cabo estudios de partículas tóxicas emergentes como son las partículas ultrafinas, partículas de microplásticos y aquellas que no derivan de combustión como el desgaste de frenos y llantas, identificando sus fuentes de emisión y potencial tóxico.

- ***Métodos de estudios en salud.*** Para ayudar en el desarrollo de políticas para mejorar la calidad del aire, es necesario integrar los resultados de diferentes métodos de estudios epidemiológicos tales como ecológicos, series de casos, estudios cross-seccionales, controles de caso, estudios de cohorte, e intervenciones. Para los estudios en salud se deben integrar también modelos in vitro e in vivo de exposición a tóxicos, técnicas moleculares de alto rendimiento y parámetros de función fisiológica de enfermedades crónicas. Es necesario avanzar en el estudio de los efectos sinérgicos de la mezcla urbana, así como de los efectos de los contaminantes emergentes. Los modelos de exposición empleados en los estudios epidemiológicos se pueden beneficiar del uso de datos obtenidos de plataformas satelitales y de las tecnologías de bajo costo, así como de las salidas de ensambles de modelos numéricos.
- ***Datos sobre contaminantes criterio y de otras especies de interés.*** Se requieren datos de los contaminantes criterio con coberturas y resoluciones espaciales y temporales adecuadas, para los estudios epidemiológicos y de exposición. Es necesario mejorar la calidad de los datos para reducir la incertidumbre en las evaluaciones de los impactos. La evaluación de los efectos de los contaminantes emergentes requerirá de la aplicación de nuevas tecnologías en las redes de monitoreo y de la realización de campañas de campo.

### **Brechas de conocimiento:**

- En el contexto mexicano, ¿existe nueva información científica sobre los efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire? ¿Cuál ha sido la información reciente sobre contaminación del aire y salud?
- ¿Existe evidencia de efectos crónicos y agudos agravados por la exposición a la mala calidad del aire?
- ¿Existe evidencia de efectos sinérgicos relacionados con la exposición a las diversas mezclas de contaminantes encontradas en los distintos ambientes urbanos? ¿Existen datos suficientes para su evaluación?
- ¿Es necesario desarrollar factores de concentración respuesta adecuados para la población mexicana?
- ¿Cuáles son los costos sociales y económicos asociados con la contaminación del aire? ¿Es necesario desarrollar metodologías para apoyar las evaluaciones del costo beneficio en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles han sido los avances para estimar mejor cuantitativamente los efectos de la calidad del aire en la salud?
- ¿Cuál es la contribución de la contaminación del ambiente exterior a la exposición en interiores?
- ¿Cuáles son los umbrales para la exposición a partículas y contaminantes gaseosos? ¿cuáles serían los retos para alcanzarlos?
- ¿Es necesario incluir algún otro contaminante o contaminantes, por ejemplo, partículas ultrafinas, HAPs, dentro de las regulaciones de calidad del aire ambiente?
- ¿Cómo modificará el cambio climático los impactos en la salud?

### **3.5. Gestión de la calidad del aire en la Megalópolis**

#### **Brechas de conocimiento**

- ¿Cómo promover el desarrollo del conocimiento científico y promover la creación de centros de investigación fuera de la Ciudad de México?
- ¿Cómo promueve el gobierno federal el trabajo científico y el desarrollo de capacidades en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Qué datos adicionales se necesitan para diseñar y evaluar las medidas de los ProAires de las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las principales necesidades de investigación en cada uno de los centros urbanos de la Megalópolis?
- La evidencia disponible sugiere que la química y la física de la atmósfera de la ZMVM están cambiando ¿cómo puede el gobierno liderar una nueva campaña integral de monitoreo para la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las lecciones científicas aprendidas para la gestión ambiental de las restricciones durante la pandemia de COVID-19?

#### **Papel de la CAME en la coordinación de la gestión regional de la calidad del aire**

La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) fue creada en 2013 como un órgano de coordinación para la planeación y ejecución de políticas, programas, proyectos y acciones en materia de protección al ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico, en la región que conforma la Megalópolis del centro de México.

La CAME está integrada por siete entidades federativas: la Ciudad de México y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala y también por cuatro Secretarías del gobierno federal: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y la de SALUD. Cuenta con un Órgano de Gobierno, que está integrado por los Titulares de las Secretarías federales, los Gobernadores de los estados y el Jefe de Gobierno. Cuenta también con un Comité Científico Asesor, constituido por 15 científicos, académicos y expertos en materia ambiental, quienes tienen la facultad de asesorar y brindar sus opiniones y recomendaciones sobre las acciones prioritarias de la Comisión.

Para su operación y funcionamiento, la CAME cuenta con una Coordinación Ejecutiva, que convoca a las sesiones del Órgano de Gobierno, propone acciones y da seguimiento a los acuerdos. El Coordinador Ejecutivo articula la actuación de ocho Grupos de Trabajo, integrados por el personal técnico de las Entidades e Instituciones participantes en la CAME.

La CAME cuenta con el Fideicomiso 1490 Para apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis (FIDAM 1490). Éste recibe aportaciones anuales de \$5.00 pesos por cada verificación vehicular realizada en los centros de verificación de las entidades de la

CAMe. El FIDAM 1490 también puede recibir aportaciones de otras fuentes como donaciones, remanentes de economías presupuestarias de sus integrantes, entre otras.

La CAMe podría fortalecerse con acciones como las siguientes:

- Incluir como integrante de la Comisión a la Secretaría de Energía (SENER) y a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (HACIENDA) del gobierno federal, para reforzar la implementación de políticas, programas y acciones ambientales regionales de alto impacto.
- Crear un Consejo Consultivo integrado por representantes de organizaciones ambientales de la sociedad civil, y cámaras y asociaciones empresariales y de servicios del sector ambiental, donde puedan opinar y dar seguimiento a temas de interés común, así como promover el diálogo constructivo entre las autoridades ambientales y la sociedad civil en general.
- Fomentar aportaciones y donaciones al FIDAM 1490 provenientes de otras fuentes, como la verificación vehicular obligatoria de emisiones de vehículos de placa federal que realiza la SICT, aportaciones por las industrias con mayores emisiones de contaminantes, y fortalecer el compromiso de las aportaciones derivadas de la verificación vehicular estatal.
- Avanzar en otros temas ambientales prioritarios en los que la CAMe puede contribuir a armonizar programas y acciones, por ejemplo, en la atención simultánea y armonizada de la calidad del aire y el cambio climático, economía circular, temas de calidad del agua, residuos y movilidad y transporte, así como de conservación de Áreas Naturales Protegidas, entre otros.
- De inicio, tomar como una prioridad apoyar el impulso de las medidas establecidas en los ProAires de las entidades para reducir las emisiones de los contaminantes en las cuencas atmosféricas de la región.
- Impulsar la evaluación basada en evidencia de la efectividad de los programas y proyectos en las decisiones presupuestarias y las políticas públicas, incluyendo la creación de requisitos de desempeño en subvenciones y contratos para garantizar que los programas se ejecutan y cumplen con sus objetivos de manera efectiva.

### **Monitoreo de la calidad del aire**

Si bien la ZMVM tiene una red de monitoreo de la calidad del aire bien desarrollada que comprende gran parte del área urbana, la cobertura espacial del monitoreo de calidad del aire en la creciente zona conurbada de la Ciudad de México y el resto de la Megalópolis es limitada. A nivel de la Megalópolis el monitoreo está restringido a los centros urbanos. Además, existe una disparidad importante en la calidad de los datos.

La CAMe tiene la oportunidad de contribuir con su liderazgo en la gestión para mejorar las condiciones del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis. En la Sección 3.1 anterior se listan una serie de valiosas recomendaciones que deben ser gestionadas por la CAMe y las autoridades ambientales para mejorar la cantidad, cobertura, y calidad de los datos de las redes monitoreo, destacando:

- Desarrollar capacidades estratégicas de la Red Regional de Monitoreo, incluyendo diferentes tipos de sitios (urbanos, periurbanos, rurales).

- Proporcionar apoyo financiero para mejorar la infraestructura y las capacidades técnicas de la red de monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis, incluida la capacitación en el análisis y validación de datos satelitales.

### **Inventarios de emisiones**

Los inventarios de emisiones son una herramienta esencial de gestión de la calidad del aire para evaluar el progreso de las estrategias de control de emisiones y planificar acciones futuras. En el Capítulo 3 se presenta una descripción detallada de los retos y recomendaciones para mejorar los inventarios de emisiones.

El inventario de emisiones de la ZMVM está bien desarrollado y se utiliza para informar las estrategias de reducción de emisiones. En la Sección 3.2 anterior se describieron los retos y las oportunidades que existen para mejorar los inventarios de emisiones en la Megalópolis y que puedan ser verdaderamente útiles en la gestión de la calidad del aire. La CAME puede contribuir decisivamente en la implementación de las recomendaciones listadas en la Sección 3.2 al fungir como líder el proceso de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis. Dentro de las áreas de oportunidad que se pueden destacar se incluyen:

- Verificar los objetivos del inventario y su alineación con las necesidades de la gestión.
- Mejorar la cobertura y resolución espaciales.
- Revisar los perfiles de emisiones y la especiación química.
- Incrementar la resolución temporal.
- Publicar la información de los cálculos e incertidumbres.

En todos los casos es necesario incluir o mejorar la información sobre las fuentes de área relacionadas con el uso de solventes en los sectores residencial, comercial y de servicios. Se requieren estudios específicos para obtener o mejorar los factores de emisión y datos de actividad, así como para las distribuciones temporales y la especiación química.

### **Modelación y pronóstico de la calidad del aire**

El gobierno de la Ciudad de México ha implementado un sistema de pronóstico de calidad del aire para alertar al público sobre la alta contaminación por O<sub>3</sub> y partículas suspendidas con 24 horas de anticipación, y en la evaluación de las políticas de reducción de emisiones para mejorar la calidad del aire y otros beneficios colaterales. Aún persisten desafíos sustanciales en la implementación del sistema de pronóstico de la calidad del aire en el resto de las Megalópolis debido a la falta de datos e investigación para respaldar los esfuerzos de modelación y pronóstico, así como al limitado personal técnico calificado.

Hay esfuerzos de parte de las instituciones académicas para pronosticar la calidad del aire. El ICAyCC-UNAM cuenta con un modelo de pronóstico a 72 horas basado en WRF-CHEM para CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> con una cobertura espacial que comprende a la Ciudad de México y las entidades aledañas, las salidas gráficas se encuentran disponibles para consulta en línea. Existen otros esfuerzos de modelación y pronóstico en el sector académico y otras entidades, pero la información no es pública.

La CAME podría proporcionar los recursos financieros y ser un catalizador para desarrollar un sistema para el modelo y pronóstico de la calidad del aire en las entidades de la Megalópolis, incluyendo la colaboración con expertos nacionales e internacionales para brindar capacitación en modelación y pronóstico de la calidad del aire.

### **Transporte y movilidad: integración transporte-uso del suelo-gestión de la calidad del aire**

La expansión urbana descontrolada y el aumento de la motorización en la Megalópolis son los principales orígenes de la contaminación del aire y de la congestión vial. La creación de un sistema de transporte equilibrado con el medio ambiente requiere de una estrategia transversal que integre al sector transporte, cambios en el uso del suelo, la gestión de la calidad del aire, y que involucre a los diferentes organismos responsables (medio ambiente, transporte, desarrollo urbano, energía y obras públicas) y con participación pública. El objetivo sería una menor dependencia de los vehículos individuales a través de la provisión de un mejor transporte público y de medidas que permitan realizar más desplazamientos a pie o en bicicleta. Algunas de las acciones en que la CAME debe tomar un liderazgo para su implementación incluyen:

- Impulsar la infraestructura para la movilidad activa o no motorizada.
- Desarrollar políticas públicas para la ubicación óptima de infraestructura y equipamiento (ciudades compactas con usos mixtos del suelo).
- Desarrollo de sistemas de transporte masivo inter e intraurbano (carga y pasajeros).
- Orientar el desarrollo urbano de la Megalópolis hacia la contención de su expansión (densificación del territorio).
- Estudios de origen-destino más frecuentes para la planificación de infraestructuras y para mejorar las operaciones.
- Promover la movilidad sostenible (teletrabajo, transporte público de alta capacidad, caminar y andar en bicicleta).
- Establecer incentivos para la introducción de vehículos de baja emisión, como automóviles eléctricos e híbridos, así como motocicletas eléctricas.
- Considerar la limitación del uso de vehículos privados en áreas muy transitadas.

### **Ciencia de la atmósfera**

Las observaciones actuales en la ZMVM y otras entidades de la Megalópolis indican que las concentraciones atmosféricas de contaminantes como el O<sub>3</sub> y las partículas suspendidas no han disminuido a límites aceptables y muestran incrementos en los últimos años, lo que plantea la necesidad de actualizar el estado del conocimiento científico de los procesos que controlan la formación, el transporte y el destino de estos contaminantes. La comprensión sólida de los cambios en la meteorología, en las emisiones y los procesos que controlan la formación de O<sub>3</sub> y otros contaminantes secundarios en la ZMVM y sobre todo en la región de la Megalópolis, es fundamental para el diseño de nuevas acciones políticas. En la Sección 3.3 anterior se describieron los retos y las oportunidades que existen para mejorar nuestro conocimiento de los procesos atmosféricos en la Megalópolis. A continuación, se describen algunas de las necesidades de

investigación que la CAME debe promover para el desarrollo de estrategias de gestión de la calidad del aire.

- ***Se necesitan mediciones atmosféricas extensivas y estudios de modelación*** para definir estrategias óptimas de control de emisiones para cada entidad particular en la Megalópolis, considerando las circunstancias institucionales, técnicas, económicas, sociales y políticas locales.
  - La aplicación y validación de modelos de calidad del aire requiere de datos de emisiones con alta resolución espacial y temporal, así como del conocimiento de la meteorología y la radiación solar. Además de la medición de los contaminantes medidos comúnmente como el O<sub>3</sub>, óxido nítrico (NO), NO<sub>2</sub>, CO y la masa de las partículas suspendidas, se necesitan mediciones de COV individuales y de la composición química de las partículas. Esta información detallada requerirá estudios especiales para comprender mejor las causas de tales emisiones y evaluar el progreso en su reducción.
  - Los responsables de la formulación de políticas deben utilizar esta información para equilibrar los beneficios económicos y sociales de las mejoras sanitarias con los costos del control de emisiones.
- ***Impactos del cambio climático en la calidad del aire y la salud.*** El cambio climático puede afectar la calidad del aire y, a la inversa, la calidad del aire puede afectar el cambio climático. Las emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) y forzadores climáticos de vida corta (CH<sub>4</sub>, CN, O<sub>3</sub>) en el aire, pueden provocar cambios en el clima.
  - Perfeccionar el conocimiento de los impactos del cambio climático en la salud humana y el medio ambiente en la región de la Megalópolis, mejorando la capacidad de los administradores estatales y locales de calidad del aire para considerar el cambio climático en sus decisiones para proteger la calidad del aire y reducir los impactos de un clima cambiante, así como las comunidades para abordar el cambio climático de manera efectiva y sostenible.
  - Integrar la mitigación del cambio climático y los inventarios de emisiones con la gestión de la calidad del aire, como se ha hecho en la Ciudad de México.
  - Cuantificar los beneficios sanitarios y económicos de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos y de gases de efecto invernadero.
  - Proporcionar herramientas y recursos para desarrollar un sistema energético más sostenible.
  - Evaluar cómo las diferentes estrategias de control multi-contaminante/multi-sectorial pueden afectar los gases de efecto invernadero y otras emisiones de contaminantes atmosféricos.
  - Desarrollar información y recursos basados en evidencia para informar al público y a las comunidades para prepararse mejor sobre las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente en las poblaciones más vulnerables.



### **Impactos de la contaminación del aire**

La contaminación del aire afecta negativamente a la salud humana, causa el deterioro de la visibilidad a escala regional y deposición ácida, daña los cultivos y los ecosistemas. La mayoría de los estudios en México se han centrado en comprender los impactos de los contaminantes del aire en la salud humana. Existen lagunas de información sobre los impactos en los cultivos, los bosques, los ecosistemas, el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada. Las políticas y programas para el control de la calidad del aire en la Megalópolis han incorporado algunos de los resultados de los estudios de salud sobre partículas y O<sub>3</sub>. Sin embargo, persisten preguntas y cuestiones clave sobre la relación entre los efectos crónicos y agudos para la salud, que se ven agravados por la exposición a la mala calidad del aire, y la cuantificación de los costos y beneficios para la salud del control de las principales fuentes de emisión. En la Sección 3.4 anterior se describieron con detalle los retos y las oportunidades que existen para mejorar nuestro conocimiento de los impactos en salud y ecosistemas en la Megalópolis por la contaminación atmosférica. A continuación, se describen algunas de las necesidades de investigación que la CAME debe promover para el desarrollo de programas que mejoren la estimación de estos impactos.

- Proporcionar recursos suficientes para la investigación sobre la contaminación del aire y la salud.
- Generar estándares y regulaciones para otros tóxicos ambientales de interés para la región, por ejemplo, benceno, hidrocarburos poliaromáticos, entre otros.
- Realizar más estudios sobre la composición de partículas para estimar sus riesgos en la salud.
- Fortalecer y mejorar los sistemas de vigilancia de la contaminación del aire y de salud.
- Fortalecer los estudios sobre los impactos y beneficios de los programas de gestión de la calidad del aire en la salud.
- Generar conocimiento científico sobre los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas, los bosques, la vegetación, los cultivos.
- Generar evidencia sobre los efectos de la lluvia ácida en los cultivos, cuerpos de agua, el patrimonio cultural, en la infraestructura pública y privada.

### **Comunicación, desarrollo de capacidades y participación de las partes interesadas**

El éxito y la sostenibilidad de las políticas ambientales dependen de altos niveles de conciencia ciudadana y de la participación informada de las partes interesadas. Los cambios permanentes en las actitudes y el comportamiento de la población requieren del desarrollo de una cultura ambiental y mejoras en la educación. Muchas políticas no funcionarán a menos que las partes interesadas se apropien de ellas y compartan la responsabilidad de su implementación. Su participación puede proporcionar apoyo a medidas impopulares pero rentables adoptadas en aras del interés público, especialmente si estas medidas son transparentes para la población. Es esencial, mejorar la capacidad de los recursos humanos necesarios para diagnosticar problemas ambientales, así como para formular, ejecutar y evaluar las políticas y programas destinados a mejorar la calidad del aire.

Personal más capacitado mejorará el desempeño del gobierno, los sectores privado y académico, y las organizaciones no gubernamentales. La CAME debe ser líder en la gestión de la calidad del aire fomentando la implementación de las siguientes recomendaciones:

- Apoyar las actividades educativas en curso de las entidades de la Megalópolis destinadas a la sensibilización ambiental del público en general.
- Asignar recursos financieros para programas de educación ambiental.
- Apoyar la investigación sobre la contaminación del aire en universidades e instituciones gubernamentales para fortalecer la capacidad de gestión ambiental en las agencias gubernamentales federales, estatales y locales, así como en los sectores industrial y académico.
- Desarrollar información y recursos basados en evidencia para mejorar la comunicación con el público y a las comunidades de tal manera que puedan estar mejor preparados para las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente entre las poblaciones más vulnerables.
- Involucrar a las partes interesadas y al público en general en el diseño e implementación de estrategias de reducción de emisiones, incluido el desarrollo de campañas de información sobre los beneficios de reducir las emisiones para la población.
- Involucrar a las comunidades y grupos no gubernamentales en estudios de monitoreo y detección de áreas de alta contaminación mediante el uso de sensores de bajo costo.

#### **4. CONCLUSIONES**

A partir de la década de 1980 se implementaron programas de mejoramiento de la calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales, políticas y económicas, que lograron un progreso significativo en la mejora de la calidad del aire en la ZMVM, como lo demuestra la reducción sustancial en las concentraciones de contaminantes criterio. Sin embargo, las tendencias de la concentración de  $O_3$  y  $PM_{2.5}$  se han estancado, y la evidencia reciente sugiere que la producción de contaminantes secundarios ha aumentado, lo cual indica que aún hay trabajo por hacer antes de que cumpla con los límites legales actuales para la protección de la salud de la población.

La Megalópolis incluye a los centros de población más importantes en las siete entidades del centro del país, donde el fenómeno del crecimiento de población y del espacio urbano no ha sido homogéneo y ha resultado con frecuencia en zonas de menor densidad de población y en la necesidad de trasladarse grandes distancias. Aunque la CAME se estableció para coordinar las políticas y programas regionales, las diferentes jurisdicciones administrativas y legislativas, así como la disparidad en los recursos disponibles mantiene un desafío constante para la gestión. Hay limitaciones severas en el monitoreo de la calidad del aire, desarrollo de inventarios de emisiones, y de estudios de contaminación del aire en los estados, lo que dificulta la evaluación de la calidad del aire y sus impactos en la región. La ZMVM y las otras entidades de la Megalópolis enfrentan desafíos adicionales por el calentamiento urbano y los cambios de temperatura asociados con el cambio climático global, así como el impacto de la pandemia de COVID-19.

Para abordar los múltiples desafíos de la contaminación del aire, el cambio climático y la protección de la salud que enfrenta la Megalópolis, es esencial colaborar con expertos nacionales e internacionales en ciencias atmosféricas, salud pública, ciencias sociales y políticas, y en economía para participar en investigaciones interdisciplinarias que conduzcan, tanto a evaluaciones holísticas de los complejos problemas ambientales como al desarrollo de estrategias prácticas y soluciones rentables para proteger la salud pública y el ecosistema. Además, será necesario desarrollar estrategias para superar las barreras sociales, económicas y políticas características de los problemas megalopolitanos, incluido el compromiso político y el seguimiento, marcos institucionales, políticas e instrumentos con objetivos y prioridades claros, un mayor conocimiento sobre los impactos y las soluciones, acceso a recursos financieros adecuados, monitoreo y evaluación, procesos de gobernanza inclusivos, consulta con las partes interesadas pertinentes y divulgación pública.

Si bien la ciencia adecuada y las tecnologías bien elegidas pueden dirigir el camino hacia medidas regulatorias correctivas, ningún desarrollo científico y tecnológico puede ayudar sin un fuerte compromiso del gobierno. Se necesita liderazgo político para implementar efectivamente acciones megalopolitanas integrales pasando a través de jurisdicciones superpuestas y conflictivas en la Megalópolis en horizontes de corto plazo. Un resultado exitoso sería llegar a estrategias de control armonizadas que sean efectivamente implementadas y adoptadas por la sociedad.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

Con más de veintiún millones de habitantes, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una de las megaciudades más grandes del mundo y el área metropolitana más poblada de América del Norte (United Nations, 2018a; 2018b). La Ciudad de México ha experimentado una transformación masiva en la urbanización y la demografía a lo largo de su historia (Lezama et al., 2002). La población del Valle de México pasó de menos de tres millones de habitantes en 1950 a más de dieciocho millones en el año 2000, abarcando una extensión de ~1500 km<sup>2</sup>; lo que corresponde a un incremento aproximado de seis veces en cincuenta años. La expansión empujó a la zona urbana más allá de la Ciudad de México y hacia el Estado de México, así como a algunas partes del Estado de Hidalgo, formando la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (Molina & Molina, 2002). La tasa de crecimiento de la población de la Ciudad de México se ha estabilizado desde el año 2000, mientras que la población urbana del Estado de México ha aumentado; por lo tanto, más municipios del Estado de México se han agregado a la ZMVM a lo largo de los años. Actualmente, la zona metropolitana cuenta con más de 21.7 millones de habitantes, de los cuales 9.0 millones viven en la Ciudad de México y 12.6 millones en 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo (SEDEMA, 2021a). Las áreas metropolitanas vecinas (Puebla, Tlaxcala, Cuernavaca, Pachuca y Toluca) también han mostrado un crecimiento demográfico creciente. Esta expansión múltiple ha producido un complejo urbano contiguo conocido como la "Megalópolis" de México que incluye la Ciudad de México, los municipios de cinco estados contiguos (México, Puebla, Tlaxcala, Morelos e Hidalgo) además del estado de Querétaro; con una población estimada en aproximadamente treinta y cinco millones (INEGI, 2021).

En la década de 1980, el rápido crecimiento de la población, la expansión urbana incontrolada, el aumento en el consumo de energía y la motorización, se combinaron con una cuenca a gran altitud rodeada de montañas e intensa radiación solar, para causar graves problemas de contaminación del aire para el área metropolitana. La red de monitoreo de la calidad del aire, establecida a mediados de la década de 1980, reveló altas concentraciones de todos los contaminantes criterio,<sup>1</sup> con el ozono (O<sub>3</sub>) alcanzando máximos de hasta 300 ppb durante 40-50 días al año, lo que en ese momento colocó al problema de contaminación del aire de la Ciudad de México entre los peores del mundo (UNEP-WHO, 1992). En respuesta a las crecientes preocupaciones públicas sobre el empeoramiento de la calidad del aire, el gobierno mexicano anunció acciones de reducción de emisiones y fortaleció el marco legal de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) que definió responsabilidades a nivel federal, estatal y local (DOF, 1988). Durante la década de 1990, el gobierno federal estableció varias agencias administrativas para abordar cuestiones ambientales, incluida la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM)

---

<sup>1</sup> Los contaminantes de criterio son contaminantes del aire para los cuales se han establecido límites de concentración aceptables sobre la base de la información disponible sobre los efectos en la salud de cada contaminante (ver la Tabla 1.1).

responsable de coordinar los diversos niveles de gobierno que se ocupan de los problemas ambientales metropolitanos (DOF, 1996). Se creó un Fideicomiso Ambiental para el Valle de México para apoyar proyectos de la CAM mediante la aplicación de un cargo extra a la gasolina vendida en la ZMVM. En 2013, la CAM fue reemplazada por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) (DOF, 2013).

Una de las principales actividades emprendidas por las autoridades ambientales en la ZMVM fue la colaboración con expertos científicos y técnicos nacionales e internacionales, incluida la evaluación integral de la calidad del aire en la ZMVM y campañas intensivas de medición en campo (Molina and Molina, 2002; Molina et al., 2007; Molina et al., 2010). La investigación científica ha desempeñado un papel importante para proporcionar a las autoridades ambientales una comprensión esencial de las fuentes de emisión de especies contaminantes, su transporte y transformación en la atmósfera, sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente, y para la identificación de estrategias eficaces de reducción de emisiones. Los hallazgos clave y las implicaciones políticas de estos estudios colaborativos se han incorporado en el diseño de los programas integrales de mejora de la calidad del aire (ProAire, Programa Para Mejorar la Calidad del Aire).

Después de tres décadas de programas integrales de gestión de la calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales y políticas, la Ciudad de México ha logrado reducir drásticamente los contaminantes del aire y mejorar la salud pública. Las concentraciones atmosféricas de plomo (Pb), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) se redujeron significativamente y están por debajo de los estándares actuales de calidad del aire. Las concentraciones de O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> (partículas con diámetro de 10 micrómetros o menores) y PM<sub>2.5</sub> (partículas con diámetros de 2.5 micrómetros o menores) disminuyeron, pero todavía están en niveles superiores a los respectivos estándares de calidad del aire.

Al igual que en el caso de algunas otras grandes ciudades de todo el mundo, recientemente no se han logrado mejoras sustanciales en la calidad del aire en la ZMVM (Molina, 2021; Molina et al., 2019). Las tendencias de la concentración de O<sub>3</sub> y de partículas finas se han estancado, y los recientes episodios severos de contaminación del aire sugieren que la producción de contaminantes secundarios ha aumentado bajo una mancha urbana en expansión, el aumento de la flota vehicular y el cambio climático. Los peores episodios de contaminación del aire están asociados con eventos meteorológicos regionales que suprimen la ventilación de la cuenca de la ciudad y afectan la evolución de la capa límite planetaria, la recirculación de la atmósfera, y la acumulación de los contaminantes emitidos y producidos localmente. Además, los incendios forestales regionales causados durante períodos de sequías cada vez más frecuentes e intensas inducen episodios severos de contaminación por partículas.

Recientemente, las medidas de confinamiento promulgadas en respuesta a la pandemia de COVID-19 demostraron que, incluso las reducciones drásticas en las actividades económicas y el tráfico vehicular tuvieron impactos relativamente menores en los niveles de O<sub>3</sub>. Esta experiencia tiene profundas implicaciones para la gestión de la calidad del aire, ya que las políticas básicas de control tienen como objetivo reducir las emisiones del tráfico y la industria.

La Ciudad de México cuenta con una sólida red de monitoreo de la calidad del aire y un inventario de emisiones, que se actualiza cada dos años, que proporcionan los datos necesarios para el pronóstico diario de la calidad del aire y apoyar la gestión de la calidad del aire. Sin embargo, la mayoría de las estrategias actuales de mitigación de la contaminación del aire en la ZMVM todavía se basan en los hallazgos científicos de la campaña de campo MILAGRO que tuvo lugar en 2006 (Molina et al., 2010). Para guiar las nuevas políticas de mejora de la calidad del aire en la región de la Megalópolis se necesita información científica actualizada y generada localmente sobre los cambios en los perfiles de emisión resultantes de las nuevas medidas regulatorias y del uso de la tecnología avanzada, los cambios en la micrometeorología urbana provocados por la creciente urbanización, la influencia de la contaminación del aire regional y los cambios en los procesos físicos y químicos atmosféricos.

Para lograr este objetivo, el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2) ha elaborado este documento, que incluye el diagnóstico de los estudios técnicos y científicos actuales sobre las fuentes emergentes de emisiones, el monitoreo y las mediciones de la calidad del aire en la región de la Megalópolis, los cambios en la química atmosférica a lo largo de los años, los impactos de los contaminantes en la salud pública y el cambio climático, y los impactos de la pandemia de COVID-19 en la calidad del aire.

El documento se basa en los resultados de la revisión y análisis de artículos científicos publicados recientemente y de informes técnicos relevantes, además integra los hallazgos clave del "Taller virtual: Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis" (en adelante, "el Taller virtual"), que se realizó los días 21 y 22 de abril de 2022.

El Taller virtual fue organizado conjuntamente por MCE2 y la Coordinación Ejecutiva de la CAME, con la colaboración de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMAGEM), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El objetivo del Taller virtual fue identificar los avances recientes y las brechas en el conocimiento científico y técnico sobre la calidad del aire, y los desafíos que enfrentan los tomadores de decisiones en la implementación de políticas de mejora. Dentro de los participantes del Taller virtual se incluyeron especialistas en temas de contaminación atmosférica que participan en instancias académicas, gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil, que presentaron y discutieron los resultados de sus estudios científicos y técnicos, así como autoridades de las agencias federales y locales, que compartieron sus conocimientos y las barreras en la implementación de políticas de mejora de la calidad del aire. La agenda, la lista de panelistas y el resumen de las presentaciones y discusiones se incluyen como apéndice a este documento.

Las siguientes secciones presentan una visión general de la comprensión actual con respecto a la calidad del aire y la gestión en la ZMVM y otras regiones de la Megalópolis. En el Capítulo 2 se proporcionan descripciones detalladas del estado actual del conocimiento sobre el monitoreo de la calidad del aire, mientras que la caracterización de las emisiones, la investigación científica atmosférica y los estudios de impacto en la salud se presentan en los Capítulos 3, 4 y 5,

respectivamente. El Capítulo 6 describe algunos de los principales programas de gestión de la calidad implementados en la ZMVM y en la región de las Megalópolis. El documento concluye resumiendo los desafíos y lecciones aprendidas en la implementación de políticas de control de emisiones en la región de Megalópolis, con énfasis en la ZMVM, basado en la información más reciente disponible (Capítulo 7).

## **1.2. Instituciones medioambientales en México**

En México, el derecho al aire limpio y a un medio ambiente sano está respaldado por diferentes niveles de la legislación mexicana: a) Constitución: el Artículo 4 reconoce el derecho a un medio ambiente sano; b) la reciente Constitución de la Ciudad de México: el Artículo 16 garantiza el derecho a un medio ambiente sano y exige el desarrollo de políticas públicas para la protección del medio ambiente, incluyendo la atmósfera (CDMX, 2017). La Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México es responsable de los programas ambientales de la ciudad, incluyendo la gestión de la calidad del aire y los planes de acción climática. De igual manera, las secretarías de medio ambiente del Estado de México y del Estado de Hidalgo administran los programas ambientales de sus respectivos estados. El 13 de septiembre de 1996, se firmó el Convenio de Coordinación mediante el cual se creó la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM), como un órgano de coordinación para la planeación y ejecución de acciones relacionadas con el medio ambiente en la zona metropolitana, comprendida por las dieciséis demarcaciones territoriales del Distrito Federal y los dieciocho municipios del Estado de México, conocida como Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (DOF, 1996). Para atender la problemática ambiental en la ZMVM, la CAM se fortaleció con la creación del Fideicomiso Ambiental 1490 para “Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México”, que fue fondeado con recursos provenientes de un sobreprecio en las gasolinas que se vendían en la región.

Ante la expansión de las urbanizaciones en la región central del país y la identificación de la importancia de la interrelación en los problemas ambientales de la región, surgió la CAME para atender de manera coordinada la política ambiental entre los gobiernos Federal, Estatales y de la Ciudad de México. Fue creada en agosto del 2013 como un órgano de coordinación para la planeación y ejecución de políticas, programas, proyectos y acciones en materia de protección al ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico, en la región que conforma la Megalópolis del centro de México. Está integrada por siete entidades federativas: la Ciudad de México y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala, así como por cuatro Secretarías del gobierno federal: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y la de SALUD. Su Órgano de Gobierno está integrado por los Titulares de las Secretarías federales, los Gobernadores de los estados y la Jefatura de Gobierno. Cuenta con el Fideicomiso 1490 (FIDAM 1490) para apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis, el cual es alimentado por \$5.00 pesos de cada verificación vehicular realizada en los centros de verificación de las entidades.

Además de las agencias ambientales locales, a nivel federal, la SEMARNAT es responsable de la protección y administración de los recursos naturales y la aplicación de las leyes ambientales. El

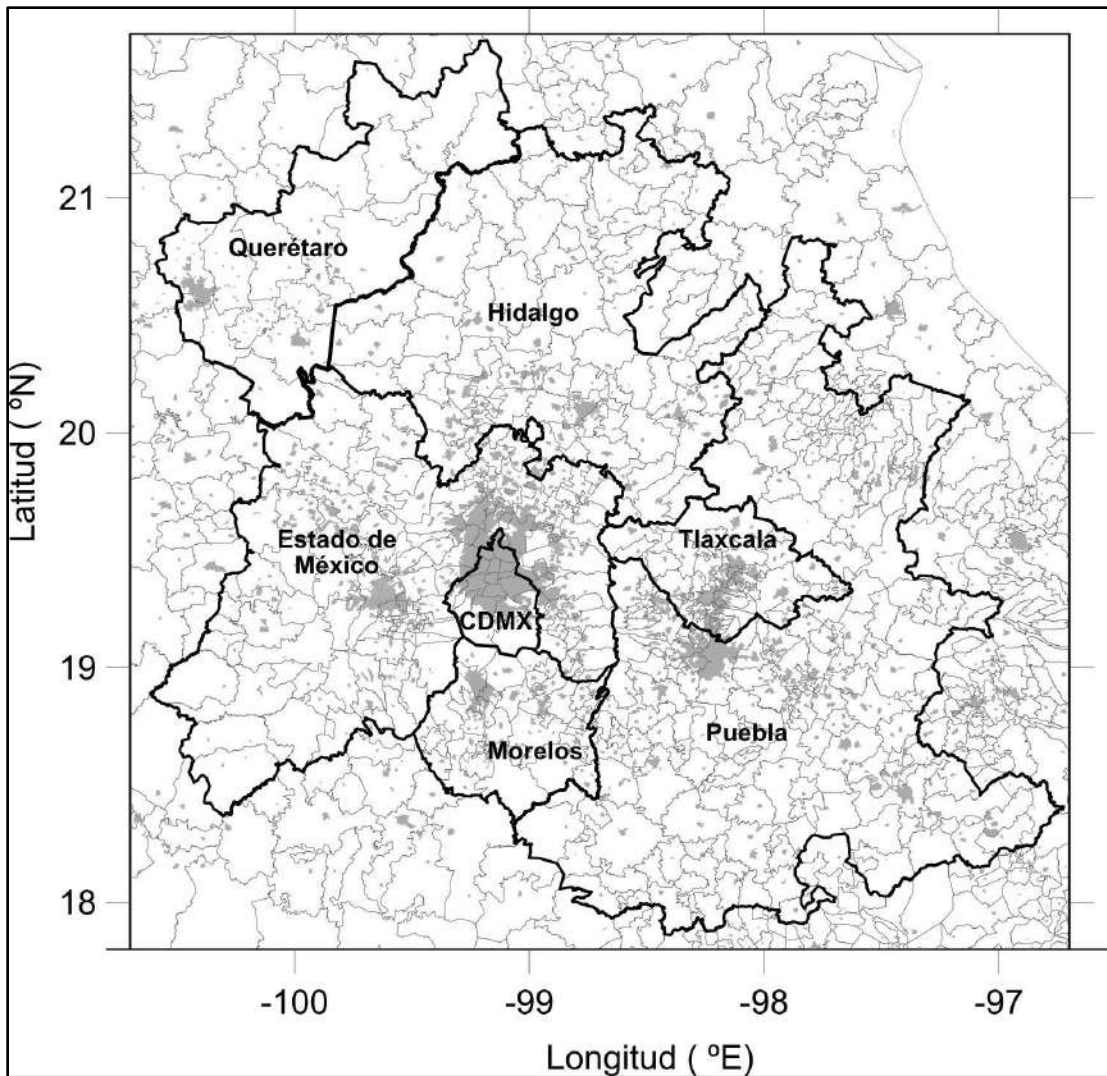
INECC ofrece apoyo técnico a los sistemas de monitoreo locales y administra el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), mientras que la Secretaría de Salud define las Normas Oficiales de Calidad del Aire que regulan los siete contaminantes criterio mediante el establecimiento de concentraciones máximas permisibles. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es responsable de la gestión de riesgos y la prevención de desastres en México para reducir la exposición pública a peligros meteorológicos, hidrológicos, geológicos y químicos como tormentas tropicales, inundaciones, terremotos, erupciones volcánicas y emisiones químicas. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), proporciona pronósticos y avisos sobre las condiciones climáticas, así como información sobre meteorología y climatología para todo el país, para apoyar la toma de decisiones.

### **1.3. Población y desarrollo urbano de la ZMVM y la Megalópolis**

Actualmente, la ZMVM está conformada por 16 alcaldías de la Ciudad de México con 9.04 millones de habitantes que ocupan un área de 1495 km<sup>2</sup>, 12.5 millones de habitantes en los 59 municipios del Estado de México cubriendo un área de 6295 km<sup>2</sup>, y 130,000 habitantes en el municipio de Tizayuca en el Estado de Hidalgo en un área de 76.8 km<sup>2</sup> (SEDEMA, 2021a). La expansión urbana de la ZMVM ha producido la Megalópolis, conformada por siete entidades del centro de México (Ciudad de México y los estados de México, Puebla, Tlaxcala, Morelos, Hidalgo y Querétaro), con una población de aproximadamente treinta y cinco millones (INEGI, 2021).

La Figura 1.1 muestra un mapa de la Megalópolis. La combinación de la continua expansión urbana y el crecimiento de las actividades económicas ha inducido el movimiento diario de un gran número de personas y bienes, así como cambios sustanciales en el uso del suelo en la región, lo que lleva a una mayor demanda de energía.





**Figura 1.1.** Mapa de la Megalópolis, los límites estatales se indican con una línea negra gruesa, mientras que los municipales con líneas más delgadas, las áreas urbanizadas se destacan con un sombreado gris.

#### 1.4. Topografía y meteorología de la ZMVM y la región de la Megalópolis

La topografía y la meteorología de la ZMVM contribuyen sustancialmente al problema de la contaminación del aire. La cuenca en donde se asienta la ZMVM se encuentra a una altitud de 2240 m sobre el nivel medio del mar (msnm) y está rodeada de montañas y volcanes en tres lados, con una abertura en el norte a la meseta mexicana y una brecha montañosa al sureste. Las montañas, junto con las frecuentes inversiones térmicas, atrapan contaminantes dentro de la cuenca. La gran elevación y la intensa radiación solar también contribuyen a los procesos fotoquímicos que impulsan la formación de O<sub>3</sub>. En este entorno geográfico, el área metropolitana con más de 21.7 millones de habitantes, 6.0 millones de vehículos, 1900 industrias reguladas, 2800 comercios y servicios regulados y 63 millones de hogares, consumen gran cantidad de

combustibles fósiles, emitiendo a la atmósfera miles de toneladas de contaminantes, capaces de reaccionar para generar otros contaminantes que pueden ser más peligrosos para la salud pública que los contaminantes originales.

La ZMVM tiene un clima subtropical de tierras altas: una estación seca fría de noviembre a febrero que es seguida por una estación seca cálida hasta mayo y una estación lluviosa de junio a octubre. La cuenca semicerrada, junto con su altitud y latitud, inducen los factores meteorológicos que caracterizan cada una de las estaciones a lo largo del año en la región. La estación cálida y seca se caracteriza por sistemas de alta presión con cielos despejados, alta radiación solar y viento débil la mayor parte del día, promoviendo procesos fotoquímicos que forman O<sub>3</sub> y otros oxidantes, e incrementando las cargas secundarias de aerosoles a través de reacciones químicas, polvo y quema de biomasa; además, el patrón de viento predominante provoca el estancamiento de contaminantes en la zona sur de la cuenca. Los vientos débiles y las fuertes inversiones de temperatura en la noche también conducen a altas concentraciones de contaminantes primarios durante la hora pico que continúan hasta la mañana, seguidas de un crecimiento muy rápido de la capa límite a unos 2 a 4 km en las primeras horas de la tarde (Whiteman et al., 2000). La gran elevación y la circulación cuenca-montaña ventilan la cuenca de manera efectiva; en consecuencia, hay relativamente poca recirculación o arrastre diario de contaminantes dentro de la cuenca (de Foy et al., 2006). La estación seca fría tiene inversiones superficiales más fuertes y mayores concentraciones matutinas de contaminantes primarios. La temporada lluviosa tiene una menor concentración de partículas suspendidas, pero continúa experimentando altas concentraciones de O<sub>3</sub> debido a las intensas reacciones fotoquímicas que ocurren antes de la precipitación en la tarde. Por lo tanto, los episodios con concentraciones elevadas de O<sub>3</sub> en la ZMVM pueden ocurrir durante todo el año (Molina & Molina, 2002). El Capítulo 2 proporciona una descripción más detallada de la meteorología y la dinámica atmosférica en la ZMVM.

## **1.5. Infraestructura y herramientas de gestión de la calidad del aire**

Desde la década de 1990, el gobierno mexicano ha logrado avances significativos en la mejora de la calidad del aire de la ZMVM, esto mediante el desarrollo e implementación de sucesivos ProAire que combinaron acciones regulatorias con cambios tecnológicos, sustentados por la investigación científica. El gobierno ha establecido estándares para la calidad del aire, las emisiones de vehículos y la calidad del combustible, ha desarrollado una red de monitoreo de la calidad del aire, elaborado inventarios de emisiones, invertido en un modelo de pronóstico y apoyado la investigación en ciencias atmosféricas y sobre los efectos en la salud. La información combinada sobre el inventario de emisiones, la cubierta terrestre y morfología urbana, la meteorología y la química atmosférica permite desarrollar modelos de calidad del aire y utilizarlos como herramienta para pronosticar posibles episodios de contaminación atmosférica, así como para evaluar episodios pasados y la eficiencia de las medidas de control.

### **Estándares de calidad del aire**

Las normas o estándares de calidad del aire ambiente definen los niveles de contaminantes que no deben superarse si se quiere proteger la salud pública, proporcionan una herramienta importante de gestión que puede utilizarse progresivamente para mejorar la calidad del aire. Desde 1987, la

Organización Mundial de la Salud (OMS) elabora directrices sobre la calidad del aire destinadas a informar a los encargados de la formulación de políticas y proporcionar objetivos adecuados para reducir los efectos de la contaminación atmosférica en la salud pública. Los estándares se fortalecen con el tiempo a medida que se dispone de más información sobre los efectos de la exposición pública a contaminantes nocivos.

En 1994 el gobierno mexicano estableció los primeros estándares de calidad del aire ambiente (NOM, Normas Oficiales Mexicanas) para O<sub>3</sub>, CO, dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), SO<sub>2</sub>, Pb y PM<sub>10</sub>, para proteger al público de la exposición a un alto nivel de contaminantes nocivos (DOF, 1994a, b, c). Las normas son definidas por la Secretaría de Salud y se revisan periódicamente. La actualización más reciente de las normas fue en 2019 para SO<sub>2</sub> (DOF, 2019) y en 2021 para NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Pb, CO y O<sub>3</sub> (DOF 2021a, b, c, d, e). Los valores límite vigentes de calidad del aire para México se presentan en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Estándares de calidad del aire en México y los valores guía de la Organización Mundial de la Salud.

Contaminante [Documento regulatorio]	México <sup>a</sup>		OMS <sup>b</sup>
	Límite máximo ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Límite máximo (ppm)	Valor guía ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )
<b>O<sub>3</sub></b> [NOM-020-SSA1-2021]	176 (promedio 1-h) 128 (promedio 8-h)	0.090 (promedio 1-h) 0.065 (promedio 8-h)	100 (promedio 8-h) 60 (promedio 8-h) <sup>c</sup>
<b>PM<sub>10</sub></b> [NOM-025-SSA1-2021]	70 (promedio 24-h) 36 (promedio anual)	--	45 (promedio 24-h) 15 (promedio anual)
<b>PM<sub>2.5</sub></b> [NOM-025-SSA1-2021]	41 (promedio 24-h) 10 (promedio anual)	--	15 (promedio 24-h) 5 (promedio anual)
<b>SO<sub>2</sub></b> [NOM-022-SSA1-2019]	196 (1-h mean) 105 (promedio 24-h)	0.075 (promedio 1-h) 0.040 (promedio 24-h)	40 (promedio 24-h)
<b>CO</b> [NOM-021-SSA1-2021]	30 $\text{mg m}^{-3}$ (1-h mean) 10 $\text{mg m}^{-3}$ (promedio 8-h)	26 (promedio 1-h) 9 (promedio 8-h)	4 $\text{mg m}^{-3}$ (promedio 24-h)
<b>Pb</b> [NOM-026-SSA1-2021]	0.5 (promedio anual)	--	--
<b>NO<sub>2</sub></b> [NOM-023-SSA1-2021]	752 (1-h mean) 39 (promedio anual)	0.106 (1-h mean) 0.021 (promedio anual)	25 (promedio 24-h) 10 (promedio anual)

<sup>a</sup> Los estándares de calidad del aire para O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y CO en México se indican en partes por millón (ppm), con propósitos de comparación con los valores guía de la OMS en esta tabla se expresan en  $\mu\text{g m}^{-3}$  a una temperatura de 298 K y una presión barométrica de 1 atm.

<sup>b</sup> Nivel de la Guía de Calidad del Aire de la OMS (WHO, 2021).

<sup>c</sup> Promedio del valor máximo de la media de 8 horas de O<sub>3</sub> para los seis meses consecutivos con el mayor promedio móvil de O<sub>3</sub>.

### **La red de monitoreo de la calidad del aire**

El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) tiene una amplia cobertura geográfica y una buena capacidad de recolección de datos a través de sus cuatro redes

(automática, manual, deposición atmosférica y meteorológica). Es una de las redes de monitoreo más avanzadas de América Latina.

Desde la década de 1960, hubo mediciones limitadas de contaminantes, concretamente SO<sub>2</sub> y partículas suspendidas totales (PST) (Bravo 1960). El gobierno del entonces Distrito Federal comenzó a monitorear la calidad del aire en la década de 1970 con una red manual de 22 estaciones para SO<sub>2</sub> y PST. La red automática de monitoreo de la calidad del aire, establecida a mediados de la década de 1980, reveló altas concentraciones en todos los contaminantes criterio, colocando el problema de contaminación del aire de la Ciudad de México entre los peores del mundo. Después de más de tres décadas de programas integrales de gestión de la calidad del aire, ha logrado avances importantes para reducir la contaminación del aire. Las concentraciones atmosféricas de Pb, SO<sub>2</sub> y CO disminuyeron significativamente y están por debajo de los estándares actuales de calidad del aire. Sin embargo, aunque las concentraciones de O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> también se redujeron sustancialmente, todavía están en niveles por encima de los respectivos estándares. Además, no se observa una tendencia significativa a la baja para O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> desde 2006, y en años recientes se han observado varios episodios de contaminación severa.

Debido al alto costo asociado con la infraestructura para establecer una red de monitoreo de la calidad del aire, las concentraciones de muchos contaminantes criterio no se miden rutinariamente en la región circundante de la ZMVM. La ZMVM tiene una red de monitoreo de la calidad del aire con cuarenta y cuatro estaciones (de las cuales treinta y cuatro miden los contaminantes criterio en forma continua) que abarca la mayor parte del territorio de la Ciudad de México y una fracción de la zona conurbada del Estado de México. Las otras entidades cuentan también con sistemas de monitoreo, pero con diferentes grados de madurez, infraestructura y calidad de los datos. El monitoreo se realiza principalmente en las áreas urbanas y existe poca información sobre la situación en áreas rurales, el suelo de conservación y pequeños centros de población. Un problema común en todos los sistemas de monitoreo es la falta de recursos económicos, técnicos y humanos que provocan deficiencias en las actividades periódicas de operación y mantenimiento. Reconociendo lo anterior, con el propósito de reforzar la infraestructura de los sistemas de monitoreo, contribuir en la mejora de la calidad de los datos y crear un Sistema Megalopolitano de Monitoreo de la Calidad del Aire, la CAME realizó el *Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis*, con una inversión de 150 millones de pesos provenientes del Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN).

Los desarrollos recientes en la tecnología de sensores han mejorado el rendimiento de los monitores de bajo costo y, si se calibran contra los monitores de referencia a intervalos regulares, podrían ampliar la capacidad de las redes actuales. Los datos obtenidos pueden complementar potencialmente la información proporcionada por las redes regulatorias y ayudar a detectar puntos críticos locales, aumentar la densidad espacial de la red, proporcionar datos a nivel de microescala o en lugares fuera de la cobertura espacial de la red, evaluar los impactos cercanos a la fuente e incrementar la representatividad espacial de las estaciones de monitoreo. Pueden utilizarse para obtener datos indicativos sobre la calidad del aire en lugares donde es difícil instalar estaciones de grado regulatorio, en sitios remotos, en zonas agrícolas y rurales. Sin embargo, es importante resaltar que, para los propósitos de la gestión, estos dispositivos son una herramienta de exploración y en ninguna circunstancia reemplazan al monitoreo regulatorio. Actualmente, la SEDEMA en coordinación con el ICAYCC-UNAM exploran las características de estos

dispositivos con miras al desarrollo de futuras aplicaciones de posible interés para las autoridades ambientales (Grutter et al., 2023).

La creciente disponibilidad de datos satelitales y una nueva generación de satélites para el monitoreo de la calidad del aire están proporcionando a los científicos y responsables de las políticas de gestión información adicional sobre los niveles de los contaminantes criterio (véase, por ejemplo, NASA, 2022a). Un nuevo espectrómetro para emisiones troposféricas de la NASA TEMPO (*Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution*), programado para su lanzamiento en abril de 2023, proporcionará mediciones cada hora de retrodispersión de la luz solar diurna, con una alta resolución espacial que cubrirá prácticamente Norteamérica (NASA, 2022b). Estas mediciones sin precedentes permitirán obtener recuperaciones robustas de los principales contaminantes del aire, lo que mejorará en gran medida el monitoreo de las cambiantes emisiones y la química atmosférica que gobiernan las condiciones de calidad del aire.

En México, el grupo de Espectroscopía y Percepción Remota del ICAYCC-UNAM es el principal equipo de investigación dedicado al análisis de datos satelitales y su validación. Actualmente, la Ciudad de México y la CAME están explorando el potencial de las observaciones TEMPO para observar la calidad del aire en regiones que actualmente carecen de sistemas de monitoreo y en aplicaciones para evaluar los impactos en la salud pública y los ecosistemas.

Las descripciones detalladas de la tendencia de la calidad del aire en la ZMVM y otros estados de la Megalópolis se presentan en el Capítulo 2.

### **Inventario de emisiones**

El inventario de emisiones es una herramienta esencial en la gestión de la calidad del aire para evaluar el progreso de las estrategias de control de emisiones y planificar acciones futuras. Desde finales de la década de 1980, la ZMVM mantiene un inventario de emisiones, originalmente las emisiones de las fuentes móviles se estiman mediante recuentos de tráfico, mientras que las emisiones industriales se cuantificaron a través de encuestas voluntarias (Molina & Molina, 2002). Desde 1994, el inventario de emisiones comprende cuatro categorías: fuentes puntuales (industria), fuentes de área (servicios y residenciales), fuentes móviles (transporte) y fuentes naturales (vegetación y suelo). Actualmente, el inventario de emisiones de la ZMVM está bien desarrollado y cumple con la certificación BASIC+ emitida por C40. El inventario se actualiza cada dos años e incluye contaminantes criterio y tóxicos, carbono negro (CN) y gases de efecto invernadero, así como la variabilidad diurna y espacial de las emisiones. El inventario estima las emisiones de aproximadamente 1900 industrias reguladas y alrededor de 2800 actividades comerciales y residenciales reguladas, además de las contribuciones del tráfico vehicular, las operaciones de aviación, la gestión de desechos y aguas residuales, y las fuentes naturales (es decir, fuentes biogénicas) en una malla con celdas de 1 km × 1 km (según sea necesario para fines de modelación).

El inventario de emisiones de la ZMVM de 2018 incluye las mejoras introducidas en la versión 2016 y retoma las estimaciones para la Ciudad de México y su área metropolitana, a diferencia del documento previo que solo incluyó a la Ciudad de México. Las estimaciones de este inventario se utilizaron para informar las estrategias de reducción de emisiones y la priorización de las medidas y acciones del ProAire 2021-2030 (SEDEMA et al, 2021). El inventario de emisiones de 2018 se

publicó en 2021 y está disponible en el sitio web de la SEDEMA (SEDEMA, 2021a). El inventario de emisiones 2020 será liberado en el verano de 2023.

A nivel federal, se creó el primer Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) para el año base de 1999 como resultado del grupo de trabajo de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (DGGCARETC) de la SEMARNAT. En la elaboración del INEM, el grupo de trabajo de la SEMARNAT ha colaborado tradicionalmente con otras dependencias adscritas al Gobierno Federal y autoridades ambientales de los estados y municipios, así como con organizaciones académicas, de investigación y no gubernamentales. Las estimaciones posteriores del INEM se realizaron para los años base 2005, 2008, 2011, 2013, 2014 y 2016, buscando en cada versión mejorar la exactitud de la información obtenida mediante la actualización de los modelos de emisión, factores de emisión y datos de actividad. Recientemente, la DGGCARETC fue reemplazada por la Dirección General de Industria, Energías Limpias y Gestión de la Calidad del Aire (DGIELGCA). Adicionalmente, con el apoyo del FIDAM 1490 la DGIELGCA actualiza el inventario de 2018 que integrará una actualización de los modelos MOVES-México. Complementariamente, el INECC elabora el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI).

Las fuentes de emisiones y los desafíos para mejorar la estimación de las emisiones en la Megalópolis se presentan en el Capítulo 3.

### **Modelación y pronóstico de la calidad del aire**

La modelación numérica es una herramienta esencial para apoyar a los tomadores de decisiones en el diseño de políticas de calidad del aire y en la evaluación de medidas de control en escenarios climáticos y de emisiones presentes y futuros, así como en la previsión de la calidad del aire. El desarrollo y el éxito de la modelación dependen de observaciones confiables del monitoreo de la calidad del aire, tanto a nivel de superficie como satelitales, estimaciones precisas de emisiones con alta resolución y de un sólido conocimiento de la química y física atmosféricas locales.

La información de pronóstico de la calidad del aire en tiempo real tiene un papel relevante para informar al público sobre concentraciones potencialmente dañinas de contaminantes como O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>2</sub>. Esta información permite al gobierno y al público anticipar medidas de precaución, como restringir la circulación de vehículos y minimizar las actividades al aire libre para limitar su exposición a los niveles insalubres de contaminación del aire previstos.

Actualmente, el gobierno de la Ciudad de México ha implementado un sistema de pronóstico de calidad del aire para la ZMVM que tiene el propósito de informar al público sobre los niveles de contaminación por O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> esperados, con hasta 24 horas de anticipación. El sistema se emplea también en la evaluación de políticas de reducción de emisiones para mejorar la calidad del aire y otros beneficios colaterales. El pronóstico se publica diariamente desde 2017. Su desempeño se evalúa periódicamente contra las observaciones de la red, los resultados indican un desempeño adecuado para O<sub>3</sub> y moderado para PM<sub>2.5</sub>, pero presenta dificultades para identificar eventos de contaminación extrema. A nivel de la Megalópolis, persisten desafíos sustanciales en la implementación de sistemas de pronóstico de la calidad del aire debido a las capacidades limitadas para el monitoreo de la calidad del aire y la elaboración de inventarios de emisiones, así como al escaso personal técnico calificado capaz de participar en las actividades de modelación y

pronóstico. Teniendo esto en cuenta, la CAME ha considerado la necesidad de desarrollar un sistema de modelación y pronóstico de la calidad del aire para la región central del país, que incluya a todas las entidades de la Megalópolis. Con la colaboración del ICAyCC-UNAM, pretende desarrollar e implementar un sistema de modelación y pronóstico utilizando modelos de última generación, aprovechando la infraestructura de supercómputo de su centro de datos. El desarrollo se beneficiará con la experiencia y el conocimiento de los científicos del ICAyCC-UNAM, quienes han desarrollado un sistema de pronóstico para el centro de México. Este esfuerzo iniciará con un curso-taller de pronóstico de la calidad del aire dirigido a las entidades de la Megalópolis.

El Capítulo 4 describe algunos estudios de modelación recientes realizados en la ZMVM, incluidos varios sobre el impacto del confinamiento por COVID-19 en la calidad del aire.

## **1.6. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis**

El estudio de los procesos atmosféricos constituye una actividad fundamental para comprender los impactos y evaluar las mejores opciones para mitigar la contaminación del aire. La investigación científica ha desempeñado un papel importante para asistir a las autoridades ambientales de la ZMVM en la caracterización de las fuentes de emisión de especies contaminantes y su transporte y transformación en la atmósfera, identificar estrategias efectivas de reducción de emisiones y monitorear el progreso de las regulaciones que ya existen a fin de garantizar que los programas se implementen con éxito.

Durante 1990-1994, el proyecto Iniciativa de Investigación sobre la Calidad del Aire de la Ciudad de México (MARI, *Mexico City Air Quality Research Initiative*) reunió observaciones del perfil superficial y vertical de meteorología y contaminantes para apoyar estudios de modelación (Streit y Guzmán, 1996). En febrero-marzo de 1997, la campaña Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico-*Aerosol and Visibility Evaluation* (IMADA-AVER) generó mediciones meteorológicas exhaustivas en la cuenca y proporcionó información sobre la composición de las partículas en suspensión (Doran et al., 1998; Edgerton et al., 1999).

Durante 1999-2000, el Programa Integral sobre Contaminación Atmosférica Urbana, Regional y Global del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) realizó una evaluación exhaustiva de la calidad del aire en la ZMVM a solicitud de las autoridades mexicanas, para apoyar el diseño de un nuevo plan estratégico para los siguientes 10 años, que proporcionó la base científica para el ProAire 2002-2010 (Molina & Molina, 2002; CAM, 2002). La evaluación integral contó con la participación de expertos multidisciplinarios en ciencias atmosféricas, salud pública, estudios sociales y políticos, y economía de México y Estados Unidos. El enfoque integrado enfatizó que abordar el problema de la contaminación del aire requería no solo de una comprensión de la ciencia de la contaminación del aire, sino también de equilibrar los factores económicos, sociales, políticos y tecnológicos, y cómo tomar decisiones en presencia de incertidumbre y datos incompletos (Molina & Molina, 2002).

Las recomendaciones de la evaluación integral para actualizar y mejorar el inventario de emisiones de la ZMVM y acrecentar el conocimiento actual de la química de los procesos atmosféricos dieron lugar a dos campañas de mediciones de campo, durante febrero de 2002 y marzo de 2003

patrocinadas por la CAM (Molina et al., 2007), y posteriormente la campaña MILAGRO (*Megacity Initiative: Local And Global Research Observations*) en marzo de 2006 (Molina et al., 2010; Singh et al., 2009). Las campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 proporcionaron mediciones meteorológicas, de gases y aerosoles, de amplio alcance, y mejoraron significativamente la comprensión de los procesos meteorológicos y fotoquímicos que contribuían a la formación de O<sub>3</sub>, aerosoles secundarios y otros contaminantes, así como su transporte y transformación en la atmósfera de la ZMVM.

### **Caracterización de gases y partículas en la Megalópolis**

Desde la campaña MILAGRO, se han realizado relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM y otras regiones de la Megalópolis, no obstante, el SIMAT, organizaciones no gubernamentales, académicos e investigadores independientes, han efectuado algunos estudios especiales. En la Sección 4.3 del Capítulo 4 se describen con mayor detalle varios proyectos sobre la caracterización de gases y partículas en la ZMVM y en otros estados de la Megalópolis.

Las observaciones actuales indican que los contaminantes clave no han disminuido a niveles aceptables. Además, las concentraciones atmosféricas de contaminantes como el O<sub>3</sub> y los aerosoles secundarios están aumentando en los últimos años (Velasco & Retama, 2017; Zavala et al., 2020), sugiriendo la necesidad de actualizar el estado de conocimiento científico de los procesos que controlan la formación, transporte y destino de estos contaminantes (Molina et al., 2019; Velasco et al., 2021; Molina, 2021).

### **Forzadores climáticos de vida corta: vincular la calidad del aire y el cambio climático**

Aunque la contaminación atmosférica y el cambio climático están íntimamente interrelacionados con respecto a las fuentes, los procesos atmosféricos, y los efectos humanos y ambientales, la calidad del aire y el cambio climático se han tratado como dos cuestiones políticas separadas y distintas. Las estrategias de control de la contaminación del aire se han centrado tradicionalmente en reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos que son perjudiciales para la salud pública o dañan el medio ambiente, mientras que la política de cambio climático en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO<sub>2</sub>. Se pueden obtener beneficios y sinergias potenciales sustanciales a partir de estrategias integradas que aborden ambos problemas, para conseguir beneficios colaterales.

Recientemente, algunas especies conocidas como forzadores climáticos de vida corta (FCVC) han recibido mucha atención por la comunidad científica del clima, por su papel en la desaceleración de la tasa de cambio climático a corto plazo en escalas regionales a hemisféricas, además de los beneficios significativos para la eficiencia energética, la salud humana, la producción de cultivos y los ecosistemas. Los principales FCVC con vidas inferiores a unas pocas décadas son el CN (~días a semanas), metano (CH<sub>4</sub>, ~ una década), O<sub>3</sub> troposférico (semanas a meses) y algunos hidrofluorocarbonos (HFC, promedio de 15 años). Debido a su naturaleza, estas sustancias pueden controlarse y reducirse rápidamente con la tecnología existente y proporcionar beneficios climáticos en el corto plazo, además de mejorar la calidad del aire (UNEP-WMO, 2011; UNEP, 2011a, 2011b).

México ha emprendido varios esfuerzos para evaluar las emisiones de los FCVC y fomentar medidas de mitigación desde 2010 con el estudio titulado "Temas emergentes en cambio climático:



el metano y el carbono negro, posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación" (INE-MCE2-UNAM, 2011). Esto fue seguido por una serie de talleres técnicos y reuniones ministeriales, dando lugar a la planificación nacional de primer orden para FCVC para México bajo la iniciativa SNAP (siglas en inglés para Apoyo a la Planificación Nacional para la Acción sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta) de la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC) en 2013 (MCE2-INECC, 2013). Este proceso condujo al desarrollo de una iniciativa de investigación del MCE2 para caracterizar mejor las fuentes de emisión de FCVC en el país, incluidas múltiples plantas de tratamiento de aguas residuales, rellenos sanitarios, granjas ganaderas de investigación, hornos de ladrillos, estufas residenciales, flotas de vehículos pesados diésel en carretera y no carretera. La Sección 4.5 del Capítulo 4 describe los resultados y las lecciones aprendidas de algunas de las mediciones realizadas específicamente en la ZMVM y la región de la Megalópolis.

### **Climatología urbana y calidad del aire**

Los procesos químicos y físicos involucrados en la formación de contaminantes que ocurren en la atmósfera son sensibles a los cambios en las condiciones meteorológicas. Estructuras como edificios, carreteras (asfalto y concreto) y otras infraestructuras absorben y reemiten el calor del sol más que los paisajes naturales como árboles, vegetación y cuerpos de agua. Las áreas urbanas, donde estas estructuras están altamente concentradas y la vegetación es limitada, se convierten en "islas" con temperaturas mayores con relación a las áreas periféricas, creando los efectos de isla de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés). La diferencia de temperatura entre el área urbana y el entorno rural suele ser mayor por la noche que durante el día y es más evidente cuando los vientos son débiles. La temperatura también puede variar dentro de una ciudad; algunas áreas son más calientes que otras debido a la distribución desigual de los edificios y pavimentos que absorben el calor.

La atmósfera de la ZMVM ha experimentado un calentamiento progresivo en las últimas décadas, posiblemente debido a la interacción sinérgica entre el aumento de la modificación de la cubierta terrestre, los nuevos materiales utilizados en la construcción, el calor antropogénico y los cambios de temperatura asociados con el cambio climático global. Una tendencia creciente similar en la temperatura ambiente se ha observado también en otras regiones urbanas de la Megalópolis. Aunque es posible un aumento de la temperatura en la región central del país debido al cambio climático, poco se sabe sobre los efectos que tendrá en la meteorología de las escalas sinóptica, regional y local (SEDEMA, 2021b). Algunos de los procesos de formación de compuestos secundarios (por ejemplo, la formación de  $O_3$ ) son sensibles al clima, por lo tanto, se espera que los impactos del cambio climático también involucren la forma en que los contaminantes se transforman, dispersan y depositan.

A pesar del cambio significativo de temperatura en la Ciudad de México y el trabajo pionero de Jáuregui (Jáuregui, 1997), actualmente el estudio de la climatología urbana es escaso. La Sección 4.4 del Capítulo 4 describe algunos de los estudios recientes que abordan aspectos de interés sobre la interacción de la contaminación atmosférica con la meteorología, así como el posible efecto de los cambios en la radiación ultravioleta (UV) superficial en la formación de  $O_3$ .

## **Impacto del COVID-19 en la calidad del aire en la Megalópolis**

Tras la detección del nuevo coronavirus SARS-CoV-2 en Wuhan, China, en diciembre de 2019 y la rápida propagación de la enfermedad COVID-19 causada por el virus en todo el mundo (WHO, 2020a; 2020b), la mayoría de los países promulgaron medidas estrictas para contener la propagación de la enfermedad a fin de proteger la salud pública, incluidos confinamientos, cuarentenas y restricciones de viaje reduciendo la actividad económica mundial. El estrés de la pandemia y la recesión económica resultante han afectado negativamente la salud mental y el bienestar de las personas en todo el mundo. Además, se descubrió que la contaminación del aire aumenta sustancialmente el riesgo de infección y la gravedad de los síntomas de COVID-19.

En México, los primeros casos se diagnosticaron durante la última semana de febrero de 2020. Como medida de precaución, las escuelas de educación básica suspendieron actividades a partir del 17 de marzo de 2020. Esto fue seguido por medidas de confinamiento parcial para algunas actividades no esenciales, la suspensión de los servicios ofrecidos por la administración pública y la cancelación de reuniones públicas de más de 25 personas. Ante el avance de la pandemia, las autoridades aplicaron acciones de la Fase 3 a partir del 21 de abril de 2020, lo que implicó la prohibición total de cualquier actividad no esencial. En la Ciudad de México, la suspensión se extendió a actividades industriales y comerciales no esenciales, la reducción en el servicio y la demanda de transporte público y la disminución de los vehículos privados en circulación. En el resto de las entidades de la Megalópolis, además de la suspensión de las actividades no esenciales se observó un descenso en la demanda de transporte público y en la circulación de los vehículos privados como resultado de la promoción del “Quédate en casa”. El descenso en la motorización y la actividad económica resultó en la disminución de las concentraciones de algunos contaminantes medidos por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la ZMVM y en otras entidades de la Megalópolis.

Una consecuencia no contemplada de las restricciones durante las Fases 2 y 3 fue la reducción de las emisiones de automóviles, industria y actividad comercial, en una escala sin precedentes en México, ofreciendo a los científicos atmosféricos y administradores de calidad del aire una oportunidad única para estudiar los efectos sobre la calidad del aire de reducciones extraordinarias en las actividades antropogénicas. Teniendo en cuenta que la mayoría de las estrategias de reducción de la contaminación a largo plazo y las acciones de control durante los eventos de contaminación episódica se centran en reducir las emisiones de los automóviles y la industria, este experimento no planificado fue de gran valor para estimar en condiciones reales el impacto máximo que podría lograrse con el esquema de gestión actual. La sección 4.7 del Capítulo 4 describe los impactos de los cambios en la actividad urbana relacionados con la aplicación de las medidas durante la pandemia de COVID-19, en la calidad del aire.

En la región de la Megalópolis, muchas actividades, como el trabajo y las actividades educativas, se realizaron a través de medios electrónicos, y otras utilizaron el acuerdo de trabajo híbrido flexible (cara a cara y a distancia a través de videoconferencias, correo electrónico y telecomunicaciones). Utilizando un indicador de la movilidad de las personas, fue posible exponer la drástica reducción de la movilidad, pero también mostrar que algunas entidades y ciudades de la Megalópolis volvieron al nivel anterior a la pandemia, mientras que otras permanecieron en niveles más bajos cuando se levantaron algunas de las restricciones de confinamiento. Este retorno a las condiciones previas de circulación de los vehículos de motor también implicó el retorno a los

niveles de emisión que existían antes de la pandemia, y por lo tanto a los niveles de calidad del aire anteriores, modulados por factores como las condiciones climáticas y meteorológicas, y la ocurrencia de incendios forestales.

### **1.7. Investigación sobre los impactos de la contaminación del aire en la salud en la Megalópolis**

Los contaminantes atmosféricos afectan la salud de la población y también dañan los cultivos, reduciendo su rendimiento y aumentando el riesgo para la seguridad alimentaria. También pueden afectar a los bosques y los ecosistemas reduciendo la calidad y cantidad de los servicios ambientales que proporcionan a la sociedad. La mayoría de los estudios en México se centran en comprender los impactos de los contaminantes del aire en la salud humana. Todavía hay lagunas de información sobre los impactos en los cultivos, los bosques, los ecosistemas y el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada.

La contaminación del aire tiene una variedad de impactos en la salud pública, incluida la reducción del crecimiento y la función pulmonar, las infecciones respiratorias y el asma agravada en los niños, mientras que la cardiopatía isquémica y los accidentes cerebrovasculares son las causas más comunes de muerte prematura en adultos. Hay evidencia emergente de otros efectos como la diabetes y las afecciones neurodegenerativas. La evidencia sobre el efecto de la contaminación del aire y la salud ha llevado a estimaciones de riesgo cada vez mayores, incluso a concentraciones más bajas de lo que se creía anteriormente; esto motivó a la Organización Mundial de la Salud (OMS) a establecer valores más estrictos para las Guías de Calidad del Aire en 2021 (WHO, 2021), así como a las autoridades de México a actualizar los estándares de calidad del aire, los cuales se muestran en la Tabla 1.1. Esto se vuelve aún más relevante en la región de la Megalópolis porque presenta problemas importantes de contaminación del aire, los cuales se reflejan en el incumplimiento frecuente de las normas, los impactos en la salud, los costos económicos directos e indirectos y el daño a los ecosistemas. Los impactos en la salud pueden exacerbarse para los grupos de población más vulnerables, como los ancianos, las mujeres embarazadas, los niños, las personas con enfermedades crónicas o con sistemas inmunológicos débiles.

El Capítulo 5 revisa el estado actual del conocimiento sobre el impacto de la contaminación del aire en la salud pública en la Megalópolis, evalúa su progreso y los desafíos científicos. Algunos de los resultados de los estudios de salud sobre partículas y O<sub>3</sub> ya se han incorporado en las políticas y programas para el control de la calidad del aire en la Megalópolis. Sin embargo, aún persisten preguntas y cuestiones clave sobre la relación entre los efectos crónicos y agudos para la salud, que son agravados por la exposición a la calidad del aire y la cuantificación de los costos y beneficios para la salud del control de las principales fuentes de emisión.

### **1. 8. Programas de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis**

La gestión de la calidad del aire se refiere a todas las actividades que una autoridad reguladora realiza para proteger la salud pública y el medio ambiente de los efectos nocivos de la contaminación del aire. Es un proceso iterativo y dinámico representado como un ciclo de elementos interrelacionados (véase la Figura 6.1, Capítulo 6). Por lo general, el proceso comienza

con una institución gubernamental que establece objetivos, metas y estándares de calidad del aire que definen umbrales de concentraciones para especies contaminantes clave que protegerán la salud pública y el medio ambiente. Los administradores de la calidad del aire determinan las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con los estándares y objetivos mediante la aplicación de diversas herramientas de evaluación, incluidos los inventarios de emisiones, el monitoreo de la calidad del aire y la modelación.

Durante el desarrollo de las estrategias de control, los administradores de la calidad del aire deben incluir el presupuesto requerido, los mecanismos de implementación, las agencias responsabilizadas de las acciones, y un cronograma los planes de cumplimiento e implementación. Para lograr con éxito las reducciones requeridas, deberán implementar los programas y hacer cumplir las reglas y regulaciones. Es importante realizar una evaluación continua a fin de evaluar la eficacia de las estrategias y medir el progreso hacia el cumplimiento de los objetivos de calidad del aire. Debido a que la gestión de la calidad del aire generalmente opera con incertidumbres científicas, tecnológicas y sociales sustanciales, es necesario revisar y evaluar continuamente los objetivos y las estrategias a medida que se dispone de nueva información. En algunos casos, esto podría incluir el establecimiento de nuevos estándares de calidad del aire.

Las contribuciones de la ciencia y la tecnología se realizan a través del monitoreo, análisis, investigación y desarrollo, y proporcionan a los gerentes de calidad del aire conocimientos fundamentales para la toma de decisiones informadas. A lo largo de cada etapa del proceso, es esencial informar al público sobre el estado de su calidad del aire.

En los Estados Unidos, la Ley de Aire Limpio (CAA, 1970) proporciona un marco legal que autoriza a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) a establecer concentraciones máximas permitidas de seis contaminantes atmosféricos comunes ( $O_3$ , CO,  $NO_2$ ,  $SO_2$ , Pb y partículas suspendidas) instaurando Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS, por sus siglas en inglés). Luego, los estados desarrollan planes estatales de implementación que muestran cómo, con la asistencia de los programas nacionales de control, cumplirán con estos estándares a través del programa de gestión de la calidad del aire (US EPA, 2022).

El gobierno mexicano estableció en 1994 los primeros estándares de calidad del aire ambiente para  $O_3$ , CO,  $NO_2$ ,  $SO_2$ , Pb y  $PM_{10}$  con el objetivo de proteger la salud pública, siguiendo el ejemplo de los Estados Unidos (DOF, 1994a, b, c). Como se describe en la Sección 1.1, la Secretaría de Salud define y revisa periódicamente los estándares.

El gobierno federal mantiene un enfoque integral de gestión a través de los programas de mejora de la calidad del aire (ProAire), que atienden la necesidad de cada una de las 32 entidades que integran el país de contar con un instrumento de carácter preventivo y/o correctivo en materia de calidad del aire y de protección de la salud, y atiende el marco jurídico aplicable en este ámbito. A partir de 2022, todos los estados de la Megalópolis cuentan con un ProAire vigente, el ProAire de Puebla está en proceso de actualización (SEMARNAT, 2022).

Debido al grave problema de contaminación del aire en la Ciudad de México identificado en la década de 1980, la calidad del aire en la ZMVM fue objeto de esfuerzos extensivos para el control

de la contaminación del aire, en las últimas tres décadas. El primer programa de gestión de la calidad del aire, Programa Integral contra la Contaminación del Aire (PICCA), se implementó en 1990 (DDF, 1990) y fue reemplazado por el *Programa Para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 o ProAire 1995-2000* en 1996 (DDF, 1996). En 2002, se desarrolló el primer programa de gestión de la calidad del aire de 10 años (ProAire 2002-2010) (CAM, 2002), y en 2010, se promulgó el programa de gestión de la calidad del aire de 10 años (ProAire 2011-2020) (CAM, 2011).

Una de las acciones de los programas de gestión de la calidad del aire incluyó la mejora de la investigación científica mediante la colaboración con expertos científicos y técnicos nacionales e internacionales. Uno de los ejemplos de esto es el Programa Integral sobre Contaminación del Aire Urbana, Regional y Global del MIT, descrito anteriormente (Sección 1.6). Los resultados (Molina & Molina, 2002) proporcionaron la base científica para el ProAire 2002-2010.

Siguiendo las recomendaciones de la evaluación para actualizar y mejorar el inventario de emisiones de la ZMVM y el conocimiento actual de los procesos químicos, de dispersión y transporte de los contaminantes emitidos a la atmósfera de la ZMVM, durante febrero de 2002 con el patrocinio de la CAM se realizaron mediciones de campo exploratorias e innovadoras con plataformas móviles y fijas. Esto fue seguido por la campaña intensiva de medición de campo MCMA-2003 en la primavera de 2003 (Molina et al., 2007). Los hallazgos científicos de MCMA-2003 fueron fundamentales en la planificación y ejecución de la campaña MILAGRO en marzo de 2006, el estudio más grande e importante sobre la contaminación del aire en la ZMVM hasta la fecha (Molina et al. 2010; Singh et al., 2009). Los hallazgos científicos de los estudios de campo y las implicaciones políticas fueron incorporados por los funcionarios del gobierno mexicano como base científica en el diseño del programa de gestión de la calidad del aire de México 2011-2020 (ProAire 2011-2020).

En septiembre de 2018, SEDEMA patrocinó el "Taller para la Evaluación del ProAire 2011-2020 e Identificación de las Estrategias para Mejorar la Calidad del Aire de la CDMX" con el propósito de evaluar el progreso del programa de gestión ProAire 2011-2020 e identificar las estrategias para mejorar la calidad del aire. Fue organizado por el MCE2 y la ICM (Iniciativa Climática de México), y contó con la participación de gobiernos locales, expertos científicos y políticos nacionales e internacionales y partes relevantes interesadas (SEDEMA, 2018). Las recomendaciones se incluyeron en el actual ProAire 2021-2030, que se publicó en diciembre de 2021 (SEDEMA et al., 2021).

En las últimas tres décadas, después de implementar programas integrales de gestión basados en la ciencia, la ZMVM alcanzó un importante progreso en la mejora de la calidad del aire. Ante la evidencia científica sobre los efectos en la salud asociados con la exposición a concentraciones cada vez más bajas de contaminantes nocivos, se fortalecieron los estándares de calidad del aire y el programa de contingencias ambientales. Sin embargo, las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> todavía están por encima de los respectivos estándares de calidad del aire, y posiblemente han comenzado a aumentar nuevamente. Aún hay desafíos sustanciales para reducir efectivamente las concentraciones de estos contaminantes y con ello proteger la salud pública y el medio ambiente. Además, dado que el crecimiento de la población, la expansión urbana y la alta motorización del área metropolitana y la región de la Megalópolis circundante, continuarán generando emisiones

contaminantes, es importante avanzar en el desarrollo e implementación de medidas políticas adicionales para mejorar la calidad del aire. Es importante diseñar e implementar estrategias para reducir los efectos de las islas de calor urbano. Ambas acciones pueden ayudar a mitigar el cambio climático. La integración de las metas de calidad del aire y de estabilización del clima en el diseño de políticas ambientales será benéfica.

Para lograr lo anterior, es necesario fortalecer la coordinación y colaboración megalopolitana en las diferentes tareas relacionadas con la gestión de la calidad del aire, tales como el monitoreo atmosférico, el desarrollo del inventario de emisiones, así como el diseño, la aplicación y la evaluación de las acciones de control.

Además, para el éxito y sostenibilidad de las políticas ambientales serán esenciales un alto nivel de conciencia ciudadana y la participación informada de las partes interesadas. Actualmente, el gobierno de la Ciudad de México mantiene una amplia infraestructura de comunicación y despliega diversas estrategias para difundir información al público. La SEDEMA cuenta con un sitio web que difunde el índice de calidad del aire, ofrece contenido sobre diversos temas relacionados con la contaminación y la calidad del aire (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>), incluyendo infografías, informes anuales, datos abiertos y un espacio especializado para niños (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/teporingo/>). También utiliza plataformas móviles y redes sociales para la difusión de información. Recientemente, la CAME lanzó la campaña "Pon buen ambiente" disponible en redes sociales, con el objetivo de motivar a la población a realizar acciones en beneficio del medio ambiente (<https://www.portalambiental.com.mx/calidad-del-aire/20201228/pon-buen-ambiente-para-mejorar-la-calidad-del-aire-y-la-salud>). Las autoridades mexicanas lanzaron el Índice de Aire y Salud (bajo la NOM-172-SEMARNAT-2019) para comunicar el grado de contaminación del aire y la probabilidad de un efecto adverso en la salud de las personas expuestas a los contaminantes.

El Capítulo 6 describe los programas de gestión de la calidad del aire en la ZMVM y la Megalópolis, así como algunos de los principales programas para mejorar la calidad del aire y los desafíos cambiantes que enfrentan los tomadores de decisiones.

## CAPÍTULO 2. EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA MEGALÓPOLIS

El objetivo más importante de la gestión ambiental es utilizar el conocimiento disponible sobre los niveles, las fuentes, y la dinámica de la contaminación del aire para que las autoridades, los formuladores de políticas, investigadores y el público en general puedan proponer y emprender medidas correctivas para mejorar la calidad del aire. El monitoreo proporciona la evidencia necesaria para entender la situación de la calidad del aire y así proteger la salud pública. Los resultados del monitoreo atmosférico permiten evaluar el impacto de las estrategias de gestión y facilitan el diseño de nuevas medidas de control. Este Capítulo describe las redes de monitoreo existentes en la Megalópolis, y partir de los datos que generan, evaluar la situación actual de la calidad del aire en las entidades que la conforman. El Anexo A explica cómo las tecnologías emergentes (es decir, los monitores de contaminación del aire de bajo costo y las observaciones satelitales) podrían complementar el monitoreo de la calidad del aire. El Anexo B presenta las series de tiempo para el periodo 2016 a 2020 de los contaminantes medidos por los sistemas de monitoreo de Hidalgo, Puebla y Querétaro.

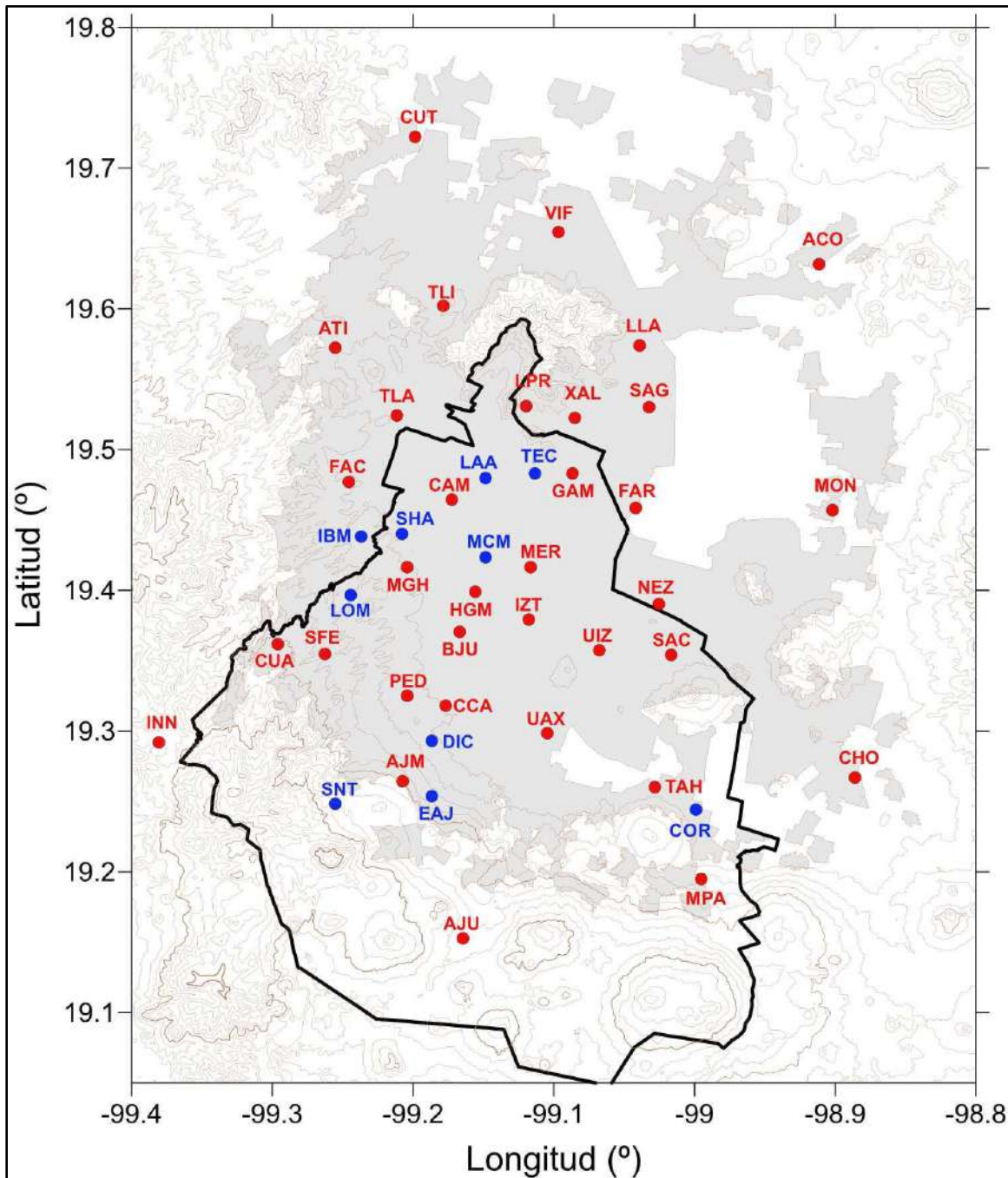
### 2.1. Monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México y su zona metropolitana

#### 2.1.1. Sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México

La Ciudad de México cuenta con un sistema maduro y robusto para el monitoreo de la calidad del aire. Integra cuarenta y cuatro estaciones de monitoreo, una estación de monitoreo móvil, un centro de control, laboratorios para mantenimiento y calibración de los equipos de monitoreo, y para la especiación y análisis químico. Su cobertura espacial se extiende más allá de los límites de la Ciudad de México y cubre una gran parte de la zona conurbada del Estado de México. En conjunto estos componentes integran el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) y la operación se encuentra bajo la responsabilidad de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire (DMCA). El SIMAT es la fuente más importante de datos de calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la calidad de sus datos permite su uso tanto para propósitos de divulgación e información a la ciudadanía sobre la calidad del aire, como para las necesidades del quehacer científico. Opera de manera continua durante todo el año, los datos de calidad del aire, meteorología y el índice ultravioleta (UV) se divulgan las 24 horas de día a través de su sitio web ([www.aire.sedema.cdmx.gob](http://www.aire.sedema.cdmx.gob)). Su configuración y esquema de operación es usado como modelo por otras redes de monitoreo en el país.

De las cuarenta y cuatro estaciones de monitoreo (junio 2022, ver Figura 2.1), treinta y cuatro sitios corresponden a estaciones para el monitoreo continuo de los contaminantes criterio y conforman la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA). Los contaminantes criterio son contaminantes del aire para los cuales se han establecido límites de concentración aceptables sobre la base de la información disponible de los efectos en la salud de cada contaminante. La Tabla 1.1 del Capítulo 1 enumera los contaminantes actuales regulados en México: ozono (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), partículas con

diámetro de 10 micrómetros o menores ( $PM_{10}$ ), partículas con diámetros de 2.5 micrómetros o menores ( $PM_{2.5}$ ) y plomo (Pb).



**Figura 2.1.** Ubicación de los sitios de monitoreo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). Las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), designadas para el monitoreo continuo de los contaminantes criterio, se muestran en color rojo, las estaciones para otros propósitos se indican en color azul. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire, [www.aire.cdmx.gob.mx](http://www.aire.cdmx.gob.mx)).



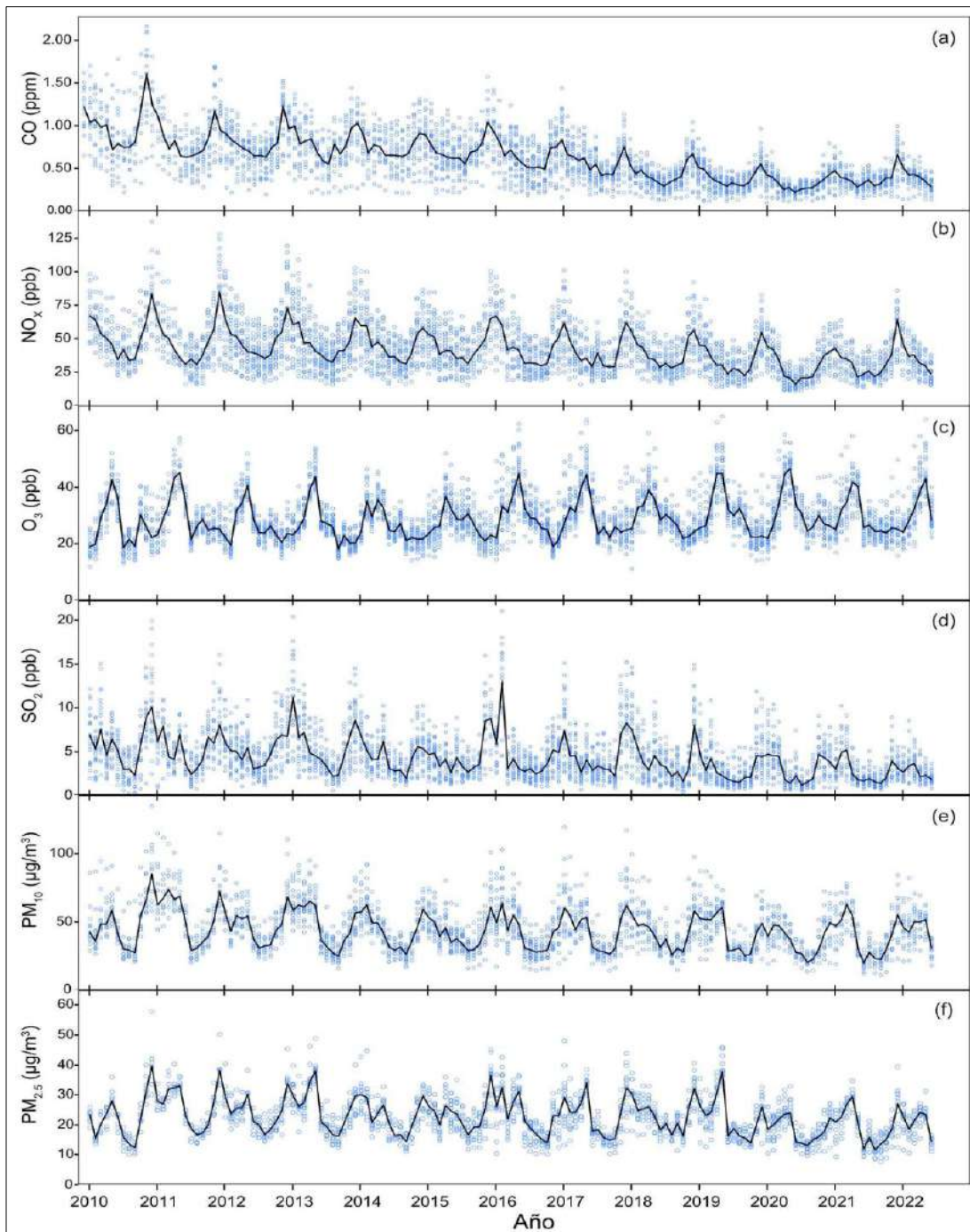
El SIMAT mantiene un esfuerzo permanente con el propósito de generar la información necesaria para la actualización de las políticas ambientales existentes en la ciudad. Tiene la flexibilidad necesaria para responder a nuevas necesidades normativas de gestión. Su configuración garantiza la cobertura espacial del monitoreo en toda la ciudad y puede adaptarse rápidamente a las demandas de un entorno urbano dinámico. La tecnología y los métodos empleados en el monitoreo cumplen con los requerimientos normativos vigentes. La calidad de los datos se garantiza mediante un conjunto de actividades de aseguramiento y control de la calidad en cada una de las etapas del proceso de monitoreo. Si bien, la principal responsabilidad del SIMAT es el monitoreo continuo de los contaminantes criterio, también contribuye con la investigación científica apoyando proyectos de investigación y campañas especiales de monitoreo atmosférico (por ejemplo, Molina et al., 2007, 2010, 2019).

### ***2.1.2. Situación de la calidad del aire de acuerdo con los datos del monitoreo***

Hasta antes de la aparición de la pandemia del COVID-19 en 2020, los niveles de la mayoría de los contaminantes criterio en la ZMVM mostraban una tendencia decreciente, excepto el O<sub>3</sub> y las PM<sub>2.5</sub>. En 2020, las acciones emprendidas por las autoridades para disminuir la tasa de contagios del virus SARS-COV-2 propiciaron una disminución significativa en las actividades económicas y sociales, y con ello reducciones importantes en la emisión de contaminantes a la atmósfera, lo que trajo una mejoría de la calidad del aire. Aunque los impactos en la química atmosférica y en la salud pública no han sido evaluados de manera metodológica aún, los datos del monitoreo atmosférico mostraron cambios en la composición del aire con una disminución importante de las concentraciones de los contaminantes primarios, durante las fases más severas de la pandemia. Posteriormente, con la reactivación de la actividad económica, los niveles de contaminación incrementaron gradualmente durante 2021.

La Figuras 2.2a y 2.2b muestran las series de tiempo de las concentraciones promedio mensual desde 2010, para CO y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), respectivamente. Un aspecto relevante del comportamiento de los niveles de CO y NO<sub>x</sub> se relaciona con el sensible incremento en las concentraciones con respecto a los niveles pre-pandemia, aparentemente las concentraciones de estos contaminantes no recuperaron la tendencia decreciente que tenían hasta antes de la pandemia, e incluso los indicadores estadísticos para 2022 fueron similares o mayores con respecto a los registrados en 2018 y 2019.

Los niveles de O<sub>3</sub> han exhibido pocos cambios en la última década (Figura 2.2c) y la evidencia sugiere una posible reversión en la tendencia, como se puede apreciar en la Figura 2.4. En el análisis preliminar (prueba de Theil-Sen) realizado para este trabajo se encontró evidencia estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) de un incremento de 0.39 ppb por año durante el periodo 2010-2022 en las estaciones ubicadas dentro de la Ciudad de México. Esto implica un incremento de ~5 ppb en 12 años. Si bien, no ha aumentado el número de activaciones de la Fase I de Contingencias Ambientales por O<sub>3</sub>, tampoco se ha observado una disminución en el número de días excediendo el valor límite de la norma NOM-020-SSA1-2021 para la protección a la salud. De mantenerse esta tendencia, incrementarán el número de días que superarán los valores límite de la norma en los próximos años. Esta situación podría agravarse por las reducciones graduales en los límites máximos de O<sub>3</sub> previstas por la norma para los siguientes años. En el ProAire 2021-2030 de la ZMVM se discute esta tendencia atribuyendo el incremento en los niveles de O<sub>3</sub> a los cambios en la química atmosférica provocados por la disminución diferencial en las emisiones de



**Figura 2.2.** Serie de tiempo de los promedios mensuales de (a) CO, (b) NO<sub>x</sub>, (c) O<sub>3</sub>, (d) SO<sub>2</sub>, (e) PM<sub>10</sub> y (f) PM<sub>2.5</sub> en la ZMVM. Los círculos indican el valor promedio en cada una de las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la línea negra indica el valor de la mediana para los valores mensuales. En la construcción del gráfico se emplearon los meses con 75% o más de datos válidos. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire, [www.aire.cdmx.gob.mx](http://www.aire.cdmx.gob.mx)).

NO<sub>x</sub> y los compuestos orgánicos volátiles (COV), así como a los cambios en la meteorología regional o global (SEDEMA et al., 2021). Sin embargo, la comunidad científica no ha abordado el tema aún y es importante que se investiguen las causas e impactos (Velasco & Retama, 2017). El ProAire indica que serían necesarias reducciones del 50% y 71% en todas las fuentes que emiten precursores de O<sub>3</sub> para alcanzar concentraciones de 90 ppb para el promedio de O<sub>3</sub> de 1 hora y de 51 ppb para el promedio móvil de 8 horas, respectivamente.

De la revisión de los objetivos planteados en el ProAire 2021-2030 se observó ambigüedad en las metas de reducción al no especificar claramente los valores a alcanzar, así como las métricas de seguimiento y evaluación. Por ejemplo, el *Objetivo Específico 1 (Reducir las emisiones de fuentes y categorías contaminantes prioritarias)* plantea estrategias para la disminución de las emisiones de contaminantes precursores de O<sub>3</sub> y de partículas secundarias, pero no indica las concentraciones que esperan alcanzar, además de que no especifica los beneficios ambientales esperados. Otro ejemplo, en el *Objetivo Específico 2 (Reducir las concentraciones de partículas y O<sub>3</sub>)* propone reducir las concentraciones máximas de O<sub>3</sub> y las concentraciones promedio de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> antes del año 2030, pero no indica los valores meta o las tasas de reducción esperadas.

En cuanto a la contaminación por partículas, las concentraciones de PM<sub>10</sub> (Figura 2.2e) mantienen una tendencia decreciente, excepto en los sitios de monitoreo ubicados en el noreste de la zona metropolitana, en los que se observaron incrementos en 2021 y 2022, posiblemente como consecuencia del desarrollo urbano en la región. Respecto a PM<sub>2.5</sub>, las concentraciones promedio observadas antes de la pandemia de COVID-19 no mostraban cambios en la tendencia durante la década previa (Figura 2.2f), sin embargo, en 2021 y 2022 se registró una disminución, posiblemente a causa de la dificultad de acceso a los equipos de monitoreo en los sitios ubicados en hospitales y centros de salud, algunos de los cuales suelen reportar las mayores concentraciones (por ejemplo, Xalostoc).

Las concentraciones ambientales de CO y SO<sub>2</sub> disminuyeron y actualmente se mantienen por debajo de los valores límite de las normas para la protección a la salud correspondientes. Ocasionalmente se presentan incrementos de corta duración en las concentraciones de SO<sub>2</sub> por la presencia de plumas de contaminación de origen regional. Las concentraciones de estos contaminantes en el aire ambiente son tan bajas que se encuentran en la región inferior de la escala de medición de los analizadores, cercanas al límite de detección, en donde la cuantificación es menos sensible y la incertidumbre es mayor. Para incrementar la precisión y exactitud de las mediciones, se requiere transitar hacia tecnologías con una mayor sensibilidad. Recientemente, a través del *Programa de Fortalecimiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis* (de aquí en adelante Programa de Reforzamiento, ver Sección 2.4), la DMCA recibió cinco equipos para la medición de niveles traza de SO<sub>2</sub> y cuatro para la medición de CO. Es importante mencionar que el monitoreo de SO<sub>2</sub> y CO se realiza en 32 y 31 de las estaciones de la RAMA, respectivamente. El despliegue en campo de los nuevos instrumentos requerirá de adecuaciones en los sitios de monitoreo y las metodologías de calibración.

En el caso de NO<sub>2</sub>, el método de quimioluminiscencia utilizado actualmente sobrestima la concentración por la presencia de compuestos interferentes comunes en el aire urbano. Diversas especies nitrogenadas -que incluyen el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), el ácido nitroso (HNO<sub>2</sub>) y algunos nitratos orgánicos e inorgánicos- se reducen dentro del convertidor catalítico del instrumento

generando una respuesta adicional a la del NO<sub>2</sub>. Por ende, los monitores también sobrestiman las mediciones de NO<sub>x</sub> (obtenida de la suma de las concentraciones de NO<sub>2</sub> y NO), por lo que miembros de la comunidad científica sugieren referirse a ellos como NO<sub>y</sub> en lugar de NO<sub>x</sub>. En observaciones realizadas en la estación de monitoreo Merced en 2003, se encontró una sobrestimación de 22% en la concentración de NO<sub>2</sub> reportada por la RAMA (Dunlea et al., 2007), mientras que mediciones más recientes realizadas en el Laboratorio de Análisis Ambiental en el norte de la ciudad, mostraron sobrestimaciones de 17% y 8% durante el día y noche, respectivamente (Zavala et al., 2020). Debido a que el NO<sub>2</sub> tiene efectos adversos en la salud, considerando los cambios recientes en los valores límite de la NOM-023-SSA1-2021 y tomando en cuenta que es un precursor de O<sub>3</sub> importante, deben realizarse esfuerzos para mejorar su medición utilizando métodos adecuados para las condiciones de la Ciudad de México. Desde 2016, la DMCA evalúa la respuesta de los monitores por desplazamiento de fase atenuada de cavidad (*Cavity Attenuated Phase Shift*, CAPS, por sus siglas en inglés) para la medición de NO<sub>2</sub>. Estos monitores miden la absorción de NO<sub>2</sub> a 450 nm sin convertir el NO<sub>2</sub> a otra especie, y por ende no sufren de interferencias de otras especies nitrogenadas como si sucede con los monitores estándar basados en quimioluminiscencia. Actualmente la medición de NO<sub>2</sub> se realiza en 32 estaciones de monitoreo, en 2018 la red recibió cuatro analizadores CAPS a través del Programa de Reforzamiento.

### ***2.1.3. Efectos de la contaminación del aire en la composición y acidez del agua de lluvia***

La Red de Depósito Atmosférico (REDDA) forma parte del SIMAT y opera con el apoyo del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC) de la UNAM. La REDDA es única en el país y mantiene un monitoreo permanente de la composición del depósito atmosférico húmedo (principalmente agua de lluvia) a través de la recolección de muestras semanales. Dentro de los efectos más importantes de la contaminación del aire en la precipitación pluvial, se encuentran los cambios de acidez y la composición iónica. La presencia de lluvia ácida es un fenómeno común en la Ciudad de México, la mayor acidez (pH < 4.5) se ha reportado en los sitios de muestreo localizados en el sur de la ciudad, precisamente en las zonas en donde se encuentran los remanentes del bosque original que cubría la mayor parte de las montañas que rodean la cuenca y en las zonas con la mayor actividad agrícola de la entidad (SEDEMA, 2020). El valor de la mediana para el pH ponderado durante el periodo 2003-2018 fue de 5.3, que es menor al valor de 5.6 considerado como el valor natural del pH en el agua de lluvia. En la última década se han registrado valores de pH de hasta 3.8 (Sosa-Echeverría et al., 2022).

La composición de la precipitación está dominada por los iones amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Su suma contribuye con ~75% de la composición iónica total. La presencia del SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y nitrato NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se relaciona con la incorporación o formación de las especies producidas por la oxidación del SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> durante la formación de las gotas de lluvia o por la incorporación de los aerosoles atmosféricos a la fase acuosa.

Se ha observado que los sitios de muestreo localizados en el norte exhiben generalmente las concentraciones más altas de iones SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y calcio (Ca<sup>2+</sup>), mientras que los sitios ubicados al sur de la ciudad reportan los mayores niveles de acidez, lo que sugiere que las características urbanas y la distribución de los contaminantes del aire tienen un impacto en la composición del agua de lluvia.

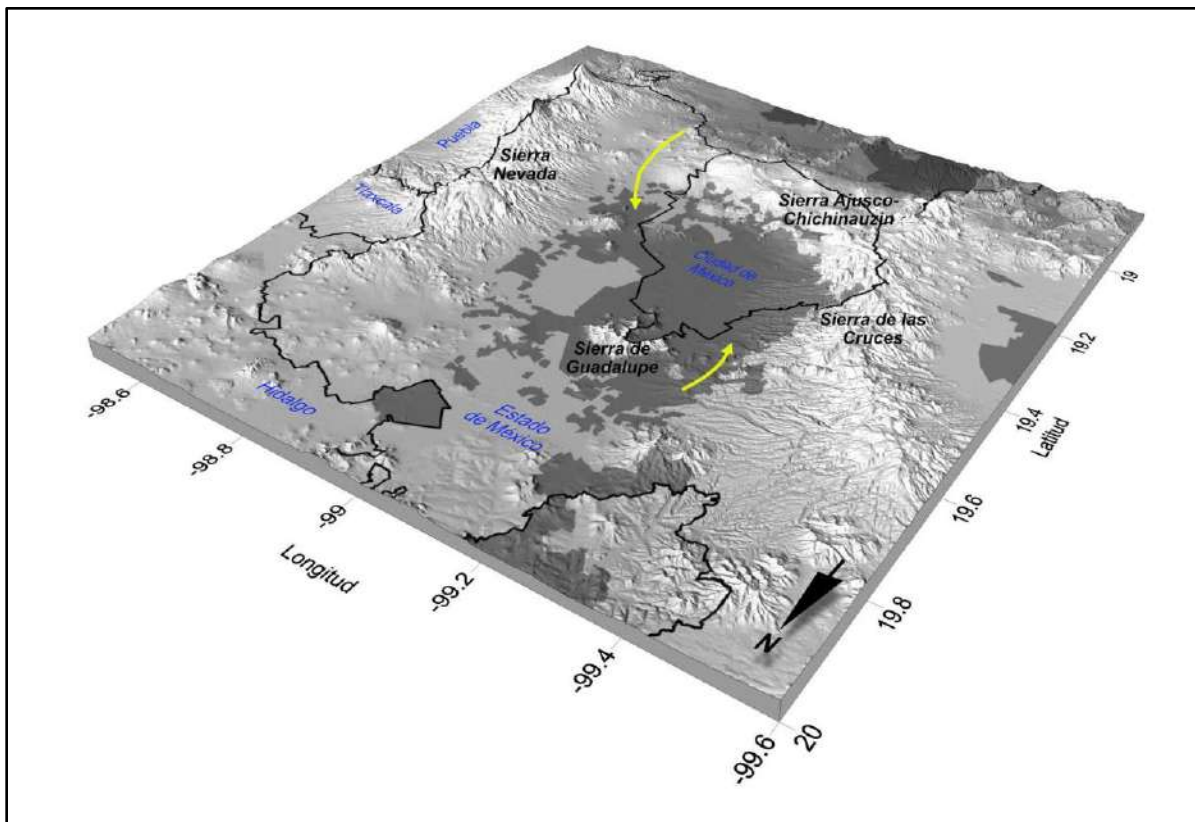
A pesar de los bajos niveles de  $\text{SO}_2$  en el aire ambiente, el  $\text{SO}_4^{2-}$  es la especie iónica más abundante en el agua de lluvia después del  $\text{NH}_4^+$  (Sosa-Echeverría et al., 2022). El  $\text{NH}_4^+$  es el principal responsable de la neutralización de las especies ácidas, seguida del ion  $\text{Ca}^{2+}$ . Se sabe que el  $\text{NH}_4^+$  tiene su origen en el  $\text{NH}_3$  gaseoso, que es emitido principalmente por la actividad agrícola y algunas fuentes urbanas que incluyen: emisiones de escape de los vehículos con convertidor catalítico, el tratamiento de agua, drenajes y tiraderos de basura. De acuerdo con resultados previos (Moya et al., 2004; San Martini et al., 2005) y recientes (Retama & Velasco, 2023), el  $\text{NH}_3$  es una especie abundante en la atmósfera y sus principales fuentes y contribuciones no se encuentran plenamente identificadas.

Los efectos de la acidez del agua de lluvia en los ecosistemas, en la infraestructura urbana, los cultivos y el patrimonio arquitectónico se han estudiado ampliamente en otras regiones del mundo (por ejemplo, Grennfelt et al., 2020; Livingston, 2016; Liu et al., 2019). Sin embargo, en la Ciudad de México se sabe poco sobre sus impactos. El problema de la lluvia ácida y sus efectos son tópicos que se encuentra relegados de la gestión ambiental y fuera de la zona de cobertura del SIMAT.

#### ***2.1.4. Influencia de la meteorología en la contaminación del aire***

La Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET), que forma parte del SIMAT, mantiene una vigilancia permanente de la meteorología a nivel ambiente y en la vertical, y permite establecer relaciones entre las condiciones meteorológicas locales y la calidad del aire.

La cuenca de México se encuentra parcialmente confinada por cadenas montañosas al poniente, sur y oriente, con una amplia apertura al noreste, entre las sierras de Guadalupe y Nevada. Las depresiones naturales que se forman entre las sierras Ajusco-Chichinautzin y la Nevada, al sureste, y entre las sierras de Guadalupe y de las Cruces, forman aberturas que permiten la ventilación de la cuenca. Las corrientes de aire que se generan ahí presentan una mayor velocidad del viento y poca variación en su dirección (ver Figura 2.3).

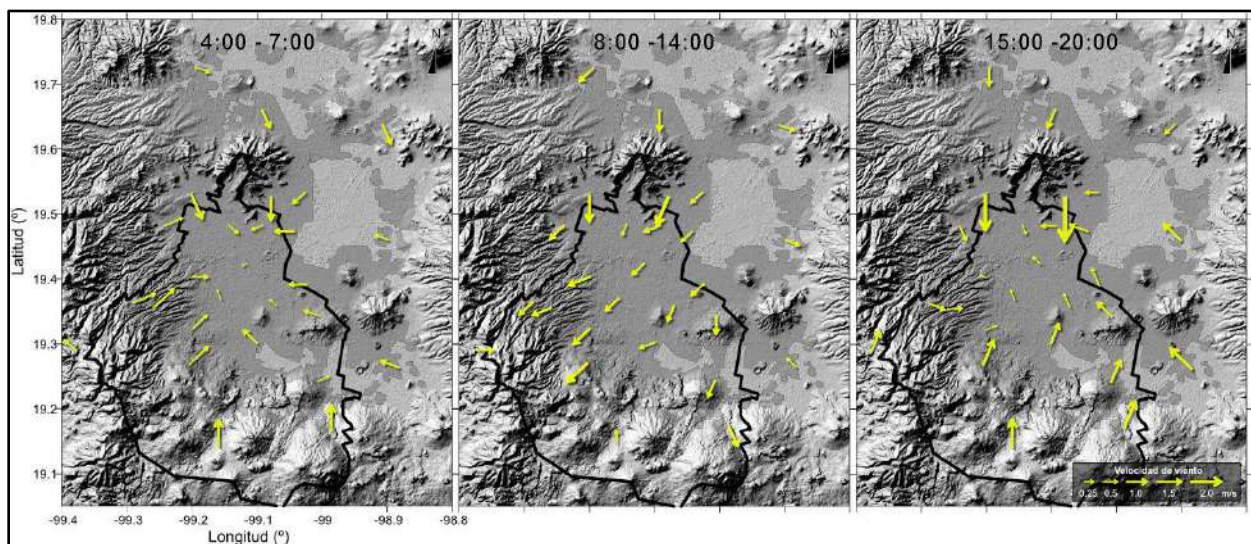


**Figura 2.3.** Relieve de la cuenca de México visto desde el noroeste. En la figura se indican las cadenas montañosas que la rodean, las flechas amarillas indican los flujos de viento canalizado al noroeste y suroeste. Las áreas sombreadas en gris oscuro corresponden a zonas urbanizadas, la línea negra indica los límites políticos de los estados. (Elaboración propia).

Los patrones de viento determinan el destino de los contaminantes. En las primeras horas del día los flujos catabáticos concentran las masas de aire sobre la porción central de la Ciudad de México, generando una región de estancamiento atmosférico. Durante este periodo, los contaminantes emitidos se concentran gradualmente dentro de una capa límite nocturna poco profunda y con una escasa movilidad vertical y horizontal. Las concentraciones de los contaminantes primarios, emitidos intensamente al despertar la ciudad e iniciar las actividades económicas, alcanzan sus concentraciones máximas. La presencia de inversiones térmicas suele extender la persistencia de los episodios de estancamiento, principalmente durante el invierno. Al amanecer, los flujos térmicos, provenientes del norte de la meseta central, dominan el movimiento de las masas de aire. Estos se fortalecen con el calentamiento de las laderas montañosas generando una corriente superficial con dirección suroeste, y se observa un transporte activo de los contaminantes acumulados en el centro de la ciudad y norte del altiplano. En este periodo, los contaminantes experimentan una rápida dilución por el crecimiento en la altura de la capa límite, además de una progresiva transformación química provocada por la intensa radiación solar característica de la altitud y latitud de la cuenca.



Mientras las concentraciones de los contaminantes primarios disminuyen durante el transcurso de la mañana, se incrementa la presencia de contaminantes secundarios como el  $O_3$  y los aerosoles orgánicos secundarios (AOS). Durante la tarde se fortalece el flujo canalizado del sureste y, ocasionalmente, los flujos regionales provenientes del sur de la entidad propician la formación de áreas de convergencia sobre la Ciudad de México, generando zonas con estabilidad en donde la velocidad del viento (vertical y horizontal) disminuye, permitiendo la acumulación y estancamiento de la contaminación. Estas zonas surgen con mayor frecuencia en el sur y centro de la ciudad, pueden permanecer durante minutos o horas, y desaparecen con el incremento de la velocidad del viento. Las masas de aire arrastradas por el flujo canalizado pueden encontrarse enriquecidas con  $O_3$  y otros contaminantes (García-Yee et al., 2018). La concentración de contaminantes y la intensa transformación química en estas zonas de convergencia suelen provocar incrementos importantes en las concentraciones de  $O_3$ , que pueden alcanzar niveles suficientes para la activación del Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA) en una o varias estaciones de monitoreo (ver la Sección 6.4.4 en el Capítulo 6 para una descripción de PPRECAA). La ubicación, extensión espacial y duración de las zonas de convergencia pueden variar en función de las características del viento en superficie y en capas superiores, de las propiedades de la capa límite y la presencia de sistemas meteorológicos de escala sinóptica. La Figura 2.4 muestra esquemáticamente el comportamiento de los vientos en la cuenca. La meteorología relacionada con la contaminación por  $O_3$  se describe ampliamente en de Foy et al. (2005, 2008) y Fast & Zhong (1998). Salcido et al. (2019) presentan un análisis detallado sobre la relación entre el viento superficial y los flujos de contaminantes en la Ciudad de México.



**Figura 2.4.** Patrones del campo de viento típicos durante la temporada seca-caliente (Mar-May) para los periodos (a) 4:00 a 7:00, (b) 8:00 a 14:00 y (c) 15:00 a 20:00 horas. El tamaño de los vectores indica la velocidad promedio del viento y se calcularon empleando los datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) para los años 2019 a 2021. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire, [www.aire.cdmx.gob.mx](http://www.aire.cdmx.gob.mx)).

Las mediciones meteorológicas en superficie proporcionan información sobre el comportamiento local de los vientos y la variabilidad de la contaminación, sin embargo, se requiere de observaciones a diferentes alturas para entender la dinámica atmosférica y sus efectos en la contaminación, como lo han mostrado estudios previos (Doran et al., 2007; Molina et al., 2007). En este sentido, la DMCA mantiene un monitoreo permanente de las condiciones meteorológicas dentro de la capa límite planetaria y en capas superiores empleando instrumentos para la medición del perfil vertical. Desafortunadamente, la operación de estos instrumentos requiere de personal especializado y de recursos económicos adicionales.

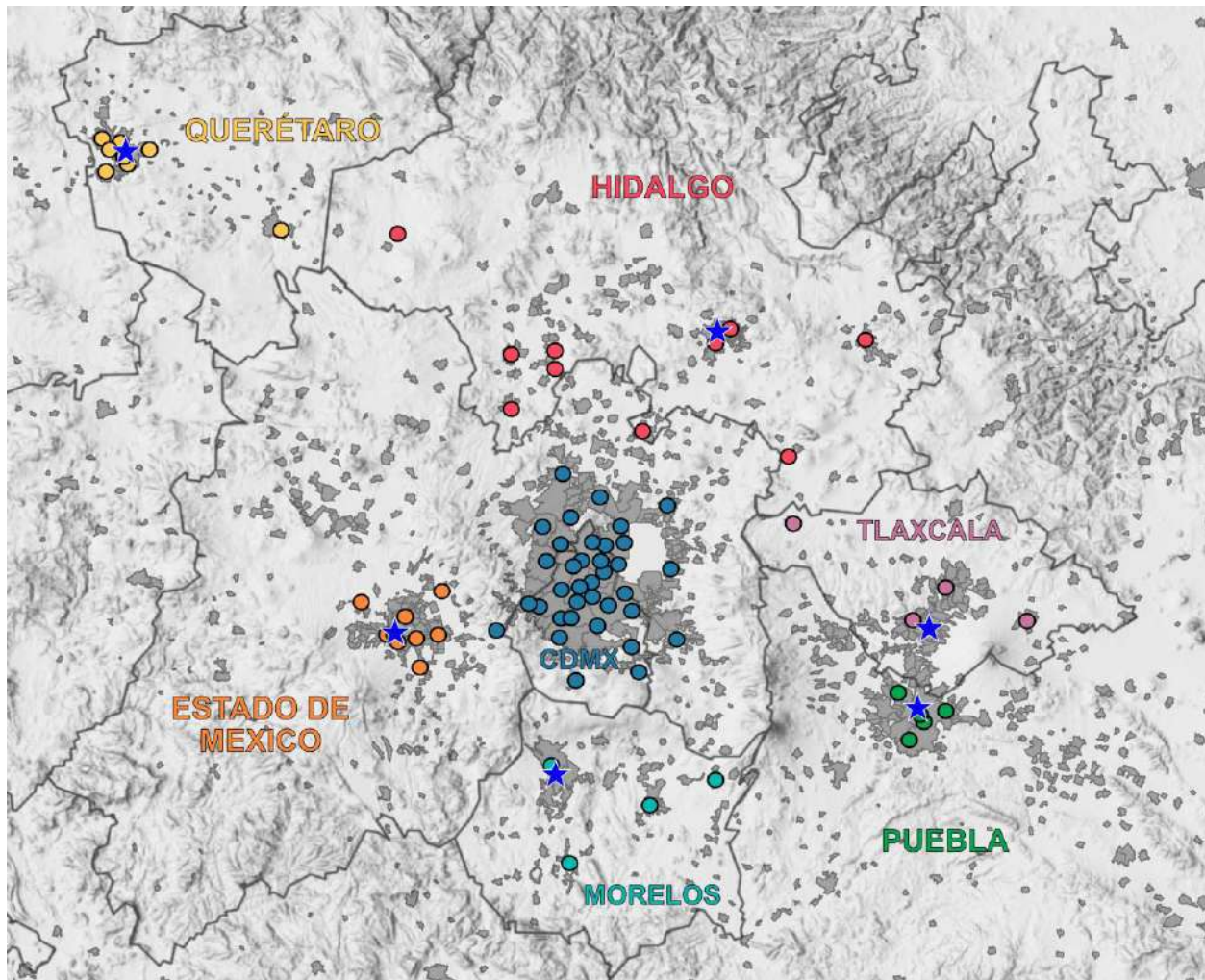
Durante los meses secos del año (Nov-May), los incendios forestales y agrícolas en los estados del centro y sur del país son frecuentes y representan una fuente importante de contaminantes atmosféricos (Ríos & Raga, 2018). Bajo ciertas condiciones meteorológicas, los incendios que ocurren en los bosques, pastizales y zonas agrícolas aledañas a la ZMVM pueden incrementar rápidamente los niveles de partículas finas. También, los grandes incendios que ocurren en las entidades más alejadas (como Michoacán o Guerrero) son una fuente adicional de contaminantes para la ciudad (Carabali et al., 2021) cuyo impacto dependerá de la dirección e intensidad de los flujos de viento a escalas meso y sinóptica. El impacto del transporte regional de las emisiones producidas por los incendios representa un reto para la gestión de la calidad del aire, principalmente durante la activación del PPRECAA.

Por otra parte, la ciudad experimenta un incremento en la temperatura cuyo origen y consecuencias aún no se han abordado con detenimiento desde la ciencia. Este tema se discute con mayor detalle en el Capítulo 4 de este documento.

## **2.2. El monitoreo de la calidad del aire en el resto de las entidades de la Megalópolis**

Las actividades de monitoreo en las entidades que rodean a la Ciudad de México se concentran en sus ciudades capitales y principales asentamientos urbanos. La Figura 2.5 muestra la distribución de las estaciones de monitoreo localizadas en las entidades que forman parte de la Megalópolis Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Morelos, Estado de México, y Ciudad de México). En esta sección solo se hace referencia a las estaciones automáticas (estaciones de monitoreo continuo) por su capacidad para proporcionar datos con una mayor resolución temporal sobre la calidad del aire. En el sitio web del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA, <https://sinaica.inecc.gob.mx>) y los Informes Nacionales de Calidad del Aire publicados por el INECC, es posible encontrar información detallada sobre la ubicación de las estaciones, disponibilidad de los datos y la situación actualizada de la calidad del aire. El propósito de esta sección es ofrecer un panorama general de la condición del monitoreo y la calidad del aire en la región a partir de la información disponible. Con el propósito de evaluar la situación actual de la contaminación, se realizó un análisis básico de los datos horarios empleando las bases de datos validadas disponibles en el SINAICA, los resultados se describen a continuación para cada entidad.



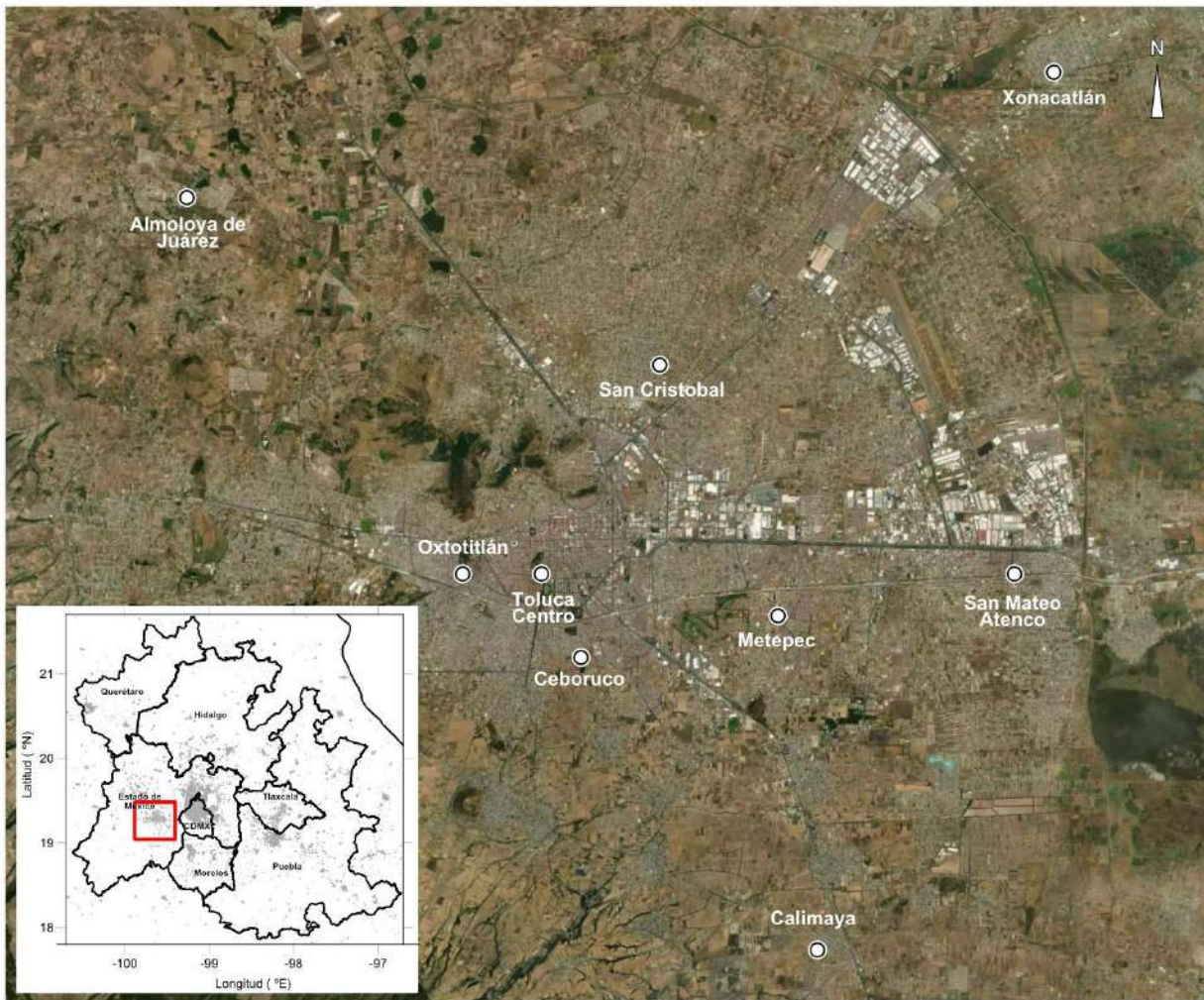


**Figura 2.5.** Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en los estados que integran la Megalópolis. Con colores se distinguen los sitios que son administrados por cada entidad, sólo se muestran las estaciones que se encontraban registradas en el SINAICA en 2022. La capital de cada estado se indica con una estrella en color azul. (Elaboración propia con datos del INEGI (2017) y SINAICA (INECC, s.f.); consultados el 25 de julio de 2022).

### 2.2.1. Estado de México

El Estado de México cuenta con dos conglomerados urbanos importantes, la zona metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) y el que han denominado zona metropolitana Cuautitlán-Texcoco (Gobierno del Estado de México, 2018). Ambas cuentan con redes automáticas para el monitoreo continuo de los contaminantes criterio. La red de la zona metropolitana del Valle de Toluca es operada por el gobierno del Estado de México, mientras que la red instalada en la zona metropolitana de Cuautitlán-Texcoco forma parte del SIMAT. De acuerdo con el SINAICA, en julio de 2022 la ZMVT contaba con nueve estaciones de monitoreo continuo: Calimaya, Ceboruco, Centro, Oxtotitlán, San Cristóbal, Metepec, Almoloya de Juárez, San Mateo Atenco y Xonacatlán (ver Figura 2.6). El sitio oficial de la red Calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (<https://rama.edomex.gob.mx/calidaddelaira>) despliega un mayor número de estaciones

para el reporte del índice local de calidad del aire, pero solo las descritas anteriormente informan al SINAICA y se incluyen en los reportes periódicos de la autoridad local.



**Figura 2.6.** Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo en la zona metropolitana del Valle de Toluca, Estado de México. Mapa actualizado a julio de 2022. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022; imagen: Google Earth).

Toluca de Lerdo es una ciudad que se asienta a una altitud de 2660 m sobre el nivel del mar en un valle rodeado de montañas donde la fisiografía tiene una influencia importante en la meteorología local y, por lo tanto, es determinante en el comportamiento de la calidad del aire. La urbanización se extiende a lo largo de un eje oriente-poniente, con un importante corredor industrial localizado al noreste. La configuración de la red de monitoreo corresponde con la distribución urbana, dentro del núcleo urbano se ubican seis estaciones, las tres restantes se encuentran en centros de población cercanos a la ciudad: Calimaya en el sur, Almoloya de Juárez en el noroeste y Xonacatlán en el noreste.

Los contaminantes PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> son los principales responsables del deterioro de la calidad del aire en la ZMVT, sus concentraciones superan con frecuencia los valores límite de las normas de calidad el aire para la protección a la salud. De acuerdo con el informe nacional de calidad del aire para 2019 (INECC, 2020), en 231 días se incumplió al menos una norma de salud ambiental en la ZMVT, lo que equivale al 63% de los días del año. La frecuencia con la que superó alguno de los valores límite establecidos por las normas para PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> fue de 52%, 32% y 24%, respectivamente. De acuerdo con el programa de mejoramiento de la calidad del aire local (ProAire 2018-2030) (Gobierno del Estado de México, 2018), los niveles de contaminación en las estaciones de la ZMVT suelen ser mayores que en las estaciones ubicadas en el valle de México, excepto para O<sub>3</sub>.

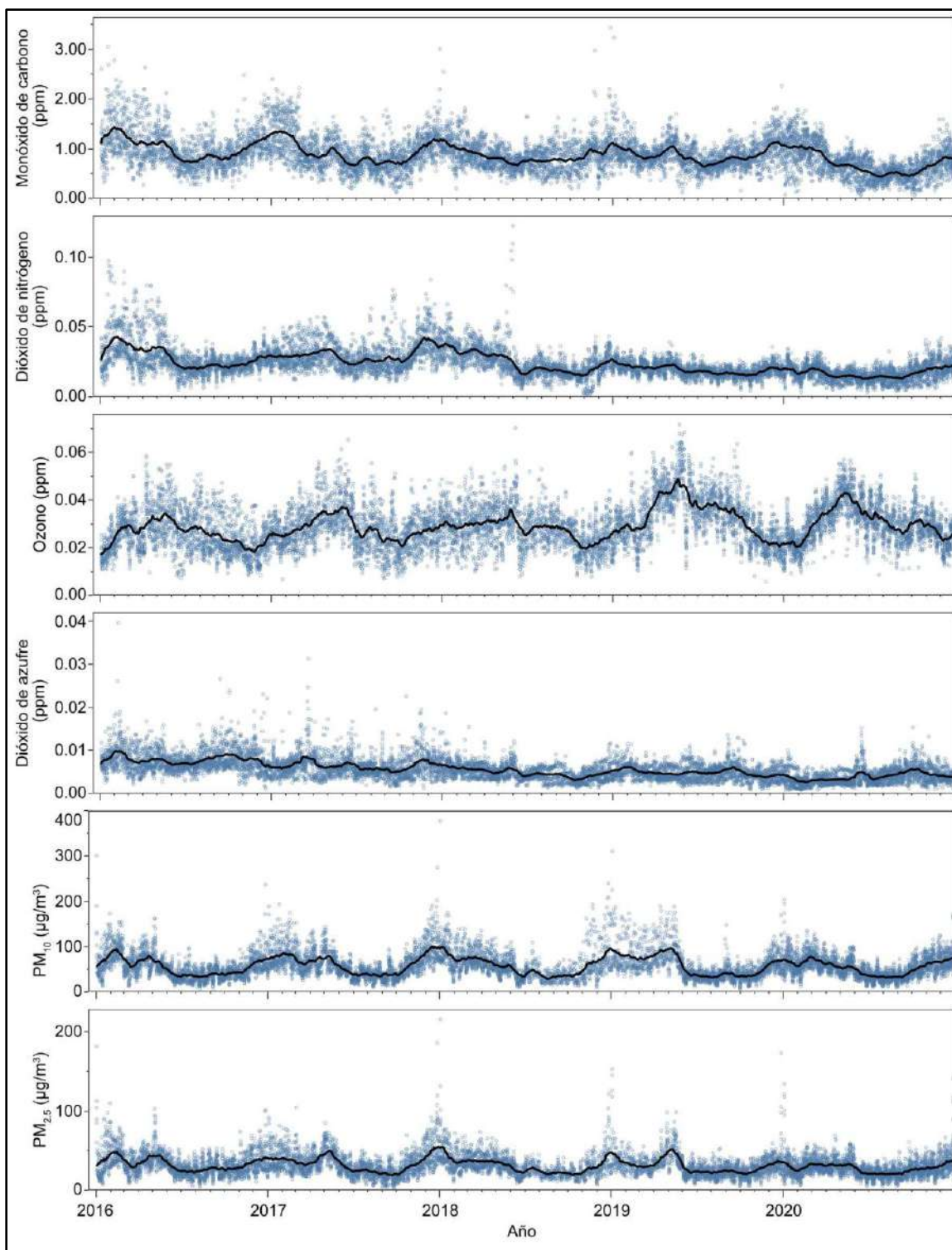
Las lluvias determinan la estacionalidad de la contaminación del aire en la ZMVT durante el año. Las menores concentraciones se presentan en los meses de lluvia (junio a septiembre). Los niveles mayores de partículas se observan generalmente entre diciembre y mayo, mientras que los de O<sub>3</sub> entre marzo y mayo. Las series de tiempo en el Anexo B muestran la tendencia de los promedios diarios de los contaminantes criterio entre 2016 y 2020.

Como se puede observar en la Figura 2.7, los contaminantes gaseosos muestran una tendencia descendente, excepto para el O<sub>3</sub>, el cual ha mostrado una tendencia ascendente en los últimos años. En el caso de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> no se aprecian cambios importantes en las tendencias.

De acuerdo con el ProAire 2018-2030 para la ZMVT, las auditorías técnicas realizadas al sistema local de monitoreo de la calidad del aire muestran una mejoría gradual en su operación y mantenimiento. Sin embargo, la red de monitoreo sufre de limitaciones presupuestales que le impiden garantizar el cumplimiento cabal en todas las actividades de monitoreo. Las auditorías previas también han recomendado revisar la representatividad espacial de los sitios de monitoreo. El refaccionamiento y equipos proporcionados por el Programa de Reforzamiento permitieron atender parcialmente algunas de las carencias de la red.

La situación de la calidad del aire en la zona metropolitana de Cuautitlán-Texcoco se discutió anteriormente en la descripción de la calidad del aire en la ZMVM (Sección 2.1).





**Figura 2.7.** Series de tiempo de los promedios diarios de los contaminantes criterio en las estaciones de la zona metropolitana del Valle de Toluca. Los círculos corresponden a los promedios diarios reportados en las diferentes estaciones de monitoreo, la línea negra continua indica el promedio móvil de 30 días de todas las estaciones. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022).

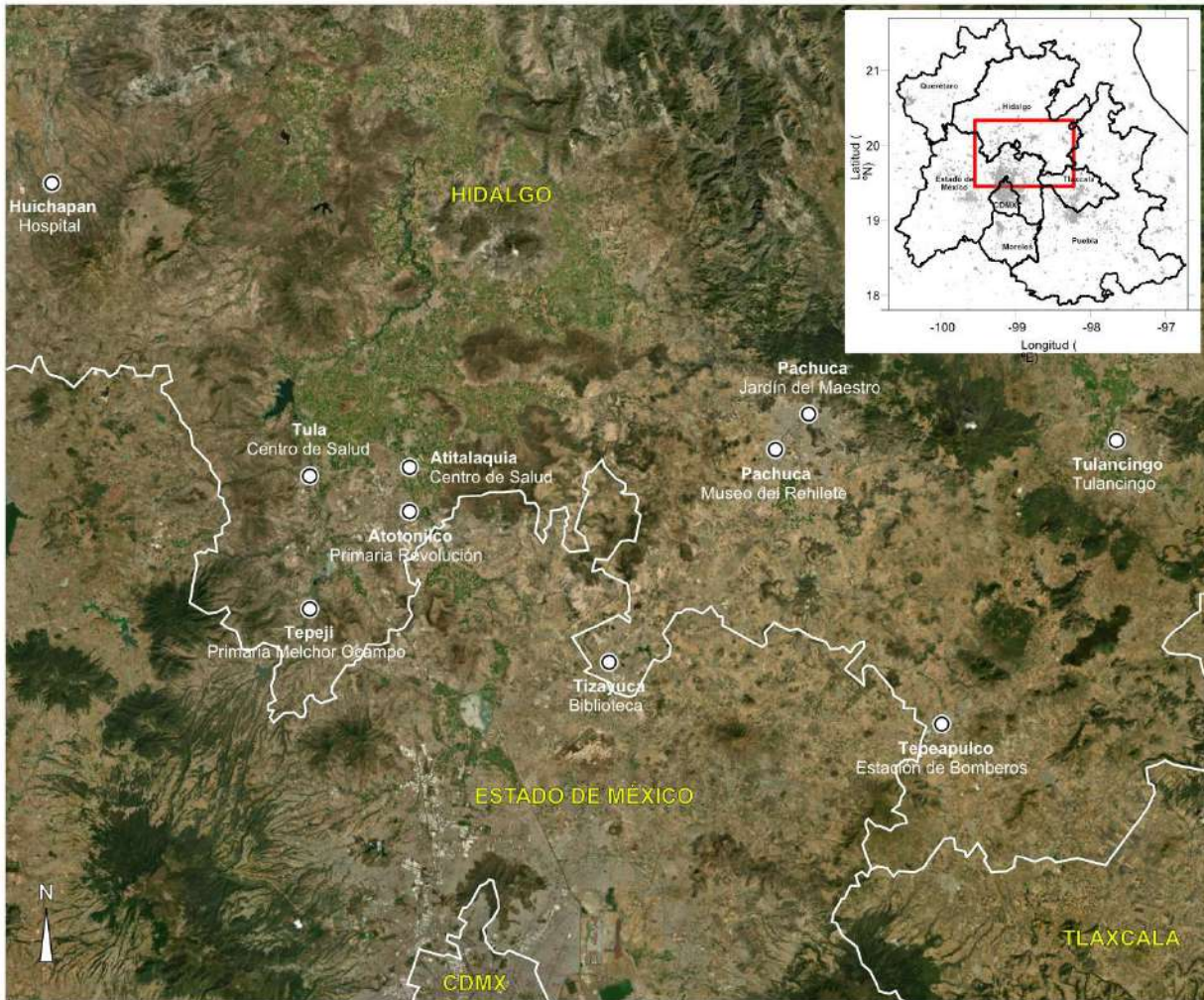
### 2.2.2. Hidalgo

La red de monitoreo de la calidad del aire del estado de Hidalgo cubre una parte importante del altiplano hidalguense al sur de del estado, incluyendo sitios de monitoreo en el Valle del Mezquital, la Comarca Minera, el Valle de Tulancingo, la cuenca de México y la Altiplanicie Pulquera. En el altiplano hidalguense se encuentra la ciudad capital, Pachuca de Soto, y los principales asentamientos urbanos e industriales de la entidad. Con propósitos de gestión ambiental, la región se organiza en tres cuencas atmosféricas: Tula, Pachuca y Tulancingo. Dichas cuencas fueron delimitadas conforme a la densidad de población, extensión de asentamientos urbanos, actividad industrial, configuración geográfica, meteorología y clima.

Pachuca y Tulancingo son las ciudades más importantes del estado, la primera cuenta con dos estaciones de monitoreo, mientras que la segunda solo con una. De acuerdo con el INECC, al mes de julio de 2022 se encontraban en operación estaciones en los centros urbanos de los municipios de Tula de Allende, Atitalaquia, Atotonilco, Tepeji del Río, Tizayuca, Tepeapulco y Huichapan. A pesar de que existen algunas estaciones de monitoreo manual, la zona serrana, que cubre la mayor parte del territorio del estado, está subrepresentada por el monitoreo. La ubicación de cada una de las estaciones de monitoreo se puede observar con detalle en la Figura 2.8.

El clima seco domina una porción importante del Valle del Mezquital y la Comarca Minera, por lo que son frecuentes las tolvaneras durante el periodo de estiaje. Existen extensiones agrícolas importantes dominadas por el cultivo de riego, durante los preparativos para la siembra y el tratamiento de los residuos de la cosecha estas áreas suelen convertirse en una fuente importante de polvo. La presencia de vientos intensos provenientes del norte es frecuente en la Comarca Minera, principalmente entre los meses de junio y octubre, lo que suele provocar tolvaneras en la región, de hecho, a la ciudad de Pachuca se le conoce como la *Bella Airosa* por este motivo. A pesar de esto, el inventario local de emisiones de contaminantes a la atmósfera no refleja una contribución importante de las fuentes agropecuarias y naturales a la contaminación por partículas suspendidas (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2016). Por otra parte, existe un intenso crecimiento urbano al sur de la entidad y no se descartan impactos adicionales en la calidad del aire por las actividades de urbanización y construcción de viviendas en varios municipios.

La parte sur del estado de Hidalgo colinda con el Estado de México y se ubica cerca de la Ciudad de México, por lo que suelen compartir las mismas masas de aire. Durante la mayor parte del año es frecuente observar flujos de viento provenientes del norte del altiplano, que durante las mañanas transportan masas de aire hacia la Ciudad de México. La detección frecuente de incrementos en SO<sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo de la Ciudad de México se relaciona con el transporte de las emisiones generadas en la región de Tula-Tepeji en la que se asientan una refinería, una planta termoeléctrica y varias fábricas de cemento (de Foy et al., 2009; Gobierno del Estado de Hidalgo, 2016; SEDEMA, 2018).



**Figura 2.8.** Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo en el estado de Hidalgo. Las estaciones se indican acorde al municipio en que se ubican y al nombre asignado a cada una por las autoridades ambientales locales. Mapa actualizado a julio de 2022. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022; imagen: Google Earth).

De acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire de 2019 (INECC, 2020), en ese año se superó el valor límite para al menos un contaminante criterio en la mayoría de los diferentes asentamientos urbanos, excepto en la ciudad de Tula donde no se excedió ningún límite normado. En Atitalaquia el 33% de los días del año superaron al menos una norma de calidad del aire, 29% en Atotonilco, 16% en Pachuca y Tizayuca, 15% en Tepeji del Río, 12% en Tepeapulco, 6% en Huichapan y 4% en Tulancingo. En Pachuca, Tulancingo, Huichapan y Tepeji del Río, el contaminante que con mayor frecuencia incumplió la norma fue el  $O_3$ . Mientras que en Tizayuca, Atitalaquia, Atotonilco y Tepeapulco fueron las partículas suspendidas, principalmente las  $PM_{10}$ . Resulta extraño que Tula -una de las ciudades con mayor descarga de contaminantes al aire- cumpla con los niveles de calidad del aire ambiente de acuerdo con la normatividad vigente.

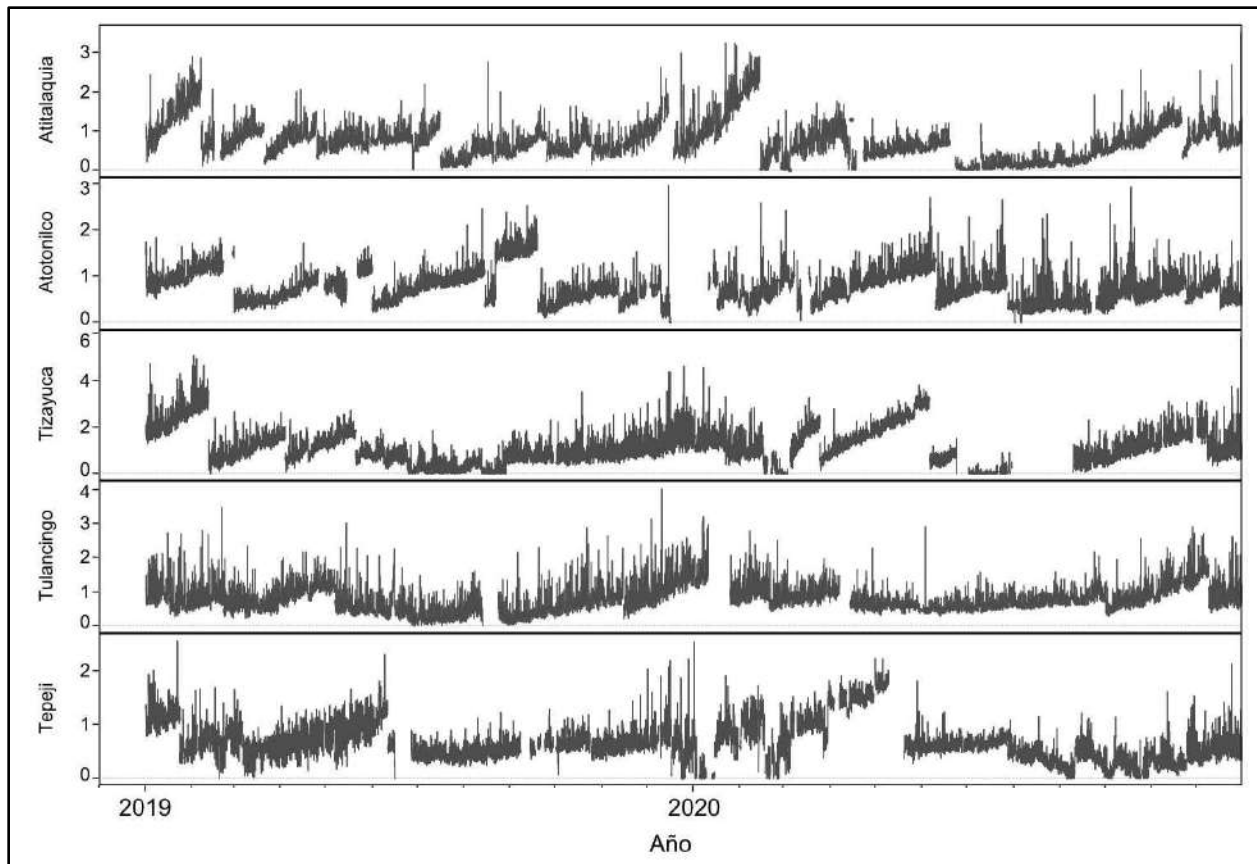


La importancia del corredor industrial Tula-Tepeji como fuente de contaminantes atmosféricos a escala local y regional, es un tema constante de discusión entre la comunidad científica y los responsables de la gestión ambiental (de Foy et al., 2009; Rivera et al., 2009; Almanza et al., 2012; Melgar-Paniagua, 2013; García-Escalante, 2014; Vega et al., 2021; ICM, 2021; MCE2-INE, 2009). De acuerdo con el documento *Calidad del Aire en la Cuenca Atmosférica de Tula* (SEMARNAT, 2020), la cuenca está integrada por 12 municipios, en ella se asientan 58 empresas locales y federales. Es sede de una refinería, dos plantas de generación eléctrica (una termoeléctrica convencional y una de ciclo combinado a gas natural), seis cementeras, cuatro caleras, industrias del ramo metalmecánica y química, entre otras. Ante la opinión pública esta región se identifica como una de las zonas más contaminadas del país (Monroy, 2019; EFE, 2020). Sin embargo, los resultados del monitoreo de la calidad del aire no parecen reflejar la magnitud real del problema. Los datos muestran niveles de contaminación similares a los reportados en otras áreas urbanas de la Megalópolis. En 2022 se realizó una campaña intensiva de monitoreo de la calidad del aire en la región financiada con recursos administrados por la CAME (INECC, 2022), los resultados serán importantes para identificar objetivamente la magnitud del problema, pero también para que las autoridades responsables del monitoreo puedan evaluar la capacidad de su red para caracterizar el problema de deterioro de la calidad del aire en el Estado de Hidalgo. Ver Sección 4.3.4.1 en el Capítulo 4 para obtener más información sobre la calidad del aire en el Complejo industrial Tula-Tepeji.

Como se puede observar en las figuras del Anexo B, las concentraciones de O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> presentan una estacionalidad clara, con máximos de O<sub>3</sub> entre abril y mayo, mientras que para las partículas suspendidas los máximos suelen presentarse durante la temporada seca (Nov-May).

Al revisar las bases de datos se encontraron indicios de posibles problemas operativos en la red de monitoreo atmosférico. Por ejemplo, para el caso de CO, como se observa en la Figura 2.9, varios sitios de monitoreo presentan tendencias ascendentes que abruptamente caen después de un periodo de tiempo. Este comportamiento anómalo sugiere posibles problemas con la estabilidad de la línea base del instrumento o deficiencias en el aseguramiento de la calidad de las mediciones. Estos problemas aparentemente no fueron identificados durante los procesos de revisión y validación de datos realizados por los técnicos de la misma red y los del INECC que manejan el SINAICA. La presencia de datos con posibles errores y deficiencias en la calidad se identificó en todos los contaminantes, pero fueron evidentes para aquellos contaminantes con concentraciones cercanas al límite de detección de los instrumentos. Obviamente, datos con errores de este tipo podrían no ser de utilidad para las necesidades de la gestión de la calidad del aire.

Las evaluaciones realizadas por el INECC mostraron indicios de problemas operativos en la red de monitoreo atmosférico del Estado de Hidalgo (INECC, 2016a, b), los cuales inclusive fueron mencionados en el ProAire 2016-2024 de la entidad (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2016) y el ProAire de la Megalópolis (SEMARNAT, 2017); sin embargo, los problemas persisten. Destacaron la falta de refacciones y consumibles para la operación y mantenimiento de los equipos, y la necesidad de actualizar algunos instrumentos que se encontraban cerca del término de su vida útil. También se recomendó reubicar algunas estaciones de monitoreo a sitios más representativos. Algunos de estos aspectos fueron atendidos recientemente a través del Programa de Reforzamiento, con el suministro de 17 equipos y refacciones para el mantenimiento de la red.

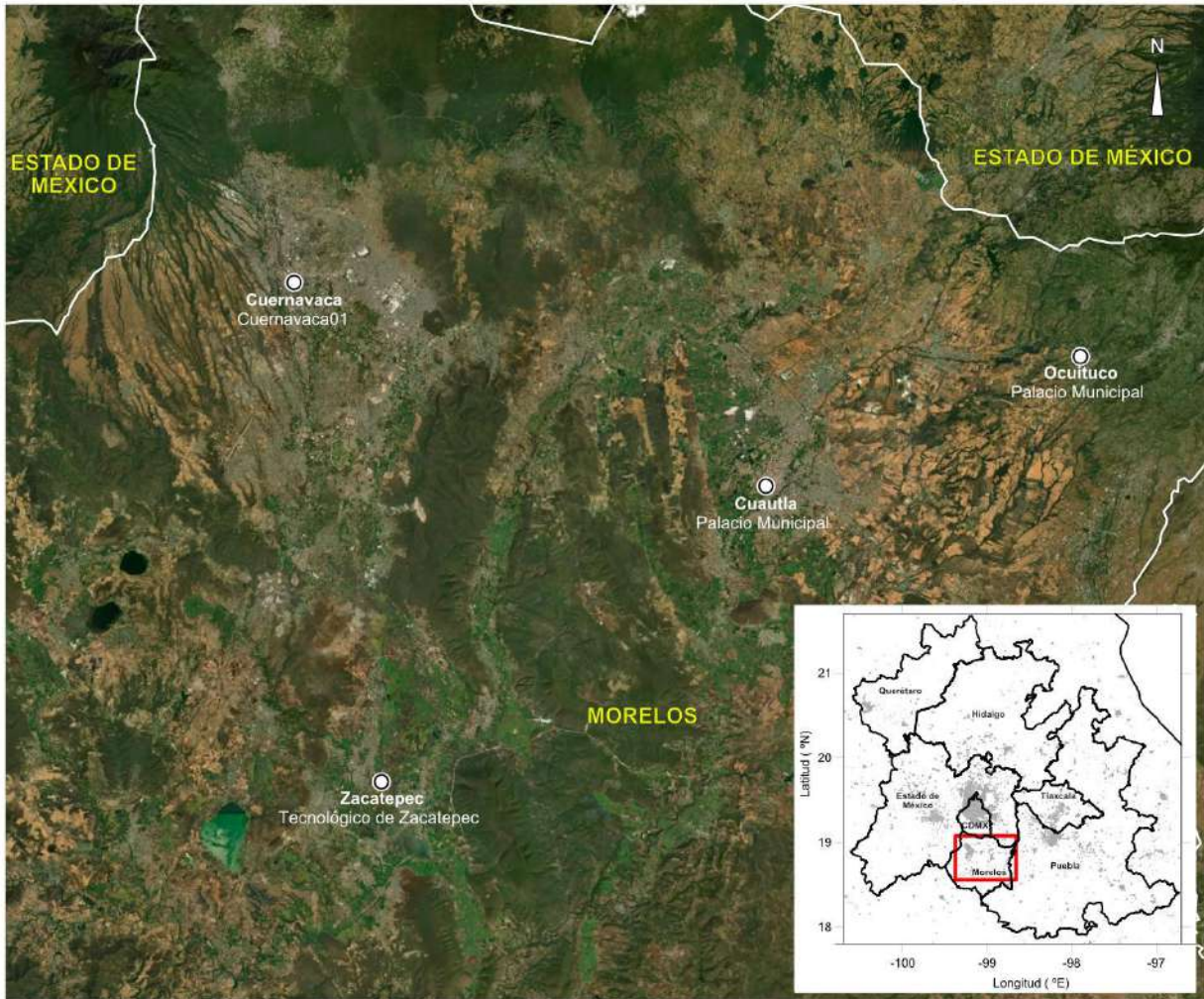


**Figura 2.9.** Series de tiempo de los promedios horarios de CO en algunos de los sitios de monitoreo de la calidad del aire en el estado de Hidalgo para el periodo 2019-2020. En todos los sitios se presentan tendencias ascendentes que abruptamente caen después de un periodo de tiempo. Este comportamiento anómalo sugiere problemas en la operación y mantenimiento de los monitores. Las concentraciones se encuentran en unidades de partes por millón (ppm). (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022).

### 2.2.3. Morelos

El estado de Morelos se ubica en la porción sur de la Megalópolis, se caracteriza por una topografía compleja debido a la interacción entre el Eje Neovolcánico, la serranía del sur de Puebla y la Sierra Madre del Sur. Tiene un clima cálido con una temporada de lluvias entre junio y septiembre, alcanzando una precipitación promedio anual de 1045 mm. La mayor parte del territorio corresponde a suelo de uso no forestal, donde la actividad agrícola cubre el 36.7% de la superficie del estado. Los asentamientos urbanos cubren 4.5% del territorio. Las dos principales zonas urbanas son Cuernavaca y Cuautla.





**Figura 2.10.** Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo en el estado de Morelos. Las estaciones se indican acorde al municipio en que se ubican y al nombre asignado a cada una por las autoridades ambientales locales. La primera línea en la etiqueta indica el municipio la segunda el nombre de la estación. Mapa actualizado a julio de 2022. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022; imagen: Google Earth).

El monitoreo de la calidad del aire en Morelos se realiza de manera intermitente desde el año 2000. La entidad cuenta con cuatro estaciones de monitoreo, dos de ellas están ubicadas en las ciudades de Cuernavaca y Cuautla. La estación de Ocuilco está orientada al monitoreo de las emisiones asociadas a la actividad del volcán Popocatepetl, mientras que la estación de Zacatepec, a la evaluación del impacto de las emisiones producidas por la industria azucarera de la región. La ubicación de las estaciones de monitoreo se presenta en el mapa de la Figura 2.10.

La topografía compleja en el poniente de la entidad presenta retos para el monitoreo atmosférico debido a la influencia que tiene en la meteorología y el movimiento de las masas de aire. Además, la región se encuentra expuesta a la influencia del transporte regional de contaminantes generados en Toluca y la ZMVM. Salcedo et al. (2012) realizaron dos campañas de monitoreo en marzo de

2007 y marzo de 2009 con el objetivo de hacer un diagnóstico preliminar de la calidad del aire en diversas localidades de Morelos, así como para entender los procesos responsables de la contaminación por O<sub>3</sub> en la entidad. Los hallazgos de este estudio proporcionaron en su momento una descripción útil de la situación general de la calidad del aire en la región, y expusieron los retos y oportunidades para el monitoreo, la mejora de los inventarios de emisiones y las necesidades de investigación. A pesar de que este estudio se realizó hace más de una década, sus resultados y recomendaciones continúan vigentes. Con respecto al monitoreo de la calidad el estudio puntualizó lo siguiente:

- La urgencia de establecer una red funcional de monitoreo de la calidad del aire en la entidad que sea capaz de generar datos confiables para identificar la tendencia y variabilidad de los contaminantes y su relación con los procesos meteorológicos.
- La necesidad de ampliar la red de monitoreo hacia otros asentamientos urbanos con alta densidad poblacional, como Xochitepec, Temixco, Jiutepec y Yautepec, y aquellos ubicados entre Cuernavaca y Cuautla.
- La falta de sitios de monitoreo en áreas rurales y agrícolas para determinar los impactos del O<sub>3</sub> en la vegetación.
- Falta de información sobre la abundancia y propiedades fisicoquímicas de las partículas atmosféricas en la entidad.

Una de las deficiencias más importantes de la red de monitoreo de Morelos es la baja captura de datos. Con excepción de la estación ubicada en Cuernavaca, el resto presenta una importante ausencia de mediciones entre 2016 y 2019. Las gráficas correspondientes en el Anexo B muestran las series de tiempo con los promedios diarios y en ellas es notable la frecuente falta de datos. Aun cuando no es el propósito de este documento realizar una evaluación de los datos, es importante mencionar que durante la revisión se observaron indicios de posibles deficiencias en su calidad, por ejemplo, derivas en la línea base, problemas de calibración, revisión y validación insuficiente, entre otros.

De acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire 2019 (INECC, 2020), ese año se superaron los valores límites de la NOM para O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en varias estaciones de monitoreo de la entidad. De acuerdo con los datos, aumentaron el número de días con una calidad del aire desfavorable en Cuernavaca, Zacatepec y Ocuituco, con respecto a 2018. Cuernavaca pasó de 15 a 43 días, mientras que Zacatepec pasó de 54 a 64 días y Ocuituco de 19 a 64 días. De acuerdo con las autoridades ambientales este incremento se debió a una mayor captura de datos por la instalación de nuevos equipos de monitoreo a través del Programa de Fortalecimiento del gobierno Federal.

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en Morelos 2018-2027 (ProAire 2018-2027) (Gobierno del Estado de Morelos, 2019) reconoce las condiciones deficientes de la red de monitoreo, y lo atribuye a la falta de recursos para el mantenimiento preventivo y correctivo de las estaciones y sus equipos. Dicho documento contiene también recomendaciones derivadas de revisiones técnicas realizadas por terceros, incluyendo la autoridad federal. Algunas de estas recomendaciones son las siguientes:

- En 2014, el INECC calificó la operación de la red como intermitente durante los ocho años previos, con datos insuficientes para la evaluación de las normas de calidad del aire para la protección de la salud pública.
- La red de monitoreo debe incluir estaciones en asentamientos urbanos con más de quinientos mil habitantes, zonas afectadas por emisiones industriales y en sitios con emisiones anuales a la atmósfera que superen las veinte mil toneladas de contaminantes criterio de origen primario.
- El sistema de monitoreo del estado carece de instalaciones, equipamiento y personal especializado para garantizar su operación adecuada.
- Existe falta de refacciones, consumibles y accesorios para los equipos de monitoreo.
- Existen deficiencias en la limpieza, verificación y validación de datos.

Ante esta situación, el ProAire local 2018-2027 contempla la Medida 6.3 “*Fortalecimiento del Sistema de Monitoreo Atmosférico del Estado de Morelos*” para subsanar los problemas mencionados. Esta medida incluye doce acciones que, de acuerdo con el calendario propuesto, no han sido ejecutadas. Hasta 2021 los avances eran limitados. Debía haberse diseñado e implementado ya un programa de control y aseguramiento de la calidad de las mediciones, así como haber expandido la red. Entre 2018 y 2022, a través del Programa de Reforzamiento se proporcionaron a la entidad refacciones diversas, sensores meteorológicos y equipos para el monitoreo de contaminantes criterio, calibración y adquisición de datos.

#### **2.2.4. Puebla**

El estado de Puebla se localiza al sureste de la meseta central, entre la Sierra Nevada y la Sierra Madre Oriental. La superficie estatal forma parte de las provincias fisiográficas: Sierra Madre del Sur, Eje Neovolcánico, Sierra Madre Oriental y Llanura Costera del Golfo Norte. La entidad cuenta con una geografía diversa, al suroeste está dominada por sierras, mientras que al centro predominan llanuras y pequeñas elevaciones que separan a las sierras en la dirección noroeste-sureste. Los extremos de la región central están enmarcados por las grandes elevaciones donde destacan los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl al oeste, y el Pico de Orizaba o Citlaltépetl al este. En el norte de la entidad predominan lomeríos. El 55% del territorio es montañoso con génesis tectónica o volcánica. Posee una importante variabilidad climática, sin embargo, el clima predominante es el templado subhúmedo.

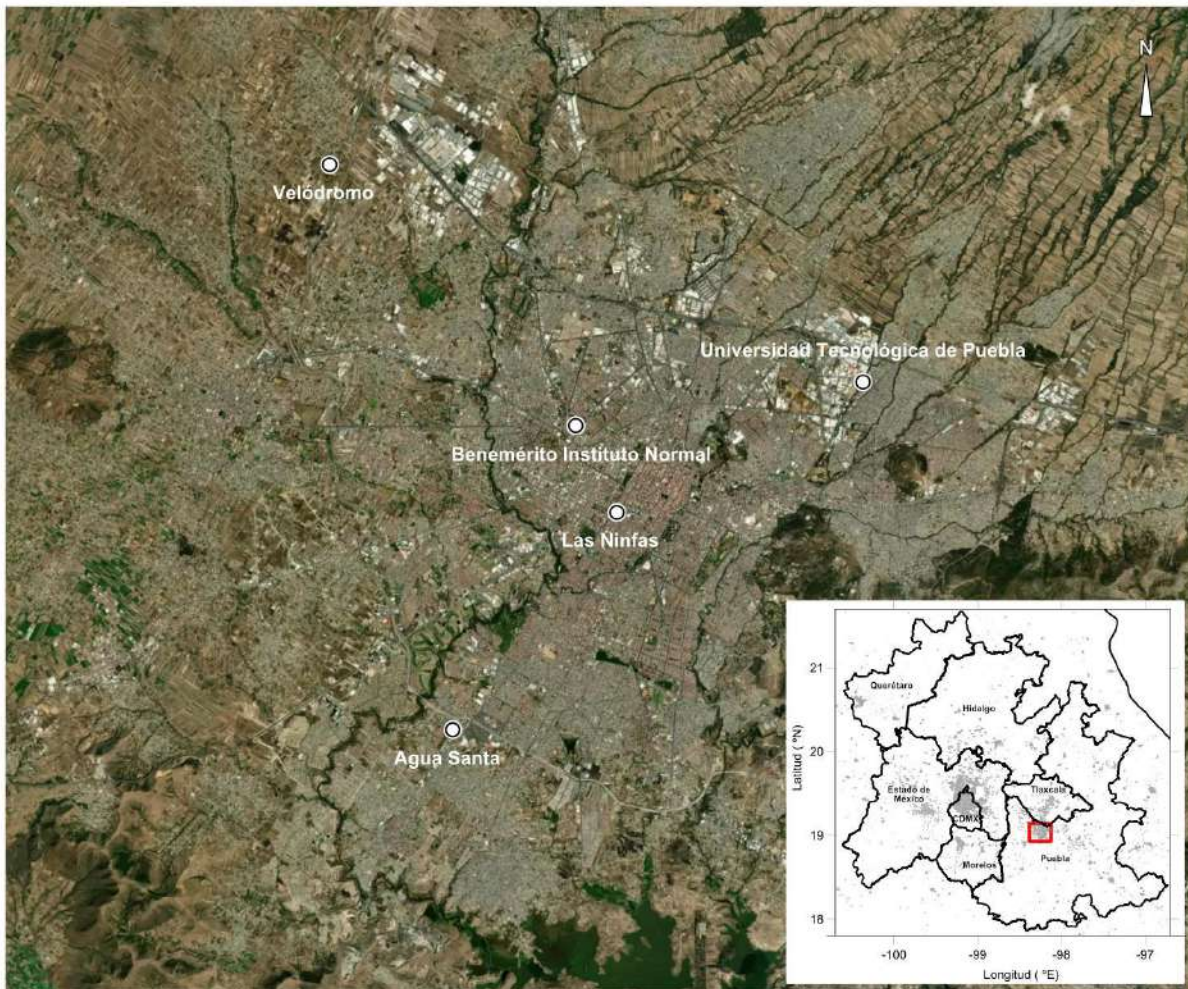
Aproximadamente el 70% del territorio estatal es apto para uso agrícola. De éste, el 55%, ubicado en el centro y sureste de la entidad, es apto para la agricultura tecnificada, debido a que el suelo es plano o con pequeñas ondulaciones; el 15% restante es apto para la agricultura mediante tracción animal y se ubica indistintamente en todo el Estado.

La ciudad de Puebla de Zaragoza es la capital y la región urbana más importante de la entidad y forma parte del corredor urbano interestatal conocido como Zona Metropolitana de Puebla-Tlaxcala que comprende 19 municipios del estado de Puebla y 20 del estado de Tlaxcala. Esta región concentra más de tres millones de habitantes y se localiza al centro de la entidad, es la cuarta zona metropolitana más poblada del país. Existen otros dos conglomerados urbanos con poco



menos de 500 mil habitantes que corresponden a las zonas metropolitanas de Tehuacán al sureste, y Teziutlán al noreste. Los centros urbanos concentran más del 70% de la población del estado.

El monitoreo de la calidad del aire se limita a la zona metropolitana de Puebla, aunque se han hecho esfuerzos por extender el monitoreo de la calidad del aire a otras regiones de la entidad. La Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) inició operaciones en el año 2000 con cuatro estaciones configuradas para el medir continuamente contaminantes criterio. En 2012 se incorporó la estación Velódromo en el municipio de Coronango, al noroeste de la zona metropolitana. La ubicación de los sitios se muestra en el mapa de la Figura 2.11.



**Figura 2.11.** Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo en la zona metropolitana de Puebla, Puebla. Mapa actualizado a julio de 2022. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022; imagen: Google Earth).

De acuerdo con los resultados del monitoreo atmosférico, el  $O_3$  y las partículas son los contaminantes que con mayor frecuencia superan los valores límite de las NOM. Al igual que en las otras entidades, los mayores niveles de contaminación se observan entre febrero y mayo. De

acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire de 2019 (INECC, 2020), ese año no se cumplieron las normas de calidad del aire para O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Para O<sub>3</sub>, 40 días incumplieron con la norma, mientras que para el promedio de 24 horas de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, se registraron incumplimientos en 72 y 14 días, respectivamente. El promedio anual establecido por las normas de calidad del aire para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> se superó en al menos una estación de monitoreo.

Los datos a partir del año 2000 no muestran una tendencia clara en ninguno de los contaminantes, esto a pesar del crecimiento que ha experimentado la zona metropolitana de Puebla en las últimas dos décadas. Este resultado es congruente con lo reportado en el Informe Nacional de Calidad del Aire (INECC, 2020). En las figuras correspondientes en el Anexo B se muestran las series de tiempo de los promedios diarios para los diferentes contaminantes durante el periodo 2016 a 2020. En este periodo fueron evidentes algunos aspectos que sugieren problemas operativos, por ejemplo, las series de tiempo de CO mostraron, como en el caso de las estaciones de monitoreo del Estado de Hidalgo, cambios abruptos en las series de tiempo. Varias de las estaciones de monitoreo exhibieron inconsistencias en las concentraciones medidas de NO<sub>2</sub>, por ejemplo, durante el primer semestre de 2018 la estación Ninfas reportó concentraciones inusualmente bajas, así como también lo hizo la estación Agua Santa a mediados de 2020. Una situación similar se observó para los datos de O<sub>3</sub>. En el caso del SO<sub>2</sub>, la situación es aún más compleja, ya que se observaron problemas con diferentes patrones: periodos sin cambios en las lecturas (por ejemplo, segundo semestre de 2016 en la estación Benemérito Instituto Normal), cambios abruptos en las mediciones (por ejemplo, estación en la Universidad Tecnológica), o cambios significativos en las tendencias (por ejemplo, 2019 en Agua Santa). Si bien, no es el propósito de este documento realizar un análisis detallado de los datos, es necesario considerar que la calidad deficiente de los datos podría dificultar su uso para propósitos de la gestión de la calidad del aire`.

La evaluación técnica realizada por el INECC en 2016 (INECC, 2016) identificó aspectos del monitoreo que requerían de una revisión inmediata y emitió las siguientes recomendaciones:

- Reubicar las estaciones Velódromo, Agua Santa y Benemérito Instituto Normal del Estado.
- Revisar obstrucciones y obstáculos para el libre flujo de aire en las estaciones Ninfas, Agua Santa y Benemérito Instituto Normal del Estado.
- Adquisición oportuna de equipo y mezclas de gases de calibración.
- Establecer un programa de calibración para los monitores de partículas.
- Reemplazar los instrumentos empleados para el monitoreo de las variables meteorológicas.
- Contar con personal suficiente y capacitado para las actividades que comprende el proceso de monitoreo.
- Establecer un registro documental de las actividades de mantenimiento y operación realizadas en la red.

Algunas de estas observaciones se atendieron con la entrega de equipos y refaccionamiento a través del Programa de Reforzamiento.

### 2.2.5. Querétaro

El estado de Querétaro se ubica en el centro-este del país, colinda al norte y noreste con San Luis Potosí, al este con Hidalgo, al sur con Michoacán, al norte y oeste con Guanajuato, y al sureste con el Estado de México. Su capital, Santiago de Querétaro, se localiza al suroeste de la entidad y junto con los municipios Corregidora, Huimilpan y El Marqués, forman la Zona Metropolitana de Querétaro. Con la incorporación a la región metropolitana del municipio de Apaseo el Alto, Guanajuato, pasó a constituirse como una metrópoli interestatal (SEDATU, 2018). La ciudad de San Juan del Río, al sureste de la entidad, es el segundo centro urbano más importante del estado, el corredor que une ambas ciudades es una región con un sustancial proceso de urbanización. El comercio y la manufactura son las actividades económicas más importantes en la zona metropolitana.

La superficie de la entidad forma parte de las provincias: Sierra Madre Oriental, Mesa Central y Eje Neovolcánico. La zona noreste está conformada por sierras y lomeríos, en las regiones centro y norte continua la presencia de sierras con forma de meseta, y en la parte central hay dos sierras separadas por llanuras. El clima en la región es cálido y semicálido al norte, seco y semiseco en el centro, y templado al sur.

El monitoreo de la calidad del aire con equipo automático inició en 2011 y se ha concentrado en la región urbana. Hasta 2019 contaba con seis estaciones de monitoreo en la Zona Metropolitana de Querétaro y una en San Juan del Río. En 2020 se agregó la estación Centro Cultural. En 2021 se incorporaron las estaciones Epigmenio González y Josefa Vergara, además se reubicaron los sitios de Carrillo Puerto y El Marqués. En la Figura 2.12 se muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo actualizada a julio de 2022.

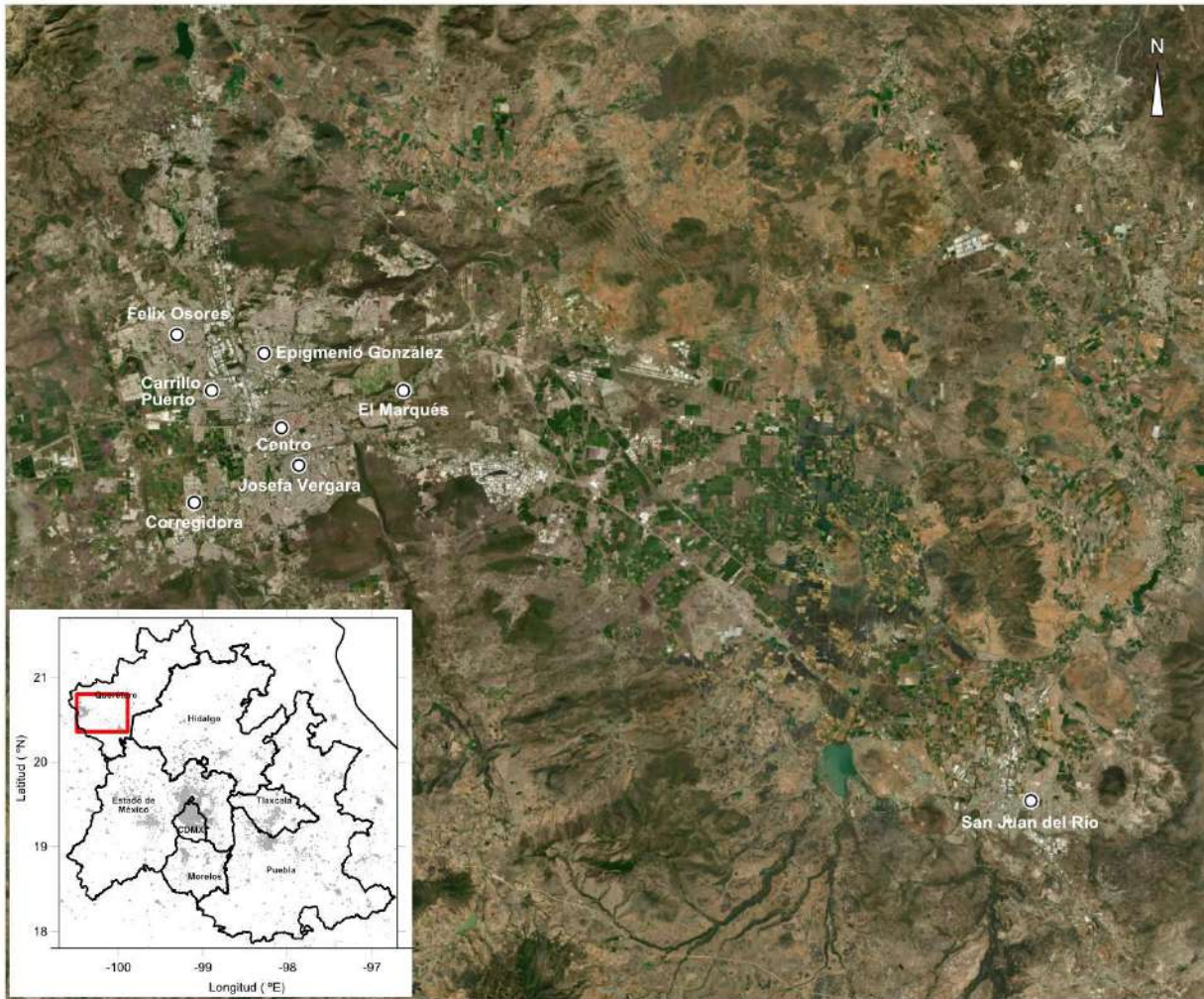
De acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire de 2019 (INECC, 2020), las concentraciones de  $O_3$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  superaron los valores límite de las normas de calidad del aire ese año. El contaminante que tuvo una mayor contribución al deterioro de la calidad del aire fue  $PM_{10}$ , mientras que en El Marqués y San Juan del Río fue el  $O_3$ . En Santiago de Querétaro se registraron 108 días con mala calidad del aire, en El Marqués 12 días y en San Juan del Río 16 días.

Las mayores concentraciones de  $O_3$  se observaron entre marzo y mayo, mientras que las de partículas ocurrieron a lo largo de la temporada seca (noviembre a mayo). La ausencia de datos durante periodos prolongados se observó en varias de las estaciones de monitoreo. Además, se identificaron deficiencias en la calidad de los datos, principalmente en las mediciones de  $CO$ ,  $SO_2$  y  $NO_2$ .

La operación de varias estaciones había sido discontinua desde su inicio debido a problemas relacionados con fallas en algunos servicios y limitaciones en recursos e infraestructura (SEDESU, 2014). La ausencia de datos dificultaba la identificación de tendencias y patrones estacionales. Reconociendo lo anterior, en 2020 las autoridades locales iniciaron esfuerzos para mejorar el trabajo que realizaba la red de monitoreo. Dentro de los aspectos que sometieron a revisión se encontraron el reemplazo de equipo obsoleto, la reubicación de algunas estaciones poco representativas, el incremento del personal operativo, la adquisición de refacciones y consumibles, la implementación de un taller para el mantenimiento y calibración de los equipos, así como el



desarrollo de un programa de aseguramiento y control de la calidad. Se espera que los resultados de este esfuerzo se vean reflejados en la calidad de los datos a partir de 2021.



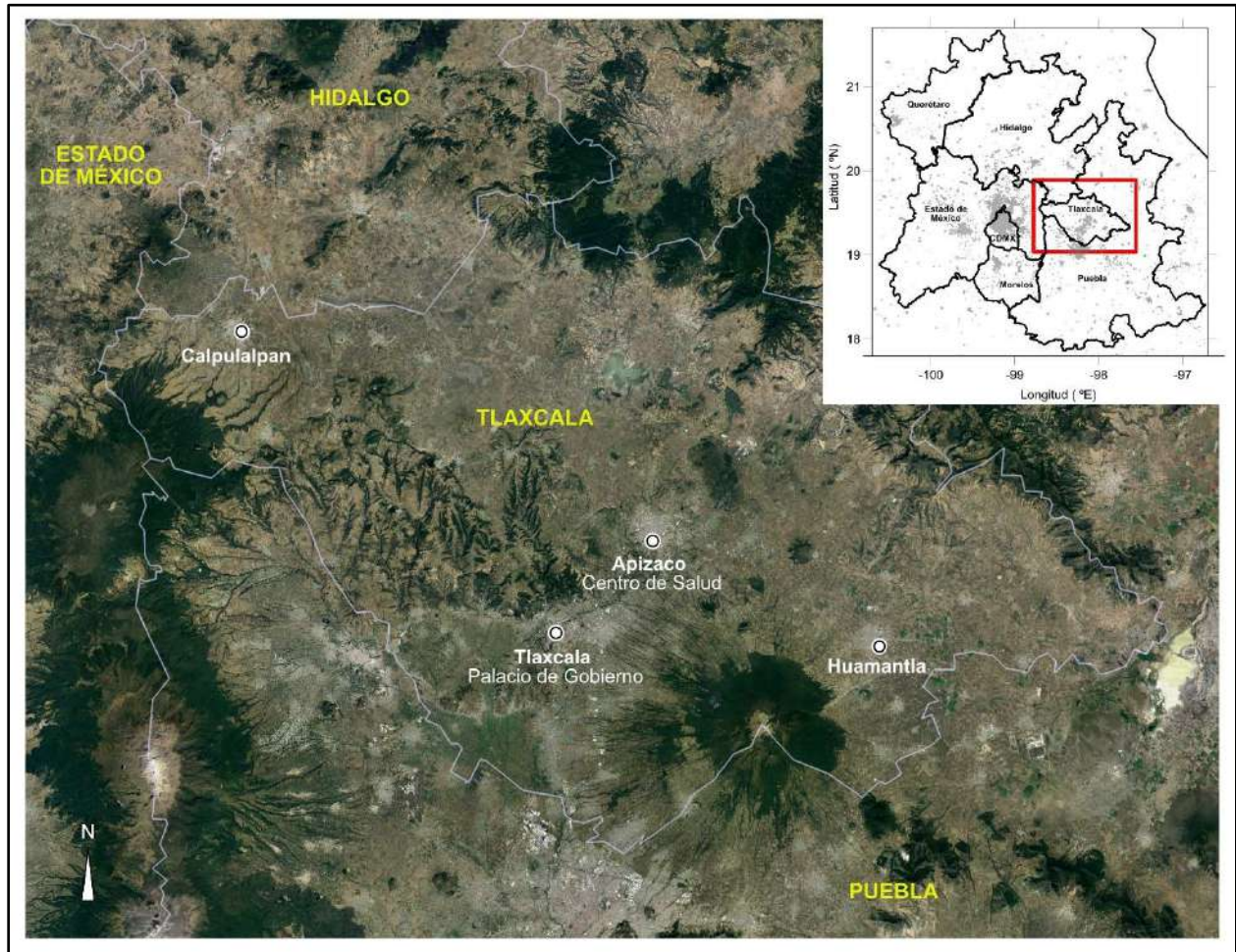
**Figura 2.12.** Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo en la zona metropolitana de Santiago de Querétaro y en el municipio de San Juan de Río, Querétaro. Mapa actualizado a julio de 2022. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022; imagen: Google Earth).

### 2.2.6. Tlaxcala

El estado de Tlaxcala se ubica el centro poniente del país, en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico. Colinda al oeste con el Estado de México, al noroeste con Hidalgo, y con Puebla al norte, este y sur. Su relieve se caracteriza por llanos extensos al noroeste y sureste, en el poniente destacan sierras donde sobresale el volcán La Malinche (4420 msnm). Al oriente predominan cadenas montañosas. El clima es templado subhúmedo con lluvias durante el verano.



La población se concentra en tres regiones principales: sur (Zacatelco), centro sur (Tlaxcala) y centro norte (Apizaco). La entidad cuenta con dos zonas metropolitanas que concentran más del 70% de la población, Puebla-Tlaxcala y Tlaxcala-Apizaco, la primera con una conurbación interestatal y la segunda con una conurbación intermunicipal.

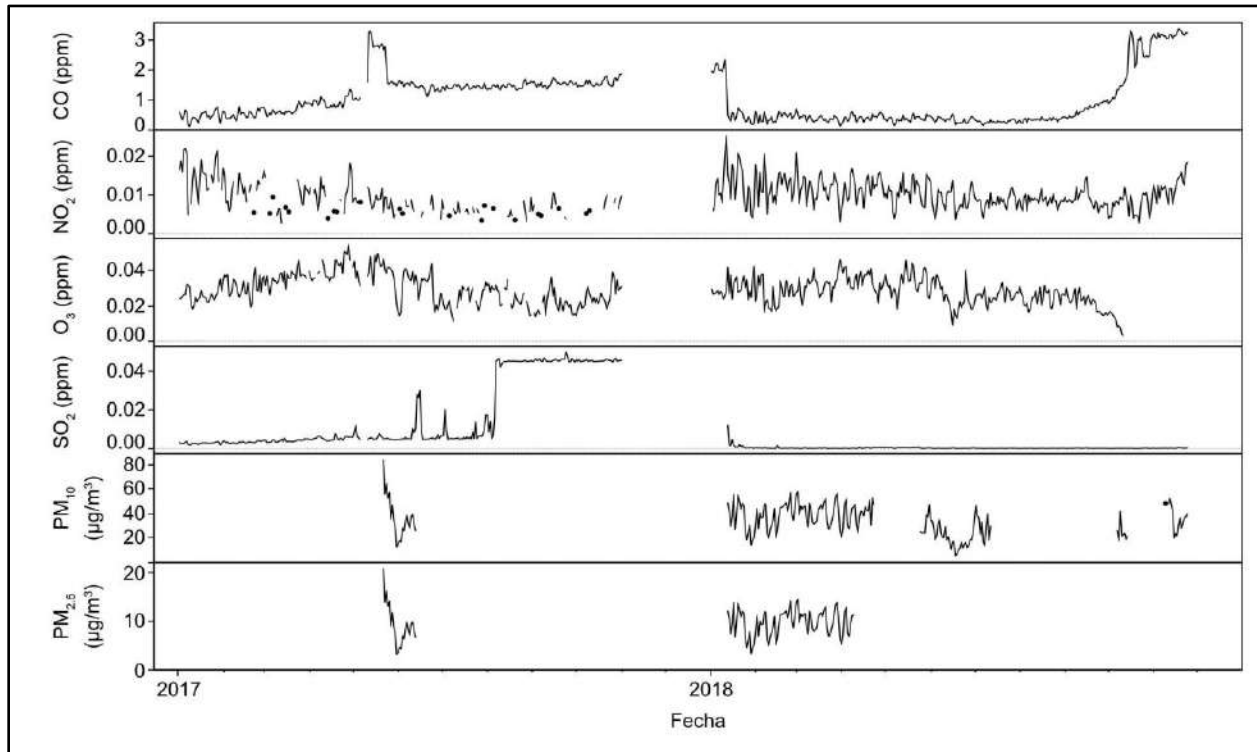


**Figura 2.13.** Ubicación de las estaciones de monitoreo continuo en el estado de Tlaxcala. En el texto se indica los nombres del municipio y de la estación. Mapa actualizado a julio de 2022. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022; imagen: Google Earth).

La entidad contaba con una red de monitoreo con estaciones manuales para la medición de  $PM_{10}$  y partículas suspendidas totales (PST), que estuvo en funcionamiento entre 2011 y 2016. A partir de 2017 esta red fue reemplazada por una conformada por cuatro estaciones con equipos automáticos continuos (ver Figura 2.13). Actualmente, en las estaciones Tlaxcala y Apizaco se realiza el monitoreo de los contaminantes criterio  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $CO$ ; mientras que en las dos estaciones restantes, Huamantla y Calpulalpan, sólo se mide  $PM_{2.5}$ . Con excepción de la estación de Apizaco, en donde el monitoreo inició en 2019, en el resto las mediciones se realizan



desde 2017. Los datos validados disponibles en SINAICA para la estación Tlaxcala muestran un comportamiento que no corresponde con la dinámica atmosférica y que sugiere posibles deficiencias en la operación de los equipos como se puede apreciar en la Figura 2.14. El Informe Nacional de Calidad del Aire de 2019 no incluyó la descripción sobre la calidad del aire para esta entidad.

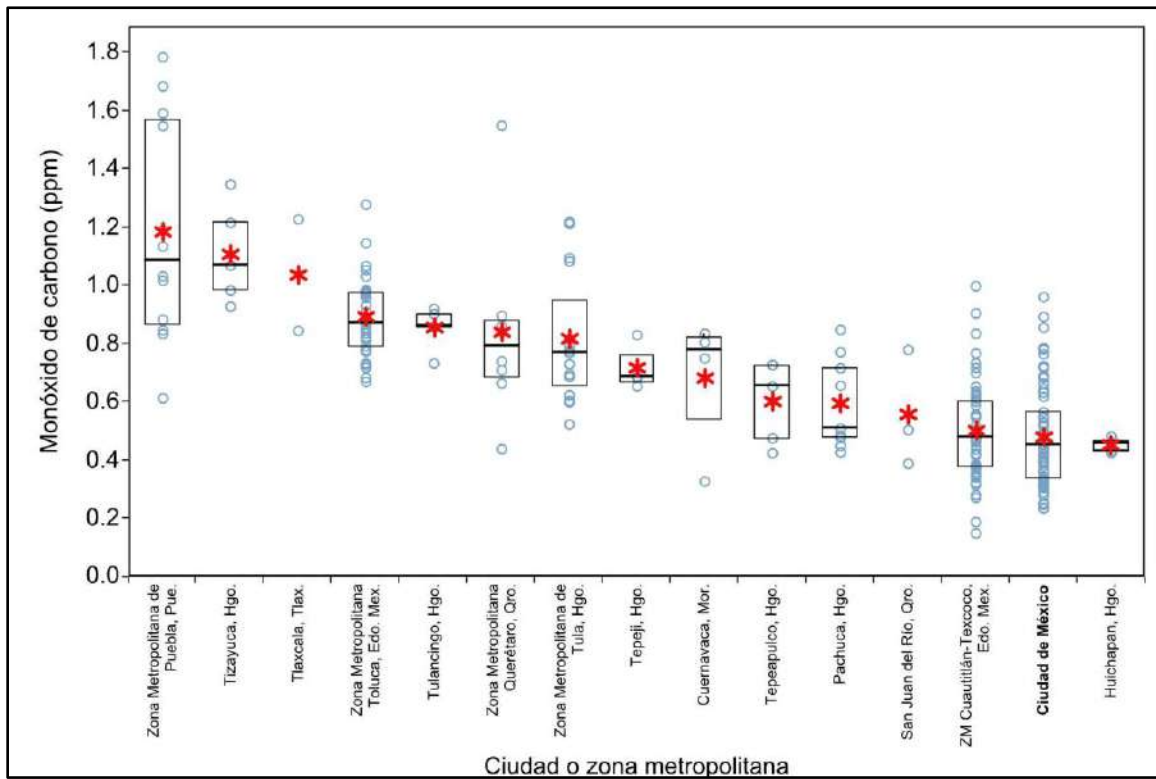


**Figura 2.14.** Series de tiempo de los promedios horarios de los datos de calidad del aire de la ciudad de Tlaxcala. (Elaboración propia con datos del SINAICA, consultado el 25 de julio de 2022).

### 2.3. Comparación de la calidad del aire entre las ciudades de la Megalópolis

A pesar de la incertidumbre que pudieran tener los datos del monitoreo, es necesario reconocer que son los únicos disponibles para evaluar la situación de la calidad del aire en la región. Como se puede derivar de esta revisión, en algunos casos los datos generados por las redes son indicativos de la calidad del aire. Tomando en cuenta lo anterior y con el propósito de obtener alguna información sobre la situación regional de la calidad del aire, se realizó la comparación de los promedios anuales obtenidos en los diferentes sistemas de monitoreo que operan en la Megalópolis. Los resultados se presentan en las Figuras 2.15 a 2.20, en ellos se muestra la distribución de los promedios anuales reportados por cada una de las estaciones de monitoreo de los diferentes sistemas, para el periodo 2016-2020. En el caso de las estaciones del SIMAT, estas se clasificaron en función de la entidad en la que se ubicaban, a las que se encontraban en los municipios conurbados del Estado de México se les incluyó en la llamada zona metropolitana Cuautitlán-Texcoco (en consistencia con el ProAire del Estado de México), el resto

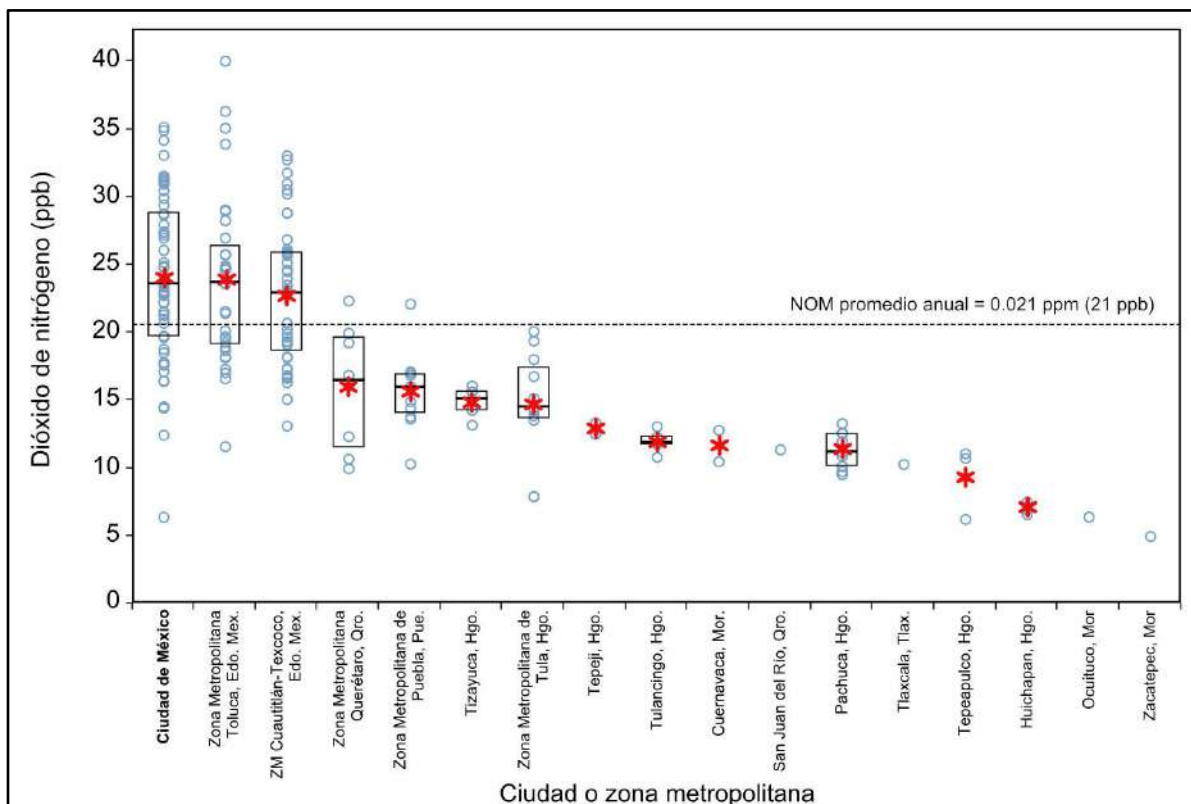
correspondieron a la Ciudad de México. Para el cálculo del promedio anual solo se emplearon años con más del 75% de datos horarios válidos. Para cada gráfico, los diagramas se organizaron en función de la magnitud del promedio global (cuando hubo más de dos datos disponibles) ordenando las ciudades de mayor a menor nivel de contaminación. Es importante mencionar que la ausencia de datos en varios sistemas de monitoreo fue evidente, agregando mayor incertidumbre al análisis.



**Figura 2.15.** Distribución de los promedios anuales de monóxido de carbono (CO) en cada una de las zonas urbanas que cuentan con monitoreo continuo en la región de la Megalópolis para el periodo 2016-2020. Los círculos en color azul corresponden al valor del promedio anual de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estrellas en color rojo indican la media de los promedios observados en las estaciones de monitoreo de cada localidad. Para aquellas ciudades que cuentan con cinco o más valores se muestra una caja con los percentiles 75 (línea superior), 50 (línea media) y 25 (línea inferior). (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la calidad del Aire y del SINAICA, consultados el 25 de julio de 2022).

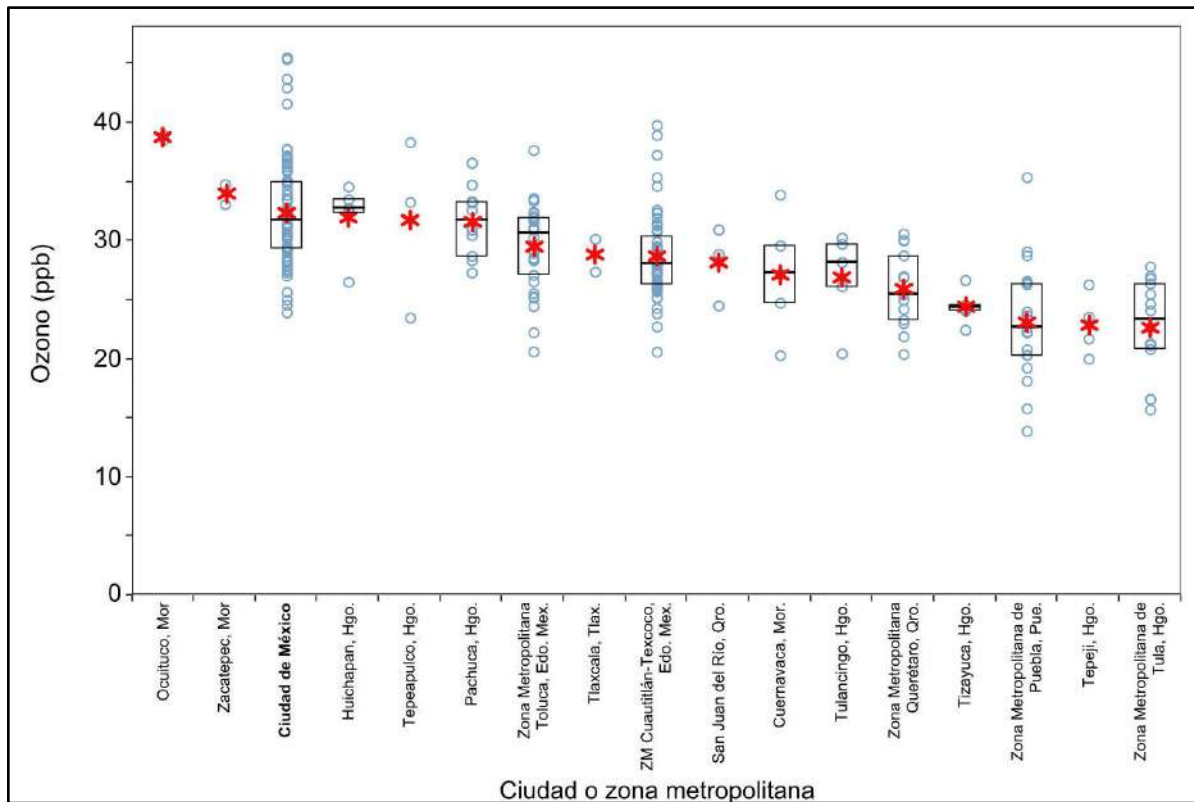
En el caso de CO (Figura 2.15), la Zona Metropolitana Cuautitlán-Texcoco, la Ciudad de México, y Huichapan, Hidalgo, reportaron las menores concentraciones promedio, mientras que la zona metropolitana de Puebla presentó las mayores. Este resultado llama la atención, ya que el CO es un contaminante vinculado directamente a las emisiones de escape de los automóviles y la ZMVM cuenta con la mayor cantidad y densidad vehicular de la región. Una interpretación de estos resultados podría relacionarse con el estricto control de emisiones que mantiene la ZMVM a través del Programa de Verificación Vehicular, así como la edad de la flota -que es la menor de la región.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, durante la revisión de los datos se observó que la mayoría de los sistemas de monitoreo tienen problemas para medir correctamente este contaminante. Las incertidumbres en las mediciones no son consistentes para todos los equipos de monitoreo, pueden ser distintas aun para los equipos empleados dentro de un mismo sistema de monitoreo; en consecuencia, es difícil establecer un factor de corrección común para los datos históricos de cada sistema de monitoreo. Para una evaluación objetiva, será necesario realizar una revisión estación por estación. Aunque el CO no supera los niveles límite de la norma, es de relevancia ya que suele emplearse como un gas trazador de las emisiones vehiculares, y es de utilidad para evaluar los avances en los programas de verificación vehicular, además de emplearse como un *proxy* de otros contaminantes asociados con el tráfico vehicular (por ejemplo, hidrocarburos).



**Figura 2.16.** Distribución de los promedios anuales de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en cada una de las zonas urbanas que cuentan con monitoreo continuo en la región de la Megalópolis, para el periodo 2016-2020. Los círculos en color azul corresponden al valor del promedio anual de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estrellas en color rojo indican la media de los promedios observados en las estaciones de monitoreo de cada localidad. Para aquellas ciudades que cuentan con cinco o más valores, se muestra una caja con los percentiles 75 (línea superior), 50 (línea media) y 25 (línea inferior). La línea punteada indica el valor límite de la NOM-023-SSA1-2021 para el promedio anual. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la calidad del Aire y del SINAICA, consultados el 25 de julio de 2022).

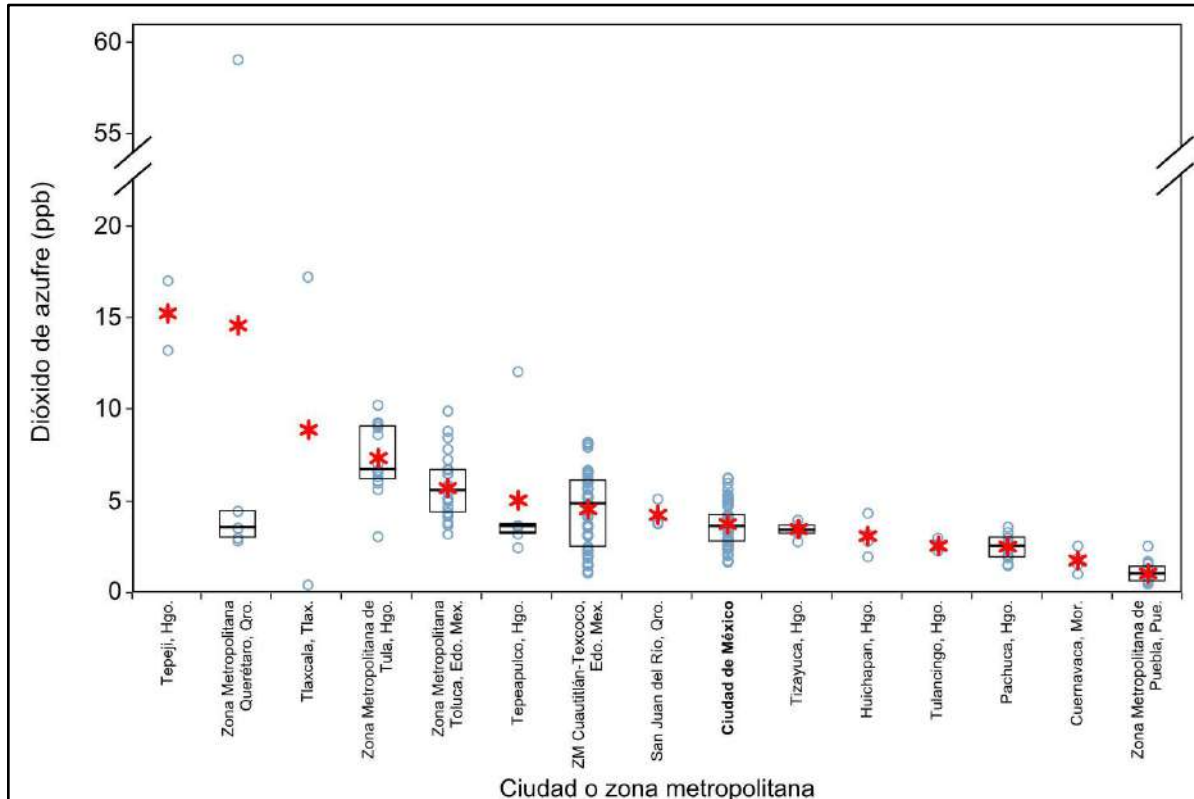
El NO<sub>2</sub> desempeña un rol importante en la química atmosférica y tiene efectos importantes en la salud, por lo que su concentración en el aire ambiente se encuentra regulada. La Ciudad de México y la zona metropolitana de Toluca registraron los mayores promedios, ambas con valores de 24 ppb. La zona metropolitana Cuautitlán- Texcoco les siguió con un promedio de 23 ppb (ver Figura 2.16). La ciudad de Tizayuca y las zonas metropolitanas de Querétaro, Puebla y Tula presentaron promedios similares, con valores entre 15 y 16 ppb. En el resto de las ciudades los promedios estuvieron en el intervalo de 5 a 13 ppb; sin embargo, los datos fueron escasos para la mayoría de las ciudades pequeñas. Destaca el hecho de que no existe una diferencia importante entre las concentraciones promedio de las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, Cuautitlán- Texcoco, y Toluca.



**Figura 2.17.** Distribución de los promedios anuales de ozono en cada una de las zonas urbanas que cuentan con monitoreo continuo en la región de la Megalópolis, para el periodo 2016-2020. Los círculos en color azul corresponden al valor del promedio anual de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estrellas en color rojo indican la media de los promedios observados en las estaciones de monitoreo de cada localidad. Para aquellas ciudades que cuentan con cinco o más valores se muestra una caja con los percentiles 75 (línea superior), 50 (línea media) y 25 (línea inferior). (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la calidad del Aire y del SINAICA, consultados el 25 de julio de 2022).

La Ciudad de México se caracteriza por niveles elevados de O<sub>3</sub>, principalmente entre mediados de febrero a mediados de junio. A este periodo, para fines de la gestión ambiental, se le conoce como

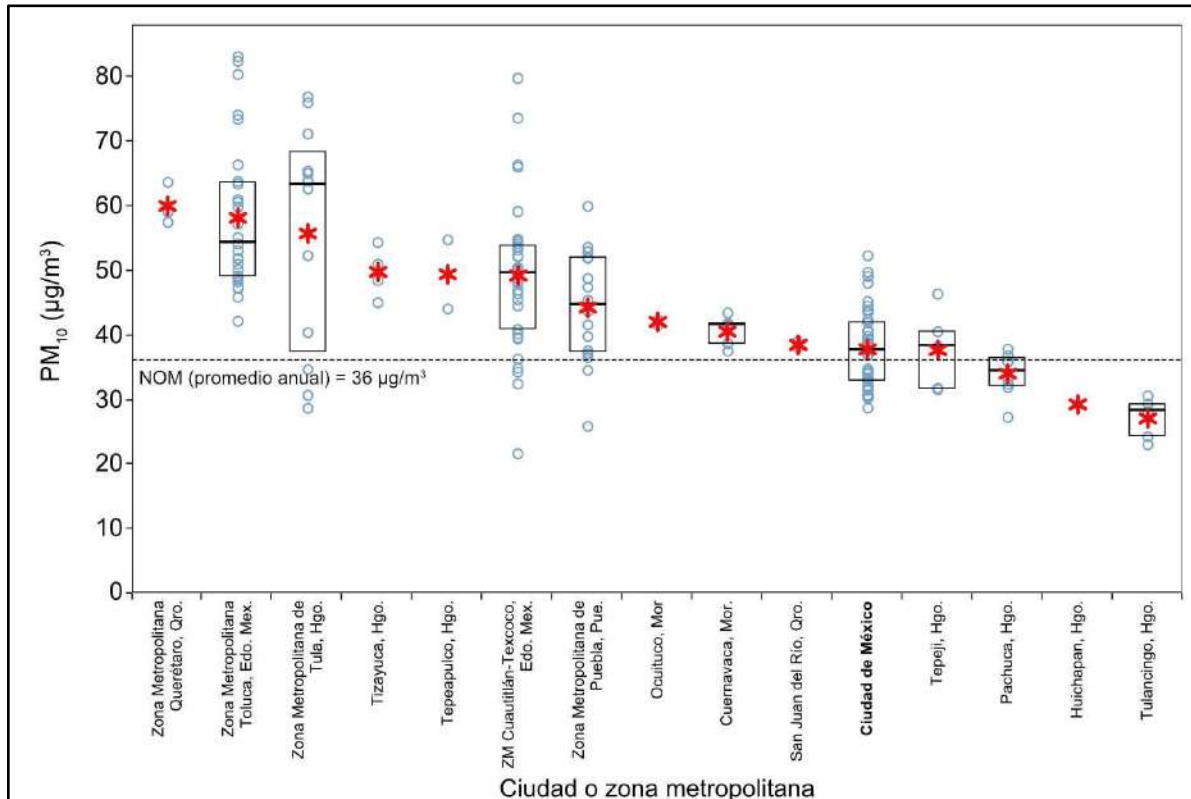
la temporada de  $O_3$ . Por lo tanto, no fue una sorpresa que tuviera los mayores promedios globales (32 ppb). Sin embargo, varias ciudades de Hidalgo (Huichapan, Tepeapulco y Pachuca) presentaron el mismo promedio, 32 ppb. Los conglomerados urbanos del Estado de México registraron promedios también muy similares, 30 ppb la zona metropolitana de Toluca y 29 ppb la zona metropolitana de Cuautitlán-Texcoco (ver Figura 2.18). Las zonas urbanas de Ocuilco y Zacatepec, Morelos, reportaron promedios mayores a los de la Ciudad de México en 2018 y 2019. El menor promedio se observó en la zona metropolitana de Tula con un valor de 23 ppb. Los resultados sugieren que la contaminación por  $O_3$  está presente en toda la región.



**Figura 2.18.** Distribución de los promedios anuales de dióxido de azufre ( $SO_2$ ) en cada una de las zonas urbanas que cuentan con monitoreo continuo en la región de la Megalópolis, para el periodo 2016-2020. Los círculos en color azul corresponden al valor del promedio anual de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estrellas en color rojo indican la media de los promedios observados en las estaciones de monitoreo de cada localidad. Para aquellas ciudades que cuentan con cinco o más valores se muestra una caja con los percentiles 75 (línea superior), 50 (línea media) y 25 (línea inferior). (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la calidad del Aire y del SINAICA, consultados el 25 de julio de 2022).

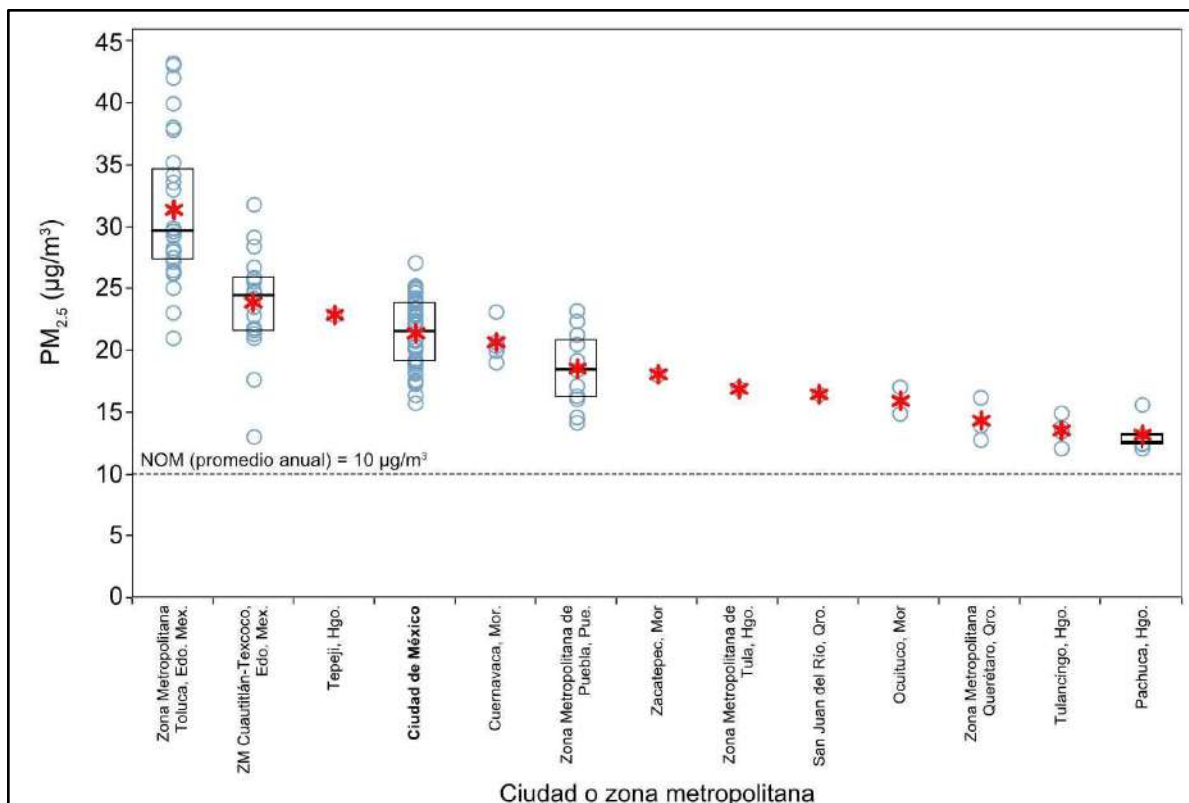
La contaminación por  $SO_2$  está asociada con el consumo de combustibles, principalmente diésel y combustóleo. Por lo que las zonas urbanas con una mayor actividad industrial reportaron los mayores niveles de  $SO_2$ , entre ellas Tepeji, Tlaxcala, y la zona metropolitana de Querétaro. Las zonas metropolitanas de Tula, Toluca y Cuautitlán-Texcoco presentaron valores promedio entre 5

y 7 ppb, superando la concentración promedio observada en la Ciudad de México, 4 ppb (ver Figura 2.18). Durante la revisión de los datos se observó que varias redes de monitoreo podrían tener problemas para determinar correctamente concentraciones bajas de SO<sub>2</sub>, frecuentemente se presentaron cambios abruptos en las tendencias, así como lecturas atípicas altas o bajas.



**Figura 2.19.** Distribución de los promedios anuales de PM<sub>10</sub> en cada una de las zonas urbanas que cuentan con monitoreo continuo en la región de la Megalópolis, para el periodo 2016-2020. Los círculos en color azul corresponden al valor del promedio anual de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estrellas en color rojo indican la media de los promedios observados en las estaciones de monitoreo de cada localidad, para aquellas ciudades que cuentan con cinco o más valores se muestra una caja con los percentiles 75 (línea superior), 50 (línea media) y 25 (línea inferior). La línea punteada indica el valor límite de la NOM-025-SSA1-2021 para el promedio anual. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la calidad del Aire y del SINAICA; consultados el 25 de julio de 2022).

Los datos sugieren que la contaminación por PM<sub>10</sub> es un problema en la mayoría de los asentamientos urbanos de la región (ver Figura 2.19). Los mayores promedios se observaron en las zonas metropolitanas de Querétaro, Toluca y Tula, con valores de 60, 58 y 56 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente. En comparación, la Ciudad de México registró un promedio de 38 µg/m<sup>3</sup>. Con excepción de Huichapan y Tulancingo, Hidalgo, en el resto de los conglomerados urbanos se superó el valor límite de la norma de 36 µg/m<sup>3</sup> para el promedio anual (NOM-025-SSA1-2021).



**Figura 2.20.** Distribución de los promedios anuales de  $PM_{2.5}$  en cada una de las zonas urbanas que cuentan con monitoreo continuo en la región de la Megalópolis, para el periodo 2016-2020. Los círculos en color azul corresponden al valor del promedio anual de cada una de las estaciones de monitoreo. Las estrellas en color rojo indican la media de los promedios observados en las estaciones de monitoreo de cada localidad, para aquellas ciudades que cuentan con cinco o más valores se muestra una caja con los percentiles 75 (línea superior), 50 (línea media) y 25 (línea inferior). La línea punteada indica el valor límite de la NOM-025-SSA1-2021 para el promedio anual. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la calidad del Aire y del SINAICA, consultados el 25 de julio de 2022).

La información disponible para  $PM_{2.5}$  es escasa o nula en la mayoría de las zonas urbanas de la Megalópolis, esto a pesar de que es el contaminante que causa el mayor daño en la salud pública. Los principales conglomerados urbanos del Estado de México registraron las mayores concentraciones, con promedios de  $31.3$  y  $23.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para las zonas metropolitanas de Toluca y Cuautitlán-Textcoco, respectivamente. La Ciudad de México registró un promedio de  $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pachuca, Hidalgo, reportó el menor promedio con un valor de  $13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Como se puede observar en la Figura 2.20, los promedios anuales reportados en todas las redes de monitoreo superaron el valor límite de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio anual de la NOM-025-SSA1-2021.



## 2.4. El Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis

Los episodios de contaminación por O<sub>3</sub> de 2016 en la Ciudad de México marcaron un parteaguas en la gestión de la calidad del aire de la región. Si bien las causas del fenómeno aún son motivo de estudio, el impacto político motivó a las autoridades federales a realizar una revisión profunda del estado de la gestión de la calidad del aire en la Megalópolis. Como resultado, la CAME planteó un conjunto de acciones, entre ellas una inversión importante para el fortalecimiento de las capacidades de monitoreo en la región y la creación de una plataforma homologada para la divulgación de la información de calidad del aire (SEMARNAT, 2016). Este compromiso llevó al establecimiento del *Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis* con una inversión de 150 millones de pesos provenientes del Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), destinada a fortalecer la infraestructura de monitoreo y apuntalar un Sistema Megalopolitano de Monitoreo de la Calidad de Aire (CAME, 2020). Su implementación inició en 2017 con un plazo de ejecución de 5 años y los siguientes objetivos:

- Observar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas relativas a la salud pública y la medición de contaminantes del aire.
- Asegurar la generación de información confiable de la calidad del aire en la región de la Megalópolis.
- Fortalecer la infraestructura existente de monitoreo de la calidad del aire mediante la sustitución de equipos obsoletos y con falla mayor; así como, con la adquisición de refacciones para los demás equipos.
- Expandir las redes de monitoreo atmosférico existentes para dar cobertura a las ciudades de más de 500,000 habitantes en la región de la CAME y a zonas relevantes por la transferencia de contaminantes entre cuencas atmosféricas.
- Ampliar la gama de contaminantes atmosféricos monitoreados mediante la adquisición de equipos para detección de partículas ultrafinas y carbono negro.
- Implementar la Red de Calidad del Aire Megalópolis “CAME AIR” como un subsistema del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Megalópolis.
- Proporcionar a las autoridades ambientales información para el diseño e implementación de políticas, programas y acciones para reducir la contaminación y proteger la salud pública.
- Difundir entre la población información validada sobre la concentración de contaminantes en la región a fin de prevenir la exposición a los mismos y los efectos adversos en la salud.

El detalle de los bienes y el monto de la inversión en cada entidad se describe a continuación:

- Ciudad de México: 45 equipos y 4 vehículos (\$26,413,235).
- Estado de México: 3 estaciones de monitoreo, 23 equipos, 2 vehículos y refacciones (\$27,980,313).
- Hidalgo: 17 equipos, 1 vehículo y refacciones (\$15,625,522).



- Morelos: 29 equipos y refacciones (\$15,189,355).
- Puebla: 22 equipos y refacciones (\$16,419,293).
- Tlaxcala: 1 estación de monitoreo (\$4,879,313).
- INECC: 2 analizadores, 2 unidades móviles para la especiación de aerosoles y perfiles atmosféricos (\$39,430,000).

El equipo no solo incluye monitores de calidad del aire, también incluyó adquisidores de datos, equipos de calibración y sensores meteorológicos. Hasta diciembre de 2022 el Programa reportaba un avance físico y financiero del 94% (Gobierno de México, 2023).

Las autoridades ambientales confían en que este proyecto contribuirá a resolver los principales problemas de infraestructura de los sistemas de monitoreo de la región, y que esto se reflejará en una mejor calidad de los datos. El análisis del impacto de este programa en la atención de las observaciones de auditoría previas y en la mejora de la calidad de los datos se encuentra fuera del alcance de este documento.

## 2.5. Observaciones satelitales

El monitoreo de la calidad del aire proporciona información sobre las concentraciones de los contaminantes del aire en diferentes escalas temporales y espaciales. Esto se logra mediante redes de monitoreo atmosférico que integran un número de estaciones distribuidas en la región de interés. Estas redes se concentran en áreas urbanas, por lo que proporcionan información limitada sobre la distribución espacial de los contaminantes fuera de ellas. Así mismo, en la práctica es complicado cambiar la ubicación de las estaciones de monitoreo y modificar la configuración de las redes de monitoreo a la par del crecimiento de las ciudades y cambios en su topología y morfología. Para mitigar estas limitaciones, las redes de monitoreo de la calidad del aire suelen complementarse con modelos numéricos y datos satelitales. En el caso de la Megalópolis las redes de monitoreo tienen una cobertura limitada y la mayor parte de la región se encuentra subrepresentada, como ya se describió.

Los datos sobre la composición química de la atmósfera generados por diversas misiones satelitales son un recurso que ha empezado a aprovecharse para complementar el monitoreo de la calidad del aire a través de redes de estaciones en superficie (Anenberg et al., 2020). Más aún, el lanzamiento de nuevos satélites de órbita geosincrónica hacen posible hoy en día obtener datos con resoluciones espaciales y temporales sin precedentes (Judd et al., 2018, CEOS, 2019). El satélite TEMPO (*Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution*) de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos cuyo lanzamiento se realizó en abril de 2023, cubrirá de manera permanente América del Norte, incluyendo gran parte de la República Mexicana. Los instrumentos montados en TEMPO proporcionarán mediciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, metano (CH<sub>4</sub>), y otras especies importantes en los ciclos químicos atmosféricos diarios. Los datos permitirán evaluar la contaminación en las horas pico en áreas urbanas y suburbanas, el transporte de contaminación por quema de biomasa y producción de O<sub>3</sub>, así como la identificación de la contaminación proveniente de fuentes específicas.

### **2.5.1. Capacidades en México para el uso y explotación de los datos satelitales**

En México, el grupo de Espectroscopia y Percepción Remota del ICAYCC-UNAM es el principal equipo de investigación dedicado al análisis y validación de datos satelitales. Actualmente este grupo está colaborando con la NASA para el uso y aprovechamiento de los datos que producirá TEMPO para el caso de México.

Es necesario que las autoridades ambientales de las entidades de la Megalópolis se involucren en el uso de estas nuevas fuentes de información sobre la calidad del aire para fortalecer sus capacidades de monitoreo atmosférico de la calidad del aire. El Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) es quien ha tomado la iniciativa en el uso de los productos satelitales. Los han empleado en combinación con datos provenientes de estaciones de monitoreo en superficie para reconstruir la exposición a PM<sub>2.5</sub> espacial y temporal en estudios epidemiológicos (Just et al., 2015; Téllez-Rojo et al., 2018; Tamayo-Ortiz et al., 2021).

### **2.6. Sistemas híbridos de monitoreo**

Desde el punto de vista de la gestión ambiental, se debe avanzar hacia la construcción de redes de monitoreo en un esquema híbrido, en el que se combinen estaciones de monitoreo atmosférico equipadas con equipo de grado regulatorio e instrumentos de grado-investigación montados en plataformas fijas y móviles con monitores de bajo costo y datos satelitales (ver el Anexo A de este capítulo). De esta forma las redes de monitoreo podrán proporcionar más y mejor información sobre la contaminación del aire con mayor resolución espacial y temporal (Gani et al., 2022). La aplicación de esquemas híbridos requerirá de una planeación adecuada, la disponibilidad de recursos humanos y económicos, y una visión de largo plazo. Los siguientes aspectos deberán considerarse para avanzar en el despliegue de sistemas de monitoreo híbridos:

- Urge mejorar el monitoreo regulatorio y armonizar las redes de monitoreo existentes en la región.
- Es esencial establecer y hacer que se cumplan los protocolos y actividades de aseguramiento y control de la calidad para el monitoreo atmosférico con fines regulatorios.
- Es necesario expandir el alcance de las redes de monitoreo de la calidad del aire actuales. Los sensores de bajo costo y productos satelitales no podrán por sí solos cubrir las regiones faltantes. La precisión de sus datos depende de que sus lecturas estén debidamente calibradas ante mediciones *in-situ* con monitores de grado regulatorio.
- Es imprescindible diseñar métodos para el monitoreo, la recopilación y validación de datos, y divulgación de los resultados de manera armonizada. Se requiere desarrollar algoritmos que ajusten y armonicen los datos provenientes de los sensores de bajo costo y productos satelitales. La información que se genere deberá estar disponible para todos los usuarios en formatos sencillos y accesibles.
- Se debe contar con la infraestructura informática para la gestión de los datos generados por las estaciones de monitoreo atmosférico de grado regulatorio, instrumentos científicos, redes de monitores de bajo costo y productos satelitales.

- Es esencial contar con las capacidades técnicas y de investigación para desarrollar y sostener la operación de sistemas híbridos de monitoreo atmosférico. Por ejemplo, no se podrán aprovechar los productos de TEMPO hasta que no se cuente con la infraestructura y recursos humanos necesarios para su aplicación y uso cotidiano.
- Se requerirán políticas y regulaciones para el uso y explotación de los dispositivos diferentes a los instrumentos de grado regulatorio (por ejemplo, sensores de bajo costo).
- Las entidades que conforman la megalópolis deberán coordinar esfuerzos para el desarrollo de capacidades técnicas, la gestión de datos, la elaboración de políticas y regulaciones para el uso y explotación de los datos provenientes de los diferentes métodos de medición, y para construir plataformas en las que se puedan compartir y divulgar la información generada. Esto requerirá que se establezcan mecanismos de financiamiento para garantizar la sostenibilidad de este esquema de monitoreo.

## **2.7. Retos y recomendaciones del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis**

### ***2.7.1. Retos del monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México***

El principal problema que enfrenta la red de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México es su sostenibilidad por falta de presupuesto para su operación y mantenimiento. A pesar de la importancia que tiene el SIMAT para la gestión ambiental, el mejoramiento de la calidad del aire, y la protección de la salud pública de la ZMVM, cuenta con un presupuesto limitado. El presupuesto asignado en 2022 para el programa de “Monitoreo atmosférico y emisiones de otros contaminantes” dentro del Programa Operativo Anual (POA) fue de \$14,369,145, de los cuales solo \$3,429,583 se asignaron a la compra de refacciones, consumibles y accesorios (Secretaría de Administración y Finanzas, 2022), comparativamente la red requiere de alrededor de \$10 millones de pesos anuales en este rubro. Menos del 40% del presupuesto restante se destinó al pago de los servicios básicos para la operación de la red (por ejemplo, mantenimiento de aire acondicionado en estaciones de monitoreo, gastos misceláneos como combustible y mantenimiento de vehículos necesarios para tareas de mantenimiento y supervisión). El resto del presupuesto se destina a otras actividades relacionadas con la gestión de la calidad del aire.

El presupuesto es insuficiente para atender las necesidades básicas de operación y mantenimiento de la red de monitoreo atmosférico. Representa menos del 30% de los recursos necesarios. El déficit suele cubrirse con recursos extraordinarios provenientes de diferentes fondos, sin embargo, estos recursos no son fijos y pueden cambiar de un año a otro año en función de las prioridades de cada administración. Las restricciones en las partidas presupuestales dificultan la renovación oportuna de los equipos dañados u obsoletos. En las últimas dos décadas la adquisición de nuevos equipos se ha realizado principalmente con recursos federales (RAMO 16 o FONADIN) o con recursos provenientes de fondos locales (por ejemplo, el Fondo Ambiental).

La falta de un presupuesto apropiado dificulta planear la operación de la red en el mediano y largo plazos, además de que compromete su vigencia tecnológica. Se ha llegado incluso a tener que suspender temporalmente la operación del 30% o más de las estaciones de monitoreo para reducir los costos de operación en años con restricciones severas de recursos.

El SIMAT genera información sobre la calidad del aire para la Ciudad de México y el área conurbana de Cuautitlán-Texcoco del Estado de México, por lo que se recomienda explorar

mecanismos de financiamiento que involucren tanto a la administración de la Ciudad de México, como la del Estado de México y al gobierno federal. La reciente aportación de equipos y vehículos a través del Programa de Reforzamiento es un ejemplo de este tipo de participación en beneficio de ambas entidades.

En cuanto a la distribución de las estaciones de la red, sería recomendable identificar la presencia de redundancia en las mediciones. Es posible, que no sea necesario medir ciertos contaminantes en algunos sitios debido a su poca variabilidad respecto a otros. De ser así, se reducirán los costos de operación sin afectar la cobertura espacial y temporal, y tales recursos podrían usarse para expandir la cobertura de la red.

También es necesario continuar con la evaluación e introducción de nuevas tecnologías para la medición de CO, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, como se ha hecho recientemente con los recursos aportados por el Programa de Reforzamiento. Esto permitirá reducir la incertidumbre en las mediciones y generar datos con mayor precisión. El SIMAT debe continuar con la caracterización de las especies involucrados en la formación de los contaminantes secundarios, el monitoreo de especies reactivas, retomar las campañas de medición intensivas que se realizaban durante las temporadas críticas de contaminación, e incentivar y participar en el diseño y ejecución de campañas de investigación en colaboración con instituciones nacionales e internacionales.

### ***2.7.2. Retos del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis***

A pesar de que el monitoreo de la calidad del aire en la mayoría de las entidades que integran la Megalópolis se realiza desde hace más de una década, con excepción del SIMAT en la Ciudad de México, existen sospechas sobre la calidad de los datos generados por algunas entidades. Como se ha descrito en este capítulo, todas las redes de monitoreo presentan algún problema de operación, mantenimiento, y control y aseguramiento en la calidad de sus registros.

En este contexto, es destacable el trabajo que realiza el SIMAT, que, a pesar de no contar con los recursos financieros necesarios, pero gracias al compromiso y trabajo de sus ingenieros y técnicos ha mantenido una calidad consistente a lo largo de las últimas dos décadas. Esto ha permitido conocer la tendencia y evolución de la contaminación del aire en la ciudad, y así evaluar objetivamente el impacto que han tenido los cambios en regulaciones ambientales, la introducción de nuevas tecnologías y controles de emisión, el crecimiento de la mancha urbana, el cambio de uso suelo en algunos sectores de la ciudad, y el impacto del cambio climático.

En términos de antigüedad, los sistemas de monitoreo atmosférico de Toluca y Puebla le siguen al de la Ciudad de México, sin embargo, no han logrado replicar la efectividad del SIMAT para generar información confiable y robusta. Los sistemas de monitoreo de Hidalgo y Querétaro son relativamente incipientes y se encuentran aún en fase de desarrollo, pero con avances notables. Los sistemas de monitoreo de Morelos y Tlaxcala requieren de esfuerzo y compromiso de las autoridades locales para empezar a producir datos con la calidad suficiente para su uso en la toma de decisiones y la atención de las necesidades de gestión.

De la revisión hecha a los sistemas de monitoreo de calidad del aire en la región de la Megalópolis se desprenden las siguientes observaciones:

- De acuerdo con los datos disponibles, la Ciudad de México no es la urbe más contaminada de la Megalópolis. Los niveles de contaminación observados en varias ciudades de la región son similares o superiores a los observados en la Ciudad de México.
- El origen y transformaciones de los contaminantes atmosféricos en las diferentes ciudades y regiones de la Megalópolis no son necesariamente los mismos que en la Ciudad de México. Por lo tanto, es necesario que cada entidad genere datos locales que contribuyan a comprender las causas y los riesgos de la contaminación que los aqueja. El diseño de las redes de monitoreo debe reflejar sus propias necesidades acorde con la problemática local.
- La región de la Megalópolis está subrepresentada por el monitoreo atmosférico. Existen importantes brechas en el conocimiento sobre la distribución espacial de los contaminantes del aire tanto a escala urbana como regional. Existe poca evidencia sobre la situación de la calidad del aire en zonas rurales, áreas de valor ecológico, extensiones agrícolas (importantes para la seguridad alimentaria) y poblaciones pequeñas.
- Existen desafíos para reducir la disparidad en la calidad de los datos entre los diferentes sistemas de monitoreo. En algunos casos los datos tienen incertidumbres difíciles de cuantificar, limitando su uso para la gestión de la calidad del aire y la información pública.
- Algunos sistemas de monitoreo de calidad del aire no realizan una validación adecuada antes de publicar sus datos en sus repositorios locales o en el SINAICA. Los datos con deficiencias deben identificarse e invalidarse durante el proceso del monitoreo, antes de su publicación. Por otro lado, la aprobación y publicación de estos datos en el repositorio del SINAICA da una falsa sensación de confianza para aquellas redes de monitoreo que están produciendo datos deficientes.
- La falta de recursos económicos, técnicos, y humanos es una constante en todos los sistemas de monitoreo. Esta es una limitación importante que debe ser atendida, ya que en ellos descansa la gestión de la calidad del aire y la protección de la salud pública.
- La mayoría de los sistemas de monitoreo no tienen un programa de gestión de la calidad de los datos adecuado.
- Todos los sistemas de monitoreo reportan concentraciones que exceden los valores límite de las Normas Oficiales Mexicanas, principalmente para O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Las mayores concentraciones de O<sub>3</sub> se observan de marzo a mayo, mientras que las de partículas en suspensión entre noviembre y mayo, durante la estación seca. Entre junio a octubre, durante la temporada de lluvia, los niveles de contaminación disminuyen en toda la región. Es importante tener en cuenta que dos de los días más contaminados en todas las entidades suelen presentarse en Navidad y Año Nuevo debido a la quema de pirotecnia y fogatas.
- La lluvia ácida continua como un problema en el territorio de la Ciudad de México; no obstante, la gestión ambiental ha sido omisa frente a este problema y se desconoce cuál es la situación en las otras entidades de la Megalópolis.

### ***2.7.3. Recomendaciones para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis***

Las recomendaciones que se presentan a continuación tienen el propósito de invitar a las autoridades locales y federales a que realicen un diagnóstico sobre cómo están operando las redes de monitoreo y de la calidad de los datos que están colectando. Esto les permitirá tomar las

acciones necesarias para mejorar el desempeño del monitoreo atmosférico en la región de la Megalópolis. La lista de recomendaciones expuestas aquí no es exhaustiva, pero sí cubre las mayores deficiencias encontradas en las redes de monitoreo de la calidad del aire durante la elaboración de este documento.

- **Implementar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas.** Realizar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas de las redes de monitoreo con el propósito de identificar sus capacidades y deficiencias en cada etapa del proceso. Estas deben realizarse con personal especializado, preferiblemente por terceros independientes ajenos a los programas de monitoreo. Con base en los resultados, establecer metas y planes de trabajo realistas para garantizar la mejora continua y permanente de la operación adecuada en el corto plazo.
- **Implementar planes de control de calidad.** Diseñar y establecer planes estandarizados para el aseguramiento y control de la calidad en las diferentes etapas del monitoreo, con el propósito de avanzar hacia la armonización de la calidad de los datos generados en la región. Establecer métricas de calidad adecuadas para evaluar la calidad del trabajo realizado por las redes de monitoreo.
- **Definir objetivos y métricas de validación.** Definir objetivos, criterios y métricas para la validación de datos antes de su envío al SINAICA, así como protocolos de validación previos a la publicación.
- **Evaluar la representatividad espacial.** Desarrollar protocolos para la evaluación de la representatividad espacial y a partir de ellos realizar una revisión de la ubicación y de los contaminantes medidos en todas las estaciones de monitoreo en la región. En aquellas donde su ubicación comprometa los objetivos del monitoreo, realizar las acciones necesarias para su reubicación, utilizando protocolos armonizados basados en evidencia científica (por ejemplo, modelos regionales de calidad del aire).
- **Incorporar mecanismos de financiamiento a largo plazo.** Garantizar la sostenibilidad de las redes de monitoreo con presupuestos apropiados que incluyan participaciones estatales, municipales y federales. Explorar mecanismos de financiamiento, por ejemplo, fondos fiduciarios, así como la participación de recursos privados, como fundaciones, que permitan el funcionamiento de las redes de monitoreo a largo plazo.
- **Establecer el monitoreo en áreas no-urbanas.** Considerar el establecimiento de estaciones de monitoreo para cubrir las brechas espaciales, generar datos sobre niveles de contaminación en áreas rurales y en áreas de interés ecológico. Incorporar criterios de justicia ambiental en la selección de los sitios de monitoreo.
- **Validación retrospectiva de datos.** Con base en los objetivos del monitoreo, realizar un análisis retrospectivo de los datos generados por los diferentes sistemas de monitoreo e identificar con banderas apropiadas aquellos datos de calidad dudosa.
- **Fortalecer la infraestructura de monitoreo.** A través del Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis se destinaron 150 millones de pesos para fortalecer la infraestructura de monitoreo y apuntalar un Sistema Megalopolitano de Monitoreo de la Calidad del Aire. Hasta diciembre de 2022 el programa presentaba un avance físico y financiero del 94%. Si bien existe la evidencia de los equipos e infraestructura adquiridos, aún está pendiente la presentación de la evidencia clara y

objetiva de los beneficios alcanzados en la mejora del monitoreo, en la calidad de los datos y en la difusión de la información por parte de las entidades financiadas.

- **Ampliar las capacidades técnicas**. Desarrollar programas de capacitación continua para incrementar las capacidades técnicas del personal de las redes de monitoreo atmosférico
- **Incorporar mediciones satelitales**. La creciente disponibilidad de datos satelitales y una nueva generación de monitoreo satelital de la calidad del aire puede proporcionar a los científicos y responsables del diseño de políticas información adicional sobre las concentraciones de contaminantes criterio, que puede ser valiosa para regiones de la Megalópolis fuera de la cobertura de las redes de monitoreo. Sin embargo, los datos satelitales no reemplazarán el monitoreo en la superficie, son complementarios. Es necesario establecer nuevas estaciones y continuar el monitoreo de la calidad del aire ambiente de manera rutinaria con instrumentos de grado regulatorio en tales áreas.
- **Incorporar monitores de bajo costo calibrados y validados**. Los desarrollos recientes en la tecnología de sensores han mejorado el rendimiento de los monitores de bajo costo y permiten que se utilicen en condiciones particulares para complementar los sistemas de monitoreo actuales y crear nuevas aplicaciones para informar mejor sobre el estado de la calidad del aire. Sin embargo, esto solo será posible si se implementa un esquema sólido de calibración y validación para reducir las incertidumbres en sus mediciones.
- **Difusión pública de la información**. Es importante mantener la difusión permanente de los resultados del monitoreo a la población a través de medios de comunicación masiva, sitios web, aplicaciones y redes sociales.

## ANEXO A

### Tecnologías emergentes como complemento del monitoreo de la calidad del aire

A pesar de los esfuerzos emprendidos en los últimos años por las autoridades locales y federales por incrementar la cobertura de las redes de monitoreo atmosférico en la región de la Megalópolis, aún existe un número importante de centros urbanos desprovistos de información sobre la calidad del aire, mientras que en las regiones suburbanas y rurales la información es prácticamente nula (SEMARNAT, 2017). Entre los principales obstáculos para instalar nuevos sitios de monitoreo podemos citar los costos asociados con la adquisición, operación y mantenimiento de los equipos de monitoreo, la disponibilidad de servicios misceláneos para su operación (por ejemplo, energía eléctrica, comunicación, vigilancia, etc.), falta de personal especializado, y en algunos casos el desconocimiento o la falta de interés por parte de las autoridades locales.

Las estaciones de monitoreo operadas correctamente generan datos confiables y útiles para la gestión de la calidad del aire. Para conseguir tal fin, la regulación federal requiere del uso de equipos (y metodologías) con designación de Método de Referencia o Método Equivalente, los datos generados deben someterse a un estricto proceso de validación antes de emplearse en la evaluación del cumplimiento de la normatividad y con propósitos de gestión. El objetivo es producir datos con la mayor calidad y menor incertidumbre. En el resto de esta sección nos referiremos a estos equipos como de *grado regulatorio*.

Las redes formadas por estaciones con equipadas con monitores de grado regulatorio pueden complementarse con mediciones hechas con los llamados sensores de bajo costo y con productos satelitales, y así solventar la falta de información en regiones donde se complica instalar una estación de monitoreo, o bien no se cuenta con los recursos para ello.

Los sensores de bajo costo han atraído la atención de las autoridades ambientales e investigadores, pero también de organizaciones de la sociedad civil, educadores y personas con algún interés en la calidad del aire. Sin embargo, es importante resaltar que, para los propósitos de la gestión, estos dispositivos son una herramienta de exploración y en ninguna circunstancia reemplazan al monitoreo regulatorio. Cuando no se utilizan correctamente podrían generar un problema mayor al que pretende resolver.

En cuanto al uso de productos satelitales por agencias ambientales a nivel internacional es aún incipiente. Solo agencias como la NASA de los Estados Unidos y Servicio de Monitoreo Atmosférico de Copernicus (*Copernicus Atmospheric Monitoring Service*, CAM, por sus siglas en inglés) del programa de observación de la Tierra, Copernicus, de la Unión Europea, son quienes han hecho uso extensivo de los productos satélites como parte integral de sistemas de predicción de contaminación del aire a escala global.

#### A1. Sensores de bajo costo

El término “sensores de bajo costo” se refiere a los dispositivos que emplean sensores baratos, el término “bajo costo” se deriva del costo de adquisición, que es significativamente menor que el de los equipos de grado regulatorio. Estos monitores están conformados por sensores para medir



partículas y gases. Los sensores utilizan tecnologías conocidas, por ejemplo, en el caso de la medición de partículas utilizan contadores ópticos, mientras que para gases suelen emplear sensores electroquímicos o de óxidos metálicos (Lewis et al., 2018; WMO, 2021). Generalmente se trata de equipos compactos, ligeros, de fácil despliegue y bajo consumo de energía, su instalación requiere de una capacitación mínima de parte del operador y necesitan de un mantenimiento mínimo.

Aunque el costo de uno de estos monitores es considerablemente menor al de un monitor de grado regulatorio, es necesario tomar en consideración los costos de la adquisición y los derivados de la operación, incluyendo la energía, el procesamiento de datos, la calibración y el aseguramiento de la calidad. En algunos casos, es necesario cubrir una cuota periódica para acceder a los datos y hacer uso de las plataformas de visualización y análisis.

En términos del desempeño, los sensores de bajo costo tienden a ser menos sensibles, tienen una reproducibilidad pobre durante las mediciones en campo y pueden verse afectados por variaciones en la temperatura y humedad. Los sensores de gases pueden responder a más de un contaminante dependiendo de la mezcla de contaminantes presentes, mientras que los sensores de partículas pueden sufrir interferencias provocadas por variaciones en la distribución de tamaño y las propiedades ópticas de los aerosoles (Lewis et al., 2018; WMO, 2021). El desempeño de los sensores suele variar de un sitio a otro, por lo tanto, su uso en regiones con diferentes microclimas y microambientes puede ser problemático. Además, debe considerarse que tienen un tiempo de vida corto (de meses a 1-3 años),

Es posible incrementar la calidad de los datos provenientes de los sensores de bajo costo mediante la aplicación de protocolos de operación y mantenimiento, el desarrollo de metodologías para la calibración y el aseguramiento de la calidad, el desarrollo de algoritmos para compensar las incertidumbres en las mediciones, y la aplicación de estrategias efectivas para la validación de los datos (WMO, 2021). Existen protocolos desarrollados por centros de investigación e institutos nacionales de estandarización. Por ejemplo, la EPA de los Estados Unidos realiza y patrocina varios proyectos para la evaluación, desarrollo y uso de estos dispositivos; ha publicado protocolos estándar para la evaluación del desempeño de los sensores de O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> en aire ambiente para sistematizar su evaluación, simplificar la presentación de los resultados y apoyar a los consumidores en la selección de los sensores apropiados para sus aplicaciones. La información se encuentra disponible en el sitio web Caja de herramientas de sensores de aire (*Air Sensor Toolbox*, en inglés) (US EPA, s. f.). Estas acciones pueden mejorar significativamente la calidad de los datos, pero incrementan los costos de operación, y bajo ciertas circunstancias, podrían igualar o superar los costos de operación del monitoreo regulatorio. No obstante, y a pesar de los esfuerzos, podrían permanecer algunas incertidumbres residuales.

En la Ciudad de México, la SEDEMA con el apoyo del ICAYCC realizaron un proyecto que tuvo como objetivos principales (1) la evaluación del desempeño de diferentes dispositivos comerciales y prototipos mediante la comparación con equipos de grado regulatorio, y (2) el despliegue de redes piloto para el monitoreo de PM<sub>2.5</sub> y CO<sub>2</sub>. Los resultados mostraron un desempeño relativamente consistente para la medición de PM<sub>2.5</sub> entre los diferentes dispositivos evaluados, y una buena concordancia con el equipo de referencia. En el caso de los sensores para PM<sub>10</sub> y gases se observó una mayor disparidad en el desempeño. Además, se encontró evidencia de una

diferencia en la respuesta cuando los sensores se emplearon en dos sitios con condiciones ambientales diferentes en la Ciudad de México. Los ejercicios sobre el despliegue de las redes de PM<sub>2.5</sub> y CO<sub>2</sub> mostraron el potencial de los dispositivos de bajo costo para generar datos útiles para diversas aplicaciones, también los retos detrás de la instalación de redes operativas con dispositivos de bajo costo en ambientes urbanos. Los productos más importantes de este proyecto fue la elaboración de recomendaciones y guías en español para la selección, evaluación y uso de estas tecnologías. Los resultados se encuentran disponibles en el sitio web (Grutter et al., 2023).

## **A2. Productos satelitales**

La radiación electromagnética (REM) emitida por el sol es absorbida, reemitida, reflejada y dispersada por la Tierra y su atmósfera, la mayoría de los instrumentos instalados en las plataformas satelitales generan datos de calidad del aire de manera indirecta al detectar esta radiación. Actualmente es posible identificar varias especies químicas de interés para la calidad del aire desde el espacio, incluyendo formaldehído (HCHO), amoníaco (NH<sub>3</sub>), CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO y PM<sub>2.5</sub> (inferidas a partir de la profundidad óptica de aerosoles). También es posible detectar O<sub>3</sub>, sin embargo, aún es un reto distinguir el O<sub>3</sub> superficial del O<sub>3</sub> estratosférico (Duncan et al., 2014).

Los satélites proporcionan datos con una cobertura espacial amplia. Los de órbita polar (que se desplazan de polo a polo) obtienen datos de cualquier ubicación geográfica una vez al día a medida que la Tierra gira. Mientras que los de órbita geosincrónica (que tienen una órbita en la que el desplazamiento del satélite coincide con la rotación de la Tierra) recopilan datos continuamente para una región específica del planeta. Estas mediciones no están exentas de dificultades. Las mediciones satelitales corresponden a la suma de las especies presentes dentro de la columna de la atmósfera que se encuentra bajo la zona de observación del sensor, no de las concentraciones a nivel de la superficie que son las que interesan a la gestión ambiental. En ocasiones la resolución espacial no es suficientemente fina para apreciar la distribución de los contaminantes, principalmente de aquellos de vida corta, o para la identificar fuentes de emisión específicas. También, la presencia de nubosidad puede limitar la observación y detección de los contaminantes presentes cerca del suelo. Los satélites de órbita polar proporcionan observaciones para una hora específica del día. Sin embargo, los sesgos en las observaciones espaciales se pueden corregir en combinación con modelos atmosféricos (Lamsal et al., 2018) y observaciones en superficie.

Actualmente se encuentran en órbita diversos instrumentos satelitales que pueden proporcionar datos útiles para el estudio de la calidad del aire (Dutta et al., 2021; NASA, 2022). Algunos cuentan con resoluciones espaciales y temporales adecuadas para la evaluación de la contaminación urbana como el TROPOMI (*TROPospheric Monitoring Instrument*) de la Agencia Espacial Europea, que recopila datos sobre NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub> con una resolución espacial de escala suburbana (Veefkind et al., 2012).

Con el arribo de los satélites de órbita geosincrónica será posible obtener datos con resoluciones espaciales y temporales sin precedentes (Judd et al., 2018; CEOS, 2019). Para México y en particular para la región de la Megalópolis, el satélite TEMPO de la NASA, cuyo lanzamiento está previsto para el 2023, realizará mediciones en América del Norte, traerá grandes beneficios para cubrir la falta de información sobre la calidad del aire en gran parte del territorio del país. El

instrumento TEMPO es un espectrómetro de rejilla, sensible a las longitudes de onda de luz visible y ultravioleta (Chance et al., 2013). Al medir la luz solar reflejada y dispersada desde la superficie terrestre y la atmósfera hacia los detectores del instrumento, los sensores de luz ultravioleta y visible de TEMPO proporcionarán espectros de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> y otras especies importantes en los ciclos químicos atmosféricos diarios. TEMPO contribuirá a evaluar la contaminación en las horas pico en áreas urbanas y suburbanas, el transporte de contaminación por quema de biomasa y producción de O<sub>3</sub>, la contaminación emitida por campos de petróleo y gas, las huellas de contaminación de barcos y plumas de las plataformas de perforación.

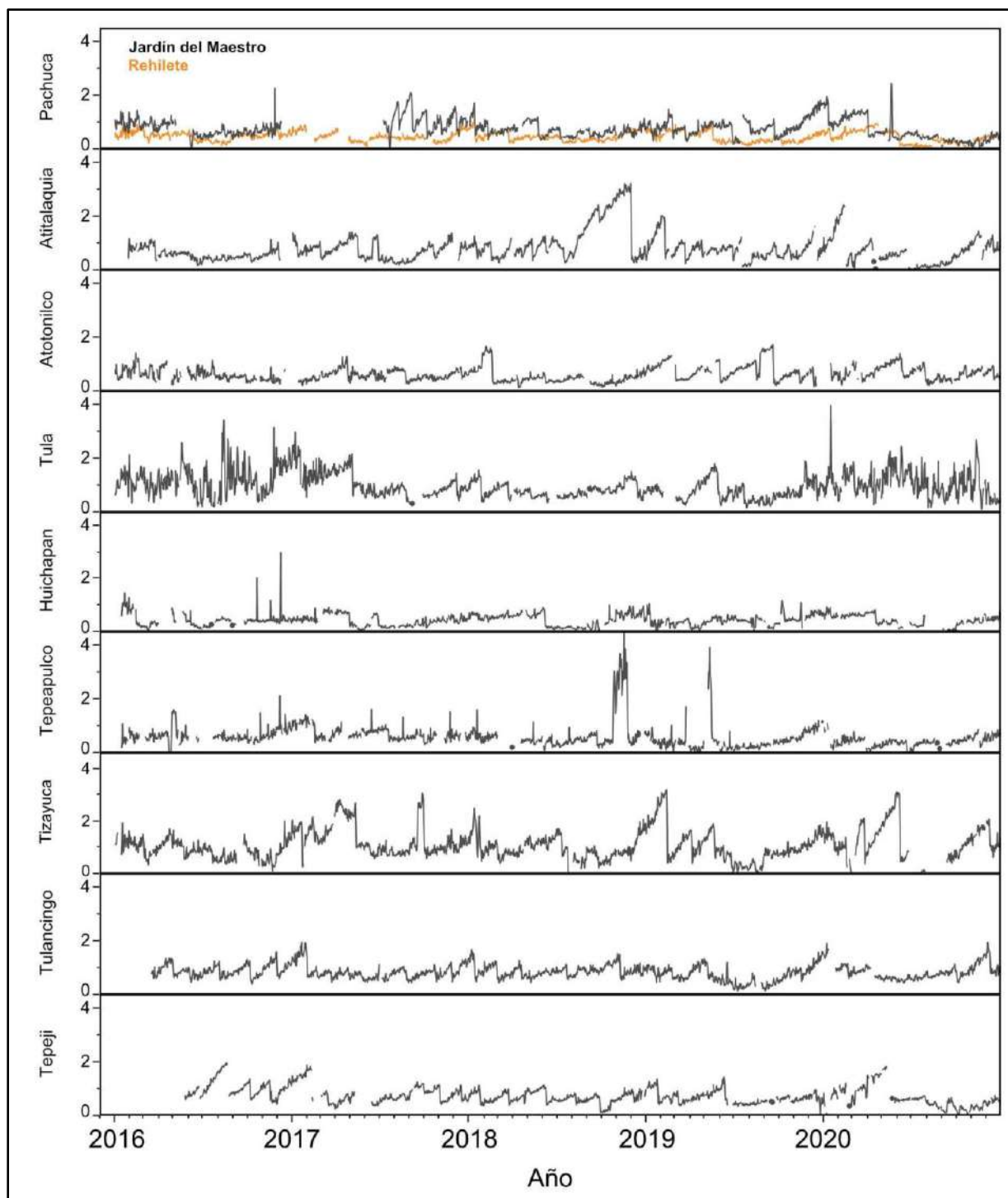
Aun cuando es posible utilizar los datos satelitales para evaluar los cambios en la calidad del aire de un año a otro, los desafíos más importantes se encuentran en su vinculación con los datos provenientes de los monitores en superficie (Holloway et al., 2021). La combinación de los datos de monitores en superficie, con los satelitales y de modelación puede mejorar significativamente la cobertura espacial y proporcionar conjuntos de datos continuos en el espacio y el tiempo.

Los instrumentos satelitales no miden las partículas suspendidas directamente, sino que infieren su concentración a partir de las mediciones de la profundidad óptica y datos del monitoreo en superficie u obtenidos por medio de modelos numéricos. No obstante, las estimaciones satelitales de PM<sub>2.5</sub> se han convertido en una de las fuentes de datos más importantes para la evaluación de la salud pública y para otras las aplicaciones (Holloway et al., 2021). El uso de datos provenientes de las estaciones de grado regulatorio y de sensores de bajo costo, puede mejorar significativamente la precisión y solidez de las estimaciones satelitales de PM<sub>2.5</sub> en la superficie (Malings et al., 2020; de Souza et al., 2020; Li et al., 2020). Los resultados de algunos estudios han demostrado el valor de estas estimaciones para evaluar la calidad del aire y los efectos de PM<sub>2.5</sub> en la salud humana (Holloway et al., 2020; Malings et al., 2020; Lin et al., 2020).

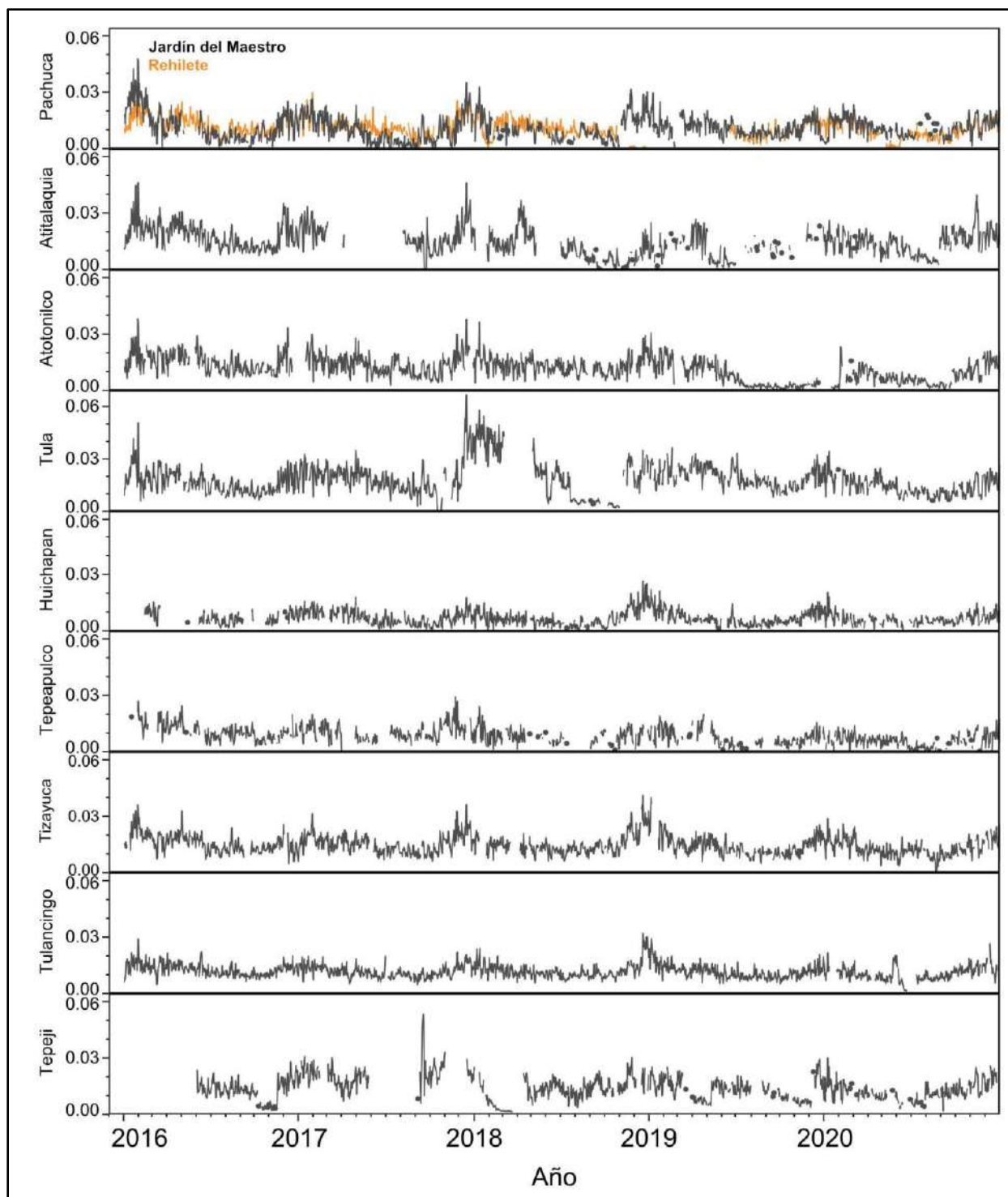
## **ANEXO B**

### **Series de tiempo para los promedios diarios de los contaminantes medidos en los sistemas de monitoreo de Hidalgo, Puebla y Querétaro**

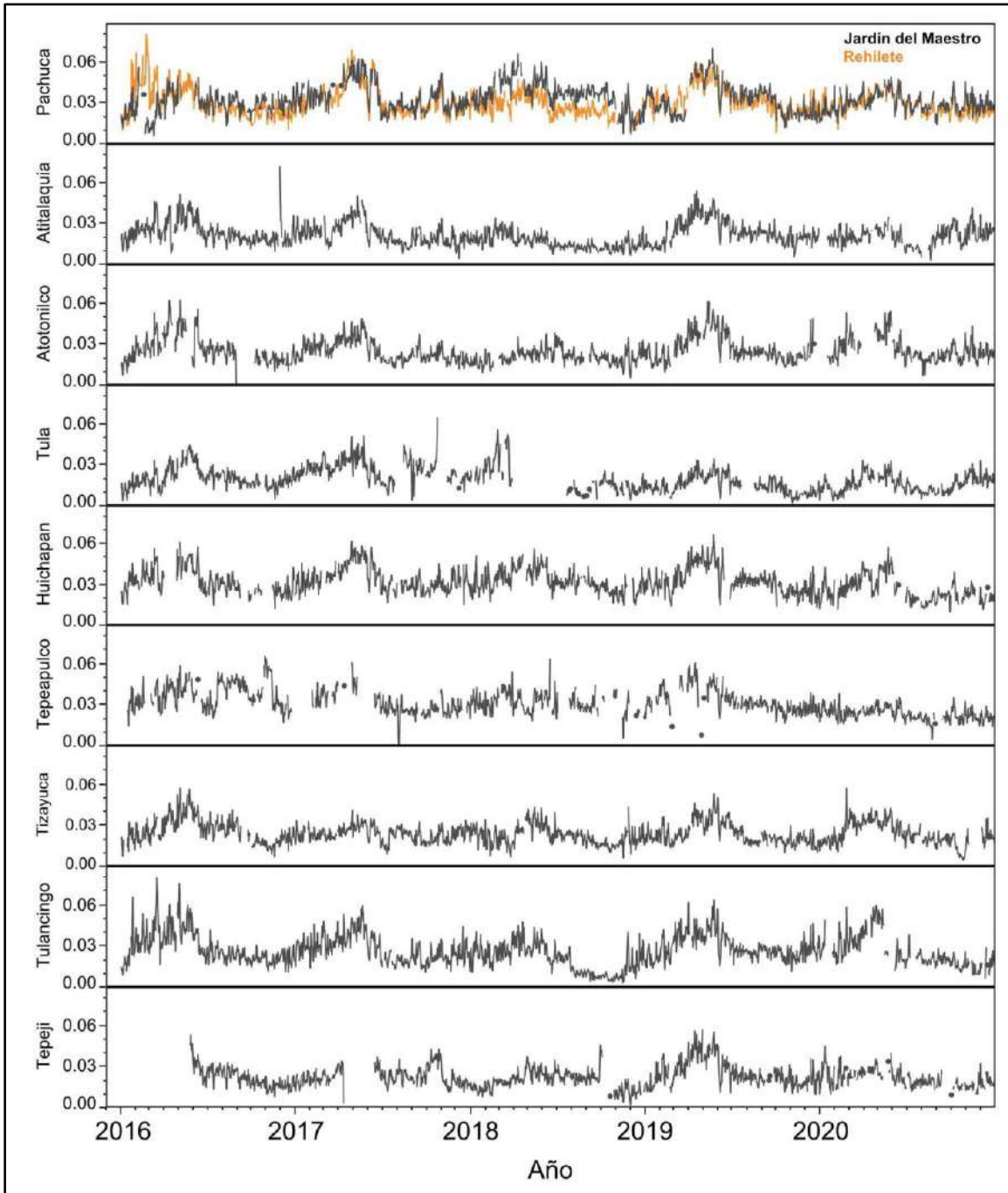
Los gráficos que se muestran en esta sección son de elaboración propia empleando los datos del Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINAICA), disponibles en <https://sinaica.inecc.gob.mx> (consultados el 25 de julio de 2022).



**Figura AB-1.** Series de tiempo de los promedios diarios de monóxido de carbono en cada una de las localidades del estado de Hidalgo en donde se realizó monitoreo continuo durante 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se encuentran en unidades de partes por millón (ppm).

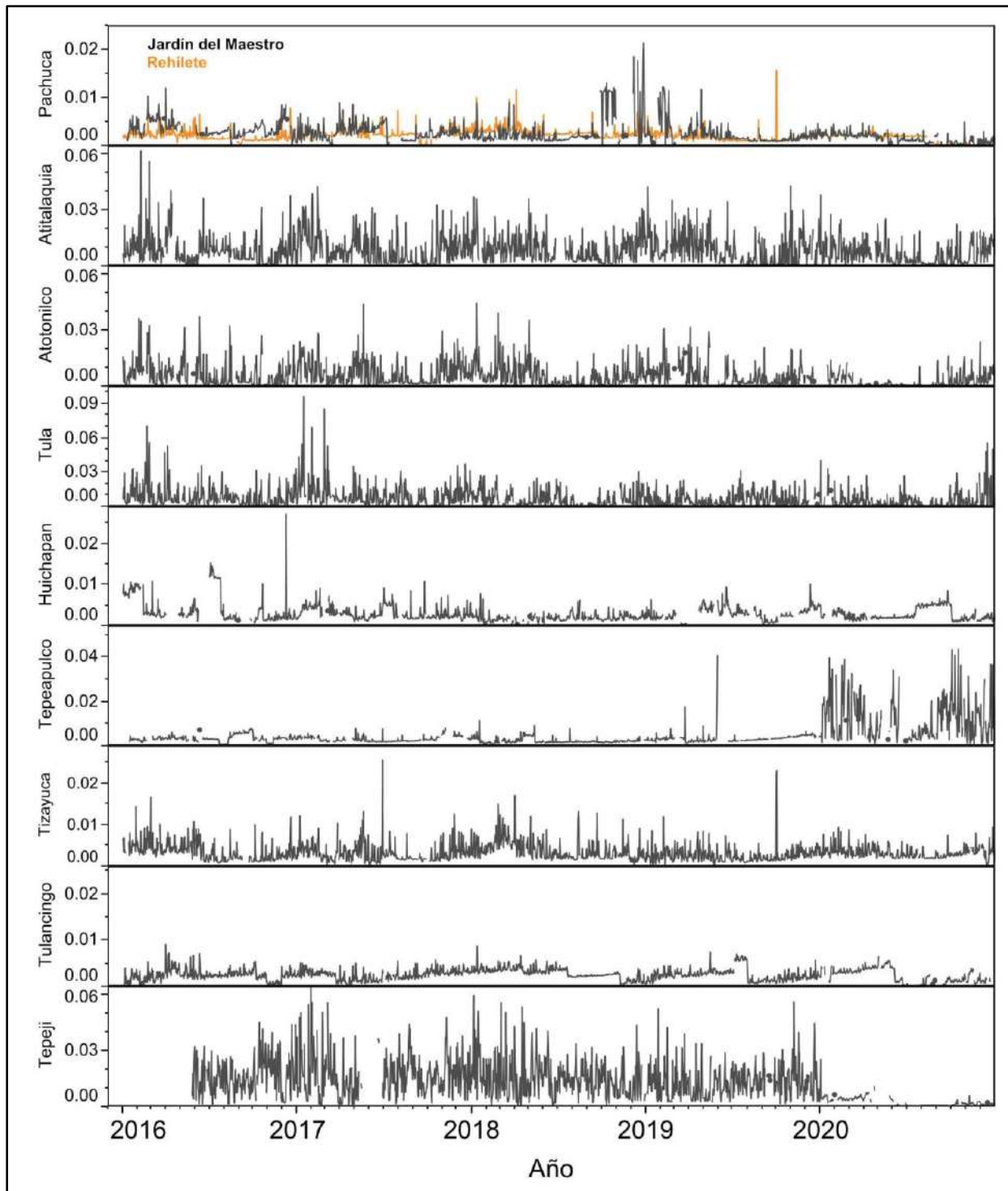


**Figura AB-2.** Series de tiempo de los promedios diarios de dióxido de nitrógeno en cada una de las localidades del estado de Hidalgo en donde se realizó monitoreo continuo durante 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se encuentran en unidades de partes por millón (ppm).



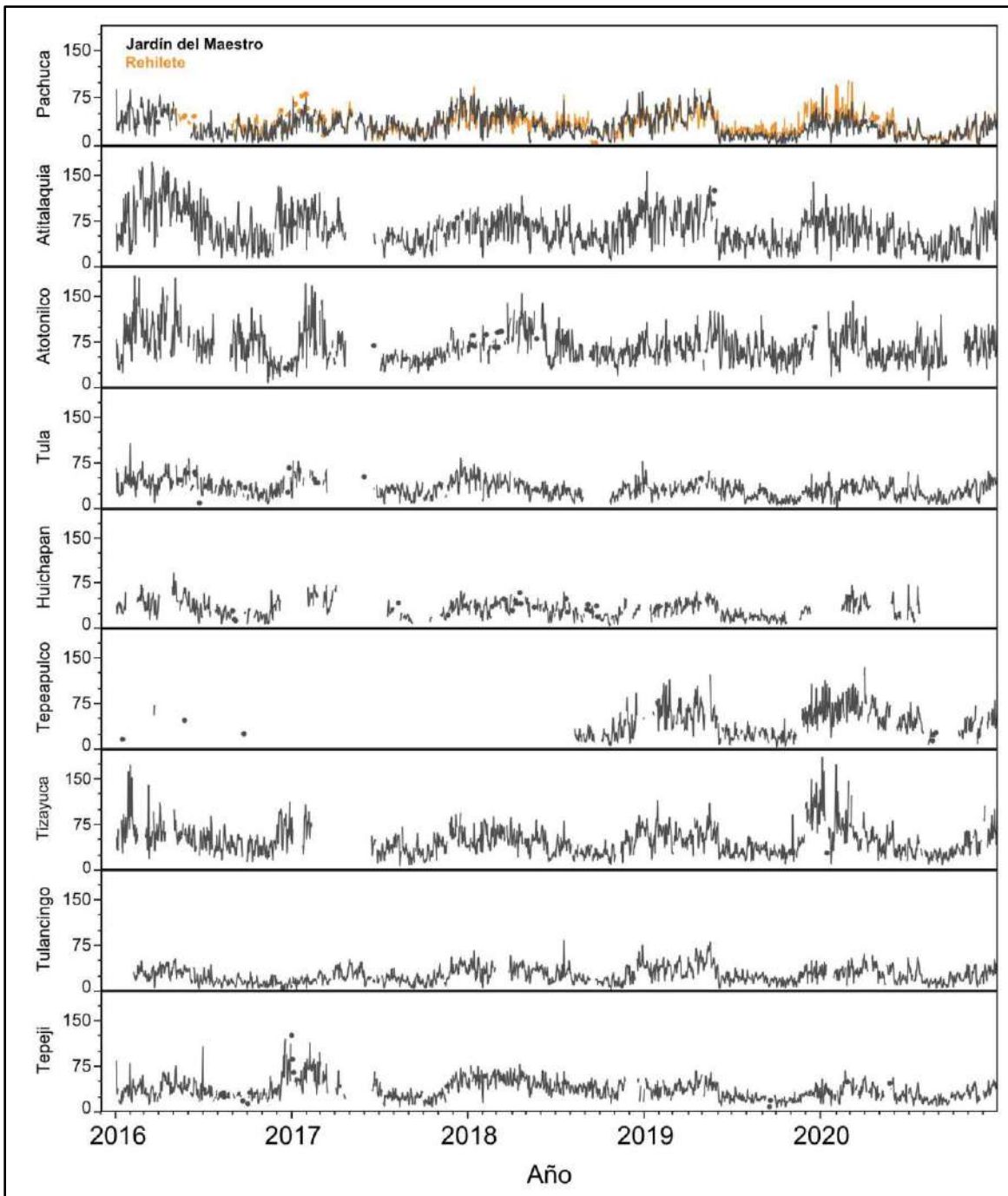
**Figura AB-3.** Series de tiempo de los promedios diarios de ozono en cada una de las localidades del estado de Hidalgo en donde se realizó monitoreo continuo durante 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se encuentran en unidades de partes por millón (ppm).



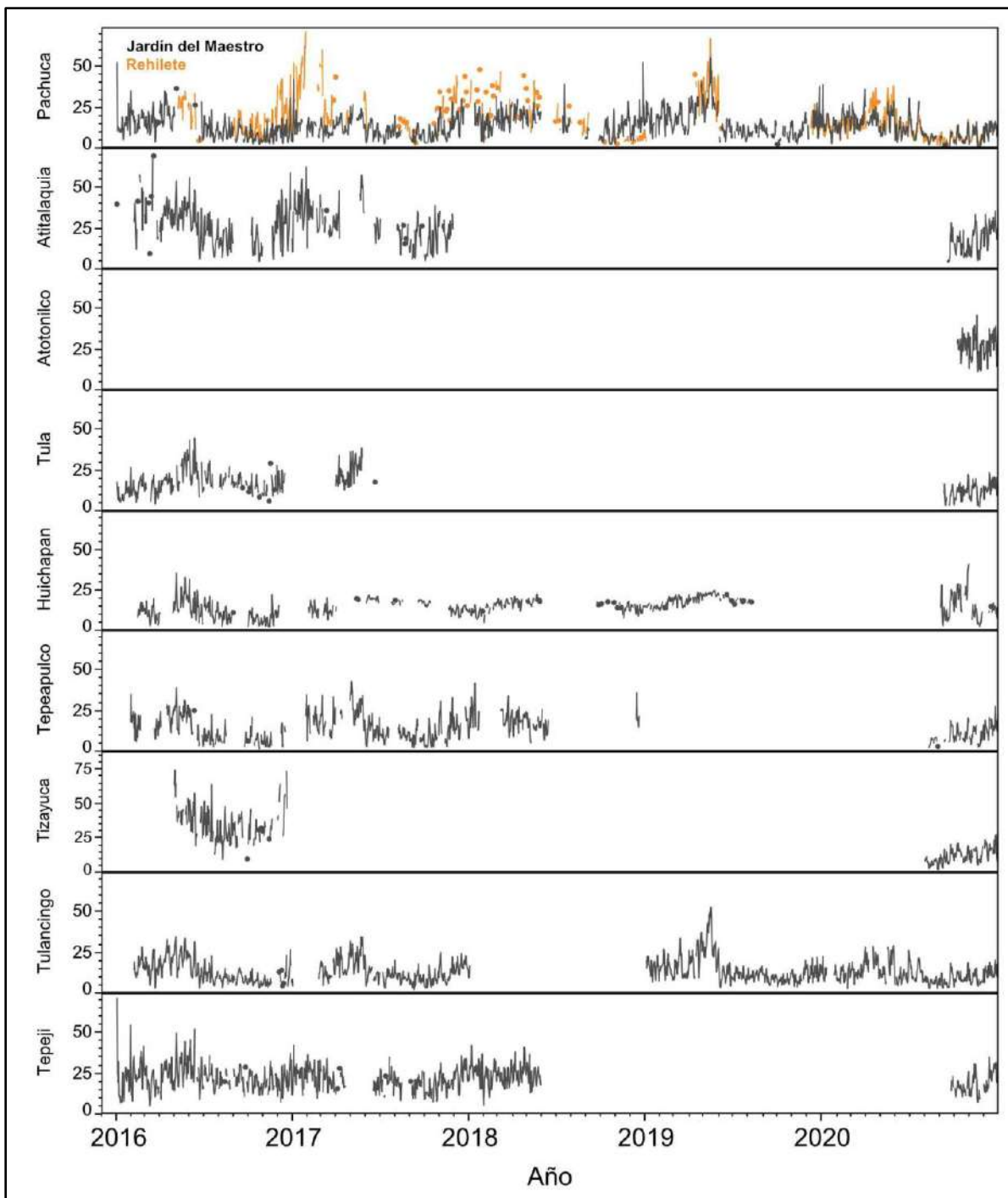


**Figura AB-4.** Series de tiempo de los promedios diarios de dióxido de azufre en cada una de las localidades del estado de Hidalgo en donde se realizó monitoreo continuo durante 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se encuentran en unidades de partes por millón (ppm).

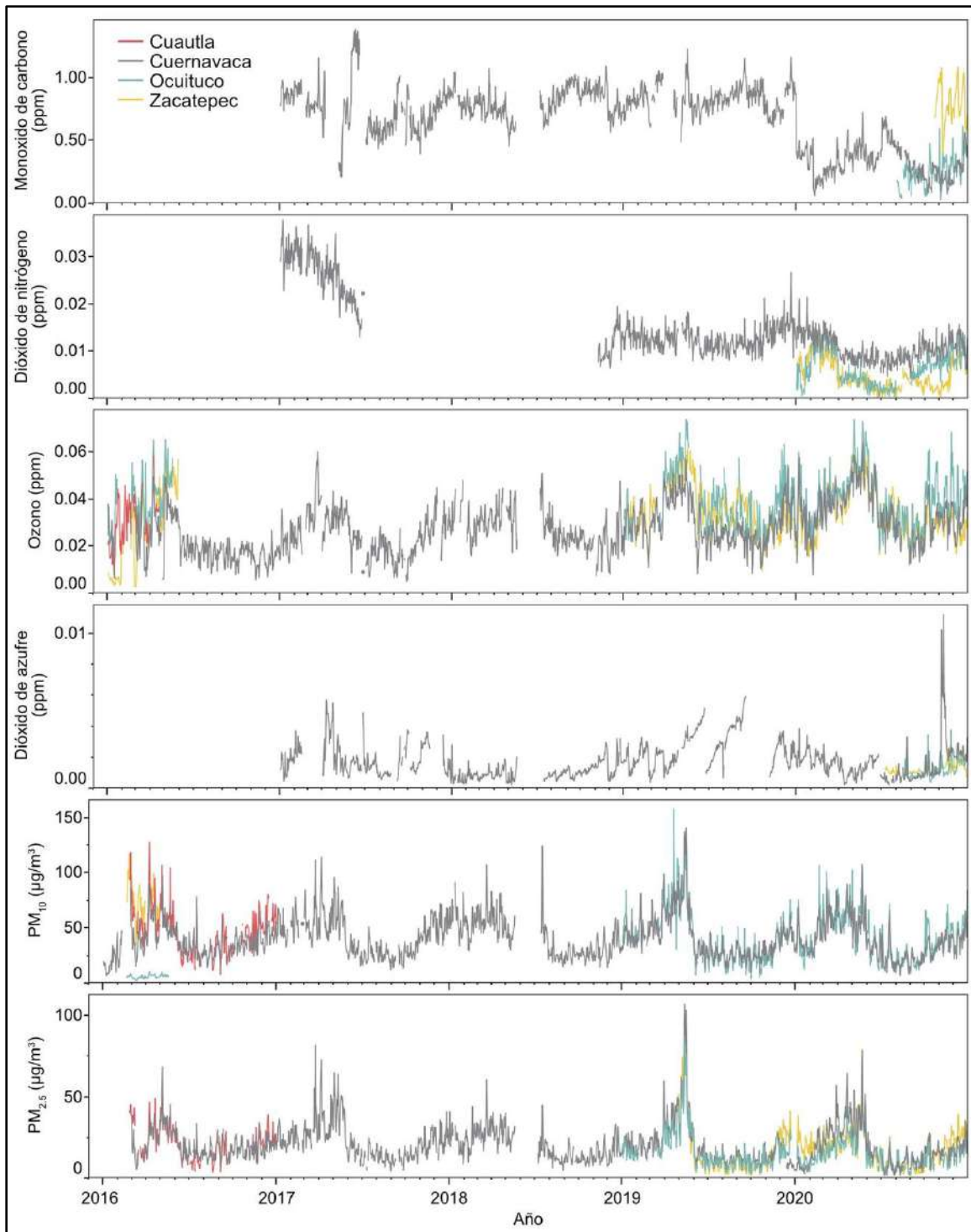




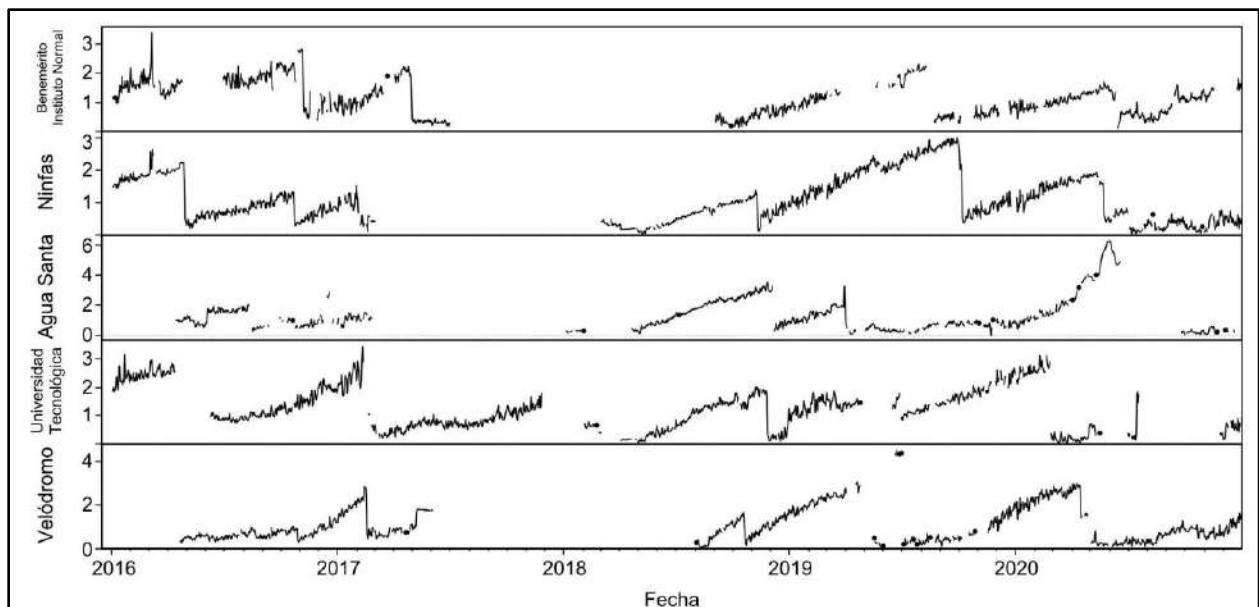
**Figura AB-5.** Series de tiempo de los promedios diarios de  $PM_{10}$  en cada una de las localidades del estado de Hidalgo en donde se realizó monitoreo continuo durante 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se encuentran en unidades de microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



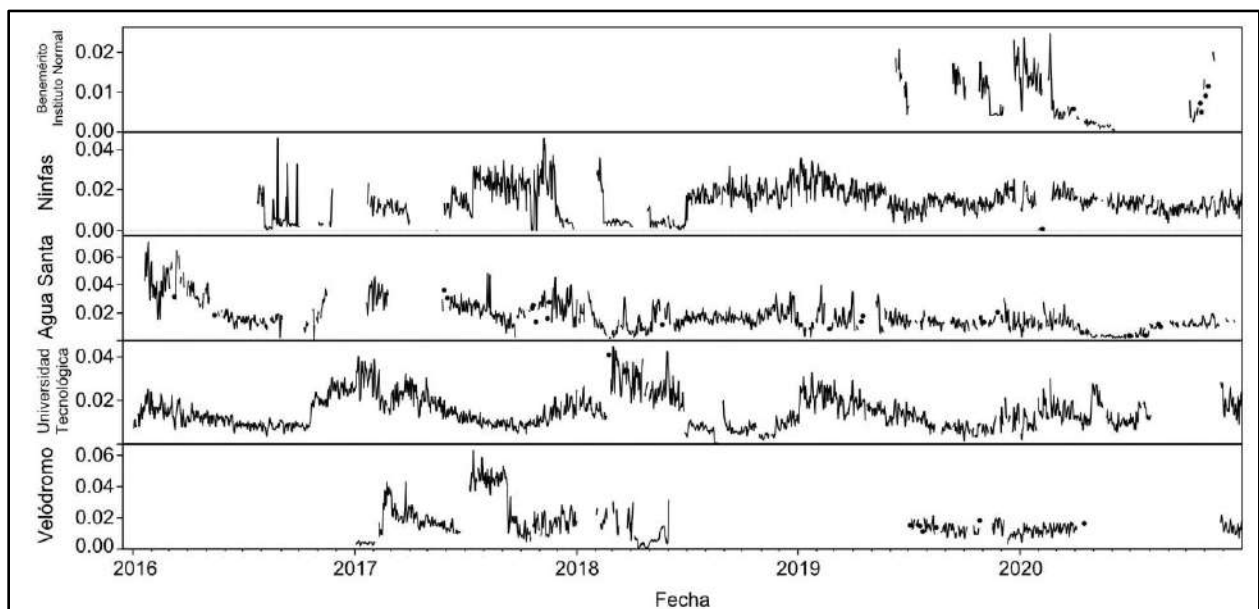
**Figura AB-6.** Series de tiempo de los promedios diarios de  $PM_{2.5}$  en cada una de las localidades del estado de Hidalgo en donde se realizó monitoreo continuo durante 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se encuentran en unidades de microgramos por metro cúbico ( $\mu g/m^3$ ).



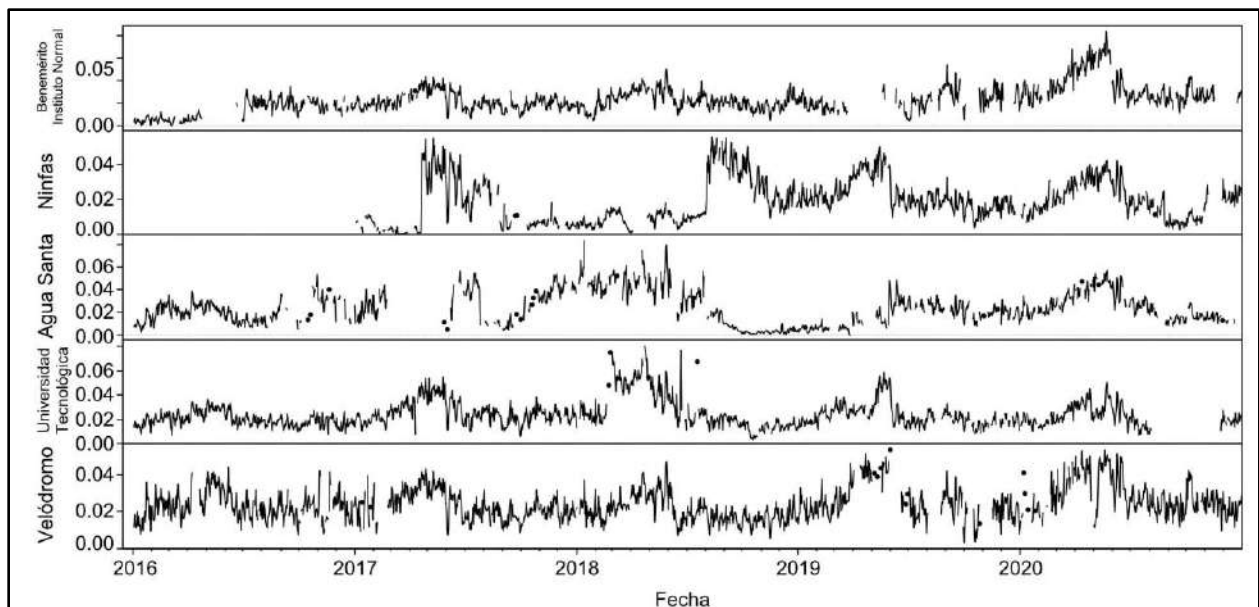
**Figura AB-7.** Series de tiempo de los promedios diarios de PM<sub>10</sub> en cada una de las localidades del estado de Hidalgo en donde se realizó monitoreo continuo durante 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se encuentran en unidades de microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>).



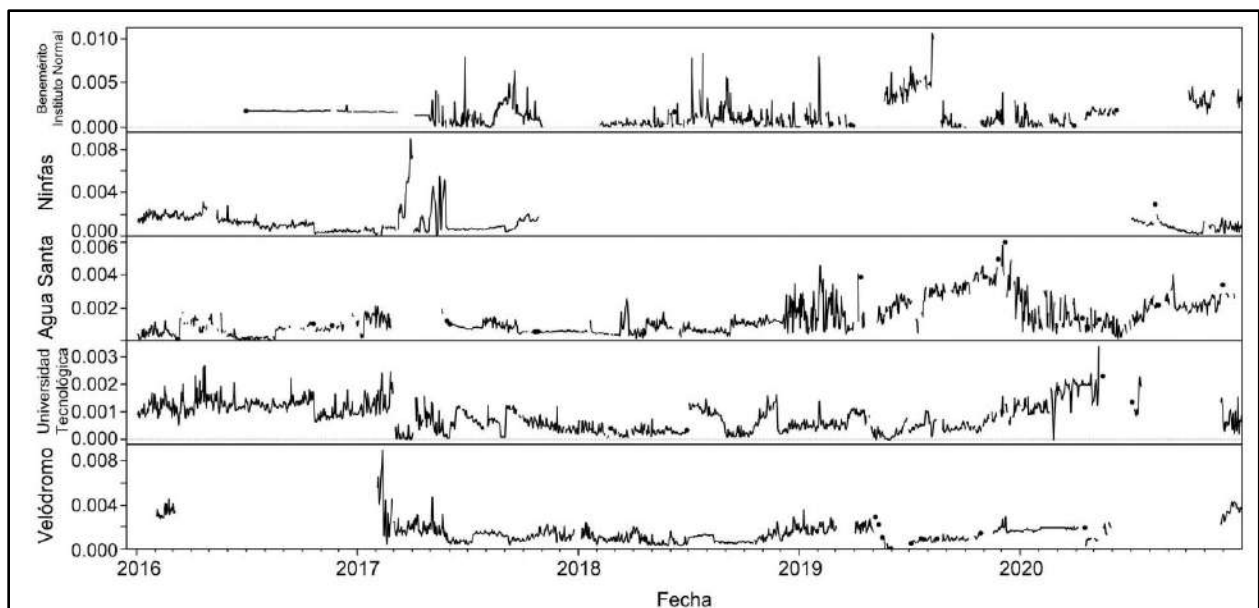
**Figura AB-8.** Series de tiempo de los promedios diarios de monóxido de carbono en las estaciones del estado de Puebla durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios validados disponibles en el SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).



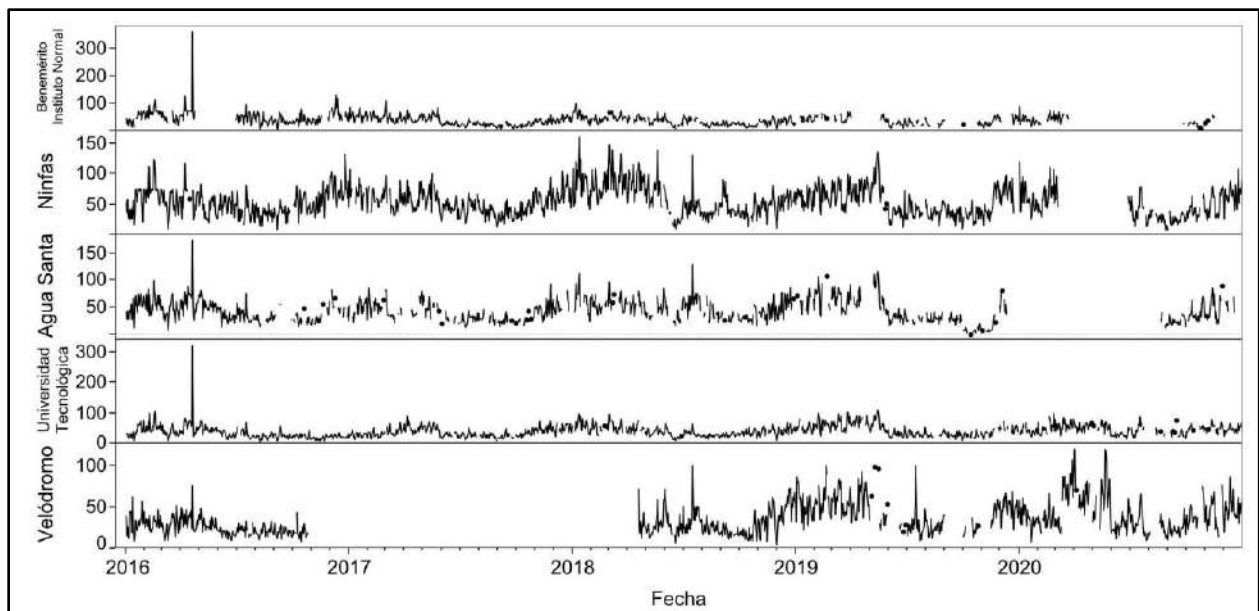
**Figura AB-9.** Series de tiempo de los promedios diarios de dióxido de nitrógeno en las estaciones del estado de Puebla durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).



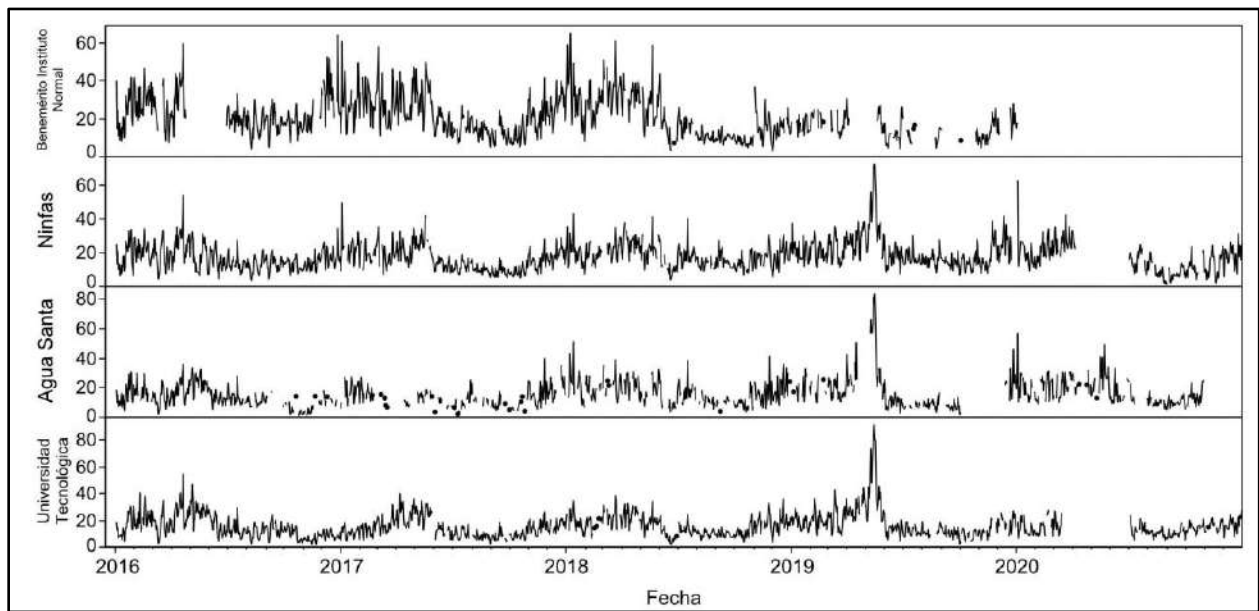
**Figura AB-10.** Series de tiempo de los promedios diarios de ozono en las estaciones del estado de Puebla durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).



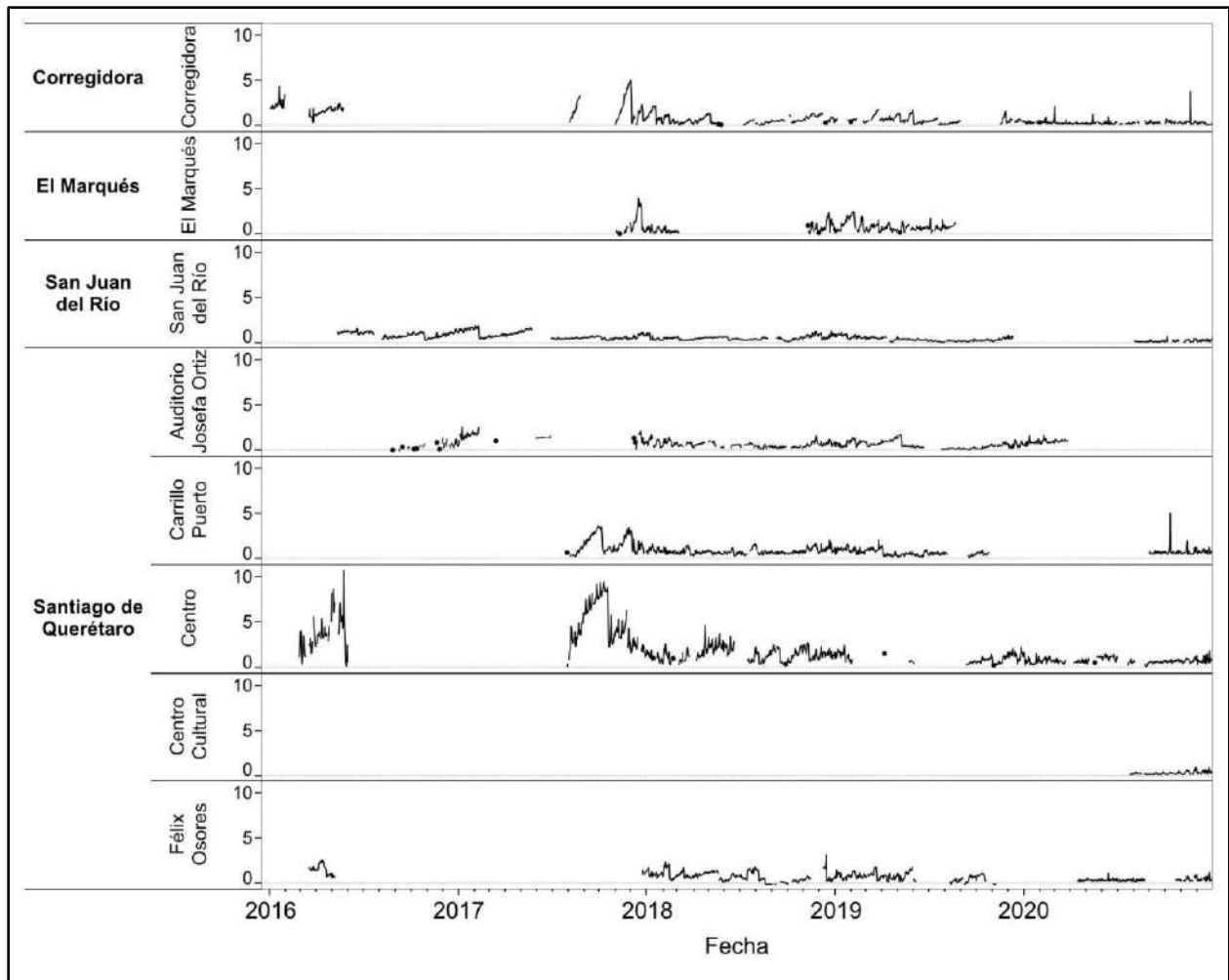
**Figura AB-11.** Series de tiempo de los promedios diarios de dióxido de azufre en las estaciones del estado de Puebla durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).



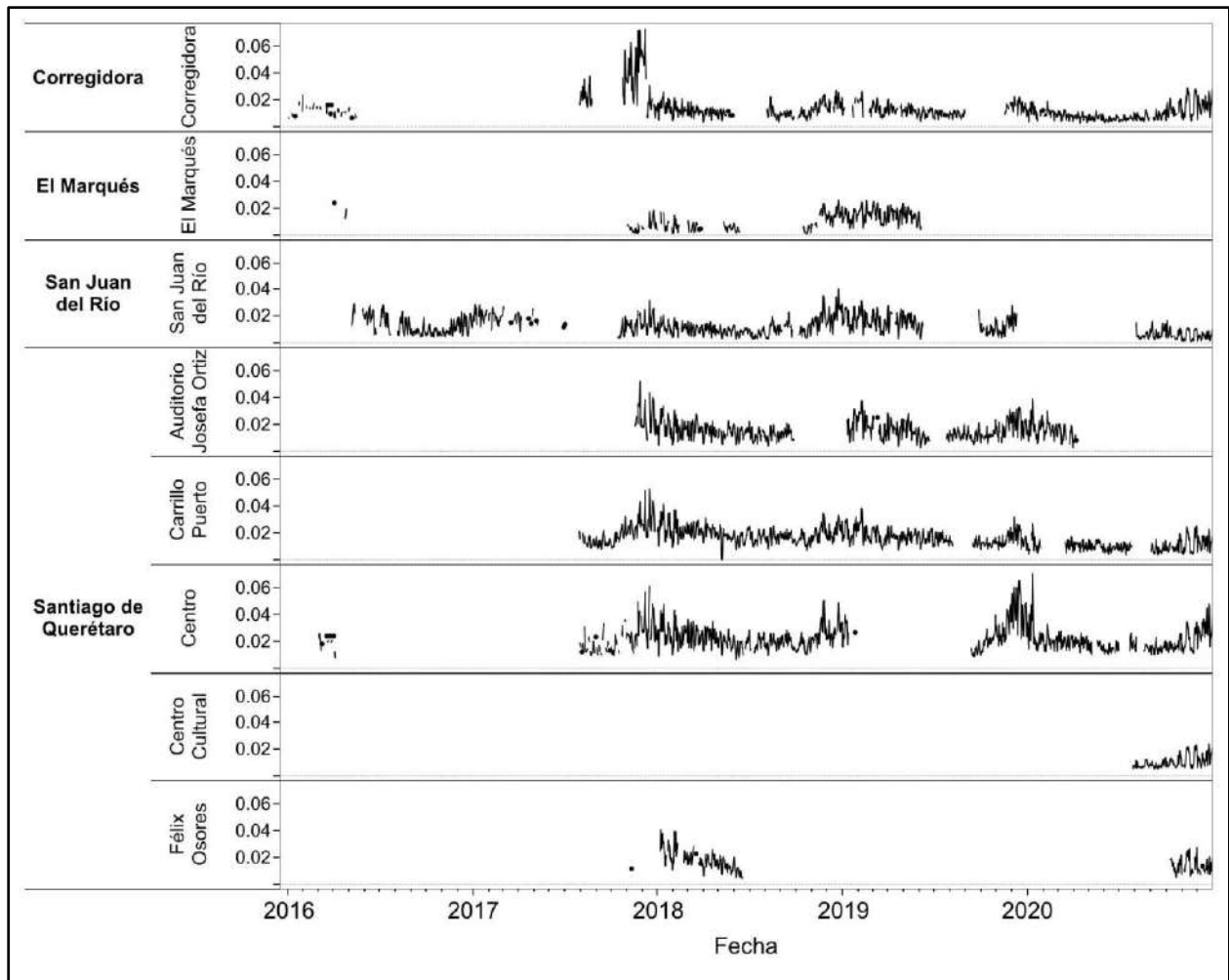
**Figura AB-12.** Series de tiempo de los promedios diarios de  $PM_{10}$  en las estaciones del estado de Puebla durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Figure AB-13.** Series de tiempo de los promedios diarios de  $PM_{2.5}$  en las estaciones del estado de Puebla durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

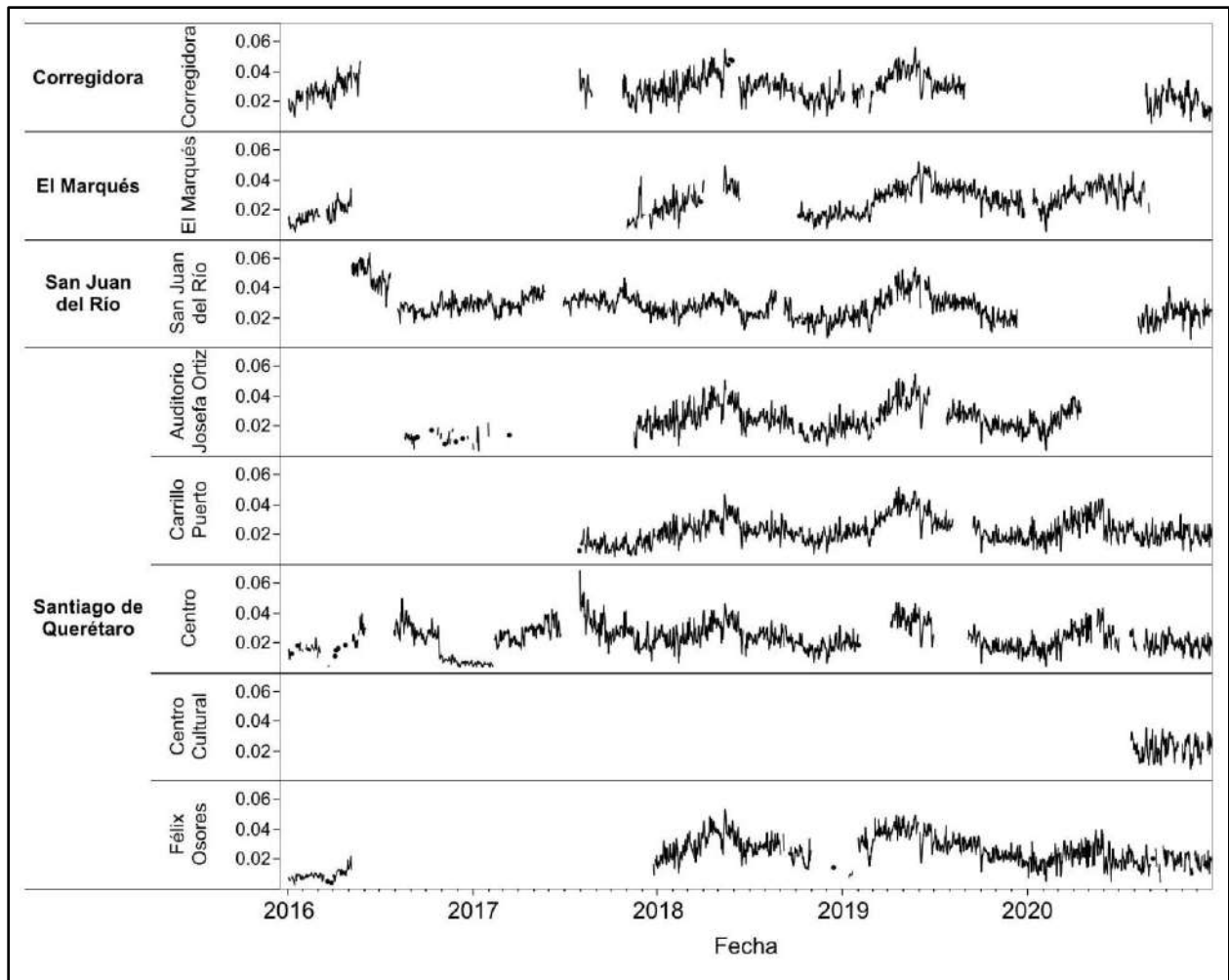


**Figura AB-14.** Series de tiempo de los promedios diarios de monóxido de carbono en las estaciones del estado de Querétaro durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).

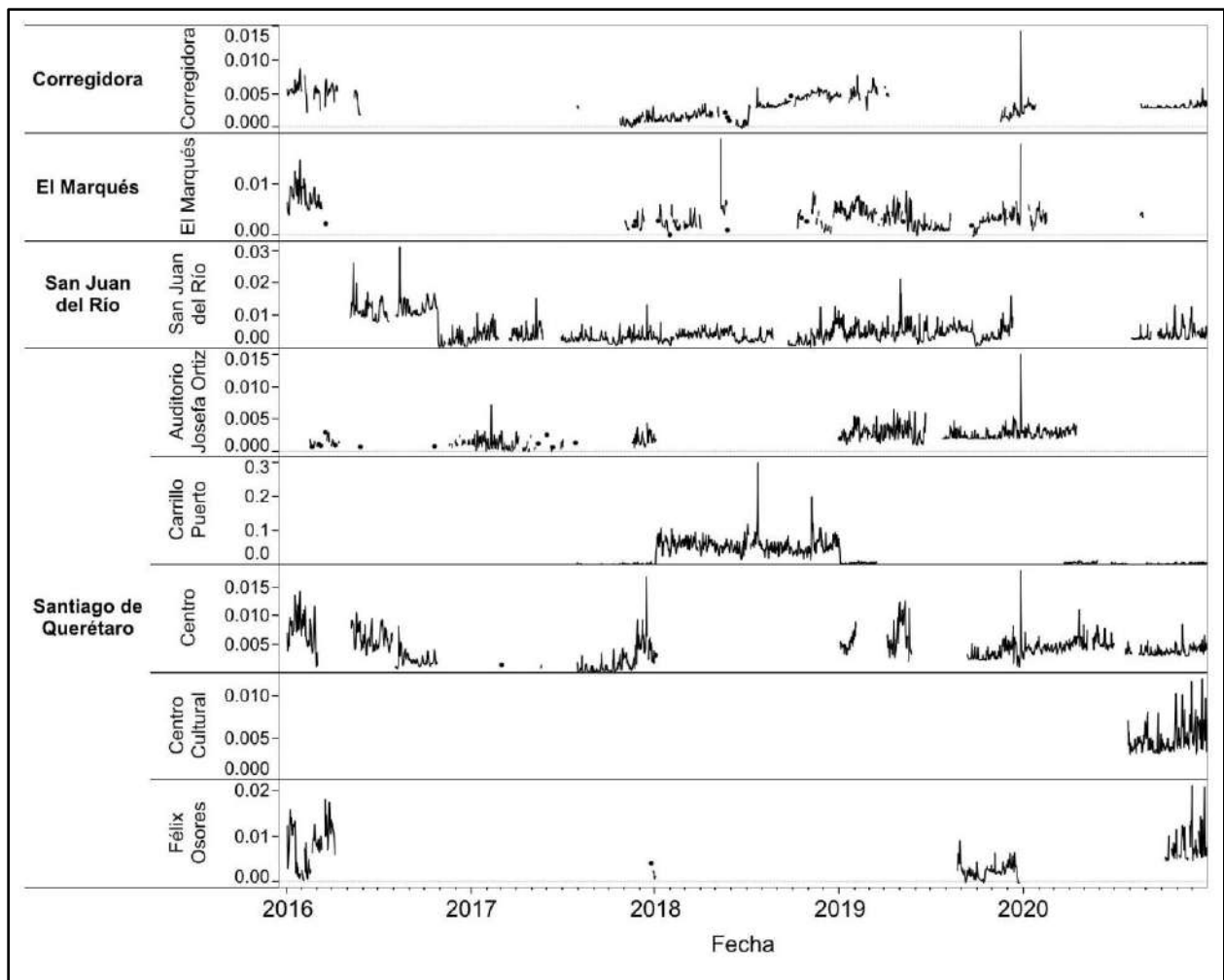


**Figura AB-15.** Series de tiempo de los promedios diarios de dióxido de nitrógeno en las estaciones del estado de Querétaro durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).

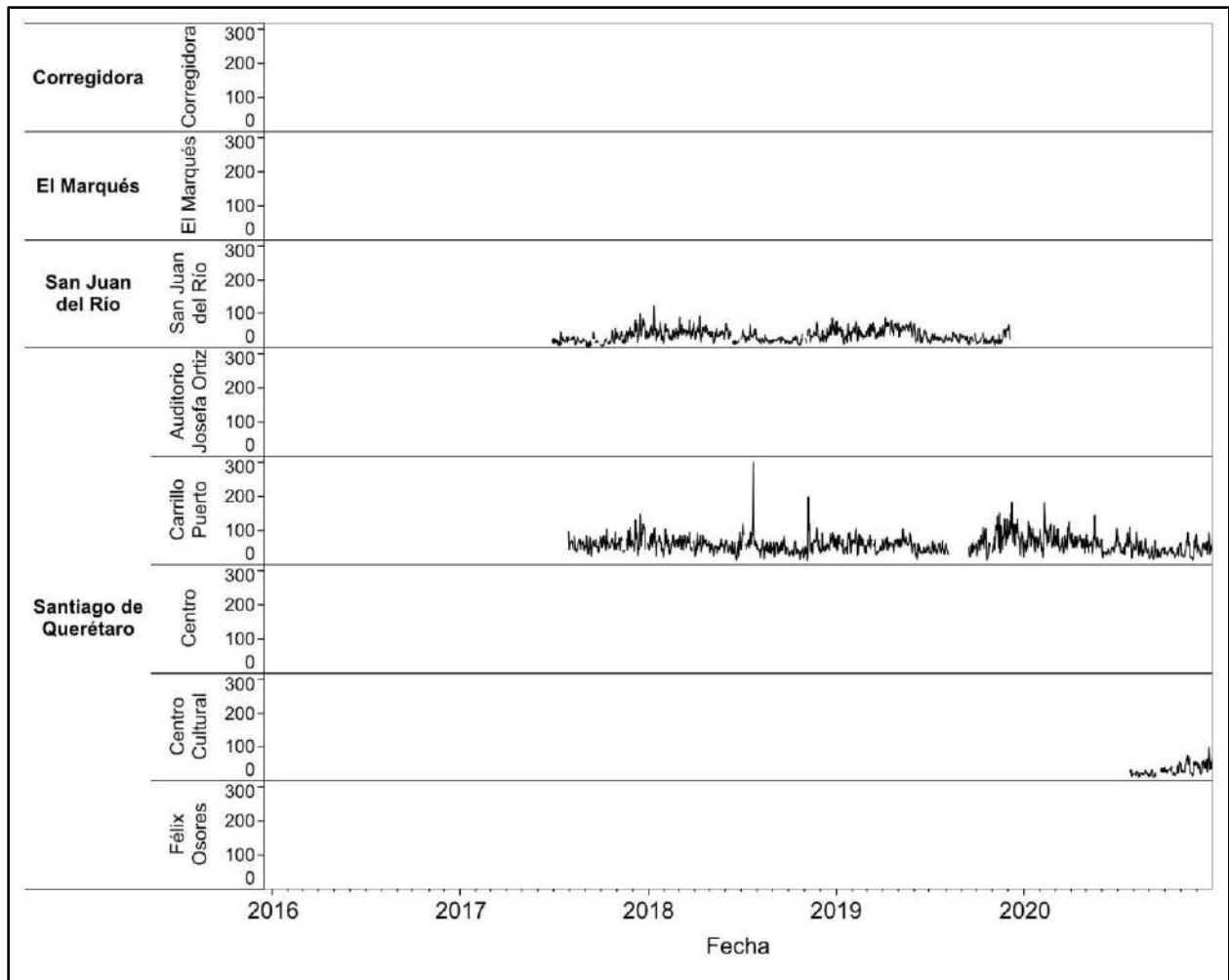




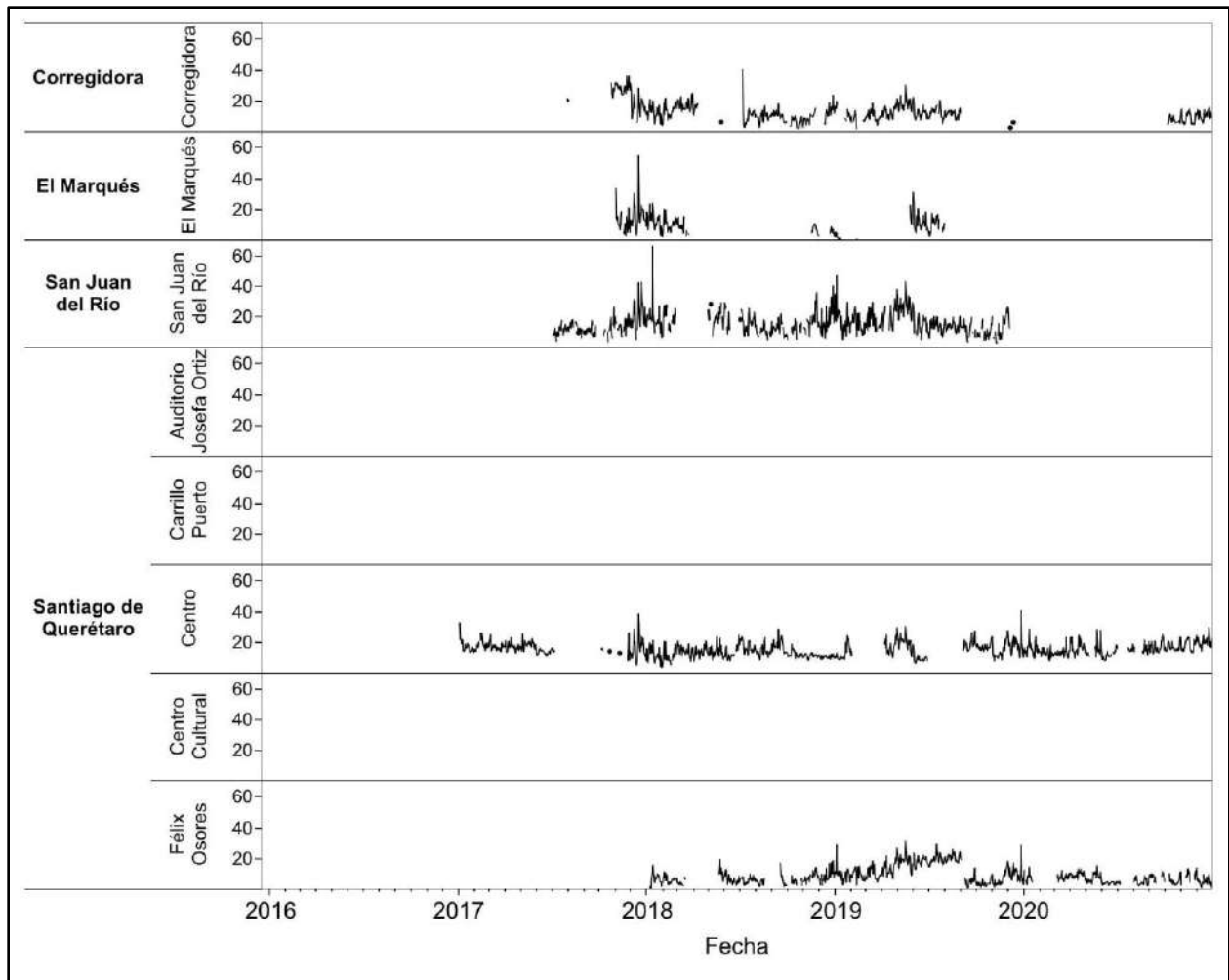
**Figura AB-16.** Series de tiempo de los promedios diarios de ozono en las estaciones del estado de Querétaro durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).



**Figura AB-17.** Series de tiempo de los promedios diarios de dióxido de azufre en las estaciones del estado de Querétaro durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en partes por millón (ppm).



**Figura AB-18.** Series de tiempo de los promedios diarios de  $PM_{10}$  en las estaciones del estado de Querétaro durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Figura AB-19.** Series de tiempo de los promedios diarios de  $PM_{2.5}$  en las estaciones del estado de Querétaro durante el periodo 2016-2020. Los promedios diarios se calcularon empleando los datos horarios disponibles en la base de datos del SINAICA, considerando un requerimiento mínimo de 75% de datos válidos para el cálculo. Las concentraciones se expresan en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

## CAPÍTULO 3. EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA MEGALÓPOLIS

### 3.1. Desarrollo de inventarios de emisiones en la Megalópolis

El deterioro de la calidad del aire como resultado de la emisión de los contaminantes atmosféricos en la Megalópolis es un problema creciente por sus severos impactos en el medio ambiente y en la salud de la población. Existe también un interés a nivel nacional e internacional por controlar la contaminación del aire y reducir los impactos del cambio climático mediante la reducción, manejo y control de las emisiones de fuentes de sectores clave. La contaminación atmosférica ocasiona grandes costos económicos y severos impactos sociales derivados de sus altos efectos en la mortalidad y la morbilidad, deteriorando la calidad de vida de la población. Es por ello imprescindible identificar las fuentes de origen y las características de las emisiones de los contaminantes primarios, en especial de aquellos que son precursores de contaminantes secundarios que pueden ser altamente tóxicos y persistentes, y afectar la salud pública.

Identificar y caracterizar las emisiones debe ser el primer paso en el diseño de los programas para la prevención y control de la contaminación del aire. Más aún, debe revisarse y actualizarse periódicamente la información sobre las emisiones como parte de los procesos de evaluación de la efectividad de los programas de control. Una de las líneas de acción prioritarias dentro de los programas de control en las zonas urbanas consiste en el desarrollo de herramientas técnicas para la formulación de estrategias de reducción de las emisiones contaminantes, a través de la elaboración de inventarios de emisiones contaminantes a la atmósfera. En todo caso, los inventarios de emisiones son instrumentos indispensables en los procesos de gestión de calidad del aire y en la toma de decisiones, ya que son el punto de partida y una herramienta imprescindible para el diseño, la implementación y evaluación de programas para mejorar la calidad del aire.

En su nivel más básico, un inventario de emisiones es un conjunto de bases de datos que identifican, caracterizan y describen las emisiones de contaminantes atmosféricos de acuerdo con el tipo de fuente emisora, la composición química y la cantidad de contaminantes emitidos en un área geográfica y un intervalo de tiempo determinados (US EPA, 1999). Sin embargo, también los inventarios de emisiones pueden ser herramientas sofisticadas constituidas por bases de datos dinámicas utilizadas para representar la compleja especiación de compuestos químicos y la alta resolución de las distribuciones espaciales (de metros a 1 kilómetro) y temporales (de 1 hora a varios días) de las fuentes emisoras. El nivel de sofisticación de un inventario se relaciona con los objetivos para su uso, los recursos técnicos, de infraestructura y de tiempo empleados para su elaboración, y del grado de incertidumbre aceptable que se desee utilizar.

En principio, los inventarios de emisiones se desarrollan siguiendo métodos de estimación desagregados (de abajo hacia arriba, *bottom-up*) o agregados (de arriba hacia abajo, *top-down*) que utilizan información de factores de emisión, datos de actividad y resultados de modelos de emisión. Sin embargo, en la práctica los inventarios se integran utilizando una combinación de ambos

métodos dependiendo de la información disponible, los objetivos del inventario, y los niveles de incertidumbre que con que se decida elaborar las estimaciones.

En general, el inventario de las emisiones estimadas de los contaminantes criterio y otros contaminantes atmosféricos se agrupan en cuatro categorías según su tipo de fuente: i) fuentes móviles: vehículos de carretera como automóviles, autobuses y camiones comerciales, motocicletas, vehículos fuera de carretera tales como aeronaves, buques marinos, equipos de construcción y agrícolas; ii) fuentes puntuales o estacionarias: instalaciones de ubicación fija, como fábricas, refinerías, calderas y centrales eléctricas; iii) fuentes de área: operaciones industriales, comerciales y de servicios en pequeña escala; instalaciones municipales de residuos sólidos y vertederos; plantas de tratamiento de aguas residuales; productos de consumo; calefacción/refrigeración residencial y uso de combustible; actividades de construcción; actividades agrícolas y operaciones confinadas de alimentación animal; caminos sin pavimentar; y iv) fuentes naturales: como vegetación, polvo arrastrado por el viento, volcanes, incendios forestales y rocío de sal marina.

Los inventarios de emisiones proporcionan datos de entrada esenciales para los modelos de transporte químico atmosférico, los cuales son descritos en el Capítulo 4. Las incertidumbres en las fuentes de emisión son un factor importante para determinar la precisión de las simulaciones y pronósticos obtenidos de los modelos, por lo que las incertidumbres de las emisiones pueden tener grandes impactos en el diseño de estrategias de control.

En esta sección se presenta un resumen de la situación actual del estado del conocimiento del desarrollo de inventarios de emisiones relevantes para la Megalópolis, las lecciones aprendidas y los retos principales para mejorar el conocimiento de las emisiones en la región.

### **3.2. Inventario nacional de emisiones**

Junto con la introducción de las primeras estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos en México, los esfuerzos iniciales por mejorar la calidad del aire en la década de los 90's incluyeron también las primeras acciones para estimar los contaminantes atmosféricos tales como partículas suspendidas totales (PST), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Es importante hacer notar que los primeros esfuerzos por caracterizar las fuentes emisoras a través de un inventario, tuvieron como finalidad el dar respuesta a grandes reclamos sociales por reducir las emisiones por el deterioro evidente de la calidad del aire en el área metropolitana de la Ciudad de México. En particular, las autoridades ambientales de la Ciudad de México en esa época comenzaron a estimar las emisiones de las principales fuentes emisoras de la ciudad, incluyendo algunas fuentes relevantes de área, fuentes móviles a gasolina y a diésel, y algunas de las principales fuentes federales industriales (grandes emisores). La información obtenida fue útil para definir las primeras acciones para controlar la contaminación en la Ciudad de México (Molina et al., 2002).

A nivel federal, se creó el primer Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) para el año base de 1999 como resultado del grupo de trabajo de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (DGGCARETC) de

la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Recientemente la DGGCARETC fue sustituida por la Dirección General de Industria, Energías Limpias y Gestión de la Calidad del Aire (DGIELGCA) y es la responsable de la elaboración del inventario. El INEM incluye información de las emisiones de los contaminantes: monóxido de carbono (CO), NO<sub>x</sub>, óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), partículas con un diámetro aerodinámico de menos de 10 y 2.5 micrómetros (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, respectivamente), compuestos orgánicos volátiles (COV) y amoníaco (NH<sub>3</sub>) emitidos por las principales fuentes antropogénicas y biogénicas (<https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>, consultado el 26 de noviembre de 2022). El INEM también incluye la estimación de emisiones de carbono negro (CN) y de gases de efecto invernadero (GEI), pero utilizando metodologías que no son del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés).

En la elaboración del INEM, el grupo de trabajo de la SEMARNAT ha colaborado tradicionalmente con otras instancias dependientes del Gobierno Federal y autoridades ambientales de los estados y municipios, así como con organizaciones académicas, de investigación y no gubernamentales. Se han realizado estimaciones subsecuentes del INEM para los años base 2005, 2008, 2011, 2013, 2014 y 2016, buscando en cada versión mejorar la precisión de la información obtenida mediante actualizaciones de los modelos de emisión, factores de emisión y datos de actividad utilizados. A su vez, cada versión del INEM ha permitido mantener la capacidad técnica del personal especializado a nivel federal en la generación del inventario al incorporar la experiencia del personal de otras agencias gubernamentales. La SEMARNAT genera las guías, los lineamientos y directrices generales para estimar los inventarios de la mayoría de las entidades del país. Sin embargo, es importante que la experiencia acumulada en la elaboración de inventarios de emisiones sea también transferida al personal técnico de otros estados y municipios.

A nivel de la Megalópolis, es necesario aumentar la resolución espacial y temporal del inventario de emisiones, así como la especiación química de los perfiles de COV y partículas suspendidas (PM, acrónimo en inglés para *particulate matter*) e incluir fuentes emergentes de contaminación. Actualmente, solo la Ciudad de México cuenta con un inventario de emisiones para todas las fuentes de su interés con resoluciones espacial y temporal adecuadas para modelación de toda la entidad, y mantiene un esfuerzo continuo para identificar y cuantificar nuevas fuentes de emisión considerando el uso de observaciones en la estimación de perfiles de emisión y su variabilidad temporal. Otros retos significativos en la elaboración del INEM incluyen la disponibilidad de datos de actividad, la actualización de factores de emisión determinados a nivel regional para uso local, y la disponibilidad de personal técnico en las entidades para elaborar los inventarios y mantenerlos actualizados, así como preservar la trazabilidad de los datos y mejorar la estimación de las incertidumbres.

Además del INEM, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es el responsable de elaborar el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), tal como se establece en el Ley General de Cambio Climático (LGCC) (INECC, 2021). El INEGYCEI es una herramienta de gestión ambiental fundamental para el desarrollo de políticas relacionadas con la mitigación del cambio climático y también los compromisos internacionales que México presentó ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), incluyendo la Contribución Nacional

Determinada (CND o NDC por sus siglas en inglés) como parte de las negociaciones internacionales del Acuerdo de París (INECC, 2022).

El INEGYCEI se desarrolla siguiendo los criterios establecidos por el IPCC y se actualiza periódicamente para ser presentado en las Comunicaciones Nacionales de México ante la CMNUCC. El inventario contiene el resultado de la estimación de las emisiones y absorciones de gases y compuestos de efecto invernadero derivados de la energía, los procesos industriales y el uso de productos, la agricultura, la silvicultura y otros usos del suelo y los residuos. La versión más reciente del INEGYCEI incluye estimaciones de emisiones de CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y CN para el período 1990 a 2019 (INECC, 2021).

### **3.3. Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México**

En paralelo a la elaboración del INEM y del INEGCEI, las autoridades de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México y del Estado de México en coordinación con la DGIELGCA, han logrado establecer un grupo de trabajo con gran experiencia en la elaboración del inventario de emisiones de contaminantes criterio, de GEI y de forzadores climáticos de vida corta (FCVC)<sup>1</sup>, de las principales fuentes de emisión de la ZMVM. En diversas versiones del inventario también se han incluido las estimaciones de emisiones de varios municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM para crear el Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM (IE-ZMVM). El IE-ZMVM reporta los resultados con una cobertura geográfica que incluye las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios conurbados del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo.

Desde principios de la década de 1990, la SEDEMA ha publicado el IE-ZMVM cada dos años y cubre cuatro categorías generales: fuentes puntuales (industria), fuentes de área (servicios y residencial), fuentes móviles (transporte) y fuentes naturales (vegetación y suelo). La versión más reciente del IE-ZMVM está disponible para el año base 2018 (el inventario de emisiones 2020 se encuentra en elaboración y será publicado durante el segundo semestre de 2023), que también incluye emisiones de contaminantes tóxicos y GEI (expresados como CO<sub>2</sub>eq) de las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios contiguos del Estado de México y el municipio de Tizayuca, Hidalgo (SEDEMA, 2021). La Tabla 3.1 resume las estimaciones de las emisiones contaminantes durante 2018 por tipo de fuente y jurisdicción, mientras que la Figura 3.1 muestra la contribución porcentual de las emisiones por contaminante, fuente y su jurisdicción.

---

<sup>1</sup> Los forzadores climáticos de vida corta (FCVC o SLCF, por sus siglas en inglés) también se conocen como contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés).



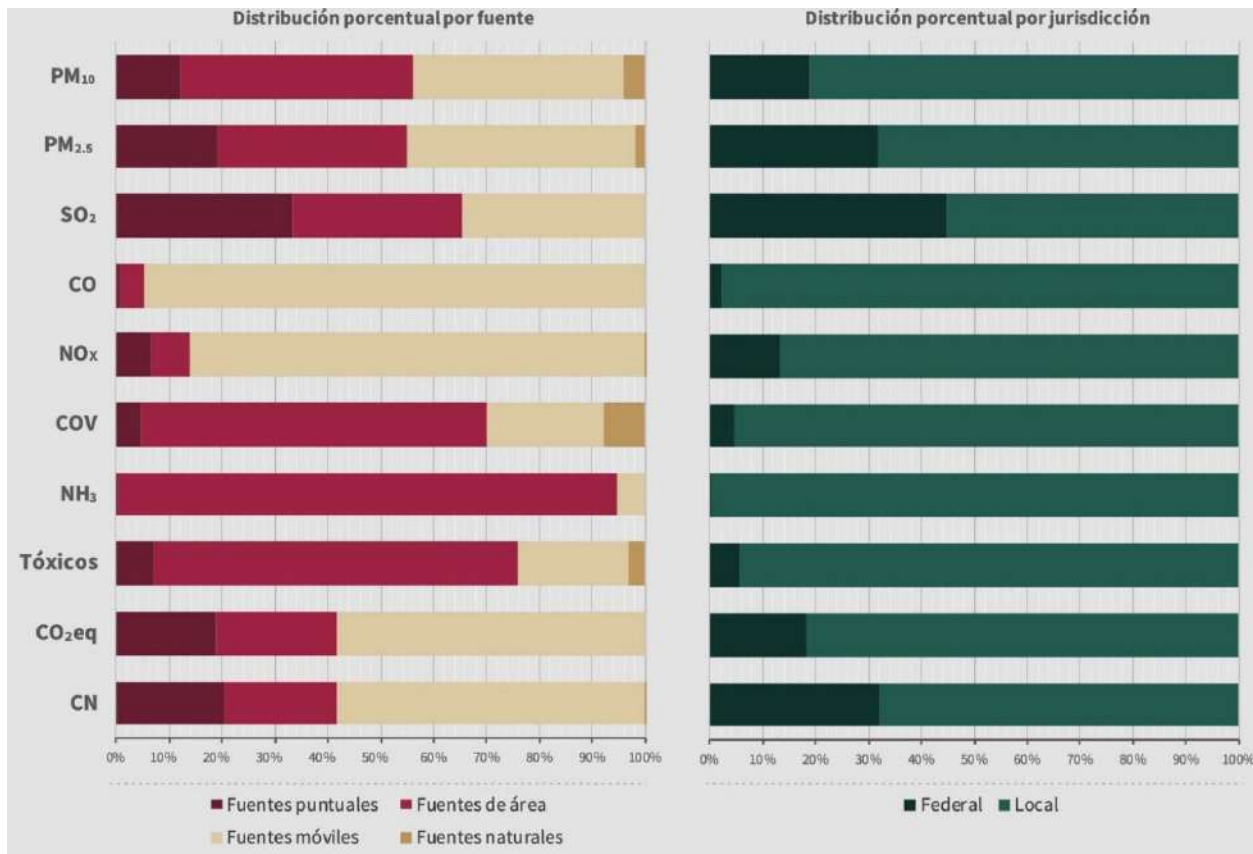
**Tabla 3.1.** Inventario de emisiones para la ZMVM en 2018 por fuente y jurisdicción (SEDEMA, 2021).

Tipo de fuente	Jurisdicción	Emisiones ZMVM, 2018 [t/año]									
		PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	COV	NH <sub>3</sub>	Tóxicos	CO <sub>2eq</sub>	CN
Fuentes puntuales	Local	1,073	754	110	1,971	2,085	14,202	46	5,834	2,691,512	102
	Federal	3,112	2,420	908	3,768	7,421	4,801	94	2,717	11,548,040	432
	<b>Subtotal</b>	<b>4,184</b>	<b>3,174</b>	<b>1,019</b>	<b>5,739</b>	<b>9,506</b>	<b>19,003</b>	<b>140</b>	<b>8,551</b>	<b>14,239,552</b>	<b>534</b>
	<b>Aporte</b>	<b>12.0%</b>	<b>19.2%</b>	<b>33.2%</b>	<b>0.8%</b>	<b>6.6%</b>	<b>4.6%</b>	<b>0.3%</b>	<b>7.0%</b>	<b>19.0%</b>	<b>20.4%</b>
Fuentes de área	Local	15,313	5,837	812	31,520	8,587	257,366	44,218	80,329	16,536,626	538
	Federal	72	69	179	2,378	2,037	13,767	1	3,856	533,269	16
	<b>Subtotal</b>	<b>15,385</b>	<b>5,906</b>	<b>991</b>	<b>33,898</b>	<b>10,624</b>	<b>271,133</b>	<b>44,219</b>	<b>84,185</b>	<b>17,069,895</b>	<b>555</b>
	<b>Aporte</b>	<b>44.2%</b>	<b>35.8%</b>	<b>32.3%</b>	<b>4.6%</b>	<b>7.4%</b>	<b>65.5%</b>	<b>94.2%</b>	<b>69.0%</b>	<b>22.7%</b>	<b>21.2%</b>
Fuentes móviles	Local	10,367	4,361	768	679,781	114,111	90,315	2,539	25,092	42,158,128	1,131
	Federal	3,396	2,737	290	9,473	10,004	1,456	33	399	1,697,932	395
	<b>Subtotal</b>	<b>13,763</b>	<b>7,098</b>	<b>1,059</b>	<b>689,254</b>	<b>124,115</b>	<b>91,771</b>	<b>2,572</b>	<b>25,491</b>	<b>43,856,060</b>	<b>1,526</b>
	<b>Aporte</b>	<b>39.6%</b>	<b>43.0%</b>	<b>34.5%</b>	<b>94.6%</b>	<b>85.8%</b>	<b>22.2%</b>	<b>5.5%</b>	<b>20.9%</b>	<b>58.3%</b>	<b>58.4%</b>
Fuentes naturales	Local	1,447	322	N/A	N/A	353	31,914	N/A	3,778	N/A	0.3
	Federal	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	<b>Subtotal</b>	<b>1,447</b>	<b>322</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>353</b>	<b>31,914</b>	<b>N/A</b>	<b>3,778</b>	<b>N/A</b>	<b>0.3</b>
	<b>Aporte</b>	<b>4.2%</b>	<b>2.0%</b>	<b>N/A</b>	<b>N/A</b>	<b>0.2%</b>	<b>7.7%</b>	<b>N/A</b>	<b>3.1%</b>	<b>N/A</b>	<b>&lt;0.1%</b>
Total ZMVM	Local	28,200	11,274	1,691	713,272	125,136	393,797	46,804	115,033	61,386,266	1,772
		81.1%	68.3%	55.1%	97.9%	86.5%	95.2%	99.7%	94.3%	81.7%	67.7%
	Federal	6,580	5,226	1,377	15,619	19,462	20,024	127	6,972	13,779,241	844
		18.9%	31.7%	44.9%	2.1%	13.5%	4.8%	0.3%	5.7%	18.3%	32.3%
	<b>Total</b>	<b>34,779</b>	<b>16,500</b>	<b>3,068</b>	<b>728,891</b>	<b>144,598</b>	<b>413,821</b>	<b>46,931</b>	<b>122,005</b>	<b>75,165,507</b>	<b>2,615</b>

Notas: N/A: no aplica, el contaminante no es emitido por la fuente referida. Los totales pueden variar por el redondeo de cifras.

Según el IE-ZMVM 2018, el sector del transporte es responsable del 50% del consumo de combustibles fósiles y es el principal emisor de PM<sub>2.5</sub> (43%), PM<sub>10</sub> (40%), CO (95%), SO<sub>2</sub> (35%) y NO<sub>x</sub> (86%). Dentro de las fuentes móviles, el principal emisor de PM<sub>2.5</sub> son los vehículos a diésel, que corresponden en su mayoría a unidades pesadas como autobuses, remolques de tractores y vehículos de carga, debido a la baja penetración de tecnologías más eficientes (por ejemplo, EURO VI o EPA 2010) y equipos de control de emisión (por ejemplo, filtros de partículas). Por otro lado, el transporte privado (coches, SUVs, motos) contribuye significativamente al resto de contaminantes prioritarios, ya que estas unidades son las más numerosas. Las fuentes móviles también aportan aproximadamente una quinta parte de las emisiones de COV y de compuestos tóxicos, básicamente provenientes de unidades de gasolina.

En el sector industrial, las industrias metalúrgicas y de generación de electricidad son las principales fuentes de emisión de PM, mientras que la industria papelera y de fabricación de productos a base de minerales no metálicos también contribuyen a las emisiones de PM y son las principales fuentes de SO<sub>2</sub>. Las fuentes puntuales contribuyen a las emisiones de COV, principalmente de la impresión y las industrias relacionadas, y de la industria química.



**Figura 3.1.** Aportes de las fuentes de emisión al inventario de emisiones de la ZMVM 2018 (SEDEMA, 2021).

Las fuentes de área, aunque pueden no emitir mucho individualmente debido a su tamaño pequeño, cuando se suman representan contribuciones significativas de PM, CO<sub>2</sub>, COV, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y tóxicos. Como se muestra en la Tabla 3.1, las fuentes de área son el principal emisor de COV (66%). Más del 30% de las emisiones de COV se deben al uso comercial y doméstico de disolventes en productos de consumo diario, como los de cuidado personal, pesticidas, recubrimientos arquitectónicos y productos de cuidado automotriz. Una quinta parte de las emisiones de COV son el resultado de fugas en las instalaciones de GLP. Otra fuente importante es la eliminación de residuos urbanos sólidos y líquidos. Las fuentes de área, como el uso doméstico y comercial de disolventes, las aguas residuales no tratadas y la quema de desechos al aire libre son fuentes importantes de compuestos tóxicos (69%). Como parte de la estrategia para reducir la generación de residuos en la Ciudad de México, a partir del 1 de enero de 2021 se prohibió la comercialización, distribución y entrega de bolsas plásticas de un solo uso y otros productos plásticos<sup>2</sup>. El gobierno de la ciudad también anunció la apertura de la planta de carbonización hidrotermal ubicada en el

<sup>2</sup> "Prohibición de plásticos de un solo uso." Disponible en <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/prohibicion-de-plasticos-de-un-solo-uso/> (Consultado 16 de mayo de 2023).

vertedero Bordo Poniente que convertirá los residuos orgánicos en electricidad y pellets de carbón vegetal con cero emisiones de GEI.<sup>3</sup>

La suspensión de polvo del tráfico en carretera, las actividades agrícolas y la quema a cielo abierto de residuos, contribuyen significativamente a las emisiones de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Las fuentes de la zona también son importantes emisores de gases de efecto invernadero y compuestos, como se indica a continuación. Otras actividades que se contabilizan dentro de las fuentes del área incluyen incendios forestales e incendios estructurales, que son eventos extraordinarios y transitorios, y cuando se combinan con condiciones meteorológicas adversas, pueden agravar seriamente la calidad del aire en la ZMVM y otras regiones de la Megalópolis. Como parte de la estrategia de manejo del fuego para el área forestal de la Megalópolis auspiciada por CAME, la Universidad Autónoma Chapingo (UACH, 2021) ha elaborado un diagnóstico para apoyar a las entidades de la Megalópolis en la actualización de sus programas de manejo del fuego con base en el programa nacional elaborado por la CONAFOR (Comisión Nacional Forestal).

El inventario de gases y compuestos de efecto invernadero abarca cuatro gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y HFC), que se estimaron utilizando las directrices del IPCC (IPCC, 2006, 2021) y se notificaron conjuntamente como CO<sub>2</sub>eq. Como se muestra en la Tabla 3.1, el sector del transporte genera las mayores emisiones de CO<sub>2</sub>eq (58%), mientras que el sector industrial (principalmente la industria del papel y la generación de electricidad) contribuye con el 19% de las emisiones. Las fuentes del área representaron el 23% de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq, los principales emisores son los rellenos sanitarios, los procesos de combustión en los hogares y las industrias no reguladas.

Cuando las emisiones de cada GEI se analizan individualmente, el uso de combustibles fósiles en el transporte, la vivienda y la industria es la principal fuente de CO<sub>2</sub>. Para el CH<sub>4</sub>, uno de los forzadores climáticos de vida corta, la mayoría de las emisiones provienen de la eliminación y tratamiento de residuos sólidos y líquidos, junto con las actividades ganaderas. También se estimaron las emisiones de CN, otro forzador climático de vida corta. El transporte es el principal emisor de CN, ya que representa una fracción de PM<sub>2.5</sub>. Los vehículos pesados a diésel tienen la mayor contribución de CN, mientras que otras categorías relevantes incluyen la generación de electricidad, la maquinaria agrícola y de construcción, la quema al aire libre de residuos sólidos y las carreteras pavimentadas.

Dentro de las fuentes naturales, la vegetación contribuye con aproximadamente el 7.7% de las emisiones totales de COV, principalmente isopreno y monoterpenos de los árboles. La erosión eólica contribuye a las emisiones de PM<sub>10</sub> (4.2%) y PM<sub>2.5</sub> (2%).

Como se mencionó anteriormente, es importante mejorar las estimaciones de emisiones reduciendo las incertidumbres asociadas. En el caso de la ZMVM, el inventario de emisiones se desarrolla buscando su mejora continua; sin embargo, las incertidumbres en las estimaciones deben reducirse aún más mediante la actualización y mejora de los factores de emisión y los datos de actividad, la actualización de la normativa y su estandarización a nivel regional y nacional. Dentro

---

<sup>3</sup> "Planta de Carbonización Hidrotermal de la Ciudad de México, una revolución tecnológica" Disponible en <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/planta-de-carbonizacion-hidrotermal-de-la-ciudad-de-mexico-una-revolucion-tecnologica/> (Consultado 16 de mayo de 2023).

de los principales retos para reducir las incertidumbres en los inventarios de emisiones sobresale la necesidad de homogenizar los procedimientos de estimación para la ZMVM y las demás entidades de la Megalópolis. La falta de estandarización de procedimientos dificulta además la comparación entre inventarios y el desarrollo de programas de control a nivel regional. Adicionalmente, el que no exista un programa continuo de evaluación de los inventarios en la ZMVM que esté basado en mediciones de campo presenta un reto mayor para conocer la confiabilidad de las estimaciones.

La SEDEMA ha realizado un esfuerzo concertado para mejorar el inventario de emisiones de COV, ya que es una de las principales incertidumbres en la modelación de la formación de O<sub>3</sub>. Uno de los desafíos para reducir la incertidumbre en las emisiones de COV es el sector informal. Por ejemplo, las fugas de gas licuado de petróleo (GLP) continúan como la principal fuente de COV, en particular propano y butano, desde que fue caracterizado durante la campaña MCMA-2003 (Velasco et al., 2007). Si bien el GLP es el principal combustible utilizado en el sector residencial, también se sabe que los cilindros de GLP se utilizan en el sector informal. Por lo tanto, es necesario realizar un diagnóstico para determinar cuánto GLP del sector doméstico es realmente consumido en el sector informal, además de estimar el que proviene del sistema propulsor de las latas de aerosoles. Adicionalmente, no se han estimado emisiones de COV del sector informal de alimentos, por ejemplo, las frituras, y es fundamental contar con datos de estadísticas de consumo por tipo de combustible en este sector.

En general, la información compilada en el inventario de la SEDEMA y del Estado de México ha sido fundamental en el trabajo de la CAME para el diseño de las políticas para mejorar la calidad del aire en la zona metropolitana, incluyendo la orientación de los programas para la activación de contingencias ambientales, y en las actividades de divulgación y pronósticos de la calidad del aire tal como se establece en el ProAire.

### **3.4. Retos y recomendaciones para mejorar la estimación de emisiones**

- **Incorporación de métodos de control de calidad durante el desarrollo de los inventarios de emisiones.** Es importante que los grupos de trabajo responsables del desarrollo de inventarios de emisiones relevantes para la Megalópolis implementen las metodologías de control de calidad disponibles durante la preparación de inventarios de emisiones. La aplicación sistemática del control de calidad durante la elaboración de un inventario es crucial para obtener coherencia, integridad, comparabilidad, representatividad y transparencia de la información obtenida.

La aplicación de controles de calidad permitirá identificar las principales áreas con incertidumbre en el inventario, así como los retos existentes para mejorar las estimaciones en cada versión sucesiva. El control de calidad debe incorporarse con técnicas estadísticamente robustas paralelas a la preparación del inventario y no después. Uno de los principales desafíos para incorporar sistemáticamente los procesos de control de calidad es institucionalizar el apoyo a los grupos de trabajo en términos de asignación de los recursos financieros, de infraestructura y de capacitación necesarios.

- **Evaluación independiente de los inventarios.** El INEM, INEGYCEI y el IE-ZMVM generalmente utilizan una combinación de métodos para estimar las emisiones, que incluyen: (1) muestreo directo de fuentes (principalmente para fuentes industriales); (2) estimaciones indirectas utilizando una combinación de técnicas de balance de masa y modelos, por ejemplo, MOVES-México, Modelo Mexicano de Biogás, el modelo *Non-Road* para fuentes fuera de carretera, y el Sistema de Modelación de Emisiones y Dispersión (EDMS), entre otros; (3) técnicas de extrapolación para la combinación de factores de emisión con datos de actividad; y (4) las directrices del IPCC para estimar las emisiones de los GEI.

La aplicación conjunta de diversos métodos representa un esfuerzo significativo para obtener, procesar y analizar la información necesaria para elaborar los inventarios de emisiones. Sin embargo, es necesario incorporar técnicas para evaluar la incertidumbre y revisiones independientes. Las emisiones estimadas en los inventarios deben basarse en la verificación y análisis independientemente de la fuente de información utilizada. El primer desafío por resolver es la promoción sistemática del trabajo y la colaboración continua con instituciones y agencias federales, estatales y locales que generan y procesan la información de datos de actividad, para garantizar la coherencia entre los datos reportados, las aproximaciones utilizadas y los datos obtenidos en condiciones reales de operación.

La experiencia de las campañas de medición de campo en la ZMVM en 2002, 2003 y 2006 (Molina et al., 2007; 2010) mostró que la información integrada obtenida de estudios de campo, actividades de modelación, redes de monitoreo, consultas dirigidas y visitas guiadas, es una herramienta importante que puede utilizarse con éxito para la evaluación y el análisis de las emisiones estimadas en los inventarios locales. Algunas herramientas valiosas para la evaluación independiente de las emisiones utilizan métodos indirectos como la modelación independiente de emisiones en combinación con campañas de monitoreo de emisiones, así como estudios a largo plazo con la aplicación conjunta de diversas técnicas, incluidos sensores remotos para fuentes móviles e industriales, técnicas de modelación inversa, procesamiento de información satelital, torres de flujo de covarianza de vórtices turbulentos (*eddy covariance*) para fuentes de área, muestreo en túneles y con sistemas portátiles para emisiones vehiculares, entre otros.

- **Actualización de los factores de emisión y datos de actividad.** Debido a los continuos cambios en la tecnología, los requisitos regulatorios de combustible y los cambios en los procesos, es necesario realizar la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad. Es indispensable que los tomadores de decisiones y las autoridades ambientales de la Megalópolis promuevan estudios de campo y encuestas para actualizar la información utilizada en los inventarios.

Hay fuentes de emisión clave que deben priorizarse para la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad, ejemplos de estas fuentes incluyen: los vehículos de gasolina, los vehículos fuera de carretera, las motocicletas, los vehículos diésel pesados y los empleados en el transporte de pasajeros y carga. Las emisiones de resuspensión de polvo en las carreteras, las de COV provenientes de las pinturas, el manejo de solventes, desinfectantes, limpiadores, impermeabilizantes, y desechos infecciosos, así

como las emisiones de la cocción en el sector informal y de los servicios, son ejemplos de fuentes clave con una alta incertidumbre en sus estimaciones y que deben revisarse continuamente.

- **Coordinación entre las autoridades ambientales y grupos de trabajo que desarrollan los inventarios de emisiones.** Se ha observado que cada entidad que conforma la Megalópolis es tanto emisora como receptora de contaminantes, por lo que es necesario fortalecer la coordinación entre las diferentes entidades para mejorar las estimaciones de emisiones a nivel regional. Además, es imprescindible mejorar la coordinación entre los grupos de trabajo que elaboran los inventarios de emisiones lo que permitirá que la generación, procesamiento y análisis de la información sea eficiente y transparente. Esto contribuirá a mejorar la gestión de la calidad del aire y reducir los niveles de contaminación en la Megalópolis. Es importante comprender la emisión y el transporte regional de contaminantes para coordinar las medidas de control dentro de la Megalópolis. Muchas de las políticas públicas sólo podrán maximizar su beneficio si existe coordinación entre las dependencias gubernamentales de las diferentes entidades.
- **Aumentar y ampliar las capacidades técnicas.** Como parte de la implementación de un proceso para mejorar la coordinación entre las autoridades ambientales, también es importante aumentar y ampliar las capacidades técnicas para la elaboración de inventarios por parte de los grupos de trabajo de las diferentes entidades de la Megalópolis a nivel federal, estatal y municipal. Se requiere de una mejor coordinación y capacidad técnica para generar (en versiones sucesivas) un inventario regional de emisiones para la Megalópolis que sea integral, robusto, preciso, confiable y que sirva de apoyo en la modelación, el pronóstico y el diseño de programas que permitan mejorar la calidad del aire. Es necesario que sean de acceso público los informes de los inventarios de emisiones, la metodología de cálculo y el manejo de las incertidumbres.
- **Mejorar la estimación de fuentes móviles.** En el caso de las emisiones vehiculares, actualmente la mayoría de los inventarios en México se desarrollan utilizando el modelo MOVES-México, el cual es una adaptación del modelo MOVES (*Motor Vehicle Emissions Simulator*) de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés). El modelo MOVES-México permite estimar las emisiones ajustando los cálculos con bases de datos locales, tales como datos de campañas de monitoreo con sensores remotos, datos de programas de verificación vehicular, pruebas de emisiones a vehículos nuevos y formulación de combustibles, además de las condiciones climáticas y características locales y regionales. Sin embargo, un desafío importante en la adaptación es la representación adecuada de las condiciones reales de manejo. Por lo tanto, debido a las particularidades del tránsito que tienen las distintas ciudades, deben mejorarse las estimaciones de los factores de emisión y datos de actividad.

La primera versión del MOVES-México fue usada en el país en el año 2016, realizando ajustes al modelo MOVES de Estados Unidos versión 2014a, para la estimación de emisiones de vehículos en carretera. En el año 2022, se actualizó el modelo para México llamándolo MOVES-México 2022, ajustando las bases de datos con información reciente

de sensores remotos, programas de verificación vehicular, flota y actividad vehicular. El modelo estará disponible públicamente durante el segundo semestre de 2023.

MOVES-México 2022 se basó en el modelo MOVES de Estados Unidos 2014b, en lugar del MOVES3 (US EPA, 2022), que fue publicado por la EPA en 2022 e incluyó el estado de la ciencia sobre las emisiones de fuentes móviles. Sin embargo, las modificaciones de MOVES3 no aplicarían en México, ya que presentan nuevas mediciones de emisiones en Estados Unidos y también ajustes a las emisiones de vehículos fuera de carretera cuyos factores de emisión no han sido evaluados para México.

Como parte de la campaña de FCVC coordinada por el MCE2 en la Ciudad de México, en 2013 se determinaron los componentes de PM (CN, carbono orgánico y otros componentes inorgánicos de PM<sub>2.5</sub>) y los gases (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, COV) presentes en las emisiones de varios vehículos diésel (autobuses, camiones de carga) con diferentes años modelo y tecnologías de control de emisiones, en condiciones reales de conducción utilizando la técnica de persecución con el Laboratorio Móvil Aerodyne (ver Capítulo 4, Sección 4.5). La comparación de los resultados con el modelo US-EPA MOVES 2014b mostró desacuerdos para varias especies, demostrando la necesidad de utilizar una base de datos con factores de emisión obtenidos localmente para reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones (Zavala et al., 2017a). Es necesario considerar no solo el ajuste del modelo MOVES-México a las condiciones locales, también la actualización de su versión base para mejorar las estimaciones.

También en 2014, se determinaron factores de emisión para gases (CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) y PM (el componente CN y PM total) para una variedad de vehículos diésel fuera de carretera (equipos de construcción y agrícolas) con y sin filtro de partículas, utilizando la técnica de Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés) en alta resolución temporal. Los resultados mostraron que las reducciones de los factores de emisión de CN fueron significativamente mayores (> 99%) con filtros instalados (Zavala et al., 2017b). A diferencia de los vehículos en carretera, aún no existe una regulación para los niveles de emisiones de los vehículos fuera de carretera pero se encuentra en proceso la elaboración de una NOM. Sus contribuciones relativas aumentan con el tiempo a medida que las emisiones de los vehículos de carretera continúan reduciéndose gracias al uso de mejores tecnologías. Existe una gran necesidad de aumentar la base de datos de factores de emisión para los vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo y de continuar estudiando los beneficios de las tecnologías de control de emisiones de estos vehículos en la Megalópolis.

Además de las emisiones de los sistemas de escape de automóviles, es importante caracterizar las emisiones evaporativas del sistema de combustible y aquellas provenientes del uso y desgaste de neumáticos, frenos y otros sistemas que no son de escape, los cuales incluyen a los metales tóxicos.

Actualmente se encuentra en ejecución el proyecto *Inventario de emisiones contaminantes de fuentes móviles carreteras para la Megalópolis con año base 2018 y la actualización del modelo MOVES México*, por parte de la CAME y SEMARNAT financiado con recursos

del FIDAM-1490. Este proyecto apoyará y brindará capacitación a las siete entidades que conforman la CAME para el desarrollo y actualización de su inventario de emisiones.

- **Mejorar la estimación de emisiones evaporativas por combustibles fósiles.** Actualmente se sabe que la evaporación de gasolinas durante las operaciones de transferencia es una fuente importante de emisiones de compuestos orgánicos en la Megalópolis. La evaporación de combustibles representa además una ineficiencia energética y una importante pérdida económica. Más aún, tiene impactos negativos en la salud de la población debido a la alta toxicidad de varios de sus compuestos orgánicos y a su decisiva participación en la formación de O<sub>3</sub> y aerosoles orgánicos secundarios. Es por tanto necesario controlar las pérdidas por evaporación durante los procesos de manejo y suministro de combustibles en gasolineras y en estaciones de servicio.

El control de las pérdidas de combustibles por evaporación durante los procesos de trasiego y suministro debe basarse en una estrategia integral de normatividad, optimización, actualización y mejora en las diferentes fases de la distribución, desde las refinerías, las terminales de almacenamiento y las estaciones de servicio, así como en la aplicación de métodos técnicos para medir las emisiones y evaluar su eficiencia. Es necesario garantizar la reducción de las emisiones durante el almacenamiento, trasiego y expendio mediante Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV), cuyo funcionamiento debe ser continuo y eficiente de acuerdo con la con la NOM-004-ASEA-2017<sup>4</sup>. La NOM-006-ASEA-2017<sup>5</sup> establece las especificaciones, criterios técnicos y requisitos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente que deben realizarse en las instalaciones terrestres de almacenamiento de petrolíferos y petróleo. La norma indica que las instalaciones deben controlar los vapores de gasolina durante la carga de los auto-tanques con una eficiencia igual o superior al 95%, pero no establece los métodos de prueba, por lo que no hay evidencia de su funcionamiento y cuantificación del control de las emisiones. De igual forma, la NOM-005-ASEA-2016<sup>6</sup> indica que las estaciones de servicio deben contar con dispositivos herméticos para controlar los vapores de gasolina durante la descarga de camiones cisterna. Sin embargo, la norma no establece parámetros ni métodos de prueba. Actualmente, mediante un proyecto de la CAME se evalúa la cobertura y desempeño de los SRV en gasolineras y propondrá modificaciones a las NOM-005-ASEA-2016 y NOM-006-ASEA-2017.

---

<sup>4</sup> Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-004-ASEA-2017, Sistemas de recuperación de vapores de gasolinas para el control de emisiones en estaciones de servicio para expendio al público de gasolinas-Métodos de prueba para determinar la eficiencia, mantenimiento y los parámetros para la operación. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5513203&fecha=14/02/2018#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5513203&fecha=14/02/2018#gsc.tab=0).

<sup>5</sup> Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-006-ASEA-2017, Especificaciones y criterios técnicos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente para el diseño, construcción, pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento de las instalaciones terrestres de almacenamiento de petrolíferos y petróleo, excepto para gas licuado de petróleo. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5533266&fecha=27/07/2018#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5533266&fecha=27/07/2018#gsc.tab=0).

<sup>6</sup> Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-005-ASEA-2016, Diseño, construcción, operación y mantenimiento de Estaciones de Servicio para almacenamiento y expendio de diésel y gasolinas. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5459927&fecha=07/11/2016#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5459927&fecha=07/11/2016#gsc.tab=0).



- **Mejorar las estimaciones de las fuentes industriales.** En las estimaciones se aplican principalmente los factores de emisión de la US EPA, los cuales no necesariamente son aplicables a las condiciones de operación y tecnológicas de los procesos industriales en México. Más aún, cuando no se sigue un control de calidad riguroso los cálculos suelen tener errores y la gran mayoría de los datos registrados en las Cédulas de Operación Anual (COA) no tienen la representatividad de operación necesaria para los inventarios de emisiones. Los datos son recalculados tomando en cuenta los datos de actividad, información histórica y otras fuentes de información, debido a que los reportes de la industria tienen múltiples errores. Varias entidades no cuentan con los reportes anuales de la industria de jurisdicción estatal o éstas no reportan anualmente o de manera confiable. También hay una gran incertidumbre respecto de las emisiones fugitivas y la eficiencia de operación de los sistemas de control que reporta la industria. Estas limitaciones subrayan la necesidad de reducir la incertidumbre en las estimaciones de fuentes industriales.
- **Mejorar las estimaciones de las fuentes área.** Las fuentes del área son pequeñas pero numerosas y contribuyen significativamente a PM, CO<sub>2</sub>, COV, amoníaco (NH<sub>3</sub>), SO<sub>2</sub> y compuestos tóxicos emitidos por diversas fuentes, incluyendo: almacenamiento de productos y distribución de transporte (gasolina, GLP), uso comercial y doméstico de solventes, productos de consumo, gestión de residuos (rellenos sanitarios, quema de basura a cielo abierto, tratamiento de aguas residuales, aguas residuales no tratadas), actividades agrícolas (quema de cultivos, labranza, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, corrales de engorda de ganado, fermentación entérica, manejo del estiércol), resuspensión de polvo, entre otros. A diferencia de las grandes fuentes estacionarias, las fuentes de área generalmente deben cumplir con límites de emisiones menos estrictos. Muchas de las microindustrias pertenecen al sector de la industria informal que no está regulado eficazmente; son pequeñas y numerosas para ser inventariadas, lo que contribuye a una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de emisiones. Por ejemplo, las fuentes de área contribuyeron al 66% de los COV en la ZMVM en 2018 (SEDEMA, 2021). Existen numerosos talleres pequeños de manufactura, pintura, servicios mecánicos, entre otros, que forman parte del sector informal que en conjunto pueden tener aportes significativos de algunos contaminantes como los COV. A medida que las emisiones de COV urbanos procedentes de fuentes relacionadas con el transporte han disminuido debido a los avances tecnológicos y las medidas reglamentarias, los productos químicos volátiles procedentes de fuentes como el cuidado personal y los productos para el hogar, el recubrimiento de aerosoles, la pintura, el uso de disolventes y los plaguicidas han ganado importancia, lo que pone de relieve la necesidad de adoptar medidas reglamentarias para controlar las fuentes. Como se describe a continuación en categorías específicas (COV, quema de biomasa, gases de efecto invernadero), es importante apoyar las mediciones de campo para estimar los factores de emisión para las fuentes de área, así como los estudios para mejorar la estimación de los datos de actividad.
- **Caracterización de emisiones de COV y compuestos orgánicos tóxicos.** Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son de interés en parte porque participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas que contribuyen a la formación de O<sub>3</sub> y tiene un rol en la

formación de aerosoles orgánicos secundarios. Además, se sabe que muchos COV individuales son perjudiciales para la salud humana (tóxicos del aire).

El inventario de emisiones de COV tiene una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de emisiones. Los COV en la ZMVM durante 2018 se emitieron desde una variedad de fuentes, incluidos vehículos motorizados, instalaciones de fabricación de productos químicos, refinerías, fábricas, productos comerciales y de consumo, y fuentes naturales (biogénicas) (principalmente isopreno y monoterpenos de árboles). Alrededor de dos tercios de las emisiones totales (66%) son generadas por fuentes de área, incluido el uso comercial y doméstico de solventes, junto con fugas de GLP (principalmente propano y butano) (SEDEMA, 2021).

El uso comercial y doméstico de disolventes contribuye con aproximadamente el 32% de las emisiones totales de COV. Dentro de esta actividad, ciertos productos tienen un mayor aporte, como productos de cuidado personal, pesticidas y otros productos para consumo doméstico, limpiadores industriales, recubrimientos arquitectónicos y productos para el cuidado automotriz. Con esto en mente, se debe alentar la creación de estándares que limiten el contenido de COV en productos prioritarios, al tiempo que se promueve la adquisición de mercancías con menor contenido de estas sustancias. Los esfuerzos para controlar las emisiones de COV también deben centrarse en abordar las fugas de GLP en hogares, empresas, servicios e industrias, que en conjunto generan el 20% de las emisiones. Se requieren medidas para reducir las fugas, promover el consumo responsable de esta energía y avanzar hacia combustibles más respetuosos con el medio ambiente y tecnologías de energía renovable, como el sistema de calefacción y calentadores solares de agua.

Los contaminantes tóxicos son compuestos que tienen la capacidad de producir directamente efectos adversos sobre la salud de la población o el medio ambiente. La mayoría de estos contaminantes son COV como el tolueno y los xilenos, aunque la clasificación también incluye elementos como el plomo, otros metales pesados, fósforo y sus compuestos.

Los compuestos orgánicos tóxicos representan el 29% de las emisiones totales de COV y las fuentes de área son la principal fuente de emisión, con una contribución del 69% del total de tóxicos en la ZMVM (SEDEMA, 2021). Las principales actividades emisoras están relacionadas con el uso doméstico y comercial de disolventes, la gestión de residuos urbanos y la distribución de gasolina.

En la actualidad se realizan esfuerzos por mejorar la caracterización de los compuestos orgánicos tóxicos no regulados en la Megalópolis. Un ejemplo de ello es el empleo de técnicas como el termodesorbido de aerosoles – cromatógrafo de gases – espectrómetro de masas (TAG-GC-MS, por sus siglas en inglés) por el Laboratorio de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos del ICAYCC-UNAM (Amador-Muñoz et al., 2022). El objetivo es mejorar el entendimiento del origen de los compuestos tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y su relación con fuentes móviles, industriales, solventes, productos del hogar, pinturas, impermeabilizantes, basura y de productos de uso personal, entre otros.

Debido a su relevancia en la química atmosférica y sus efectos tóxicos, es importante mantener y aumentar el apoyo para los estudios dirigidos a la caracterización de las emisiones de COV y de los compuestos orgánicos tóxicos. Además de caracterizar la especiación química de los COV, los estudios deben priorizar un mejor entendimiento de las distribuciones espaciales y temporales de los compuestos orgánicos en la Megalópolis.

- **Emisiones de motocicletas.** Un desafío importante es la regulación para el uso de las motocicletas y la mejora de la estimación de sus emisiones para la Megalópolis. En los últimos años, el crecimiento en el uso de motocicletas en la región ha sido explosivo. Entre otros factores, se debe a la versatilidad de este tipo de unidades para circular en condiciones de alta congestión vehicular (generalmente haciendo caso omiso al reglamento de tránsito), el menor precio de adquisición y la falta de regulación adecuada. La importancia de reglamentar el uso y mantenimiento de las motocicletas, así como mejorar las estimaciones de sus emisiones, radica en el hecho de que en su mayoría circulan con tecnologías emisoras altamente contaminantes, y potencialmente pueden impactar negativamente en la calidad del aire. Actualmente no hay regulaciones para las emisiones de motocicletas, pero la SEMARNAT coordina un grupo de trabajo para la preparación de un proyecto de NOM para limitar sus emisiones.
- **Mejorar las estimaciones de los incendios, la quema de biomasa y las tolveneras.** La quema de biomasa es una de las mayores fuentes de gases traza y aerosoles emitidos a la atmósfera global y es la fuente dominante de CN y aerosoles orgánicos primarios (Andreae, 2019). El humo del fuego también es una fuente importante de gases de efecto invernadero, incluidos el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. Otros contaminantes emitidos incluyen CO, compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y no volátiles, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, cianuro de hidrógeno (HCN) y ácido nitroso (HONO). Hay muchas fuentes y tipos de incendios relacionados con las emisiones de quema de biomasa; algunos son fuentes naturales como incendios forestales no controlados y no planificados, mientras que otros, como las emisiones de la quema de residuos de cultivos, los desechos sólidos municipales, la quema de madera residencial para cocinar y calentar, y el biocombustible para la producción de ladrillos, son el resultado de actividades humanas. Se han utilizado diferentes enfoques para estimar los factores de emisión para la quema de biomasa en la Ciudad de México y la región circundante, incluidas las mediciones directas sobre incendios en experimentos de campo (Christian et al., 2010; Zavala et al., 2018), mediciones de aeronaves (Yokelson et al., 2007, 2011) y mediciones de laboratorio (por ejemplo, Zuhelen et al., 2021, Santiago de la Rosa, 2018). A pesar de los importantes avances en las mediciones de los factores de emisión, la detección y la cuantificación de la quema de biomasa, es necesario mejorar la precisión de las estimaciones de actividad, tanto para la quema a cielo abierto como para el uso de biocombustibles.

La evidencia sugiere que los episodios excepcionales con concentraciones elevadas de contaminación en la región están vinculados a condiciones meteorológicas particulares, junto con la contribución de grandes fuentes de emisión regionales, como la quema de biomasa (agrícola y forestal) y las emisiones de partículas provenientes del suelo descubierto y erosionado. Es importante promover y apoyar estudios de campo, monitoreo,

satelitales y modelación para caracterizar mejor las emisiones de estas fuentes y así gestionar los procedimientos a seguir por la población y las autoridades ambientales durante las contingencias ambientales.

- **Mejorar las estimaciones de gases de efecto invernadero.** Las directrices del IPCC se utilizan generalmente para estimar las emisiones de los GEI con técnicas comparables en todos los países, incluido México. Como parte de la campaña FCVC, coordinada por el MCE2, para caracterizar las principales fuentes de CN, CH<sub>4</sub> y contaminantes asociados, los estudios de campo realizados en México para estudiar las emisiones de CH<sub>4</sub> de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la fermentación entérica del ganado indicaron que las metodologías del IPCC son una herramienta inexacta para estimar los gases de efecto invernadero locales (ver Capítulo 4, Sección 4.5). Es importante determinar factores de emisión específicos a cada fuente emisora para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. Con base en estas mejores estimaciones, se pueden identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

Además, los estudios de campo demostraron la importancia de obtener factores de emisión de CN y contaminantes asociados, en condiciones reales de operación provenientes de vehículos en y fuera de carretera, hornos de ladrillos y estufas, para mejorar las estimaciones de emisiones, ya que México fue el primer país comprometido a reducir el CN como parte de su NDC presentada a la CMNUCC.

- **Incorporación de datos satelitales y de percepción remota para la evaluación de emisiones.** Existen esfuerzos por parte del sector académico en conjunto con autoridades ambientales por incorporar el uso de información satelital como una herramienta de evaluación de los inventarios de emisiones. Un ejemplo de ello es el uso de columnas de NO<sub>2</sub> y formaldehído (HCHO) del instrumento TROPOMI de Sentinel-5P para evaluar cambios en las emisiones en regiones de la Megalópolis. Debido a su gran potencial para evaluar las estimaciones de las emisiones en los inventarios, es importante que se expanda el uso de estas técnicas en México. La incorporación de datos satelitales para la evaluación de emisiones debe también incluir la aplicación de técnicas que caracterizan la estructura vertical, los procesos de mezcla, ventilación y dispersión de la atmósfera tales como mediciones con ceilómetro, radiosondeos, lidars Doppler y ejercicios de modelación (por ejemplo, Burgos-Cuevas et al. 2021, García-Franco et al. 2018). La integración de estas técnicas es necesaria para comprender y predecir la interacción entre las emisiones, la meteorología y los niveles de contaminación de la Megalópolis.

## CAPÍTULO 4. INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ATMOSFÉRICA EN LA MEGALÓPOLIS

### 4.1. Procesos atmosféricos

El estudio de los procesos atmosféricos constituye una actividad fundamental para comprender los impactos y evaluar las mejores opciones para mitigar la contaminación del aire. La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) tiene una historia abundante en el estudio de los procesos físicos y químicos que controlan la emisión, transformación y transporte de contaminantes atmosféricos, incluidos el ozono (O<sub>3</sub>) y las partículas suspendidas (PM, acrónimo en inglés para *particulate matter*) (Molina et al., 2007, 2010, 2019). Una revisión de los estudios disponibles de investigación científica atmosférica en la ZMVM y otras entidades de la Megalópolis indica que las herramientas comúnmente utilizadas para este propósito incluyen:

- 1) Diseño e implementación de redes de monitoreo ambiental, principalmente en áreas urbanas.
- 2) Desarrollo continuo y sistemático de inventarios de emisiones de fuentes a escala local y regional.
- 3) Estudios con mediciones de campo de contaminantes atmosféricos.
- 4) Caracterización de diversas fuentes de emisiones.
- 5) Estudios de modelación meteorológica y del transporte, transformación y destino de los contaminantes en la atmósfera.
- 6) Modelación y pronóstico de la calidad del aire.
- 7) Impactos de los contaminantes atmosféricos en la salud pública.
- 8) Estudios de costo-beneficio del control de la contaminación atmosférica.

Se cuenta también con informes públicos y aplicaciones en redes sociales que son emitidos periódicamente para informar sobre las condiciones de calidad del aire en la ZMVM y en otras ciudades de la Megalópolis. La divulgación continua de información tiene como objetivo ayudar a la población a tomar decisiones que reduzcan la exposición a los contaminantes del aire. Además, se han incorporado algunos de los resultados más importantes del desarrollo de estas herramientas a la agenda pública a través de regulaciones y legislación ambiental, así como en el diseño de planes estatales, regionales y nacionales para controlar la contaminación atmosférica, incluida las acciones a realizar durante contingencias ambientales. Al mismo tiempo, se realizan algunos esfuerzos para desarrollar capacidades financieras e institucionales, de infraestructura y de fortalecimiento de recursos humanos que permitan la implementación y cumplimiento de los planes de control de la contaminación del aire.

Las acciones descritas anteriormente han contribuido a mejorar la calidad del aire en la ZMVM para algunos contaminantes, especialmente cuando se comparan con los niveles de contaminación a los que estuvo expuesta la población en las décadas de 1990-2000. Sin embargo, las

observaciones actuales indican claramente que los contaminantes clave no han disminuido a niveles aceptables. Además, las concentraciones atmosféricas de contaminantes como O<sub>3</sub> y PM han comenzado a aumentar en los últimos años (Velasco & Retama, 2017; Zavala et al., 2020). Esto sugiere que es prioritario actualizar la información científica de los procesos que controlan la formación, transporte y destino de estos contaminantes (Molina et al., 2019; Velasco et al., 2021; Molina, 2021). Este interés se refleja en el ProAire 2021-2030 de la ZMVM para recuperar la tendencia de reducir la contaminación del aire y sus impactos en la salud y mejorar la calidad de vida de la población (SEDEMA et al., 2021).

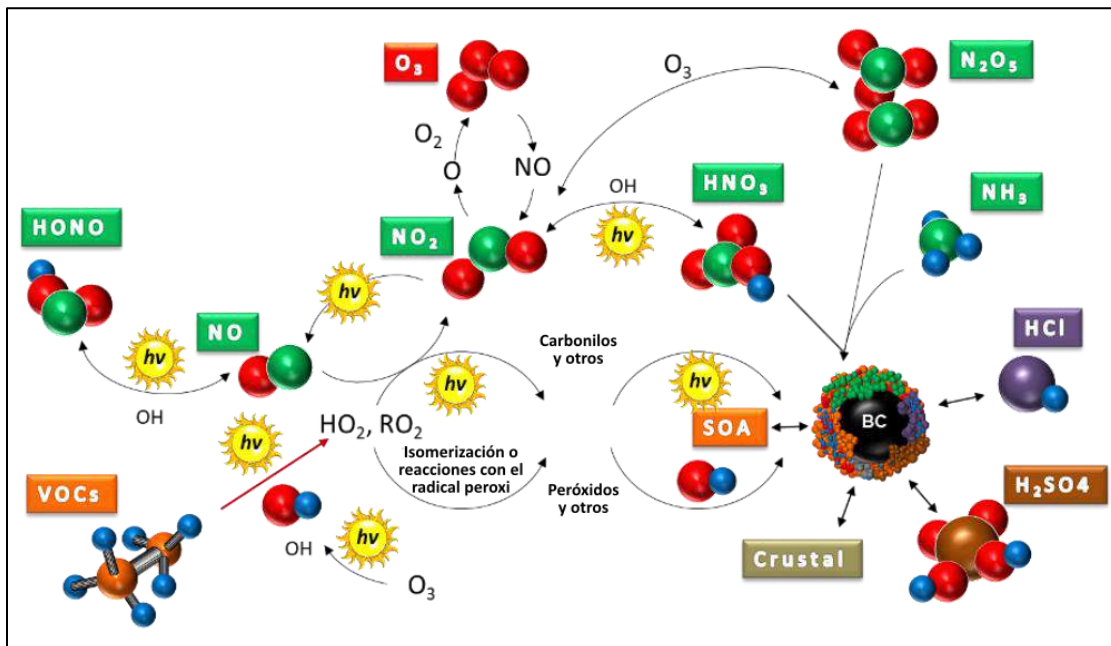
## 4.2. Desafíos científicos de la caracterización de los contaminantes atmosféricos

En esta sección se describen los principales aspectos que limitan el conocimiento actual de los contaminantes atmosféricos, con especial énfasis en la formación, transporte y destino del O<sub>3</sub> y PM.

### 4.2.1. Caracterización del ozono en la Megalópolis

#### 4.2.1.1. Procesos de formación y destrucción de ozono

La formación de O<sub>3</sub> en áreas urbanas es un proceso complejo que está determinado por la abundancia local relativa de compuestos orgánicos volátiles (COV), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), así como por la radiación solar disponible. El O<sub>3</sub> se produce a partir de la fotólisis del NO<sub>2</sub> y la posterior reacción con el O<sub>2</sub> atmosférico, por lo que la cantidad de NO<sub>2</sub> disponible es clave en el proceso. El NO<sub>2</sub> puede formarse de nuevo a partir de la reacción entre el O<sub>2</sub> y NO, consumiendo una molécula de O<sub>3</sub>. Sin embargo, la oxidación de los COV presente en la atmósfera ofrece una ruta alternativa efectiva para producir NO<sub>2</sub> que evita el consumo de O<sub>3</sub>, como se muestra en la Figura 4.1, lo que permite una mayor producción y posterior acumulación del contaminante.



**Figura 4.1.** La compleja formación y destrucción del O<sub>3</sub>, y la formación de aerosoles secundarios y la transformación de partículas emitidas directamente a la atmósfera. (Elaboración propia).

La formación de O<sub>3</sub> no es lineal debido a que existe una competencia entre los COV y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) por el oxidante principal, el radical hidroxilo (OH), pero mientras que los COV se consumen durante la formación de O<sub>3</sub>, los NO<sub>x</sub> se regeneran actuando como catalizadores. La formación de O<sub>3</sub> es promovida por la radiación solar: cuando disminuye o cuando alguno de los precursores disminuye, predominan las reacciones de terminación, formando ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), aerosoles secundarios, peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y nitrato de peroxiacetilo (PAN), entre otras especies contaminantes secundarias. Los procesos de formación y terminación ocurren continuamente en la atmósfera e interactúan con las condiciones meteorológicas, y determinan la posible acumulación de O<sub>3</sub> a la que está expuesta la población.

#### 4.2.1.2. Limitaciones para la caracterización del ozono

Aunque la descripción previa de la formación y destrucción local del O<sub>3</sub> se encuentra bien establecida por la comunidad científica desde hace varias décadas, en la Megalópolis y en muchas otras ciudades de México aún se presentan niveles altos de O<sub>3</sub>, y mientras la activación de contingencias ambientales sigue sucediendo todos los años. Dado que se conocen los procesos de formación y destrucción de O<sub>3</sub>, la pregunta es pertinente: ¿cuáles son las barreras que limitan nuestra capacidad para controlar la contaminación por O<sub>3</sub> en la Megalópolis y otras ciudades?

En principio, la descripción previa de los procesos químicos involucrados indica que los principales desafíos para caracterizar la formación local de O<sub>3</sub> incluyen: (1) la caracterización de las mezclas químicas de COV, y NO y NO<sub>2</sub>; (2) la determinación de los niveles de radicales OH, HO<sub>2</sub> y peróxidos orgánicos (RO<sub>2</sub>); y (3) la abundancia de radiación solar. También es necesario caracterizar los niveles de fondo de O<sub>3</sub> y de las especies precursoras. Sin embargo, en la práctica puede ser muy difícil obtener, integrar y analizar la información requerida, aunado a que faltan datos importantes para la caracterización del O<sub>3</sub>.

A continuación, se describen algunas limitaciones en el conocimiento de los procesos físicos y químicos que controlan el O<sub>3</sub> en la Megalópolis:

- 1) *Caracterización espacial y temporal de COV.* Como resultado de la heterogeneidad y número de fuentes de emisión, los COV en áreas urbanas son mezclas complejas de cientos o incluso miles de compuestos orgánicos con una amplia gama de concentraciones, niveles de reactividad (con el OH y otros oxidantes) y tiempos de vida media. Esto dificulta la caracterización adecuada de la distribución espacial y temporal de estos compuestos, particularmente para aquellos que son más reactivos y, por lo tanto, tienen un alto potencial de formación de O<sub>3</sub> (PFO).
- 2) *Caracterización espacial y temporal de compuestos radicales.* Los compuestos radicales OH, HO<sub>2</sub>, y RO<sub>2</sub> se producen a través de reacciones químicas y fotolíticas que involucran al O<sub>3</sub>, HONO y diversos compuestos carbonilos entre otros COV. Sin embargo, existen dificultades técnicas para medir con precisión los niveles de los compuestos radicales. Esto se debe a que son químicamente muy reactivos, por lo cual sus concentraciones atmosféricas son bajas y sus tiempos de vida media extremadamente cortos. Aunque

existen en la actualidad métodos de medición que permiten su caracterización con suficiente precisión, al igual que para las mezclas de COV precursores de radicales, todavía es difícil caracterizar su distribución espacial y temporal adecuadamente, de tal manera que permitan evaluar cuantitativamente sus contribuciones relativas a la formación de O<sub>3</sub> en las diferentes zonas de la ciudad.

- 3) *Caracterización espacial y temporal de NO<sub>x</sub>*. La medición de NO y NO<sub>2</sub> presenta menos dificultades para su caracterización espacial y temporal que los COV y los compuestos radicales. Sin embargo, los compuestos nitrogenados participan también en diversas reacciones químicas con COV y otros radicales, y forman a su vez el radical nitrato (NO<sub>3</sub>) y otros compuestos orgánicos nitrogenados, afectando con ello las tasas de destrucción del O<sub>3</sub>. Por tanto, para que la información sea útil en la caracterización de O<sub>3</sub>, los compuestos NO y NO<sub>2</sub> deben medirse simultáneamente y en la misma ubicación que los COV y compuestos radicales. El no contar con información simultánea de los precursores, limita la capacidad para entender las rutas de formación y destrucción de O<sub>3</sub>.
- 4) *Formación limitada de O<sub>3</sub> en áreas cercanas a las emisiones de gases precursores*. La oxidación de los COV ocurre durante las transformaciones en la atmósfera, no obstante, los procesos de combustión, evaporación o sublimación podrían emitir algunas especies con algún grado de oxidación. Esta característica dificulta la caracterización de O<sub>3</sub> en zonas con múltiples fuentes emisoras de COV y NO<sub>x</sub>, tal como ocurre típicamente en las grandes ciudades.
- 5) *Necesidad de caracterizar las concentraciones de fondo*. Tanto los procesos de formación, como de destrucción de O<sub>3</sub>, ocurren simultánea y continuamente en las masas de aire que son transportadas dentro de la zona urbana. Esto implica que cada masa de aire que arriba incluye una concentración inicial de O<sub>3</sub> y de sus precursores que corresponde a los niveles de fondo. Debido a que la contribución varía espacialmente de acuerdo con la historia de la masa de aire viento abajo y viento arriba, caracterizar esa contribución no es sencillo y requiere el uso de modelos numéricos correctamente evaluados.
- 6) *Variabilidad espacial y temporal de los parámetros meteorológicos*. Las condiciones meteorológicas que modifican la intensidad de la radiación solar afectan a su vez la formación de O<sub>3</sub>. Esto incluye la nubosidad, albedo, humedad relativa e incluso la microfísica de aerosoles para la formación de nubes. Debido a la topografía compleja en la Megalópolis y en otras grandes ciudades de México, las condiciones meteorológicas varían substancialmente en las diferentes regiones de las zonas urbanas. Así, la dependencia espacial y temporal de las condiciones meteorológicas induce un reto adicional para la caracterización de O<sub>3</sub>.
- 7) *Variabilidad espacial y temporal de la capa de mezclado y la turbulencia local*. Las concentraciones ambientales dependen sobremedida del estado de la capa de mezclado y la producción de turbulencia térmica locales. Además, debido al fenómeno de intrusión de masas de aire a diferentes posiciones alturas, es fundamental conocer la dinámica de la capa de mezclado para caracterizar el O<sub>3</sub>.



- 8) *Efectos locales.* A nivel local existen también impactos en los patrones de viento y la radiación solar disponible inducidos por el efecto de cañones urbanos y el intercambio energético con la superficie. Esto indica que la caracterización de O<sub>3</sub> debe también realizarse con la mayor resolución espacial posible dentro de la zona de estudio. Inversamente, esto también sugiere que para que las acciones de control de O<sub>3</sub> sean efectivas, debe realizarse la caracterización en múltiples zonas de tal manera que reflejen integralmente los procesos de formación y destrucción del contaminante.

#### ***4.2.2. Caracterización de partículas en la Megalópolis***

Numerosos estudios han destacado el marcado impacto de las partículas atmosféricas en la salud humana, el clima y los ecosistemas naturales. La materia particulada son partículas sólidas y/o líquidas suspendidas en el aire, excluyendo gotas (o cristales) de nubes y lluvia. Al estar suspendidas en masas de aire, las partículas pueden ser transportadas por el viento a largas distancias. Las partículas atmosféricas son emitidas directamente por fuentes naturales (como océanos, volcanes, zonas desérticas) y fuentes antropogénicas (como tráfico vehicular, actividad industrial, quema de biomasa) con una amplia gama de propiedades físicas (por ejemplo, tamaño, densidad, morfología) y composición química. Las fracciones de partículas que se usan dentro de la gestión ambiental son PM<sub>10</sub> (partículas gruesas con un diámetro aerodinámico de 10 µm o menos), PM<sub>2.5</sub> (partículas finas con un diámetro aerodinámico de 2.5 µm o menos) y partículas ultrafinas (con un diámetro aerodinámico de 100 nm o menos).

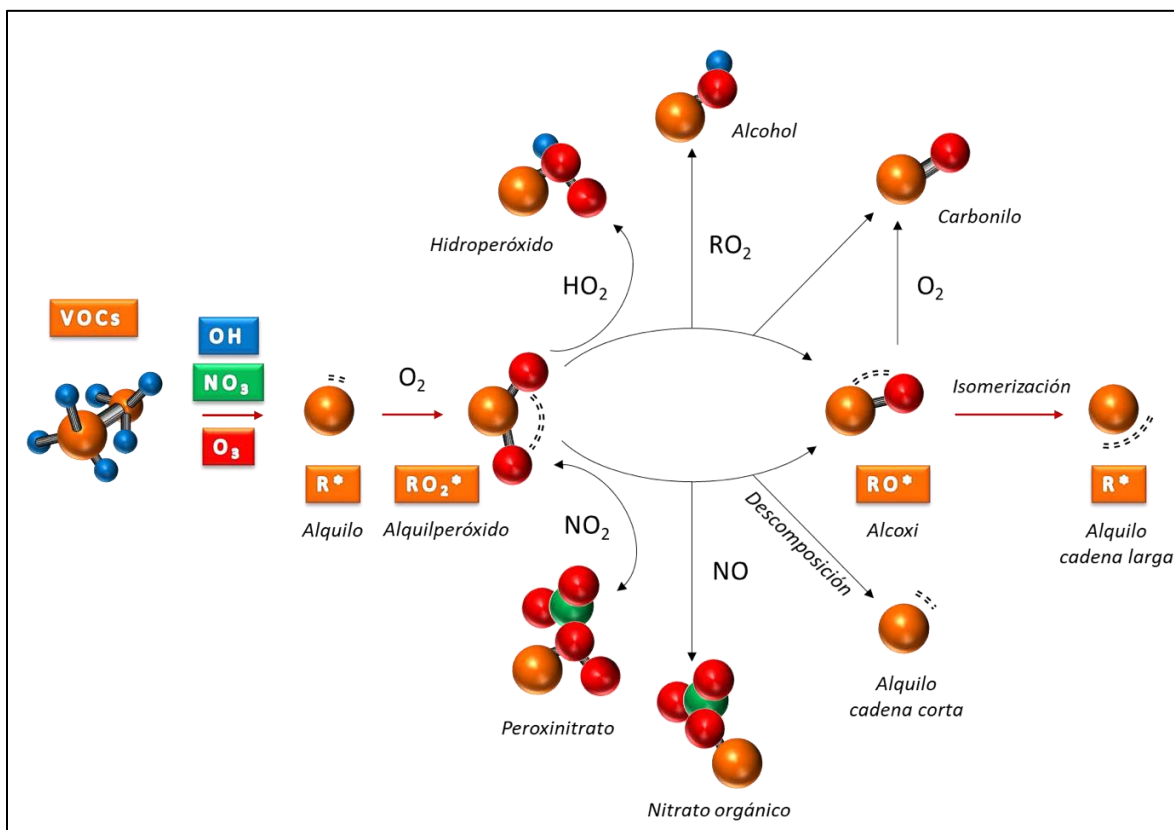
Las características descritas anteriormente enfatizan la complejidad en la formación, transformación y destino de las partículas en la Megalópolis y otras ciudades de México. Algunas de las partículas en la atmósfera provienen directamente de las múltiples fuentes de emisión mencionadas anteriormente (PM primarias). Sin embargo, hoy en día en la Ciudad de México, como en muchas otras ciudades del mundo, la mayoría de las partículas atmosféricas tienen una gran contribución de origen secundario. Por lo tanto, esta sección aborda principalmente la contribución a las partículas derivadas de las reacciones entre gases contaminantes que actúan como especies precursoras en la formación de aerosoles en la atmósfera (PM secundarias).

##### ***4.2.2.1. Procesos de formación y destrucción de las partículas suspendidas***

Al igual que la formación de O<sub>3</sub>, la formación de nuevas partículas en la atmósfera es un proceso complejo que comienza a escala molecular y que solo recientemente ha comenzado a entenderse. Los mecanismos de formación de aerosoles secundarios son el resultado de la conversión de gases atmosféricos en partículas bajo condiciones termodinámicas específicas. Las rutas de formación de partículas secundarias inorgánicas en la atmósfera por precursores gaseosos, como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el amoníaco (NH<sub>3</sub>), se han estudiado durante varias décadas (Seinfeld & Pandis, 2016). Pero se ha observado que los gases precursores también pueden interactuar con compuestos orgánicos provenientes tanto de fuentes antropogénicas de combustión y de evaporación, así como de procesos metabólicos de las plantas. Anteriormente se pensaba que la formación de partículas requería ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), que se forma a partir de la oxidación de SO<sub>2</sub>, ahora se conoce que ciertos vapores orgánicos también forman partículas. De hecho, las partículas orgánicas pueden formarse de manera más eficiente cuando el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> y vapores orgánicos están presentes simultáneamente (Lehtipalo, et al., 2018; Liu et al., 2015; Hao et al., 2020).

Los COV se oxidan en presencia del radical OH, pero también son oxidados rápidamente por otras especies como el O<sub>3</sub> y el radical NO<sub>3</sub>. La oxidación puede ocurrir en cuestión de minutos u horas. Las rutas de oxidación dependen de varios factores: la abundancia de los oxidantes, el tamaño y funcionalidad de las moléculas orgánicas, el contenido de agua en los aerosoles y su acidez, temperatura ambiente, disponibilidad e intensidad de la radiación solar, entre otros factores. Las reacciones con OH y O<sub>3</sub> predominan durante el día, mientras que el radical NO<sub>3</sub> juega un papel importante por la noche. La Figura 4.2 muestra algunos ejemplos de la formación de nuevas partículas a partir de COV, las cuales se conocen como aerosoles orgánicos.

Como se puede ver en la Figura 4.2, es importante conocer la abundancia y variedad de COV, los niveles de NO<sub>x</sub> y de oxidantes atmosféricos. Los procesos de formación de aerosoles secundarios tienden a ser más complejos que los involucrados en la formación de O<sub>3</sub> debido a la variedad y complejidad estructural de los compuestos orgánicos que se pueden encontrar en la atmósfera, especialmente en entornos urbanos.



**Figura 4.2.** Oxidación de COV y formación de aerosoles orgánicos secundarios. (Fuente: Adaptado de Seinfeld & Pandis, 2016).

#### 4.2.2.2. Limitaciones en la caracterización de las partículas

La descripción anterior de la formación y destrucción de las partículas secundarias muestra que las relaciones no lineales que existen entre los gases precursores y las condiciones meteorológicas son complejas. Además, las propiedades físicas y químicas cambiantes de los aerosoles por

mecanismos de oxidación dificultan entender todos los procesos involucrados. El conocimiento actual indica que la formación de contaminantes secundarios está íntimamente ligada a los componentes de ambas fases del aerosol: gaseosa y partícula. La conexión entre los procesos químicos y físicos en ambas fases ocurre a través de: (1) la participación de los radicales libres presentes en la atmósfera; (2) las fuentes emisoras de COV, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, y SO<sub>2</sub> entre otros gases precursores, y la mezcla de estos; y (3) el transporte de masas de aire y su participación en los cambios termodinámicos.

Al igual que en el caso del O<sub>3</sub>, en la práctica resulta complicado compilar y analizar la información requerida para la caracterización de los aerosoles secundarios. A continuación, se describen algunas de las barreras que limitan nuestro conocimiento de los procesos físicos y químicos que controlan la formación de los aerosoles secundarios en la Megalópolis:

- 1) *Interacciones entre los compuestos orgánicos y otros gases precursores.* Es importante entender la formación secundaria de aerosoles a través de la interacción entre los compuestos orgánicos y otros gases precursores. Una interrogante actual es el impacto que tendría la formación de partículas secundarias al disminuir la emisión de gases precursores. La emisión biogénica de compuestos orgánicos volátiles no se puede controlar en principio, pero si es posible controlar la emisión de los gases precursores de origen antropogénico. Conocer el impacto que tendrían tales reducciones ayudaría a diseñar medidas de control de la contaminación por partículas.
- 2) *Procesos de oxidación y la formación de núcleos de condensación.* Los aerosoles pueden afectar el clima dispersando y/o absorbiendo la radiación solar y actuando como núcleos de condensación en la formación de gotas en las nubes. Las partículas recién formadas van aumentando de tamaño al ir incorporando materia orgánica durante los procesos de oxidación, hasta alcanzar un tamaño en el que pueden actuar como núcleos de condensación en nubes. Los procesos de oxidación ocurren durante el transporte de los aerosoles. Así, además de absorber y reflejar la radiación solar, y con ello contribuir al cambio climático y modificar el balance energético, las partículas atmosféricas también pueden alterar los ciclos de precipitación al alterar la formación de nubes. Sin embargo, no es clara aún la magnitud de su impacto en función del tipo de nubosidad (por ejemplo, nubes poco profundas o nubes cumulonimbos), lo cual se ve reflejado en las incertidumbres que presentan los modelos climatológicos actuales.
- 3) *Necesidad de aumentar la resolución espacial y temporal de la información sobre la abundancia y composición química de los gases precursores.* La heterogeneidad en las fuentes de emisión en zonas urbanas hace necesario conocer la abundancia y composición de los gases precursores con cierta resolución espacial que permita determinar variaciones espaciales en la formación de aerosoles secundarios. Así mismo, es necesario conocer su variabilidad durante el año para evaluar cambios en la química heterogénea de acuerdo a las estaciones climatológicas.
- 4) *Contribución de las fuentes emisoras de compuestos precursores.* Es necesario conocer la contribución relativa de las diferentes fuentes de emisión, tanto naturales como antropogénicas, en la composición de las principales especies químicas que actúan como

compuestos precursores. Estos incluyen iones, metales, carbono orgánico, carbono elemental, carbono total, y componentes inorgánicos como el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Una caracterización química completa permitirá evaluar detalladamente el desempeño de los mecanismos químicos utilizados en los modelos numéricos para reproducir la formación de aerosoles secundarios.

- 5) *Caracterización espacial y temporal de los compuestos radicales.* Al igual que en el caso del  $\text{O}_3$ , la caracterización de los compuestos radicales (principalmente del  $\text{OH}$  y  $\text{NO}_3$ ), que actúan simultáneamente como compuestos precursores y catalizadores oxidativos, es fundamental para mejorar nuestro conocimiento de la formación secundaria de aerosoles.
- 6) *Mecanismos de oxidación de los aerosoles.* Los procesos de oxidación, tanto en la fase gaseosa como en la particulada, ocurren permanente en la atmósfera. Su intensidad depende de las condiciones meteorológicas y niveles de reactividad química de la mezcla de contaminantes. Una vez en la fase partícula, los compuestos semi-volátiles en las partículas experimentan reacciones que disminuyen su volatilidad al formar compuestos de mayor peso molecular debido a que la presión de vapor de los compuestos orgánicos disminuye al aumentar el número de átomos añadidos. Un ejemplo de este tipo de reacciones son las de oligomerización catalizadas por los protones  $\text{H}^+$  (es decir en un medio ácido) y contribuyen a la formación de aerosoles secundarios. Por lo que es necesario mejorar el conocimiento sobre los mecanismos de oxidación y los efectos de la acidez en la formación de partículas.
- 7) *Complejidad en los cambios químicos en las propiedades de los aerosoles.* Los procesos de oxidación inducen no solamente cambios en la volatilidad de los compuestos ya formados, sino también en la concentración, composición química y propiedades físicas de los aerosoles. Cada etapa o proceso oxidativo tiene el potencial de contribuir a la formación de aerosoles secundarios si se cumplen las condiciones necesarias. Los procesos oxidativos terminan cuando todo el carbono orgánico es degradado completamente a  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$ . Por lo tanto, es necesario conocer los cambios en la volatilidad durante la formación de partículas y sus efectos sobre las propiedades físicas y químicas.
- 8) *Factores concurrentes para entender la formación de ozono.* Muchas de las barreras que obstaculizan entender los procesos de formación y destrucción de  $\text{O}_3$  aplican también para los aerosoles secundarios. Estas incluyen: (1) la variabilidad espacial y temporal de los parámetros meteorológicos; (2) la variabilidad espacial y temporal de la capa de mezclado y la turbulencia local; (3) las concentraciones de fondo de los contaminantes precursores; y (4) los efectos locales en los patrones de viento y la radiación disponible asociados con los cañones urbanos y el intercambio energético con las diferentes superficies de las construcciones que los forman.
- 9) *El papel de la química nocturna en la formación de los aerosoles.* La formación de los aerosoles secundarios se ha vinculado con los procesos fotoquímicos; sin embargo, la química nocturna dominada por el radical  $\text{NO}_3$  puede ser también una fuente importante de compuestos nitrados secundarios y de precursores para la química diurna. Es necesario realizar estudios que evalúen la participación de las reacciones oscuras en la formación o

transformación de los aerosoles, así como, para entender los mecanismos involucrados en la formación de especies reactivas como el HONO.

### **4.3. Caracterización de gases y partículas en la Megalópolis**

La experiencia internacional indica que la gestión ambiental efectiva requiere de inversiones importantes en investigación científica, incluido el monitoreo de la calidad del aire ambiente y campañas especiales de medición en campo, que son esenciales para proporcionar la información necesaria para la modelación y pronóstico de la calidad del aire (Velasco et al., 2021).

La gestión de la calidad del aire en la ZMVM se ha visto beneficiada cuando los encargados de esta han hecho equipo con científicos nacionales e internacionales para entender mejor los procesos químicos y físicos detrás de la contaminación del aire. La información generada por estudios científicos pasados, incluyendo la Evaluación Integral de la Calidad del Aire de la Ciudad de México realizada por el MIT (Molina & Molina, 2002), y las campañas intensivas de medición de campo, IMADA-AVER 1997 (Doran et al., 1998; Edgerton et al., 1999), MCMA-2003 (Molina et al., 2007), y MILAGRO 2006 (Molina et al., 2010), proporcionaron información exhaustiva sobre las emisiones, el transporte y transformación de los contaminantes en la atmósfera de la ZMVM, y mejoraron significativamente el conocimiento de los procesos meteorológicos y fotoquímicos que contribuyen a la formación de O<sub>3</sub>, de los aerosoles secundarios y de otros contaminantes secundarios. Los hallazgos científicos y las implicaciones políticas de estos estudios se encuentran incorporados en los programas de gestión de la calidad del aire actualmente vigentes. Aunque las agencias gubernamentales, investigadores universitarios e investigadores independientes han realizado algunos estudios especiales, desde la campaña MILAGRO se han realizado relativamente pocos estudios de campo en la ZMVM y otras regiones de la Megalópolis.

A continuación se hace un recuento de la investigación científica realizada en los últimos cinco años sobre la contaminación atmosférica en la Megalópolis. Este recuento no pretende ser una revisión exhaustiva, pero si busca proporcionar una visión general de los estudios hechos en la región publicados en revistas científicas, o bien presentados en informes técnicos del gobierno y otras instituciones de investigación. En la sección 4.7 se presentan los estudios relacionados con el impacto que tuvo el confinamiento en la calidad del aire durante la pandemia de COVID-19.

#### ***4.3.1. Compuestos orgánicos volátiles***

Previamente se describió el importante papel de los COV en la química atmosférica, especialmente en la formación de especies secundarias. Durante las campañas MCMA-2003 y MILAGRO 2006 se investigó exhaustivamente la complejidad de los COV en la ZMVM utilizando métodos de medición de amplio alcance desplegados en sitios de fondo, fuente y a favor del viento, así como en sitios rurales, suburbanos e industriales (ver Velasco et al., 2007; Jobson et al., 2010; De Gouw et al., 2009; Fortner et al., 2009; Apel et al., 2010; Bon et al., 2011). Los resultados mostraron que el uso de gas licuado de petróleo (GLP) era una fuente importante de alcanos de bajo peso molecular, mientras que el combustible evaporativo y las emisiones industriales, así como el uso de solventes y la aplicación de capas y pinturas eran fuentes significativas de COV aromáticos y metanol en la cuenca (Velasco et al., 2005, 2009). Las dos especies medidas de COV más importantes en términos de reactividad de OH fueron el formaldehído y el acetaldehído; los

aldehídos fueron componentes principales de la reactividad del flujo de salida. El análisis de los enormes conjuntos de datos proporcionó una mejor comprensión de las fuentes y las cargas atmosféricas de COV en la ZMVM y destacó la necesidad urgente de incluir el monitoreo continuo de COV, como parte de los programas de monitoreo rutinario de la calidad del aire.

Según el inventario de emisiones de 2018 para la ZMVM (SEDEMA, 2021), las fuentes de área son el principal emisor de COV y compuestos tóxicos. Más del 30% de las emisiones de COV se deben al uso comercial y doméstico de disolventes en productos de consumo cotidiano y alrededor del 20% a fugas en instalaciones de GLP (véase el Capítulo 3, Sección 3.3). Dado el importante papel de los COV, no sólo es importante seguir monitoreándolos, sino que también es esencial reducir sus emisiones mediante la aplicación de tecnologías eficaces de control de emisiones y el refuerzo de las medidas reglamentarias. Esto se discute con más detalle en el Capítulo 6.

En el caso de la Ciudad de México, que tiene un problema de contaminación secundaria, el monitoreo debe realizarse al menos durante la temporada de O<sub>3</sub> cada año para generar los datos de entrada para los estudios de modelación y la información requerida para implementar medidas de control. Teniendo en cuenta la relevancia de los aerosoles secundarios en la carga neta de partículas atmosféricas en la ciudad, deben realizarse monitoreos periódicos también durante el período invernal, cuando la contaminación de partículas se encuentra en su peor momento.

En la Megalópolis, el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) tiene la capacidad de realizar monitoreo continuo de hidrocarburos (C<sub>2</sub> a C<sub>12</sub>) basado en cromatografía de gases (SEDEMA, 2016). Sin embargo, los esfuerzos previos para instalar un monitoreo continuo permanente se han visto obstaculizados por la falta de un presupuesto adecuado. Las mediciones se han limitado a algunas campañas de campo, financiadas con recursos de otras fuentes y por esfuerzos a nivel personal de investigadores independientes durante períodos limitados. Por otro lado, tras los eventos de contaminación por O<sub>3</sub> ocurridos en 2016, la SEMARNAT otorgó recursos al INECC para dotar de infraestructura para el monitoreo continuo de hidrocarburos para apoyar a las entidades de la Megalópolis en el estudio de la química atmosférica. Sin embargo, actualmente carecen de recursos para emprender campañas de mediano y largo plazo. Algunas instituciones de investigación como la UAM-A y el ICAyCC-UNAM tienen capacidad instalada para medir COV por métodos continuos o mediante el análisis de muestras recolectadas, no obstante, sus mediciones generalmente se limitan a campañas de medición de corto período, proporcionando solamente una instantánea de la situación con información limitada para satisfacer las necesidades de gestión. En los últimos años, las mediciones de COV han sido escasas y, fuera de la Ciudad de México, sólo el INECC ha hecho esfuerzos a través de proyectos aislados para realizar mediciones en otras ciudades de la Megalópolis.

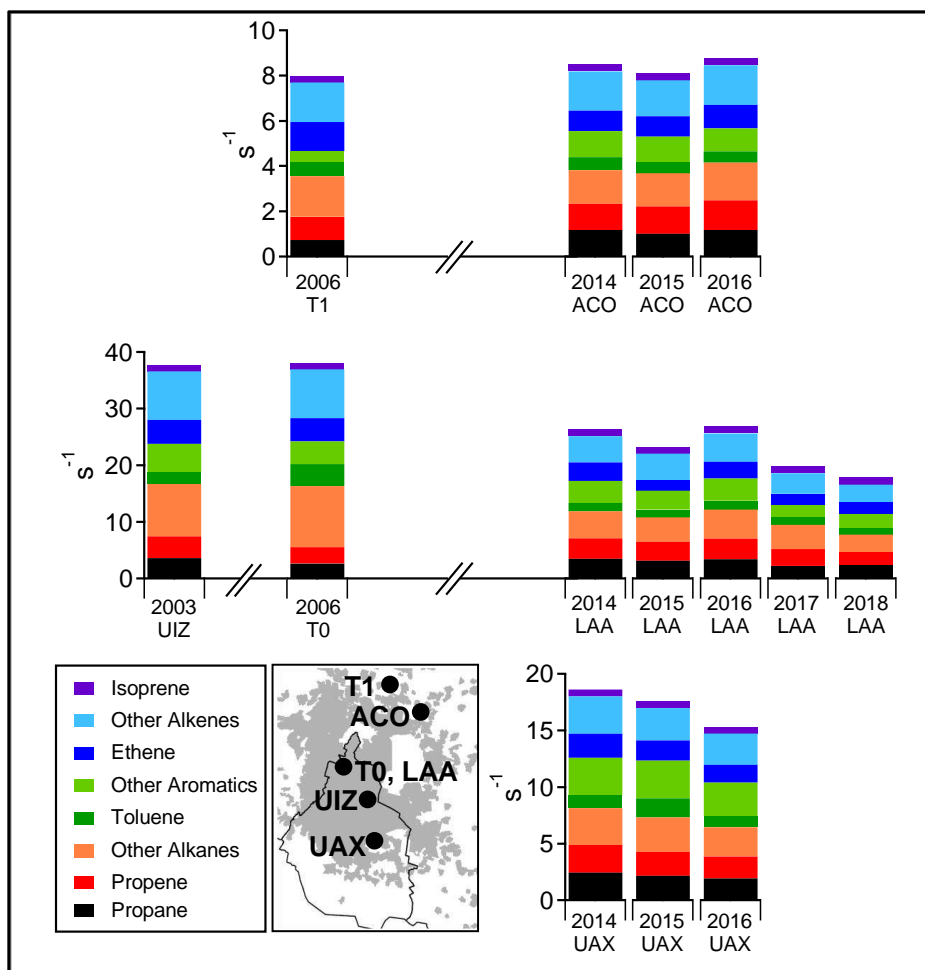
La Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire (DMA) de SEDEMA realizó campañas de medición en 2012, 2014-2018 durante la temporada de ozono. Sin embargo, el procesamiento y análisis de los datos derivados de las mediciones de 2014 a 2018 se realizó posteriormente con la colaboración desinteresada de especialistas externos a la institución. Los datos obtenidos han proporcionado insumos para avanzar en el estudio de la química atmosférica en la Ciudad de México (por ejemplo, Jaimes-Palomera et al., 2016; Zavala et al., 2020, Akther et al., 2023).

#### *4.3.1.1. Cambios recientes en la producción de O<sub>3</sub> y la reactividad de COV*

Zavala et al. (2020) investigaron los cambios en la producción de O<sub>3</sub> y la reactividad de COV utilizando datos de COV medidos en 2014-2018 y comparados con las estimaciones de producción de O<sub>3</sub> correspondientes de las campañas de campo intensivas realizadas en MCMA-2003 y MILAGRO-2006 (Molina et al., 2007; 2010; Lei et al., 2007, 2008; Song et al., 2010). Los resultados indicaron que la distribución espacial de los COV fue heterogénea dentro de la ZMVM, donde las concentraciones en sitios ubicados en la periferia fueron generalmente más bajas que en los ubicados dentro del núcleo de la ciudad. Las variaciones durante el día fueron determinadas por la evolución de la capa de mezclado, las actividades antropogénicas y la actividad fotoquímica. Se observaron disminuciones significativas en los niveles de eteno, benceno y tolueno con respecto a MILAGRO, lo cual fue consistente con la reducción que se ha observado en las emisiones de COV de fuentes móviles. El uso de GLP continuó como la principal fuente de propano y butano en la ciudad; aunque se observó un aumento de propano desde 2006, la suma de las concentraciones de butano e isobutano no mostró cambios. En los sitios urbanos, las concentraciones promedio de etileno, benceno y tolueno disminuyeron en 2.2, 2.6 y 3.5 veces en 2014-2016, en comparación con los valores reportados en 2006, respectivamente. En contraste, la suma de otros compuestos aromáticos como etilbenceno, m,p,o-xileno y 1,2,4-trimetilbenceno no disminuyeron en la misma proporción. En el caso del isopreno, se observó asociado al escape del vehículo, no obstante, se detectó la posible presencia de un aporte biogénico durante la estación cálida.

El estudio reportó una reducción de la reactividad de VOC-OH en los sitios de monitoreo ubicados en el núcleo urbano durante la hora pico de la mañana, pero se mantuvo relativamente constante en las afueras al norte y sur. La valoración de la reactividad de los COV y el comportamiento de O<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> en el área metropolitana sugirió una importante heterogeneidad espacial en la producción de O<sub>3</sub>, lo que implicó regímenes de sensibilidad a COV y NO<sub>x</sub> espacialmente diferentes (ver Figura 4.3). También encontró aumentos significativos en las relaciones NO<sub>2</sub>/NO, sugiriendo cambios en las vías para la acumulación nocturna de radicales HO<sub>x</sub> y especies de NO<sub>y</sub>, que podrían afectar la fotoquímica matutina y la disponibilidad de radicales para la formación secundaria de aerosoles.

Los resultados de este estudio sugieren que el control de las emisiones debe tomar en cuenta la variabilidad espacial en la reactividad atmosférica y en la producción de O<sub>3</sub> en toda la ciudad. Se necesita una base de datos sólida, especialmente representativa y continua de observaciones de COV, incluidas las especies volátiles oxigenadas relacionadas con productos de limpieza y cuidado personal, para evaluar los impactos de las estrategias de control de emisiones. Los resultados pueden servir como base para nuevas mediciones de campo enfocadas a comprender mejor los cambios en la química atmosférica de la ZMVM y la región de la Megalópolis, y para apoyar estudios integrales de modelación para el diseño de estrategias efectivas de control de emisiones en la Megalópolis.



**Figura 4.3.** Reactividad de VOC-OH durante la hora pico de la mañana (6:00–9:00 AM) por grupos, en los sitios de monitoreo T1, T0, Acolman (ACO), Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA), UAM Xochimilco (UAX) y UAM Iztapalapa (UIZ) de 2003 a 2018. Los datos de isopreno para UAX en 2016 no estaban disponibles, por lo que se utilizó la concentración promedio de isopreno de 2015 en su lugar. El mapa inferior muestra la ubicación de los sitios de monitoreo dentro de la MCMA (Fuente: Zavala et al., 2020).

#### 4.3.1.2. Perfiles de COV de vehículos ligeros de gasolina

En 2018, Mugica-Álvarez et al. (2020a) realizó una campaña de muestreo de COV dentro y fuera de dos túneles en la Ciudad de México con el objetivo de actualizar los perfiles de las emisiones de escape y evaporativas de vehículos de gasolina livianos. Los resultados de uno de los túneles se compararon con mediciones similares realizadas en 1998. También midió la composición de la gasolina y las emisiones de evaporación (Mugica-Álvarez et al., 2020b). Mugica-Álvarez et al. (2020a) encontraron una disminución del 77% en los niveles de COV en 2018 en el aire ambiente en comparación con las mediciones de 1998. El contenido aromático y de olefinas en las emisiones de escape disminuyó durante el período de 20 años del 26% al 17% y del 16 al 12%, respectivamente, mientras que el contenido de acetileno, un marcador de la combustión de gasolina disminuyó del 8 al 4%. Los alcanos dominaron la composición en masa de COV en el aire



ambiente con un 77% debido a la presencia de especies asociadas con el GLP. Los COV más abundantes en las emisiones de escape fueron butano, isopentano, tolueno y etileno, y en general, las concentraciones de COV tóxicos como benceno, tolueno y xilenos disminuyeron en 2018 en comparación con 1998 como consecuencia de las modificaciones en las tecnologías de los vehículos y la composición de la gasolina. Se determinó el potencial de formación de O<sub>3</sub> de todos los COV analizados, tanto en emisiones de escape como de evaporación. En 2018 se observó una reducción en la reactividad de los COV frente al OH en comparación con 1998; los compuestos más reactivos en las emisiones de escape en 2018 fueron etileno, propileno, xilenos y tolueno, mientras que el 4-metil pentano, el isopentano, el 2-metilpentano y los xilenos fueron los más reactivos en las emisiones de evaporación.

Mugica-Álvarez et al. (2020a, 2020b) encontraron que las gasolinas Magna y Premium tenían el mismo contenido de olefinas y compuestos oxigenados; sin embargo, la gasolina Magna tenía un mayor contenido de alcanos, isoalcanos y naftenos en comparación con la gasolina Premium, mientras que la gasolina Premium tenía un mayor contenido de compuestos aromáticos en relación con la Magna. El perfil de emisiones evaporativas era diferente al de las emisiones de escape y, aunque contienen un tercio de los compuestos aromáticos presentes en las emisiones de escape, tenían más del 10% de olefinas que podrían afectar la producción de O<sub>3</sub>. El análisis de 30 muestras de gasolina en un período de dos años mostró que la composición de Magna y Premium es la misma en todas las estaciones de servicio, a pesar de la presencia de diferentes marcas de gasolina, presumiblemente porque todas las gasolinas fueron distribuidas por PEMEX.

Los resultados de los estudios de túneles de COV demostraron que las medidas relacionadas con el transporte aplicadas en los últimos 20 años han tenido éxito en la mejora de la calidad del aire en la ZMVM, no obstante, el contenido aromático y de olefinas en las gasolinas debe reducirse aún más para disminuir las concentraciones de especies tóxicas y reactivas. Además, es importante controlar los vapores de gasolina, tanto en los vehículos como en las estaciones de servicio, ya que se emiten de forma continua y no dependen de la circulación del vehículo, sino de la temperatura ambiente y de la composición del combustible.

#### *4.3.1.3. Mediciones de COV durante la pandemia de COVID-19*

Entre diciembre de 2019 y mayo de 2021, el INECC realizó mediciones de COV en algunos sitios del Estado de México y de la Ciudad de México utilizando una unidad móvil equipada con cromatografía de gases (Blanco Jiménez et al., 2022). En el Estado de México, las mediciones se realizaron en el Centro de Toluca (3 al 13 de diciembre de 2019) y en la Facultad de Estudios Superiores de Aragón (FES Aragón) (20 de diciembre de 2019 al 12 de enero de 2020), Villa de las Flores, Coacalco (12 al 23 de mayo de 2021). En la Ciudad de México, las mediciones se realizaron en los Viveros de Coyoacán, donde se encuentra el laboratorio del INECC, durante dos campañas de medición (del 27 de abril al 15 de junio de 2020 y del 12 de febrero al 12 de abril de 2021). Sin embargo, los resultados aún no se han publicado. Se anticipa que los resultados de las mediciones de INECC, algunas tomadas durante el período de confinamiento de la pandemia de COVID-19 cuando las emisiones se redujeron significativamente, serán importantes para comparar con mediciones posteriores.

#### *4.3.1.4. Otros estudios relacionados con los COV*

Akther et al. (2023) utilizaron datos de COV, la composición iónica de aerosoles, de contaminantes criterio, datos meteorológicos de superficie y medición continua de la altura de la capa límite planetaria en un sitio urbano en la Ciudad de México, para explicar el aumento de O<sub>3</sub> durante el episodio de contaminación severa de marzo de 2016. El estudio evaluó el contraste entre dos escenarios atmosféricos diferentes que ocurrieron consecutivamente, donde la meteorología jugó un papel relevante. El primer escenario (8-11 de marzo) se caracterizó por inestabilidad atmosférica, dispersión eficiente y bajos niveles de contaminantes atmosféricos; en el segundo (12 al 18 de marzo), una condición intensa y prolongada de estabilidad atmosférica favoreció una producción fotoquímica activa y la acumulación de contaminantes en un evento de contaminación de varios días, desencadenando uno de los peores eventos por O<sub>3</sub> en la década anterior. Observaron cambios importantes en la altura de la capa límite, así como evidencia de recirculación y acumulación de precursores durante el evento. Aplicando el método de factorización de matriz positiva (PMF), pudieron identificar cuatro factores asociados con COV y fuentes de emisión de aerosoles: (1) precursores de aerosoles secundarios, (2) combustión y evaporación de combustibles, (3) fuente geogénica, y (4) emisiones de escape de vehículos, con contribuciones de 11.9, 30.2, 9.1 y 48.8%, respectivamente. De acuerdo con el análisis de reactividad, el isopreno y el etileno se identificaron como los COV que tenían el mayor potencial de oxidación y formación de O<sub>3</sub> en las horas pico, durante el período anterior al evento O<sub>3</sub> (8 al 11 de marzo), mientras que, durante el mismo período de tiempo para el episodio de O<sub>3</sub> (12 al 18 de marzo), el m,p-xileno se añadió al etileno como el más relevante en los procesos fotoquímicos. Este estudio destaca la relevancia de la meteorología como factor determinante durante los eventos de contaminación por O<sub>3</sub>, así como el impacto que la composición de los COV puede tener en la producción de O<sub>3</sub>.

Actualmente, el Laboratorio de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos (LEQAOA) del ICAyCC-UNAM se encuentra midiendo COV en la fase gaseosa de aerosoles utilizando una reacción de transferencia de protones acoplada a espectrometría de masas de tiempo de vuelo (PTR-ToF-MS); sin embargo, los resultados aún no han sido publicados.

#### *4.3.2. Compuestos reactivos de nitrógeno atmosférico*

El nitrógeno desempeña un papel importante en la calidad del aire y el cambio climático debido a la participación de varios compuestos que contienen nitrógeno en los procesos químicos y físicos atmosféricos. Como se muestra en la Figura 4.1, la interacción y las conversiones entre diferentes especies que contienen nitrógeno, incluidos NO<sub>x</sub>, HNO<sub>3</sub>, HONO, PAN, NO<sub>3</sub> y NH<sub>3</sub>, son esenciales en la formación y destrucción del O<sub>3</sub> y las partículas. Gran parte de nuestra comprensión sobre las fuentes y el procesamiento de estos compuestos en la ZMVM se obtuvo a partir de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO (Molina et al., 2007, 2010). Pocos estudios se han realizado desde MILAGRO. Enseguida se describen algunas de las mediciones recientes realizadas en la ZMVM y sus alrededores.

##### *4.3.2.1. Ácido nítrico*

El ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) es principalmente de origen secundario y se forma durante procesos fotoquímicos en la atmósfera de reacciones en fase homogénea entre el NO<sub>2</sub> y el radical OH (ver Figura 4.1). Es un precursor importante de los aerosoles orgánicos secundarios y la lluvia ácida. A pesar de su importancia, las mediciones en la atmósfera de la Ciudad de México y otras ciudades

de la Megalópolis son limitadas. Las mediciones continuas de  $\text{HNO}_3$  realizadas durante la campaña MILAGRO reportaron una concentración promedio de  $1.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fountoukis et al., 2009). Las mediciones durante la campaña AERAS 2015 (AERosoles AtmosféricoS), realizada por la Dirección de Monitoreo Atmosférico en 2015 (noviembre 2015 a marzo 2016), reportaron un valor promedio de  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Retama & Velasco, 2022). En la atmósfera, el  $\text{HNO}_3$  es rápidamente neutralizado por el amoníaco para formar  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , el cual se disocia rápidamente en sus precursores con el aumento de la temperatura (Fountoukis et al., 2009). Alrededor del 32% del nitrato total se encuentra en la fase de partículas (Retama & Velasco, 2022). Como era de esperar, las mayores concentraciones de  $\text{HNO}_3$  generalmente se observaron a primera hora de la tarde, cuando la temperatura alcanzaba su máximo.

#### 4.3.2.2. *Ácido nitroso*

El ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$  o HONO) es un compuesto común en la atmósfera de la Ciudad de México y una fuente importante de radicales OH. Puede formarse en la fase homogénea de la reacción entre el radical OH y el NO, pero también a partir de reacciones de fase heterogénea en superficies urbanas y de aerosoles (véase la Figura 4.1). Se fotodisocia fácilmente en presencia de la luz solar, por lo tanto, las mayores concentraciones generalmente se observan por la noche. El HONO es el principal iniciador de la actividad fotoquímica en las primeras horas de la mañana (Volkamer et al., 2010). Como en el caso del  $\text{HNO}_3$ , las mediciones de HONO son escasas. Las primeras mediciones de HONO se realizaron durante las campañas MCMA-2003 y MILAGRO (Molina et al., 2007, 2010). Como parte de un estudio para evaluar el impacto de la actividad pirotécnica en la calidad del aire, Retama et al. (2019) reportaron una concentración promedio de  $2.5 \pm 1.8 \mu\text{g m}^{-3}$  para la temporada de vacaciones de invierno de 2013-2014. Un año después, Retama & Velasco (2022) reportaron una concentración promedio de  $2.7 \pm 2.4 \mu\text{g m}^{-3}$  correspondiente al período noviembre 2015 - marzo 2016.

#### 4.3.2.3. *Amoníaco*

El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) es la principal especie básica en el aire ambiente de la Ciudad de México. Estudios previos identificaron que el ambiente de la ciudad es abundante en  $\text{NH}_3$  (Moya et al., 2001, 2004; San Martini et al., 2005; Fountoukis et al., 2009). La abundancia de este compuesto promueve la formación de aerosoles secundarios a partir de la neutralización de especies ácidas (por ejemplo,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Hay pocas mediciones de este contaminante, y poco se sabe sobre sus principales fuentes de emisión. Durante la campaña AERAS 2015, se reportó una concentración promedio de  $\text{NH}_3$  de  $7.7 \pm 4.0 \mu\text{g m}^{-3}$  (Retama & Velasco, 2022), que representó alrededor del 81% del total de amonio ( $[\text{NH}_3](\text{g}) + [\text{NO}_3^-]$ ).

Recientemente se han utilizado datos de sensores remotos en superficie o en las plataformas satelitales para cuantificar el  $\text{NH}_3$  y observar su variabilidad espacial y temporal. Utilizando observaciones en la columna atmosférica obtenidas con dos espectrómetros infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR, *Fourier-Transform Infrared*, por sus siglas en inglés), Herrera et al. (2022) estimaron valores medios de  $14.6 \times 10^{15}$  moléculas  $\text{cm}^{-2}$  y  $1.87 \times 10^{15}$  moléculas  $\text{cm}^{-2}$  para la concentración total de la columna sobre un sitio urbano y un sitio remoto (Altzomoni), durante 2012 y 2020. En el sitio urbano, la presencia de  $\text{NH}_3$  se relacionó con las fuentes de emisión locales, mientras que las contribuciones de las emisiones urbanas y regionales (es decir, la quema de biomasa y la agricultura) se observaron en el sitio remoto. Se observó una marcada variación estacional, con los mayores valores en los meses más calurosos del año, abril y mayo.

Las observaciones satelitales obtenidas del sensor IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) identificaron que las principales fuentes de  $\text{NH}_3$  en la ZMVM se encontraban en las zonas más urbanizadas de la Ciudad de México y el Estado de México (Herrera et al., 2022). Se observó consistentemente una alta concentración de  $\text{NH}_3$  en la sección noreste de la Ciudad de México, lo que coincidió con la presencia de posibles fuentes de  $\text{NH}_3$  como el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, la planta de compostaje Bordo Poniente, cuerpos de descarga de aguas residuales, plantas de tratamiento de aguas residuales y la zona agrícola de Texcoco. Las mediciones de los dispositivos basados en la superficie fueron mayores que los datos del sensor satelital.

#### 4.3.2.4. Nitrato de peroxiacilo

El nitrato de peroxiacilo (PAN,  $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{OONO}_2$ ) es una especie química ubicua en toda la tropósfera global. Se identificó por primera vez como un componente del *smog* fotoquímico de Los Ángeles en la década de 1950, formado por la oxidación de hidrocarburos reactivos en presencia de  $\text{NO}_2$ . Es un poderoso irritante respiratorio y ocular, y puede dañar los cultivos agrícolas. Una propiedad única del PAN es que es altamente estable a temperaturas frías y puede descomponerse fácilmente, liberando  $\text{NO}_x$  a temperaturas cálidas, actuando como portador y reservorio de  $\text{NO}_x$  en atmósferas remotas. Los estudios de modelación de la formación de  $\text{O}_3$  durante MCMA-2003 indicaron una salida significativa de contaminantes como  $\text{O}_3$  y PAN del área urbana hacia el entorno regional circundante (Lei et al., 2007; 2008). Este resultado fue corroborado por observaciones de aeronaves y estudios de modelación realizados durante la campaña MILAGRO (Song et al., 2010). Utilizando la interpolación novedosa de observaciones de aeronaves a través de *kriging*, junto con productos de modelación, Mena-Carrasco et al. (2009) encontraron que la exportación de nitrógeno reactivo de la Ciudad de México ocurrió principalmente a través de la formación de PAN. Los PAN pueden descomponerse térmicamente a escala regional proporcionando una fuente de  $\text{NO}_x$  y producir  $\text{O}_3$  adicional viento abajo de la Ciudad de México. Por lo tanto, las salidas de contaminantes de la ZMVM pueden modificar la calidad del aire ambiente y la fotoquímica a escala regional.

Marley et al. (2007) midieron PAN durante la campaña MCMA-2003 y compararon con mediciones similares obtenidas anteriormente durante la campaña IMADA-AVER en 1997 (Gaffney et al., 1999). Se encontró que la concentración de PAN en 1997 alcanzó un máximo de 34 ppb con un máximo diario promedio de 15 ppb, mientras que los niveles de PAN en 2003 se registraron con un máximo diario promedio de 3 ppb. Esta drástica reducción, observada en 2003, se atribuyó a la reducción en las emisiones reactivas de hidrocarburos debido a los controles de olefinas en el GLP y también al número significativo de vehículos nuevos con convertidores catalíticos que reemplazaron a los vehículos más antiguos de mayor emisión.

Carrasco-Mijarez et al. (2020) midieron PAN y  $\text{NO}_2$  durante dos campañas cortas en junio y octubre de 2017 utilizando un método de detección de cromatografía de gases-luminol, en el suroeste de la Ciudad de México. Las proporciones de mezcla máxima y promedio por hora de PAN fueron de 5.2 y 1.3 ppbv en junio, y 3.3 y 0.6 ppbv en octubre, respectivamente. Estas proporciones de mezcla fueron ligeramente inferiores a las notificadas en 2003 (Marley et al., 2007), lo que sugiere que los niveles de precursores de PAN sólo han disminuido parcialmente durante el período de 15 años. El PAN mantiene un patrón diurno similar al del  $\text{O}_3$  con máximos

a media tarde y mínimos durante la noche, con una concentración de fondo relativamente alta en el período nocturno asociada con la estabilidad del compuesto a temperaturas menores.

#### **4.3.3. Partículas suspendidas: fuentes, composición y propiedades**

##### *4.3.3.1. Composición y distribución del tamaño de las partículas*

A pesar de los altos niveles de partículas suspendidas, sus impactos demostrados en la salud humana y la necesidad de datos para la gestión, hay pocos estudios recientes en la región de la Megalópolis. La mayoría de los trabajos publicados corresponden a los resultantes de MCMA-2003 y MILAGRO 2006, que utilizaron múltiples plataformas de medición, instrumentación y técnicas de análisis de datos para obtener información completa sobre las fuentes y el procesamiento de partículas primarias y secundarias, sus impactos en la calidad del aire y el clima (ver Molina et al., 2007, 2010 y las referencias en el mismo).

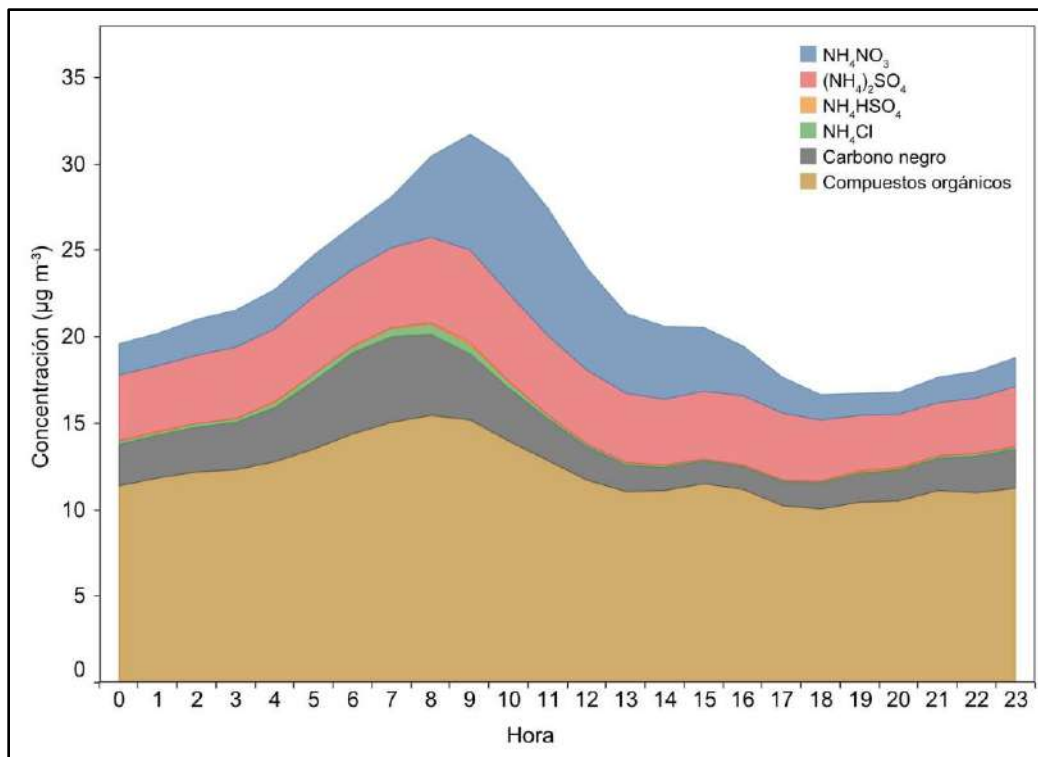
La identificación de las fuentes urbanas de emisión y las características de las partículas primarias es relativamente simple en comparación con la identificación del origen y destino de las partículas secundarias. Termodinámicamente hablando, existe una relación dinámica entre la composición de las partículas y la fase gaseosa en la que están suspendidas, por lo tanto, la caracterización de la materia particulada requiere el estudio de ambas fases del aerosol.

Las campañas de medición de campo MCMA-2003 y MILAGRO-2006 proporcionaron un amplio conocimiento de la composición, distribución de tamaños y cargas de masa atmosférica de partículas finas primarias y secundarias, y una mejor comprensión de la evolución y las propiedades radiativas de los aerosoles (Molina et al., 2007; 2010). Entre 2013 y 2015, el gobierno de la Ciudad de México, a través de SIMAT, adquirió instrumentación analítica en línea para dilucidar la composición química de las partículas siguiendo los hallazgos de MCMA-2003 y MILAGRO. Como ya se ha mencionado, la falta de recursos financieros suficientes y de personal capacitado mantienen los equipos subutilizados. Gracias a la dedicación de los especialistas externos a la institución que, con sus propios recursos financieros y tiempo, han hecho un uso adecuado de dichos equipos beneficiando la gestión de la calidad del aire de la Ciudad de México, así como compartiendo sus resultados con la comunidad científica a través de revistas revisadas por pares (por ejemplo, Retama et al., 2019, 2022).

Según las mediciones más recientes, la concentración de  $PM_{2.5}$  ha disminuido relativamente poco en los últimos 20 años en promedio, y ninguna durante la última década a pesar de ser uno de los contaminantes prioritarios en los planes de manejo (SEDEMA, 2020). La composición de PM en la Ciudad de México está dominada por la presencia de materia orgánica, que representa más del 50% de la masa total de las partículas (Salcedo et al., 2018; Retama y Velasco, 2022). Las partículas de origen secundario dominaron la composición de PM, principalmente durante la mañana y la madrugada cuando la radiación solar fue mayor, mientras que las partículas de origen primario fueron más abundantes al comienzo de la actividad urbana (Retama y Velasco, 2022). En términos de tamaño, las  $PM_{2.5}$  estuvieron dominadas por partículas submicrométricas (diámetro < 1  $\mu m$ ), que representaron el 70% o más de su masa (Retama et al., 2022).

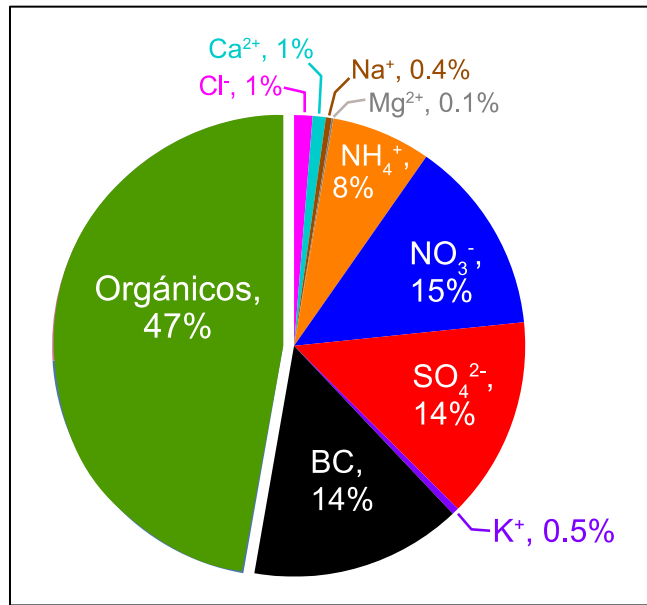
Como se muestra en la Figura 4.4, la composición de las partículas cambia a lo largo del día dependiendo de la temperatura, la humedad y la capacidad oxidativa de la atmósfera; por ejemplo,

los compuestos volátiles, como el nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), el cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) y algunos compuestos en la fracción orgánica, están en equilibrio termodinámico con sus componentes en la fase gaseosa. Estos cambios en la composición también se reflejan en sus propiedades (Retama et al., 2022).



**Figura 4.4.** Composición media de la fracción  $\text{PM}_{10}$  durante el curso diario. (Imagen elaborada con datos de Retama et al., 2022).

Después de los compuestos orgánicos, las especies más abundantes en  $\text{PM}_{10}$  incluyeron  $\text{NO}_3^-$ , carbono negro (CN),  $\text{SO}_4^{2-}$  y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) (ver Figura 4.5). Otros componentes se encontraron en un porcentaje menor e incluyeron al cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), elementos de origen geogénico, metales pesados y material de origen biológico. El carbono negro tiene un origen primario y proviene principalmente de la quema de biomasa a escala regional, las emisiones de los vehículos y el uso de leña y carbón en los puestos de comida callejera en toda la ciudad. El  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$  son de origen secundario y resultan de la oxidación de óxidos de nitrógeno y azufre, respectivamente. El  $\text{NH}_4^+$  en las partículas proviene principalmente de las reacciones de neutralización del  $\text{NH}_3$  gaseoso con ácidos sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) y nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) presentes en la atmósfera. Los compuestos  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4\text{Cl}$  se descomponen fácilmente con el aumento de la temperatura ambiente, por lo tanto, su abundancia en las partículas se modula a medida que aumenta la temperatura durante el día y según las estaciones climatológicas. El sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) es más estable en el intervalo de temperatura ambiente, por lo tanto, presenta poca variabilidad durante el día (véase Figura 4.5).



**Figura 4.5.** Composición porcentual de PM<sub>1</sub> en el norte de la Ciudad de México. (Fuente: Retama & Velasco, 2022).

Las partículas en la Ciudad de México son ácidas con un valor de pH de ~3.3 (Hennigan et al., 2015; Salcedo et al., 2018; Retama & Velasco, 2022), y la abundancia de NH<sub>3</sub> en la atmósfera les impide alcanzar valores de pH más bajos. La acidez juega un papel importante en las propiedades de los aerosoles, ya que aumenta la solubilidad de los metales, influye en la producción de aerosoles orgánicos y puede aumentar la toxicidad del aerosol.

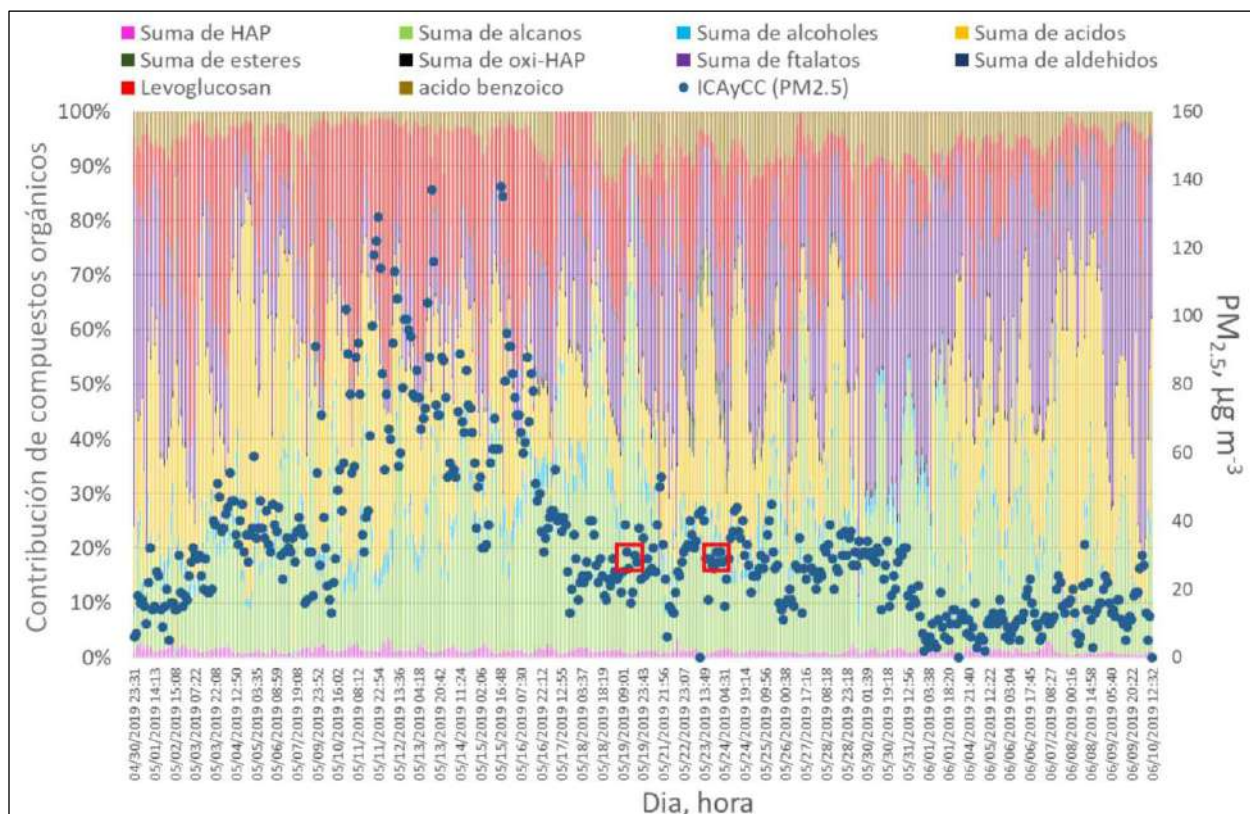
El estudio de Salcedo et al. (2018) mostró que existen diferencias espaciales en la composición del aerosol. Los resultados del análisis de la composición en un sitio ubicado en la parte sur de la ciudad indicaron un mayor porcentaje de aerosoles orgánicos y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> con menor volatilidad (más oxidación) en la fracción submicrométrica en comparación con mediciones similares al norte de la ciudad de estudios previos (Aiken et al., 2009; Guerrero et al., 2017), sugiriendo un mayor envejecimiento (mayor oxidación) en los aerosoles del sur. Amador-Muñoz et al. (2011) identificaron previamente una variabilidad espacial en la composición de la fracción orgánica, con contribuciones primarias en el noroeste y sureste de la ciudad, y una mayor proporción de compuestos orgánicos secundarios en el noreste, centro y suroeste; con los aerosoles orgánicos menos oxidados en el noreste y el aerosol orgánico más envejecido en el suroeste.

La fracción orgánica se compone de una mezcla compleja de compuestos con diversos orígenes. Una parte importante es del tipo primario; sin embargo, la mayoría proviene de la oxidación de COV en la atmósfera, ya que los procesos fotoquímicos generalmente resultan en la formación de partículas. Los estudios más recientes disponibles para la Ciudad de México indican que los compuestos orgánicos primarios representan alrededor del 20-35% de la masa de la fracción orgánica, mientras que la fracción secundaria representa entre el 65-80%, dependiendo de la ubicación en la ciudad (Salcedo et al., 2018; Retama et al., 2022). La quema de biomasa es una fuente importante de aerosoles orgánicos y puede originarse principalmente en incendios agrícolas y forestales, pero también de la quema de basura y del uso de leña y carbón como combustible en



puestos de comida callejera y para calefacción. La fuente más importante son los incendios forestales, por lo tanto, su contribución a la carga de partículas dependerá de la frecuencia e intensidad de los incendios en la región y de la meteorología. En dos trabajos recientes se identificaron contribuciones de entre el 12 y el 15% a la fracción orgánica (Retama et al., 2019, 2022). Durante la estación seca, la quema agrícola y los incendios forestales son una fuente regular de gases orgánicos y aerosoles. En mayo de 2019, la Ciudad de México estuvo bajo la influencia de una columna de contaminantes provenientes de incendios forestales en los estados ubicados al oeste y al sur, lo que provocó un aumento significativo en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , un enriquecimiento en la fracción orgánica y un impacto severo en la visibilidad (Carabalí et al., 2021; Retama et al., 2022).

En 2018, la Dirección de Monitoreo Atmosférico de SEDEMA adquirió un desorbedor térmico de aerosol orgánico acoplado a un cromatógrafo de gases con un detector de espectrometría de masas (TAG-GC-MS, por sus siglas en inglés) para medir componentes primarios y secundarios presentes en la fase de partículas del aerosol con alta resolución temporal y alta especificidad. Este equipo mejorará la caracterización de componentes orgánicos, la química diurna y nocturna involucrada en la formación de aerosoles secundarios y la identificación de fuentes de emisión. La Figura 4.6 muestra un ejemplo de los datos obtenidos por este instrumento.



**Figura 4.6.** Series de tiempo de los promedios horarios de 110 especies orgánicas agrupadas en 9 categorías (barras de color) contenidas en  $PM_{2.5}$ . Las series corresponden a un periodo de prueba de 52 días (mayo-junio de 2019) en el que se evaluó la capacidad del TAG-GC-MS para mejorar la especiación química de aerosoles orgánicos en la atmósfera de la CDMX. Los círculos azules



se refieren a las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, los cuadros rojos muestran dos eventos con la misma concentración de PM<sub>2.5</sub> pero diferente composición. (Fuente: Amador-Muñoz et al., 2022b).

El TAG-GC-MS se ha empleado en algunas campañas de medición recientes al sur de la Ciudad de México y en Tula, Hidalgo. En la Ciudad de México, los resultados preliminares de la primera campaña de Especiación Química de Aerosoles Atmosféricos (EQAA1), realizada entre noviembre y diciembre de 2018, han proporcionado información sobre la composición y variabilidad temporal de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) con una mayor resolución temporal. Los hallazgos confirmaron observaciones previas de Amador-Muñoz et al. (2020, 2022a). Los HAPs cancerígenos mostraron una variabilidad diurna con dos máximos, uno por la mañana (7:00-8:00 h) y otro por la noche (21:00 – 22:00 h), esta variabilidad fue similar a la observada en CO y NO<sub>x</sub> relacionada con el tránsito vehicular. La presencia recurrente de reteno (7-isopropil-1-metilfenantreno), asociado a los flujos de viento del suroeste, principalmente durante la noche, sugirió una contribución de aerosoles derivados de la quema de madera, posiblemente debido al uso de madera en la cocina y la calefacción doméstica en la zona montañosa del Ajusco. Los resultados preliminares de la segunda campaña de Especiación Química de Aerosoles Atmosféricos (EQAA2) (Amador-Muñoz et al., 2022c), realizada entre el 1 de mayo y el 10 de junio de 2019, identificaron la abundante presencia de los trazadores de quema de biomasa levoglucosan y reteno, durante los episodios de contaminación severa, relacionados con el transporte regional de emisiones de quema de biomasa durante mayo de 2019. Durante este evento de contaminación se verificó la ineficacia del programa Doble-Hoy-No-Circula para reducir los niveles de partículas. Aunque el análisis de los datos obtenidos en las campañas descritas aún está en proceso, los resultados preliminares ilustran el potencial del instrumento para avanzar en el conocimiento sobre los aerosoles, su composición e impactos.

Actualmente, se desarrolla un estudio para caracterizar ambas fases del aerosol utilizando un conjunto de instrumentos y técnicas de última generación, desplegados en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire. El objetivo principal es caracterizar la composición orgánica e inorgánica de las fases particulada y gaseosa con una alta resolución temporal, así como las propiedades ópticas de los aerosoles, y a partir de los datos investigar los procesos de formación de aerosoles secundarios en el área. La campaña de medición se realizó entre abril y mayo de 2022, los primeros resultados estarán disponibles en 2023. Los resultados preliminares evidencian el fuerte impacto que la combustión y/o evaporación del diésel tiene en esta zona, sobre todo, de origen vehicular. La concentración de fenantreno, considerada un marcador de esta fuente, es al menos 10 veces mayor que la observada en el sur de la Ciudad de México durante la campaña EQAA1. Además, los datos también sugieren que la familia dominante de compuestos que componen la fracción orgánica determinada en la campaña EQAA2 son los ácidos grasos saturados e insaturados, que pueden provenir de cocinar alimentos (entre otras fuentes), lo cual es una actividad común en la Ciudad de México.

Con respecto al tamaño de partícula, existe una creciente evidencia de que las partículas ultrafinas (partículas de menos de 100 nm de tamaño, PUF) pueden causar una variedad de impactos graves en la salud. Debido a su tamaño, son capaces de translocarse en el torrente sanguíneo, atravesar las barreras nasales/olfativas, respiratorias, gastrointestinales, placentarias y hematoencefálicas, y llegar a los sistemas nervioso central y linfático (Calderón-Garcidueñas y Ayala, 2022). Pocos

estudios se han realizado en la Ciudad de México para determinar la distribución del tamaño y la concentración numérica de PUF. Caudillo et al. (2020) midieron partículas entre 10 y 400 nm en el otoño de 2016, encontrando una relación significativa entre las emisiones de vehículos y el número de concentraciones del modo de nucleación ( $\leq 50$  nm). La variabilidad diurna en ambos se caracterizó por la concentración máxima durante la hora pico de la mañana, coincidiendo con máximos de concentración de CO. En el modo de acumulación, se observaron incrementos asociados con la formación de aerosoles secundarios. Durante un evento de contaminación por SO<sub>2</sub> encontraron evidencia de la posible formación de aerosoles por nucleación.

Velasco et al. (2019), mientras realizaban mediciones de exposición personal a nivel de calle, encontraron que los peatones en la Ciudad de México están expuestos a partículas con un tamaño promedio de  $49 \pm 20$  nm. Esta cifra se derivó del diámetro superficial promedio calculado a partir de mediciones simultáneas e independientes de la concentración del número de partículas y el área de superficie activa asociada.

#### *4.3.3.2. Caracterización de las principales partículas peligrosas en la Megalópolis*

##### **Hidrocarburos aromáticos policíclicos**

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son contaminantes comunes en la fracción orgánica, se encuentran en la superficie de partículas ultrafinas, especialmente en el modo de nucleación ( $< 50$  nm de tamaño) y, por lo tanto, se denominan HAP unidos a partículas (pHAP). Son abundantes en microambientes urbanos directamente impactados por las emisiones de escape vehicular y la quema de biomasa o basura, así como por los humos de cocción, especialmente de carne a la parrilla y frita. La mayoría de los HAP son altamente tóxicos, mutagénicos, cancerígenos y teratogénicos. Amador-Muñoz et al. (2020; 2022a) estudiaron la variación espacial y temporal de los HAP en PM<sub>2.5</sub>, cubriendo cinco sitios alrededor de la ZMVM durante tres temporadas diferentes en 2016-2017. Los pHAP más abundantes en el área metropolitana de la Ciudad de México fueron benzo[ghi]perileno y benzo[b], [k] y [j] fluorantenos, entre los más pesados (masa molecular  $> 216$  g mol<sup>-1</sup>), mientras que los más abundantes dentro de los ligeros (masa molecular  $\leq 216$  g mol<sup>-1</sup>) fueron pireno, fluoranteno y fenantreno. Estos compuestos mostraron fuertes correlaciones con CO y NO<sub>x</sub> en todos los sitios, lo que sugiere fuentes de combustión incompleta similares.

La comparación de los niveles de HAP en PM<sub>2.5</sub> en la ZMVM medidos en 2016-2017 con los determinados hace una década en 2006 (Amador-Muñoz et al., 2011), mostró una disminución de  $34 \pm 9\%$  en HAP cancerígenos y de  $60 \pm 7\%$  en benzo[ghi]perileno. Según los autores, estos resultados demostraron que las acciones de gestión de la calidad del aire implementadas durante el período de 10 años tuvieron un impacto favorable en su reducción, sin embargo, su presencia y concentraciones aún representan riesgos para la salud humana (SEDEMA, 2020). A partir de un estudio reciente sobre la exposición personal a partículas, se encontró que los puestos de comida callejera, ubicuos en la ciudad, además de ser una importante fuente de emisión de carbono negro también lo son de pHAPs (Velasco et al., 2019).

##### **Metales tóxicos**

Los metales representan una pequeña fracción de la masa de las partículas en suspensión, no obstante, se sabe que algunos tienen una carga de toxicidad significativa para los humanos. La

presencia de metales está relacionada con fuentes geogénicas y antropogénicas, entre las primeras se encuentran las emisiones volcánicas, el espray marino y los suelos erosionados; mientras que el tráfico vehicular, la quema de combustibles fósiles, los procesos metalúrgicos industriales y la quema de desechos son ejemplos de fuentes antropogénicas. En la ZMVM, el uso intensivo de catalizadores para controlar las emisiones de diversos gases contaminantes ha llevado a un aumento significativo en el contenido de platino (Pt) en PM<sub>2.5</sub> (Morton-Bermea et al., 2014). El plomo (Pb), un contaminante que en el pasado se asociaba con el uso de gasolina con plomo, se ha reducido significativamente, sin embargo, el polvo del suelo urbano continúa enriqueciéndose con este metal, con niveles que podrían implicar cierto riesgo para la población (Aguilera et al., 2021). El polvo del suelo urbano también es una fuente importante de zinc (Zn), cobre (Cu), cromo (Cr) y níquel (Ni); estos metales provienen principalmente del desgaste mecánico de los vehículos, el desgaste de frenos y neumáticos, la quema de combustibles, los aditivos automotrices y la degradación de la pintura callejera (Aguilera et al., 2021; Delgado et al., 2019). Las fuentes geogénicas tuvieron la mayor contribución a la carga de metales en PM<sub>2.5</sub> y se relacionaron con el transporte regional y la contribución de material geogénico local y/o la resuspensión del polvo del suelo (Garza-Galindo et al., 2019). La presencia de metales asociados con la actividad industrial se vinculó principalmente a contribuciones locales (Hernández-López et al., 2021).

Hay algunas fuentes que pueden tener contribuciones esporádicas adicionales al contenido de metales en aerosoles, como la quema de biomasa y la pirotecnia, que son una fuente importante de potasio (K) y otros metales (Hernández-López et al., 2021; Retama et al., 2019); otros, como las emisiones volcánicas del Popocatepetl, pueden ser una fuente importante de mercurio (Hg) (Schiavo et al., 2020). Existe poca información sobre la situación en otras áreas urbanas y suburbanas de la Megalópolis, sin embargo, se ha reportado evidencia de la presencia de metales relacionados con fuentes antropogénicas (Gómez-Arroyo et al., 2018; Ramos-H et al., 2020).

### *Contaminantes atmosféricos de los hornos crematorios*

Los hornos crematorios son una fuente urbana emergente de emisiones de gases de combustión, principalmente CO y NO<sub>x</sub>, y de PM<sub>2.5</sub>. En la Ciudad de México hay alrededor de 40 crematorios públicos y privados donde se realizan un promedio de alrededor de 25,000 cremaciones anuales. Un estudio reciente de González-Cardoso et al. (2020) evaluó las emisiones de CO, PM<sub>2.5</sub>, carbono elemental (EC), carbono orgánico (OC) y HAP, de varios hornos crematorios representativos de los empleados en la Ciudad de México. La muestra de hornos incluyó aquellos con y sin control de suministro de aire. Encontraron que los hornos sin control del suministro de aire tienden a generar hasta seis veces más emisiones que los hornos con control de aire. Los HAP de 5 y 6 anillos (por ejemplo, benzo[ghi]perileno e indeno[1,2,3-cd]pireno) fueron los más abundantes en los hornos con control de aire, mientras que los HAP de 4 anillos (por ejemplo, fluoranteno, pireno y benzo[a]antraceno) fueron los más abundantes en hornos sin suministro de aire controlado; las especies cancerígenas representaron el 45% del total de los HAP. El mercurio fue el metal más abundante asociado con las partículas, mientras que las emisiones de cobre, plomo, níquel, y vanadio (V) fueron mayores que las reportadas para otras instalaciones de combustión que utilizan diésel, biomasa y hornos de GLP. Aunque las emisiones de la cremación no modificaron significativamente la composición y las concentraciones de fondo de los aerosoles urbanos, podrían tener un impacto en las áreas cercanas, principalmente debido al aumento de HAP y Hg. Este trabajo se utilizó en el diseño de la norma local de la Ciudad de México para hornos crematorios NADF-017-AIRE-2017.

### *Emisiones procedentes de la quema de productos pirotécnicos*

La quema de pirotecnia es una actividad profundamente arraigada con las festividades cívicas y religiosas en México, así como en muchos otros países. La exhibición de despliegues pirotécnicos durante celebraciones como el Día de Año Nuevo en todo el mundo, Diwali en India y el Festival de Primavera en China, aumentan sustancialmente el nivel de contaminantes atmosféricos, lo que lleva a algunos países a restringir la venta y uso (Molina, 2021).

Generalmente, los dos días más contaminados del año en la Ciudad de México son Navidad y Año Nuevo (CAME, 2022). Retama et al. (2019) caracterizaron el impacto de la actividad de fuegos artificiales y fogatas (por quema de llantas y madera) en la calidad del aire de la Ciudad de México durante el invierno de 2013-2014 y encontraron que durante la quema de pirotecnia durante Navidad y Año Nuevo se emitieron pequeñas partículas de metales y especies orgánicas e inorgánicas, y gases nocivos como el  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  y HONO. La atmósfera estancada en la noche favoreció la acumulación de las emisiones provenientes de la quema de pirotecnia bajo una capa límite poco profunda. Al amanecer, una vez que la quema de pirotecnia cesó, la fotólisis del HONO formado y acumulado durante toda la noche, llevó a una rápida producción de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y aerosoles orgánicos secundarios. En este periodo las concentraciones de partículas diurnas fueron más altas que durante los fuegos artificiales nocturnos.

La producción de pirotecnia es una actividad económica importante en el Estado de México, particularmente en el municipio de Tultepec, donde aproximadamente el 65% de su población está involucrada directa o indirectamente en esta actividad. Un informe reciente de la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México destacó la necesidad de mejorar los sistemas de producción de pirotecnia y migrar hacia alternativas tecnológicas que reduzcan los impactos ambientales en la calidad del aire (EDOMEX, 2021).

#### *4.3.3.3. Bioaerosoles*

El término bioaerosoles se refiere a todas las partículas de origen biológico suspendidas en el aire, incluidas bacterias, hongos, virus, polen y sus derivados, como alérgenos y endotoxinas (Yao et al, 2018). El interés internacional en los bioaerosoles ha aumentado recientemente para mejorar el conocimiento sobre su identificación, cuantificación, distribución e impactos en la salud. La presencia y abundancia de aeroalérgenos, como el polen y las comunidades fúngicas y bacterianas en el aire, es un tema emergente de investigación en México.

Con los avances en biología molecular en las últimas décadas, se ha logrado la detección específica de bioaerosoles recolectados del aire, principalmente hongos, levaduras, bacterias y arqueas, utilizando diversos equipos de muestreo. Calderón-Ezquerro et al. (2020) emplearon un enfoque metagenómico para caracterizar las comunidades bacterianas y fúngicas, utilizando ARNr 16S y la región espaciadora transcrita interna del ARN ribosómico nuclear. El estudio se llevó a cabo en la Ciudad de México durante la estación seca, en días con altos niveles de ozono y partículas en suspensión (14 al 18 de marzo de 2016). Observaron aumentos en las bacterias y hongos presentes en el aire durante la contingencia ambiental provocada por altos niveles de  $\text{O}_3$ , que posiblemente podrían causar efectos sinérgicos en la salud humana debido a la exposición simultánea a contaminantes químicos en el aire y la microbiota. En un estudio sobre la detección metagenómica

de bacterias del aire en la Ciudad de México, realizado durante un ciclo anual en tres zonas de la ciudad, Calderón et al. (2022) encontraron diferencias significativas en la diversidad de comunidades bacterianas, muchas de las especies encontradas han sido reconocidas como patógenas y su presencia se asoció a las estaciones climáticas y el grado de urbanización, con mayor diversidad durante la temporada de lluvias y en los distritos más urbanizados.

La *Red Mexicana de Aerobiología* (REMA), instalada y operada por la UNAM a partir de 2008, cuenta actualmente con sitios de muestreo en diferentes zonas de la Ciudad de México y del Estado de México. El propósito de la red es informar a la población sobre las concentraciones atmosféricas de diferentes alérgenos de polen, cuantificar los riesgos para la salud y los ecosistemas, y observar los posibles efectos del cambio climático en la vegetación. Sus resultados permitirán evaluar las variaciones espaciales y temporales del polen atmosférico, además de su impacto en la salud humana, el desarrollo de calendarios polínicos, serán útiles para pronosticar la presencia de aeroalérgenos de polen según diferentes escenarios de temperatura. Calderón-Ezquerro et al. (2016) desarrollaron el primer calendario de polen para la Ciudad de México, que incluyó una gran variedad de taxones, muchos de los cuales muestran una larga temporada principal de polen que puede durar todo el año.

El estudio de los bioaerosoles es un trabajo en progreso, la disponibilidad de más sitios de muestreo y nuevos datos sobre su composición y calendario, proporcionarán más y mejor evidencia que, en el mediano plazo, podría permitir la incorporación de este contaminante en las estrategias de gestión de la calidad del aire con un enfoque en la protección de la salud de un sector importante de la población.

#### ***4.3.4. Propiedades ópticas de los aerosoles***

Los aerosoles atmosféricos interactúan con la luz solar y afectan la calidad del aire y el clima. Absorben y dispersan la luz de acuerdo con las propiedades ópticas resultantes de su carga de masa, distribución de tamaño, edad, composición química, estado de mezcla e higroscopicidad. Por lo tanto, es necesario evaluar las propiedades ópticas de los aerosoles junto con su composición química, origen, variabilidad estacional y fotoquímica diurna para mitigar su impacto atmosférico, incluido el deterioro de la visibilidad dentro de la ciudad, que, a pesar de ser el efecto más evidente de la contaminación del aire, no ha recibido la atención necesaria de las autoridades ambientales y la academia.

Las campañas de campo IMADA-AVER, MCMA-2003 y MILAGRO proporcionaron información valiosa sobre las propiedades ópticas y la composición química de los aerosoles durante la temporada de primavera en condiciones climáticas secas y cálidas (Doran et al., 1998, Edgerton et al., 1999, Molina et al., 2007, 2010). Estudios recientes han determinado las propiedades ópticas durante períodos más largos utilizando instrumentación terrestre (Retama et al., 2015; Liñán-Abanto et al., 2019), y los datos de teledetección (Carabali et al., 2017; Gorchakov et al., 2017), pero no habían evaluado simultáneamente la composición química de los aerosoles.

En tal contexto, Retama et al. (2022) investigaron durante dos años la capacidad de los aerosoles para dispersar y absorber luz en la atmósfera de la Ciudad de México en combinación con una especiación química detallada de sus componentes, centrándose en las características del carbono

café (BrC, *brown carbon*, siglas en inglés), el BrC es el término utilizado cuando se consideran las especies orgánicas que dan a las partículas una apariencia marrón en lugar de negra. Encontraron que, dependiendo de la estación climatológica, el 65-74% de la extinción de la luz en la región del infrarrojo cercano se debía a la dispersión. Al menos la mitad de la dispersión de la luz se atribuyó a aerosoles orgánicos durante días regulares, y más del 80% durante episodios de incendios forestales. El  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  fueron importantes contribuyentes de dispersión de la luz. El primero tuvo una mayor contribución en días regulares (20%) que durante la temporada de incendios forestales (14%), lo contrario fue cierto para el segundo (11% y 22%, respectivamente). En cuanto a la absorción de la luz, las partículas frescas asociadas con las emisiones del tráfico tuvieron un papel importante en los días no afectados por las columnas de combustión de biomasa. Durante los episodios de incendios forestales, la fracción orgánica contribuyó hasta un 50% a la absorción de la luz. Los aerosoles orgánicos envejecidos tuvieron una contribución insignificante a la absorción de la luz, pero los aerosoles orgánicos secundarios de formación reciente contribuyeron en promedio un 24% en días no afectados por columnas de incendios forestales. El BrC y el CN contribuyeron con 22% y 78% a la absorción total de luz en la Ciudad de México, respectivamente. El BrC aumentó en promedio un 28% la absorción de luz sobre la atribuida a CN. Este aumento puede ser de hasta el 32% durante la estación seca-cálida. En resumen, el tráfico vehicular fue el principal contribuyente diario a la absorción de luz, mientras que la quema de biomasa fue el principal contribuyente durante los episodios de incendios forestales. Los resultados de este estudio actualizaron los hallazgos sobre el tema logrados durante los estudios de campo de corta duración realizados en el pasado.

#### ***4.3.5. Investigación científica en los otros estados de la Megalópolis***

Existe un sesgo geográfico en la investigación científica en la Megalópolis; la mayoría de los estudios de investigación se han realizado en la Ciudad de México y su área metropolitana. El trabajo en el resto de las entidades es escaso o nulo. Hay múltiples razones posibles detrás de la falta de investigación científica en las otras entidades, incluyendo:

- 1) El poco interés de las autoridades ambientales en identificar y resolver el problema
- 2) La falta de infraestructura y capacidad técnica para realizar estudios
- 3) La ausencia de recursos financieros para realizar estudios
- 4) La poca educación ambiental que limita el interés de la población en una mejor calidad del aire
- 5) La poca disponibilidad de datos de calidad del aire para informar a la población
- 6) La presencia o ausencia de centros de investigación que colaboren con las agencias ambientales

Los resultados del monitoreo muestran que existen áreas urbanas, aparte de la Ciudad de México, con evidencia emergente o confirmada de la degradación de la calidad del aire. A pesar de esto, poco se sabe sobre el origen y las características de la contaminación, los procesos que ocurren en la atmósfera y los efectos sobre la salud humana. Durante los eventos de contaminación severa por  $\text{O}_3$  en marzo de 2016, las autoridades de la Ciudad de México se pronunciaron sobre la naturaleza regional del problema de la contaminación y mencionaron que los problemas ambientales no solo eran responsabilidad de la entidad, sino también un problema que involucraba emisiones generadas

por entidades vecinas, particularmente el Estado de México (ver Velasco et al., 2017). El episodio de contaminación marcó un hito en la gestión ambiental para la Megalópolis, con consecuencias positivas para la región, ya que las autoridades federales dirigieron su atención al tema, realizando una evaluación del estado del monitoreo y la gestión de la calidad del aire en las otras entidades. Esto llevó al desarrollo de un ProAire para la Megalópolis (SEMARNAT, 2017), que incluyó una agenda de investigación científica a escala regional, la liberación de recursos financieros para el fortalecimiento de la infraestructura, el fortalecimiento de las capacidades de medición del INECC para apoyar campañas de investigación en otros estados, y la participación de diversas dependencias del gobierno federal en el trabajo en las entidades.

Un ejemplo de la investigación regional es reportado por Mora et al. (2017), quienes estudiaron el comportamiento de los aerosoles a nivel de Megalópolis mediante el análisis de datos obtenidos por satélites, mediciones terrestres, modelos de trayectoria, modelos de composición química de aerosoles y datos de reanálisis para el período 2003 a 2015. Los autores encontraron un claro efecto antropogénico en los perfiles diurnos de las partículas suspendidas y los días de la semana, con un aumento notable en los niveles de partículas gruesas (diámetro  $\geq 2.5 \mu\text{m}$ ) durante los períodos de hora pico de los días laborables en comparación con los fines de semana, así como un aumento estadísticamente significativo en la velocidad del viento y la temperatura ambiente de 2003 a 2015. Entre las especies de deposición húmeda, los iones  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , y  $\text{Ca}^{2+}$  se correlacionan mejor con  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ , lo que sugirió que estas especies eran componentes importantes del aerosol que siembra hidrometeoros que eventualmente caen como deposición húmeda. Entre las diferentes especies modeladas con GOCART, el  $\text{SO}_4^{2-}$  contribuyó significativamente a la profundidad óptica (mayor durante mayo-junio), seguido de los orgánicos. Por otro lado, las emisiones de quema de biomasa ocurrieron durante la estación seca-cálida (marzo a mayo) coincidiendo con valores elevados de espesor óptico (AOD, siglas en inglés para *aerosol optical depth*), el índice de aerosol ultravioleta (UV AI) y las concentraciones de material particulado superficial (PM). Las emisiones de la quema de biomasa contribuyeron significativamente a los altos valores de AOD, UV AI, y PM en la estación cálida-seca cuando la capa límite fue mayor.

Aunque varias áreas urbanas en México luchan por mantener una buena calidad del aire, poco se sabe sobre los procesos que determinan la presencia de contaminantes en la atmósfera más allá de la Ciudad de México. Enseguida se describen algunos resultados de la investigación científica realizada en los otros estados de la Megalópolis presentados durante el Taller virtual.

#### 4.3.5.1. Complejo industrial Tula-Tepeji, Hidalgo

Algunos estudios han identificado la presencia de  $\text{SO}_2$  de origen regional en el aire ambiente de la Ciudad de México (por ejemplo, Raga et al., 1999; de Foy et al., 2009). El origen de estas emisiones se ha relacionado con las emisiones del complejo industrial Tula-Tepeji (ubicado ~ 65 km al norte de la ZMVM) y el volcán Popocatepetl (ubicado ~ 70 km al sureste). Si bien el impacto de las emisiones del Popocatepetl depende de la actividad volcánica y las condiciones meteorológicas en la atmósfera media, las emisiones de Tula son una fuente continua de contaminantes en la región. Durante las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO-2006, se demostró que estas emisiones industriales afectaban la calidad del aire de la ZMVM, principalmente para  $\text{SO}_2$ , porque las tasas de emisión eran mayores que las de las fuentes de emisión urbanas. Sin embargo, la cuantificación precisa de la contribución fue un desafío, ya que la magnitud de las concentraciones y el alcance espacial de los impactos dependía de los patrones

de transporte de las masas de aire, las condiciones meteorológicas y la transformación química durante y después de cualquier evento de liberación.

Las emisiones del volcán Popocatepetl son una importante fuente regional de  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , de acuerdo con Arellano et al. (2021), el volcán Popocatepetl emitió un promedio de 2,115 toneladas/día de  $\text{SO}_2$  a la atmósfera entre 2007 y 2016. Las contribuciones de esta fuente natural a la contaminación en la Ciudad de México no son constantes y dependen de la frecuencia e intensidad de las emisiones y las condiciones climáticas.

El complejo industrial de Tula continua como un importante *hotspot* de  $\text{SO}_2$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en la región. Se estima que tan solo en 2017 el complejo industrial emitió a la atmósfera aproximadamente 217,200 megagramos (Mg) de  $\text{SO}_2$ , 89,950 Mg de  $\text{NO}_x$ , 34,950 Mg de  $\text{PM}_{10}$ , 23,960 Mg de  $\text{PM}_{2.5}$ , 268,990 Mg de COV, y 24,930 Mg de  $\text{NH}_3$  (Sosa et al., 2020). Las principales fuentes en el corredor industrial incluyen una refinería, una planta de generación de energía termoeléctrica y cinco plantas de cemento. La termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” es una central termoeléctrica con una capacidad de 2.095 GW con cinco unidades generadoras de electricidad y un consumo importante de combustóleo (con un contenido de 3.5% de azufre) y gas natural. La termoeléctrica junto con la refinería “Miguel Hidalgo” aportan alrededor del 80 y 90% de las emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  de la entidad, respectivamente. Desde 1989 la región se encuentra clasificada como zona crítica (ZC) en materia de contaminación atmosférica (ICM, 2021).

En un estudio de modelación sobre los impactos de las emisiones de  $\text{SO}_2$  de la región de Tula en la calidad del aire de la ZMVM, se evaluaron las mediciones de  $\text{SO}_2$  y de variables meteorológicas tomados durante MILAGRO en marzo de 2006 y de un estudio de campo realizado en octubre-diciembre de 2008 por el IMP, junto con datos de monitoreo RAMA de largo plazo y las observaciones satelitales, para identificar el origen y transporte de las plumas de  $\text{SO}_2$  observadas en la ZMVM (MCE2-INE, 2009). Los resultados de la modelación mostraron que la región de Tula tuvo mayores contribuciones a los impactos de  $\text{SO}_2$  en la superficie de la ZMVM que el volcán Popocatepetl, para los períodos simulados. La contribución a largo plazo de las emisiones volcánicas de  $\text{SO}_2$  a la calidad del aire fue pequeña, aunque podría ser algo más significativa en la parte sureste de la ciudad. Este resultado no excluyó la posibilidad de una mayor influencia en la ciudad durante un evento volcánico en presencia de las condiciones de transporte adecuadas. Los resultados también sugirieron que los impactos a largo plazo del volcán tuvieron una mayor influencia espacial que cualquier impacto local (~60 a 100 km), destacando la importancia de estudiar los impactos de las emisiones volcánicas del Popocatepetl a escala regional y global.

Un estudio de modelación, basado en datos de MILAGRO, sugirió una contribución de las actividades de venteo y quema de gas en Tula a los niveles totales de  $\text{SO}_2$  de 18% a 27% en el norte de la ciudad, y de 10% a 18% en las afueras (Almanza et al., 2012). En un estudio posterior, Almanza et al. (2014) estimaron una contribución de las emisiones del complejo industrial de Tula a la formación de  $\text{O}_3$  de entre 1 a 4 ppb. Sin embargo, esta contribución podría alcanzar 10 ppb en la región superior noroeste de la ZMVM, y el suroeste y sursureste del estado de Hidalgo. La pluma urbana de  $\text{O}_3$  podría alcanzar el noroeste de Tlaxcala, el este de Hidalgo y más al noreste del Estado de México, pero con valores menores. Además, una estimación de la contribución potencial de las actividades de quema a los niveles regionales de  $\text{O}_3$  sugirió que hasta el 30% del  $\text{O}_3$  regional originado en Tula podría relacionarse con actividades de quema. Este estudio también



sugirió la posibilidad de fuentes de emisión "pasadas por alto" en la región de Tizayuca, Hidalgo, que podrían tener una influencia en la calidad del aire de la ZMVM. Encontraron que las plantas de cemento ubicadas en los estados de Hidalgo y México podrían aportar a los niveles de SO<sub>2</sub> en la región noreste de la Cuenca de México y en el supersitio suburbano T1 (41%), así como en algunas estaciones de monitoreo, sugiriendo que bajo ciertas condiciones su contribución podría exceder la contribución del complejo industrial de Tula.

Entre 2006 y 2017, se realizaron tres campañas de medición de campo para evaluar las emisiones de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> del complejo industrial de Tula: la primera en 2006 como parte de la campaña MILAGRO, utilizando una espectroscopia de absorción óptica diferencial miniaturizada de barrido (Mini-DOAS, por sus siglas en inglés) (Rivera et al. 2009), la segunda en 2010 y la más reciente en 2017 (Rivera et al., 2022). Los resultados indicaron que las emisiones de NO<sub>2</sub> no tuvieron cambios significativos, mientras que se observó una ligera disminución en SO<sub>2</sub> (Tabla 4.1).

**Tabla 4.1.** Resultados de emisiones SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> estimadas para la refinería y central termoeléctrica de Tula, Hidalgo, durante diferentes campañas de medición.

Año	SO <sub>2</sub> (ton/día)	NO <sub>2</sub> (ton/día)
2006	384 ± 103	24 ± 7
2010	365 ± 141	23 ± 17
2017	362 ± 300	25 ± 13

Sosa et al. (2020), utilizando una combinación de mediciones y modelación, identificaron los aumentos en las concentraciones de SO<sub>2</sub> en la Ciudad de México observados durante el invierno, con altas emisiones en la planta termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos" en Tula. Los autores señalaron que, aunque las concentraciones de SO<sub>2</sub> no son un problema de calidad del aire en el ZMVM, la presencia de lluvia ácida y altos niveles de sulfatos en la deposición atmosférica húmeda continúan como un motivo de preocupación.

En cuanto a las PM finas, en ciertas noches, las plumas ricas en SO<sub>2</sub> provenientes del complejo industrial Tula-Tepeji arriban a la ciudad y aumentan la presencia de SO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Por lo que las concentraciones nocturnas de ambas especies tienden a ser similares o superiores a las del resto del día (Retama & Velasco, 2022). Como ya se mencionó, los vehículos en la Ciudad de México utilizan combustibles bajos en azufre; por lo tanto, la presencia de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> puede atribuirse a las emisiones del complejo industrial Tula-Tepeji.

Además de la contribución regional a la calidad del aire, el corredor industrial tiene un impacto directo en la exposición de los habitantes de las comunidades aledañas. No obstante, no existe información objetiva sobre los efectos de las emisiones industriales en la salud de la población. La organización Iniciativa Climática de México (ICM) realizó un ejercicio de modelación empleado el modelo regulatorio AERMOD para identificar la influencia de las emisiones de la termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos" en las concentraciones de SO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> en los municipios cercanos. Sus resultados identificaron que las localidades Pradera del Llano, Teocalco y El Llano, al sur de la termoeléctrica, se encontraban en una zona de riesgo por la presencia de concentraciones fuera de los límites máximos permisibles para PM<sub>2.5</sub>, no así para SO<sub>2</sub> (ICM, 2021).

Recientemente, el INECC coordinó una campaña intensiva de medición a corto plazo en el complejo Tula-Tepeji-Endhó, para ayudar a mejorar las capacidades de gestión de la calidad del aire en la región. Sin embargo, los resultados no han sido todavía publicados.

#### *4.3.5.2. Caracterización de partículas suspendidas en Querétaro*

Olivares-Salazar et al. (2021) describieron la composición química de las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la Zona Metropolitana de Querétaro e identificaron las principales fuentes de emisiones utilizando factorización de la matriz positiva. Las principales fuentes de  $PM_{10}$  fueron la resuspensión de polvo mineral y de construcción, incineración, emisiones industriales, la quema de biomasa y partículas secundarias. Para  $PM_{2.5}$ , las principales fuentes fueron la resuspensión, partículas antropogénicas (con incineración y partículas industriales), vehículos y la combustión de biomasa. Aunque algunas de las fuentes identificadas fueron probablemente locales, la contribución regional a las concentraciones de PM fue significativa, revelando así la importancia de estudiar la región central de México, que es una importante área industrial y agrícola.

En otro estudio (Rozanes-Valenzuela et al, 2021), se estableció una climatología de flujo de viento para el Área Metropolitana de Querétaro (AMQ) mediante el análisis de cuatro años (2014-2017) de trayectorias generadas utilizando el modelo HYSPLIT. Los resultados diferenciaron dos regímenes de flujo: uno de junio a septiembre (régimen lluvioso) y el otro de diciembre a mayo (régimen seco). La presencia constante de flujos desde el noreste se observó durante todo el año, en contraste, las trayectorias desde el suroeste fueron menos frecuentes y se observaron principalmente durante el régimen seco. Algunas de las trayectorias observadas hacia el noreste tuvieron su posible origen en una región desértica del estado de Querétaro, donde se encontraban varias minas de piedra caliza. Durante el régimen seco y los meses de transición, algunas trayectorias tuvieron un posible origen en la zona industrial de Guanajuato, incluida la refinería de Salamanca. Este análisis podría ser útil para identificar fuentes regionales que afectan al AMQ y posiblemente aumentar su carga de contaminación del aire.

Liñán-Abanto et al. (2019) estudiaron las propiedades ópticas de los aerosoles en un sitio al norte del AMQ y las compararon con observaciones similares realizadas en el ICAYCC-UNAM, al sur de la Ciudad de México. Observaron una variabilidad diurna similar en el coeficiente de absorción en ambos sitios, pero con diferencias significativas en magnitud, donde las mediciones obtenidas en el AMQ correspondieron a un tercio de los valores observados en la Ciudad de México. Observaron una coincidencia en los perfiles horarios, tanto de absorción como de coeficiente de dispersión, que sugirieron fuentes similares de aerosoles. Encontraron que la contaminación del aire en Querétaro estaba influenciada por fuentes locales (ubicadas al norte y al sur) y por aerosoles presentes en masas de aire fotoquímicamente envejecidas, transportadas regionalmente y que arribaban a la ciudad de Querétaro.

#### *4.3.5.3. Monitoreo de la calidad del aire en Puebla*

Mora-Ramírez (2022) presentó avances en el trabajo de investigación realizado por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), donde evaluó la exposición de ciclistas y peatones a partículas  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  utilizando sensores de bajo costo, en combinación con instrumentos científicos calibrados. Se utilizaron sensores de bajo costo como alternativa para determinar los niveles de partículas en la zona central del municipio de Puebla, en conjunto con un proyecto para

instalar estaciones de monitoreo. Los resultados destacaron la necesidad de un esfuerzo inmediato para mejorar la red de monitoreo de Puebla y otras entidades fuera de la Ciudad de México, debido a la interrelación que existe entre las diferentes cuencas atmosféricas de la Megalópolis.

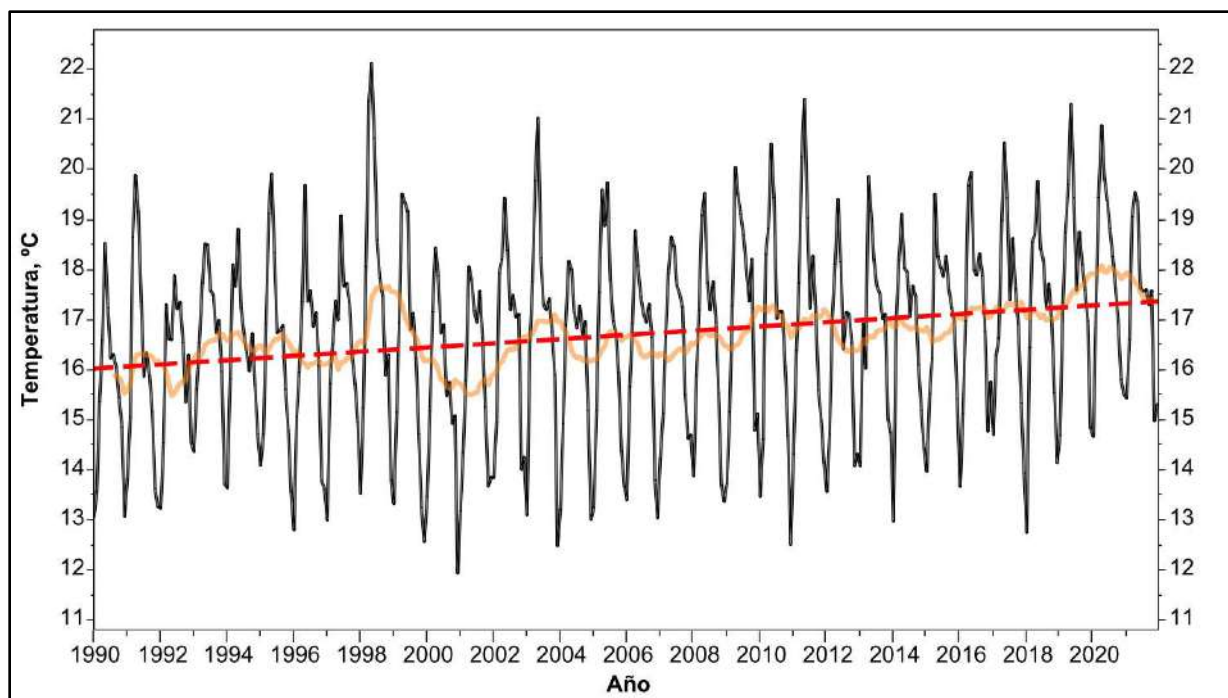
#### **4.4. Climatología urbana y calidad del aire**

Los procesos químicos y físicos involucrados en la formación de los contaminantes atmosféricos que ocurren en la atmósfera, son sensibles a los cambios en las condiciones meteorológicas. Se ha observado que, en entornos urbanos, el calentamiento del entorno construido y el cambio climático regional están modificando la meteorología local. En términos de calidad del aire, se sabe que el aumento de la temperatura puede causar un aumento de las emisiones evaporativas, impactos en la degradación de los procesos de eliminación de contaminantes y la amplificación de la química atmosférica (Nolte et al., 2018; Fiore et al., 2015; Jacobs & Winner, 2009).

##### ***4.4.1. Calentamiento urbano y cambio climático***

Las estructuras como edificios, carreteras (asfalto y concreto) y otras infraestructuras absorben y reemiten el calor del sol más que los paisajes naturales como árboles, vegetación y cuerpos de agua. Las áreas urbanas, donde estas estructuras están altamente concentradas y la vegetación es limitada, se convierten en "islas" de temperaturas más altas en relación con las áreas periféricas, creando los efectos de isla de calor urbano (ICU) (Mills et al., 2021; US EPA, 2022). Las islas de calor generalmente se estiman de la diferencia de temperatura entre las ciudades en relación con las áreas circundantes. La diferencia de temperatura entre el área urbana y el entorno rural suele ser mayor por la noche que durante el día y más evidente cuando los vientos son débiles. La temperatura también puede variar dentro de una ciudad; algunas áreas son más calientes que otras debido a la distribución desigual de los edificios y pavimentos que absorben el calor.

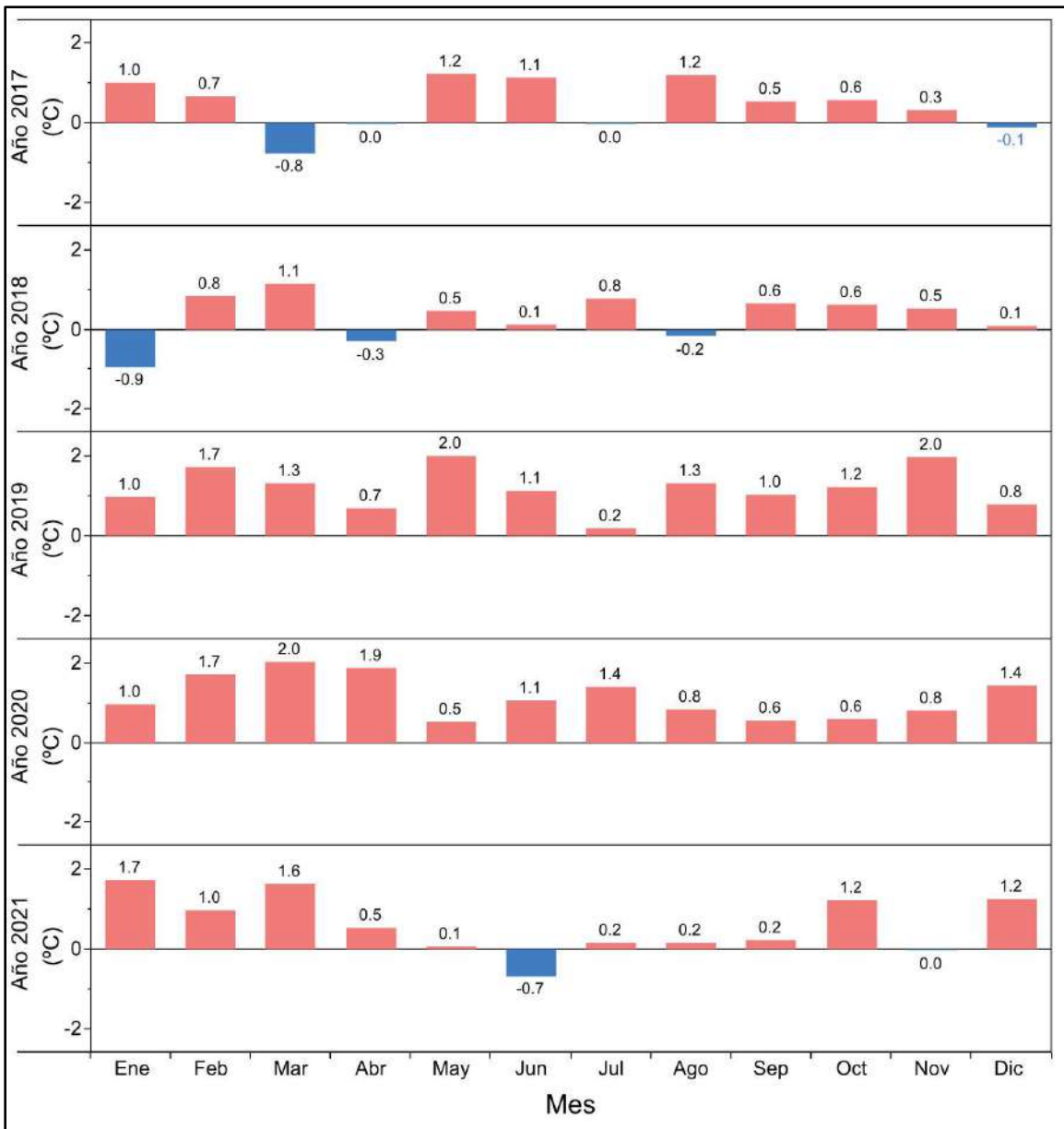
La atmósfera de la ZMVM ha experimentado un calentamiento progresivo en las últimas décadas, posiblemente debido a la interacción sinérgica entre el aumento de la modificación de la cubierta terrestre, los nuevos materiales utilizados en la construcción, el calor antropogénico y los cambios de temperatura asociados con el cambio climático global. Según datos del SIMAT, en los últimos 20 años la temperatura ambiente ha aumentado en  $\sim 1.3^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 4.7). En el caso del Estado de Puebla, también se ha observado una tendencia creciente en la temperatura ambiente, con un aumento de  $1.3^{\circ}\text{C}$  entre 1985 y 2021; mientras que las precipitaciones mostraron una tendencia emergente a la baja, con valores por debajo del promedio en los últimos cuatro años. Se espera que el calentamiento continuo empeore en el futuro. A medida que aumenten las densidades de población urbana en la Megalópolis y disminuyan las áreas de tierra natural, las islas de calor se fortalecerán. Los impactos del calentamiento urbano podrían extenderse más allá de los límites de la ciudad, alterando los patrones regionales de precipitación y modificando las cargas de aerosoles (López-Espinoza, 2022; Aquino-Martínez et al., 2021; Ochoa et al., 2015).



**Figura 4.7.** Series temporales de los promedios mensuales (línea gris) obtenidos a partir de los valores horarios de las estaciones FAC, MER, MON, PED, SAG, TAH, TLA, VIF y XAL operadas por SIMAT. La línea naranja indica la media móvil de 12 meses, mientras que la línea roja punteada muestra la tendencia lineal. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del aire, [www.aire.cdmx.gob.mx](http://www.aire.cdmx.gob.mx), consultado el 10 de septiembre de 2022).

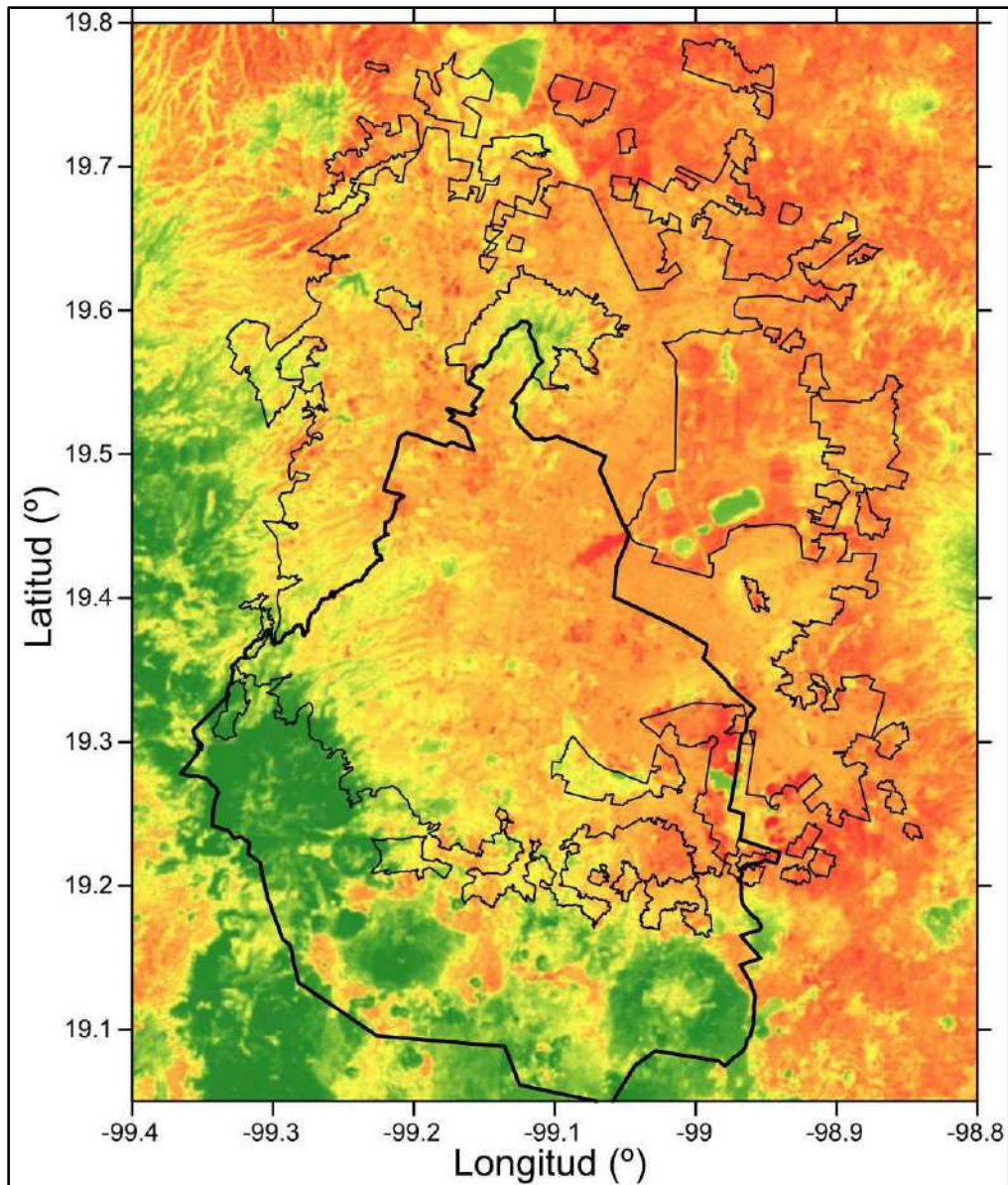
El aumento observado en la ZMVM no ocurre en un período o estación específica del año. Un análisis de las anomalías mensuales de la temperatura confirma que los aumentos ocurren en todos los meses del año, como se puede ver en la Figura 4.8. Es importante señalar que en los años 2019 y 2020 se registraron anomalías positivas atípicas en todos los meses; curiosamente 2019 y 2020 se incluyeron entre los tres años más cálidos a nivel mundial, lo que sugiere que el clima de la Ciudad de México podría responder a los cambios climáticos globales.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Una anomalía de temperatura se define como la desviación (positiva o negativa) con respecto a la temperatura promedio durante un cierto período de referencia, a menudo llamado período base.



**Figura 4.8.** Anomalías mensuales de la temperatura ambiente para los años 2017 a 2021 con respecto a los valores medios para el período base 1990-2021. (Elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo Atmosférico, [www.aire.cdmx.gob.mx](http://www.aire.cdmx.gob.mx), consultado el 10 de septiembre de 2022).

La Figura 4.9 presenta la variación espacial promedio de la temperatura de la superficie urbana (que no debe confundirse con la temperatura a nivel ambiente o del dosel) durante marzo y mayo, obtenida del satélite Landsat 8. El mapa muestra los contrastes de temperatura superficial que existen entre los diferentes usos del suelo en la región.



**Figura 4.9.** Temperatura media de la superficie terrestre en el MCMA para los meses de la estación seca-cálida (marzo-mayo), para el período 2010-2022. Las temperaturas más altas se muestran en tonos de rojo, mientras que las temperaturas más bajas se muestran en tonos de verde. (Fuente de datos: colección 2 nivel 2 del satélite Landsat 8, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>, consultado el 6 de noviembre de 2022).

A pesar del cambio significativo de temperatura en la Ciudad de México y el trabajo pionero de Jáuregui (Jáuregui, 1997), actualmente el estudio de la climatología urbana es escaso. La Estrategia Local de Acción Climática 2021-2050 de la Ciudad de México (SEDEMA, 2021a) estimó la intensidad de la isla de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés) ambiental de la ciudad en 4°C. Por otro lado, la intensidad de la isla de calor urbano superficial estimada a partir de la aproximación propuesta por Chakraborty & Lee (2019) para 2020 fue de 0.25°C durante el día y 1.95°C por la noche. La Tabla 4.2 muestra estimaciones de la intensidad de la isla de calor urbano



en varias ciudades de la Megalópolis como un ejemplo de la presencia de la isla de calor urbano superficial en la mayoría de las áreas urbanas. Sin embargo, este tipo de estimaciones basadas en modelos, así como otras derivadas de datos satelitales globales, deben tomarse con cautela. Especialmente en las regiones áridas, puede haber una gran diferencia entre la temperatura de las islas de calor urbano superficial (*skin*) y del dosel (aire). Es necesario realizar mediciones de campo para investigar los cambios en el clima urbano, sus relaciones con la morfología y el metabolismo urbanos, y los posibles efectos sobre la salud, la micrometeorología y la calidad del aire.

**Tabla 4.2.** Valores promedio de la intensidad de la isla de calor urbana superficial para diferentes grupos urbanos de la Megalópolis en 2020 basados en información del *Global Surface UHI Explorer* (Chakraborty & Lee, 2019).

Ciudad	Isla de calor urbano superficial, media diurna (°C)	Isla de calor urbano superficial, media nocturna (°C)
Zona Metropolitana del Valle de México	0.25	1.95
Zona Metropolitana del Valle de Toluca, Estado de México	0.38	0.93
Cuernavaca, Morelos	0.29	0.58
Cuatla, Morelos	0.59	0.96
Zona Metropolitana de Puebla, Puebla	0.62	1.58
Tlaxcala, Tlaxcala	1.26	0.47
Tulancingo, Hidalgo	1.48	0.87
Pachuca, Hidalgo	-0.56	1.46
Zona Metropolitana de Querétaro, Querétaro	0.67	1.24

En la ZMVM, Cui & de Foy (2012), estudiaron los efectos de la cubierta vegetal en la isla de calor urbano y distinguieron entre las islas de calor superficial (*skin*) y la cercana a la superficie midiendo la temperatura del aire. Encontraron que las islas de calor superficial, dentro del dosel urbano, podían alcanzar valores máximos de hasta 10.5°C y tenían una fuerte señal estacional con valores bajos o negativos (isla fría) durante el día en la estación seca. La isla de calor medida a partir de la temperatura del aire fue más baja por la noche y casi cero durante el día. Además, encontraron correlaciones entre la isla de calor superficial diurna y la diferencia en la fracción de vegetación en las áreas urbanas y circundantes, en la noche la isla de calor superficial se correlacionó con la estabilidad atmosférica y débilmente con las diferencias en la cubierta vegetal y la insolación diurna. Algunos estudios recientes habían abordado los cambios de temperatura urbana en ZMVM (Vargas & Magaña, 2020; Méndez-Astudillo et al., 2022), Toluca (Rivera et al., 2017) y Querétaro (Méndez-Astudillo et al., 2022), utilizando los datos de superficie y satelitales disponibles, sin embargo, la evidencia está lejos de explicar la situación actual.

Actualmente, los posibles efectos del cambio climático han recibido una atención considerable de las diferentes entidades de la Megalópolis, como se demostró en las presentaciones y discusiones en el Taller virtual de abril de 2022 (ver Apéndice). La Ciudad de México estima un aumento en su temperatura promedio de entre 3 y 5°C antes de 2050. En el caso de Puebla, las proyecciones para este siglo estiman un incremento de más de 3°C para toda la entidad. Mientras que se espera una disminución de alrededor del 9% en las precipitaciones a mediano plazo (2045-2069) (Manrique-Guevara, 2022).

Aunque es posible un aumento de la temperatura en la región central del país debido al cambio climático, poco se sabe sobre los efectos que tendrá en la meteorología de las escalas sinóptica, regional y local (SEDEMA, 2021b). Algunos de los procesos de formación de compuestos secundarios (por ejemplo, la formación de O<sub>3</sub>) son sensibles al clima, por lo tanto, se espera que los impactos del cambio climático también involucren la forma en que los contaminantes se transforman, dispersan y depositan (Fiore et al., 2015; Jacobs & Winner, 2009; Fu & Tian, 2019). Los cambios en la temperatura, los patrones de lluvia y las sequías pueden aumentar la concentración de PM<sub>2.5</sub> debido al aumento en la frecuencia e intensidad de los incendios, la emisión de compuestos del suelo, el aumento de las emisiones de compuestos orgánicos de origen biogénico y por la expansión del suelo erosionado.

Los aumentos en las concentraciones de algunos contaminantes (es decir, O<sub>3</sub>) inducidos exclusivamente por el cambio climático se conocen como penalización del cambio climático. Esta penalización tiene implicaciones importantes para la gestión de la calidad y su cuantificación implica procesos meteorológicos, químicos y biológicos complejos y retroalimentaciones que aún no se comprenden bien (Fiore et al., 2015). La penalización climática ocurrirá incluso en ausencia de cambios en las emisiones antropogénicas. Hasta la fecha, la penalización climática para las ciudades de la Megalópolis no se conoce con precisión, sin embargo, se supone que, con el aumento de la temperatura, los niveles de contaminación del aire podrían aumentar. En el caso de la Ciudad de México, el ProAire 2021-2030 de la ZMVM evaluó que la penalización climática podría estar entre 2 y 12 ppb para O<sub>3</sub>, esto con base en estimaciones realizadas por diferentes autores para otras regiones (por ejemplo, Wu et al., 2008; González-Abraham et al., 2015; Kelly et al., 2012). El documento destacó que la penalización climática podría superar cualquier beneficio que pudiera obtenerse de las acciones del programa para disminuir la concentración de O<sub>3</sub>. La estimación de la penalización climática para PM<sub>2.5</sub> es difícil de obtener a partir de la evidencia disponible, por lo tanto, se desconoce su impacto. Por otro lado, existen otros compuestos nocivos que también son susceptibles al cambio climático como el Hg, los compuestos orgánicos persistentes y algunos alérgenos.

#### ***4.4.2. Influencia de la capa límite planetaria en la calidad del aire***

El problema de la contaminación se ha estudiado generalmente a partir de observaciones superficiales, tanto de la calidad del aire como de la meteorología, sin embargo, los procesos que ocurren en regiones superiores de la atmósfera (por ejemplo, en la capa límite planetaria) y en escalas espaciales mayores tienen efectos que han comenzado a estudiarse a partir de las nuevas mediciones en la ZMVM.



La capa límite planetaria (CLP, también conocida como capa límite atmosférica) es la capa inferior de la tropósfera que está en contacto con la superficie de la tierra. La altura y estructura termodinámica de la capa límite planetaria tienen una influencia importante en la calidad del aire, ya que modulan el transporte vertical y horizontal de los contaminantes atmosféricos. La altura de la CLP es variable en el tiempo y el espacio, desde decenas de metros en situaciones estáticamente estables, hasta varios kilómetros en condiciones convectivas. La CLP tiene un marcado ciclo diurno sobre la tierra. Durante el día, la CLP consiste en una capa de mezcla (o capa límite convectiva), que se agita por el calentamiento solar de la superficie y la convección de aire cálido y húmedo, mezclando así el aire dentro de la capa. Durante la noche, la turbulencia decae, el aire que se mezcló durante el día permanece en una capa residual por encima de la capa límite estable nocturna de menor altura. Las nubes cúmulos y estratocúmulos pueden formarse dentro de la parte superior de una CLP húmeda, mientras que la niebla puede formarse en la parte inferior de una capa límite estable.

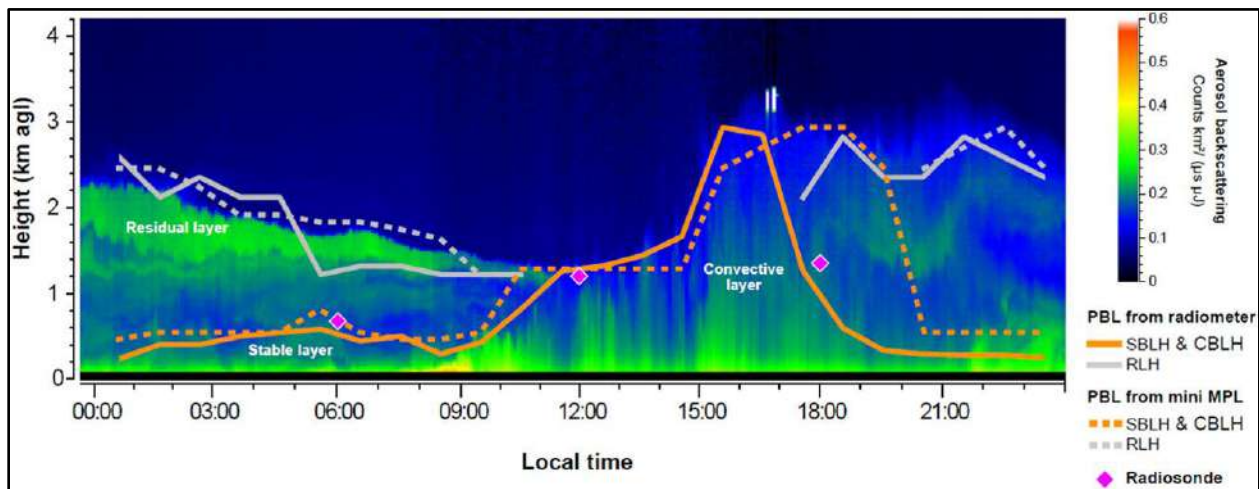
En la Ciudad de México, la compleja topografía, la variabilidad de la insolación diurna, el clima regional y el calor urbano determinan la evolución, estructura y altura de la CLP. Burgos-Cuevas et al. (2021) analizaron 28 años (1990-2017) de datos diarios de radiosondeos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para evaluar la estabilidad vertical de la CLP y las características de estratificación relacionadas con la calidad del aire. Sus resultados identificaron la presencia recurrente de inversiones térmicas de octubre a abril, con mayor frecuencia en invierno, cuando también se observó una mayor estratificación. Los resultados mostraron que la concentración superficial de contaminantes (como las partículas y el CO) era mayor cuando había múltiples capas térmicamente estables, en comparación con los días en que solo había una capa térmicamente estable. Este estudio ilustra la complejidad de la CLP sobre la Ciudad de México y la influencia de su estratificación en la calidad del aire.

Dado que el SMN lanza los radiosondeos de una a tres veces al día, no proporciona la suficiente resolución temporal para dilucidar el ciclo diurno y los procesos en la CLP. Recientemente, se han empleado métodos de percepción remota para estudiar la estructura vertical de la atmósfera de la Ciudad de México. García-Franco et al. (2018) analizaron los datos de la retrodispersión de pulsos de luz emitidos por un sistema LIDAR (acrónimo para *light detection and ranging*) a partir de mediciones realizadas durante un período continuo entre 2011 y 2016 en la parte sur de la Ciudad de México. Encontraron una variación estacional en la altura máxima de la capa de mezcla y su tasa de crecimiento. La evolución diurna promedio de la altura de la capa de mezcla mostró un valor promedio máximo de 2750 m sobre el nivel del suelo (msns) alrededor de las 16:00 y un valor promedio mínimo de 850 msns alrededor de las 07:00, con un mínimo por debajo de 500 msns durante los meses de invierno. Las alturas máximas de la capa ocurrieron durante los meses más cálidos (marzo y abril), con valores superiores a 3000 msns, mientras que las alturas más bajas se observaron en los meses más fríos (septiembre a diciembre), con valores inferiores a 2700 msns. También observaron una tendencia creciente en los valores mínimos que atribuyeron al calentamiento urbano, así como una clara anticorrelación entre los episodios de alta contaminación y la altura de la capa de mezcla.

Osibanjo et al. (2022) realizaron una intercomparación entre un radiómetro de microondas, un LIDAR de micropulso y los radiosondeos del SMN durante un período de tres meses y encontraron un buen acuerdo general en la detección de las alturas de las capas límite convectiva y residual,

pero un acuerdo menor para la altura de la capa estable debido a la dificultad asociada con los instrumentos para realizar mediciones por debajo de 120 msns (ver Figura 4.10). Los valores de la altura de la capa convectiva fueron ligeramente inferiores (~1755 y 2332 msns) que los reportados por García-Franco et al. (2018). Observaron que las mayores alturas en las capas convectiva y residual ocurrieron en días con cielos despejados y temperaturas superficiales más altas, mientras que las menores alturas ocurrieron en días predominantemente nublados. Burgos-Cuevas et al. (2022) compararon las alturas de la CLP obtenidas de un ceilómetro y un LIDAR Doppler y encontraron que la altura máxima de la CLP estimada con la retrodispersión del ceilómetro era mayor que la altura estimada al umbralizar los datos CLP Doppler. Dedujeron que los mecanismos de mezcla en la CLP no están restringidos a la convección diurna y también están influenciados por otros factores, como los vientos impulsados térmicamente.

Los estudios anteriores ilustran la importancia de utilizar diferentes recuperaciones de métodos de percepción remota para comprender y parametrizar mejor de la CLP en la situación orográfica compleja como la Ciudad de México.



**Figura 4.10.** Ejemplo de la evolución de la capa límite planetaria observada por diferentes instrumentos: radiómetro (líneas continuas), LIDAR (líneas punteadas) y radiosondas (diamantes fucsias). La imagen de fondo corresponde a la distribución vertical del aerosol obtenida de la retrodispersión de la luz emitida por el LIDAR. (Fuente: Osibanjo et al., 2022).

Empleando los datos continuos de un radiómetro de microondas y las observaciones de calidad del aire, Osibanjo et al. (2021) analizaron los efectos de la evolución de la capa límite sobre la contaminación del aire, durante el episodio de contaminación severa por  $O_3$  de marzo de 2016 (12-15 de marzo) en la Ciudad de México. Los primeros días previos al episodio de *smog* (8-11 de marzo) se vieron afectados por el paso de una profunda vaguada troposférica superior (Barret et al., 2019), acompañada de una fuerte advección que mantuvo una ventilación significativa sobre la cuenca durante varios días. Poco antes del episodio de *smog* (10 de marzo), la altura máxima de la capa convectiva se mantenía en alrededor de ~2.5 km sobre el nivel del suelo; pero luego disminuyó a ~1.2-1.7 km para los días con contaminación más severa. Durante los primeros días, la fuerte advección permitió que los precursores de  $O_3$  fueran rápidamente desalojados de la cuenca; después del 11 de marzo, los vientos se debilitaron rápidamente y una fuerte inversión de

temperatura cerca de la superficie durante la noche permitió la rápida acumulación de contaminantes. Durante la jornada del 12 de marzo, la altura de la capa convectiva apenas alcanzó 1.2 km, muy por debajo de la altura de las montañas que rodean la ciudad, confinando la contaminación dentro de la cuenca. En los días siguientes, la altura de la capa convectiva diurna aumentó gradualmente, sin embargo, la condición de estancamiento se mantuvo los días siguientes, causando altos niveles de O<sub>3</sub> durante el día. La intensa actividad fotoquímica, en presencia de altos niveles de precursores, causó que la concentración de O<sub>3</sub> alcanzara ~200 ppb el 14 de marzo. El episodio terminó después del 17 de marzo, cuando la capa límite recuperó su comportamiento habitual, permitiendo una mayor dilución, y la advección horizontal contribuyó a la eliminación gradual de contaminantes. Este estudio muestra que la evolución diurna de la CLP es crucial para los estudios de calidad del aire, ya que afecta el intercambio y la distribución de contaminantes cerca de la superficie.

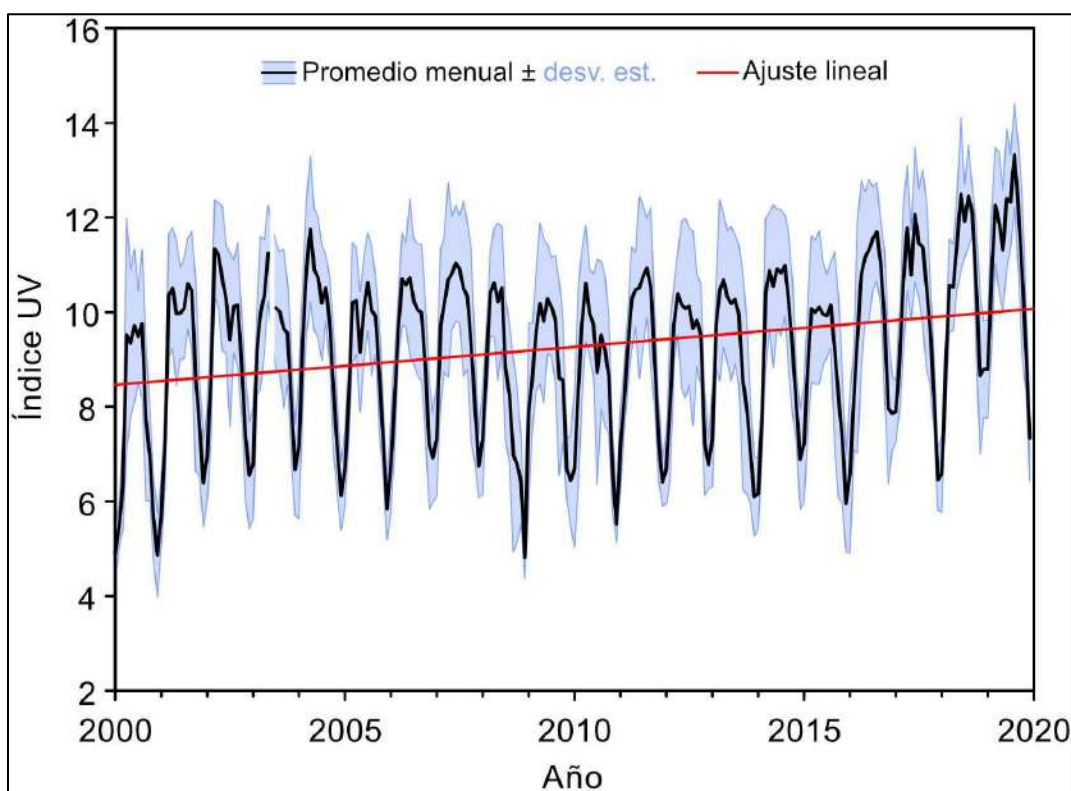
Como se mencionó anteriormente, las condiciones meteorológicas locales juegan un papel esencial en la ocurrencia de episodios de mala calidad del aire, ya que la meteorología afecta la formación, el transporte y la dispersión de los contaminantes. La Red de Meteorología y Radiación Solar, que forma parte del SIMAT, mantiene una vigilancia permanente de la meteorología a nivel ambiente y en la vertical, y permite investigar la influencia de la meteorología en la contaminación del aire (ver la Sección 2.1.4 en el Capítulo 2). El trabajo realizado por de Foy et al. (2005, 2006a, 2006b, 2008) durante el MCMA-2003 y MILAGRO 2006, y algunos estudios recientes (por ejemplo, Salcido et al., 2019; Silva-Quiroz et al., 2019), destacó la importancia de la meteorología escala sinóptica en la contaminación del aire en el MCMA, aunque estos estudios analizaron solo unos pocos eventos.

Recientemente, Díaz-Esteban et al. (2022) examinaron los patrones climáticos que producen características de circulación que resultan en una mala calidad del aire en la cuenca de México durante la estación seca (noviembre-mayo), utilizando un análisis de conglomerados de los vientos a 500 hPa para un período de 30 años (1990-2019). Observaron niveles de contaminación por encima de lo normal que ocurrían bajo la influencia de sistemas de alta presión en la tropósfera media centrados alrededor de los 20°N, que se movían hacia el este sobre México. Los eventos de alta contaminación asociados con este patrón generalmente ocurrieron durante la estación seca: marzo a mayo para O<sub>3</sub> y diciembre a febrero para NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>. A escala interanual, identificaron una asociación entre El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la frecuencia de patrones climáticos relacionados con la contaminación, donde los años de La Niña favorecieron la ocurrencia de patrones asociados con más contaminación, mientras que los años de El Niño con menos contaminación. La estacionalidad y previsibilidad de los patrones atmosféricos relacionados con la contaminación en la cuenca de México serán útiles para las evaluaciones de la calidad del aire tanto a escala estacional como intra-estacional.

#### ***4.4.3. Contaminación del aire y la radiación ultravioleta superficial***

Los impactos de los cambios a mediano y largo plazo en la radiación solar incidente sobre la Cuenca de México se han estudiado relativamente poco. Los contaminantes presentes en la atmósfera interactúan con la radiación solar, absorbiéndola o dispersándola, reduciendo la intensidad que llega a la superficie. Debido a que la mayoría de los contaminantes se concentran dentro de la CLP, la atenuación de la radiación debido a la contaminación del aire fue más fuerte cerca de la superficie. En un trabajo reciente, Ipiña et al. (2021) analizaron 20 años de mediciones

del Índice Ultravioleta (UV) y de calidad del aire realizadas por el SIMAT en la ZMVM. Identificaron una tendencia creciente en la intensidad de la radiación solar UV que incidió sobre la superficie, con una pendiente de 0.9% por año (ver Figura 4.11). La estimación en la reducción en la radiación fue ~40% para el año 2000 y ~20% en 2019. Los aerosoles tuvieron la mayor contribución individual a la disminución de la radiación, sin embargo, los gases contribuyeron con más de la mitad del total. La reducción en la concentración de los contaminantes atmosféricos aumentó la intensidad de la radiación que alcanzó la superficie. Con la disminución de los niveles de contaminación lograda por las políticas efectivas de gestión en las últimas dos décadas, se favoreció un aumento en la radiación solar UV con impactos colaterales en la calidad del aire al aumentar las tasas de fotólisis en la atmósfera, intensificando la producción de contaminantes secundarios (es decir,  $O_3$  y aerosoles secundarios) y aumentando los riesgos para la salud humana (por ejemplo, cataratas, cáncer de piel) debido a una mayor exposición a la radiación UV.



**Figura 4.11.** Series temporales de los promedios mensuales del Índice UV (línea negra), su desviación estándar (sombreado azul) y ajuste lineal (línea roja) en el periodo 2000-2019, para la Ciudad de México. (Fuente: Adaptado de Ipiña et al., 2021).

Los posibles efectos de la radiación sobre la formación de  $O_3$  es un aspecto relevante que debe tomar en cuenta la gestión de la calidad del aire. El ProAire 2021-2030 se centra en la reducción de aerosoles, pero esto podría inducir un aumento en la radiación solar incidente y en la actividad fotoquímica con posibles incrementos en las concentraciones de  $O_3$ , comprometiendo cualquier meta de reducción para este contaminante gaseoso.

#### 4.5. Forzadores climáticos de vida corta

La reducción de unas pocas especies conocidas como forzadores climáticos de vida corta (FCVC)<sup>2</sup> puede disminuir la tasa de cambio climático de escalas regionales a hemisféricas a corto plazo, además de beneficios significativos para la eficiencia energética, la salud humana, la producción de cultivos y los ecosistemas (UNEP-WMO, 2011). Los principales FCVC con vidas inferiores a unas pocas décadas son carbono negro (CN, ~ días a semanas), metano (CH<sub>4</sub>, ~ una década), O<sub>3</sub> troposférico (semanas a meses) y algunos hidrofluorocarbonos (HFC, promedio de 15 años). Debido a su naturaleza, estas sustancias pueden controlarse y reducirse rápidamente con la tecnología existente (UNEP-WMO, 2011; UNEP, 2011a, 2011b; UNEP-CCAC, 2018), proporcionando beneficios climáticos y mejora de la calidad del aire en el corto plazo. Es importante enfatizar que, a pesar de estos beneficios a corto plazo, reducir el calentamiento a largo plazo también requerirá medidas para reducir las emisiones actuales y futuras de CO<sub>2</sub>.

El carbono negro es un componente importante del hollín y se produce a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles, biocombustibles y biomasa. El CH<sub>4</sub> antropogénico se emite a la atmósfera a partir del ganado rumiante, el cultivo de arroz, el procesamiento de desechos microbianos (vertederos, estiércol y aguas residuales), la minería del carbón y los sistemas de petróleo y gas natural; tiene aproximadamente 34 veces el potencial de calentamiento global (GWP, siglas en inglés para *Global Warming Potential*) del CO<sub>2</sub> (horizonte de 100 años). Debido a su tiempo de vida menor, es aún más efectivo en un horizonte temporal de 20 años. Como se discutió anteriormente, el O<sub>3</sub> troposférico no se emite directamente, es un contaminante secundario que se forma por procesos fotoquímicos atmosféricos y debe controlarse reduciendo sus especies precursoras, principalmente NO<sub>x</sub>, CO, y COV, así como CH<sub>4</sub>. El O<sub>3</sub> es perjudicial para la salud humana y la agricultura, también es un poderoso gas de efecto invernadero.

Muchos países han incluido o están en proceso de incluir la reducción de CN en sus contribuciones nacionales determinadas en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, <https://unfccc.int/>). México fue el primer país en comprometerse a reducir el CN como parte de su compromiso con la Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP21) celebrada en París en diciembre de 2015. Durante la COP 26 en Glasgow, Escocia, en noviembre de 2021, México se unió a más de 100 países para comprometerse a reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> en un 30% para 2030 (UNEP, 2021).

Existe un alto grado de incertidumbre en las estimaciones de las emisiones globales de CH<sub>4</sub>, en gran parte debido a la disponibilidad y calidad de los datos. Las estimaciones más recientes del *International Energy Agency* (IEA, 2013) sugieren que las estimaciones globales de CH<sub>4</sub> rondan los 580 millones de toneladas (Mt)<sup>3</sup>, de las cuales 355 Mt (alrededor del 60% del total) se generan a partir de fuentes antropogénicas. La agricultura (fermentación entérica, manejo del estiércol, cultivo de arroz y otros), el sector energético (petróleo, gas natural, carbón, biocombustible) y otras

---

<sup>2</sup> Los forzadores climáticos de vida corta (SLCF, por sus siglas en inglés) también se conocen como contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés).

<sup>3</sup> La conversión de emisiones de CH<sub>4</sub> equivalente a una cantidad equivalente de CO<sub>2</sub> dependerá del GWP (siglas en inglés para potencial de calentamiento global) del CH<sub>4</sub> usado en los cálculos. Por ejemplo, INECC usa valores de GWP de 28, entonces 580 Mt CH<sub>4</sub> = 16,240 Mt CO<sub>2</sub>e (INECC, 2021).

fuentes aportan 39.9%, 37.5%, 19.8%, y 2.7% de las emisiones del CH<sub>4</sub> antropogénico, respectivamente. Como se muestra en el reporte del IEA (2023), hay una amplia diferencia entre los datos basados en campañas de monitoreo y los obtenidos de estudios científicos y de las emisiones reportadas por las agencias públicas. De hecho, la emisión global total de CH<sub>4</sub> reportada a la CMNUCC fue 30% menor que las emisiones estimadas por el IEA en 2022; la mayor discrepancia se observó en el sector energético. La mayoría de los países y regiones aún no cuentan con datos basados en mediciones y los datos reportados son de baja calidad, lo que destaca los retos para evaluar y mitigar las emisiones de CH<sub>4</sub>.

Como se mencionó en el Capítulo 3, el INECC es el responsable de elaborar el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) (INECC, 2021). La versión más reciente del INEGYCEI incluye estimaciones de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y CN para el período 1990 a 2019 (INECC, 2021). La mayoría de los inventarios oficiales de gases de efecto invernadero (GEI) reportados por SEMARNAT e INECC, hasta el momento, han sido elaborados utilizando la aproximación del IPCC en su Tier1 (IPCC, 2006), que es el más sencillo, incluyendo la Sexta Comunicación Nacional (SEMARNAT-INECC, 2018).

Al igual que en el caso de otros países, existe discrepancia entre las emisiones de CH<sub>4</sub> reportadas por México a la UNFCCC y las estimaciones de la IEA. La emisión total de CH<sub>4</sub> reportada para 2019 es de 6,270 Gg<sup>4</sup> (INECC, 2021) mientras que la IEA estimó una emisión de 6,051 Gg (IEA, 2023). Sin embargo, aun cuando la diferencia en la emisión total es pequeña, existe una gran diferencia en las contribuciones originadas a partir de los diferentes sectores, por ejemplo, para el sector energético el INECC reportó valores de emisión de CH<sub>4</sub> inferiores en 50% a los reportados por la IEA, y, por otro lado, aproximadamente 35% más altos para el sector agricultura. De igual forma, Shen et al. (2021) también reportó que los inventarios oficiales de CH<sub>4</sub> para el sector petróleo/gas están subestimados a partir de observaciones realizadas por estos autores empleando imágenes de satélites.

México ha estado realizando varios esfuerzos para evaluar las emisiones de FCVC y fomentar medidas de mitigación. Estos esfuerzos iniciaron en 2010, con el estudio titulado "Temas emergentes en cambio climático: metano y CN, posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación" (INE-MCE2-UNAM, 2011). Este estudio fue seguido por una serie de talleres técnicos y reuniones ministeriales, que dieron lugar a la planificación nacional de primer orden del FCVC para México bajo la iniciativa SNAP (siglás en inglés para Apoyo a la Planificación Nacional para la Acción sobre contaminantes climáticos de vida corta) de primer orden para México bajo la iniciativa SNAP (MCE2-INECC, 2013) de la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC). Este proceso condujo al desarrollo de una iniciativa de investigación del MCE2 para caracterizar mejor las fuentes de emisión de FCVC en el país, incluidas múltiples plantas de tratamiento de aguas residuales, vertederos, granjas ganaderas de investigación, hornos de ladrillos, estufas residenciales, flotas de vehículos diésel pesados en carretera y fuera de carretera. Esta iniciativa resultó en la publicación de más de veinte artículos revisados por pares académicos. A continuación, se describen los resultados de algunas de las mediciones realizadas específicamente en la ZMVM y la región de la Megalópolis.

---

<sup>4</sup> Gg = Gigagramo; 1 Gg=1000 toneladas = 1 Kt

#### ***4.5.1. Emisiones de carbono negro de vehículos diésel en carretera y fuera de carretera***

Se realizaron mediciones de las emisiones de CN, carbono orgánico y otros componentes inorgánicos de PM<sub>2.5</sub>, así como de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, etano, acetileno, benceno, tolueno y C2-bencenos, en condiciones reales de conducción de 20 vehículos con motor diésel con años modelo 1998 a 2011 y tecnologías de nivel de emisión EPA98, EPA03, EPA04, EURO3-5, en la Ciudad de México, con la técnica de persecución utilizando el Laboratorio Móvil Aerodyne (LMA) (Zavala et al., 2017a). Los resultados mostraron factores de emisión de PM mayores para los autobuses urbanos con tecnologías más antiguas que para otros tipos de vehículos, y una marcada dependencia de la tecnología de control de emisiones, lo que demuestra los beneficios de regulaciones Tier más estrictas y pruebas independientes, para verificar la eficacia de los estándares de emisiones reducidas para vehículos diésel. Una comparación de los resultados con el modelo US-EPA MOVES-2014b mostró que el modelo subestimó el CO, carbono orgánico y las especies seleccionadas de COV, mientras que tuvo una mejor concordancia para NO<sub>x</sub> y CN. Las relaciones carbono orgánico/CN observadas fueron mayores en comparación con las proporciones medidas en California utilizando una técnica similar, lo que demostró aún más la necesidad de utilizar una base de datos de factores de emisión local para los países en desarrollo, para minimizar la incertidumbre en las estimaciones de emisiones y mejorar la evaluación de la efectividad de las medidas de reducción de emisiones.

Los factores de emisión para gases (CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) y partículas (CN y total) para una variedad de vehículos diésel fuera de carretera en México, se obtuvieron utilizando la técnica de Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS) con alta resolución temporal. Los vehículos muestreados incluyeron retroexcavadoras, excavadoras, cargadoras de ruedas grandes, excavadoras, grúas, tractores, compresores de aire y generadores eléctricos utilizados en las actividades de construcción y agricultura. Para un número seleccionado de estos vehículos, se caracterizaron las emisiones empleando filtros para partículas tipo *wall-flow* (DPFs) y *partial-flow* (p-DPFs). Hasta donde se sabía, este fue el primer estudio de las características de emisiones para vehículos fuera de carretera en México y los resultados contribuyeron a la comprensión de las emisiones de estos vehículos en condiciones de operación del mundo real. Las pruebas realizadas con los sistemas de filtración indicaron que las reducciones de los factores de emisión CN fueron significativamente grandes (>99%) cuando se instalaron DPF y los vehículos estaban al ralentí, y las reducciones fueron moderadas (en el rango de 20-60%) cuando se instalaron p-DPF, y los vehículos estaban en condiciones de funcionamiento. Dadas las reducciones de emisiones potencialmente grandes, existe una gran necesidad de estudiar más a fondo los beneficios de emisiones de la tecnología de control para la adaptación de vehículos diésel fuera de carretera en México (Zavala et al., 2017b).

#### ***4.5.2. Emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales***

En México, el manejo de aguas residuales industriales y municipales emite aproximadamente el 13% del CH<sub>4</sub> antropogénico, cantidad a la que hay que sumar las emisiones indirectas de CO<sub>2</sub> que corresponden al consumo de energía eléctrica necesaria para su operación. Por lo tanto, la contribución al inventario nacional de los GEI de esta actividad es significativa. Por otro lado, existe muy poca información sobre mediciones directas para el cálculo de emisiones de GEI en drenajes y plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en México (Noyola, 2022).



Las directrices del IPCC se utilizan generalmente para estimar las emisiones de CH<sub>4</sub> de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (IPCC, 2006). Sin embargo, no consideran las emisiones debidas al CH<sub>4</sub> disuelto en las aguas residuales entrantes, ni las emisiones que se producen durante la eliminación biológica de nutrientes. Ambas son operaciones comunes en instalaciones de tratamiento bien administradas.

En tal contexto, Paredes et al. (2015) investigaron los factores de emisión de CH<sub>4</sub> en cinco tanques de estabilización, cubriendo la capacidad representativa de la planta, la distribución geográfica y la variabilidad de las condiciones ambientales de cada región en México. Con base en el análisis de los resultados de las mediciones, se sugirió un valor de 0.43 kg CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> DBO eliminado (0.32-0.58) como un valor representativo para el sistema de tanques de estabilización municipal bien operado en México. La DBO (demanda bioquímica de oxígeno) representa la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica en el agua.

No hay PTAR libre de emisiones de CH<sub>4</sub> ya que el drenaje es una fuente exógena de este gas. Además, la eliminación de nutrientes (nitrógeno) también producirá N<sub>2</sub>O en la etapa anaeróbica (o anóxica). Para tener en cuenta estas emisiones, Noyola et al. (2018) propusieron un factor de corrección de metano (FCM) de 0.06 para una PTAR aeróbica centralizada bien operada, para regiones intertropicales. Adicionalmente, sugirieron calcular las emisiones de CH<sub>4</sub> para el arreglo integrado PTAR aeróbico + digestor anaeróbico, como un proceso integrado, con un FCM de 0.32. Las modificaciones estuvieron respaldadas por la evaluación *in situ* de las emisiones fugitivas de CH<sub>4</sub> en dos instalaciones en México (Cerro de la Estrella en la Ciudad de México y Dulces Nombres en Monterrey) y en datos relevantes de la literatura.

Con base en las contribuciones de Paredes et al. (2015) y Noyola et al. (2018), fue posible aplicar el Tier 2 en PTAR aeróbicas en México (responsables del 55 al 70% del flujo tratado en México) y sistemas lagunares (10% del flujo tratado). Así, el Tier 2 se aplicaría a las emisiones de entre el 65 y el 80% de las aguas residuales tratadas.

Un nuevo estudio realizado en varias PTAR de México indicó que las emisiones de CH<sub>4</sub> de dos fuentes dentro del proceso de tratamiento (la sedimentación primaria y el tanque de aireación) fueron de igual importancia (Noyola, 2022). Una medida efectiva de mitigación fue evitar la generación de CH<sub>4</sub> en las unidades de sedimentación a través de una frecuencia adecuada de purga de lodos. Los resultados mostraron que, en casi todas las plantas visitadas, la concentración de CH<sub>4</sub> disuelto se triplicó en promedio en la sedimentación primaria en relación con el contenido del afluente. Las emisiones indirectas (asociadas al consumo eléctrico) superaron los valores de las emisiones directas por un amplio margen, por lo que la reducción de las emisiones indirectas sería una prioridad para una estrategia de reducción de emisiones en las PTAR. Las emisiones indirectas, debidas al consumo eléctrico, representaron más del 60% de las emisiones totales en los escenarios considerados, con partes prácticamente iguales (alrededor del 20% cada una) de emisiones en las PTAR y de los lodos vertidos al sistema de alcantarillado.

Cabe señalar que el IPCC actualizó las Directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019). Sin embargo, la metodología actualizada en 2019 para el Tier 1



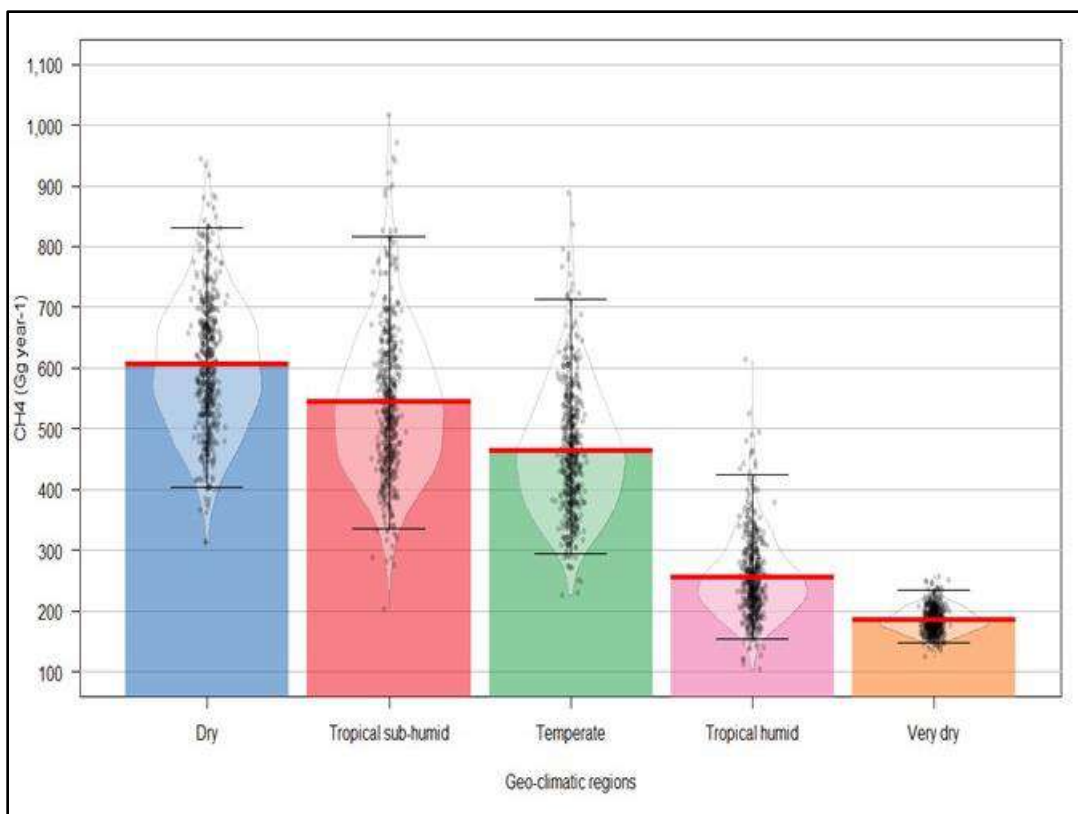
recomienda un valor de 0.03 para el FCM sin distinguir las plantas bien operadas de las mal explotadas.

#### **4.5.3. Emisiones de metano de la fermentación entérica del ganado**

A nivel mundial, se estimó que las fuentes agrícolas contribuyen con alrededor del 40% de las emisiones antropogénicas totales de CH<sub>4</sub>. La fermentación entérica, el manejo del estiércol, el cultivo de arroz y otros representan el 64%, 7%, 17% y 12%, respectivamente, de estas emisiones (GMI, s.f.). En el caso de México, la agricultura es la mayor fuente de emisiones de CH<sub>4</sub>, el ganado emitió más del 80% de las emisiones de CH<sub>4</sub> del sector agrícola considerando la fermentación entérica y el manejo del estiércol (Castelán-Ortega, 2022; INECC 2021).

Castelán-Ortega et al. (2019) reportaron el inventario de Tier 2 de emisiones de CH<sub>4</sub> de  $2.039 \pm 205$  Gg año<sup>-1</sup> de fermentación entérica bovina (Figura 4.12). Este fue el primer inventario de Tier 2 desarrollado en México utilizando factores de emisión determinados localmente para los diferentes sistemas geoclimáticos del país, utilizando la técnica de cámara de respiración de circuito abierto. Se utilizaron datos de actividad obtenidos a través de una encuesta nacional y una extensa revisión y colección de bibliografía publicada en artículos científicos (principalmente) y otras fuentes como actas de congresos, libros y tesis. Esta información incluyó datos sobre los sistemas de alimentación, ya que el consumo de alimento es el principal factor que determina las emisiones de CH<sub>4</sub> en el ganado, los tipos y razas de ganado, los niveles de producción, la orientación de la producción (leche, carne, doble propósito), las edades y el peso de los animales, entre otros. Es importante destacar que Castelán-Ortega et al. (2019) contaron con factores de emisión *in vivo* para CH<sub>4</sub> entérico para todas las regiones geoclimáticas de México, por lo que fue posible estimar las emisiones entéricas de CH<sub>4</sub> por estado, categoría, edad, peso y función productiva de todos los 32 estados de la República Mexicana.

Los resultados de este inventario nacional mostraron que la mayor parte de las emisiones de CH<sub>4</sub> se registraron en la región de clima seco (Castelán et al. 2018), seguida de la región de clima tropical seco, es decir, en los estados del norte de la república para el primer caso, y en los estados ubicados a lo largo de las llanuras costeras del océano Pacífico y del océano Atlántico, para el segundo caso. En cuanto a la región de la Megalópolis, se estimó que los estados que forman parte de esta zona emitieron ~131 Gg de CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>, que fue aproximadamente el 6% del inventario nacional de emisiones de CH<sub>4</sub> entérico (Castelán-Ortega & Ku-Vera 2019).



**Figura 4.12.** Inventario Tier 2 de emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica por región geoclimática de México. (Fuente: Castelán-Ortega & Ku-Vera, 2019)

Castelán-Ortega y su equipo también investigaron diferentes estrategias de mitigación para CH<sub>4</sub> entérico mediante el uso de distintas tácticas de alimentación y aditivos en la dieta del ganado. Estos autores han identificado al menos tres aditivos naturales basados en plantas taníferas (*Cosmos bipinnatus*, *Cymbopogon citratus*, leguminosa tropical *Samanea saman*) que han demostrado reducir la producción de CH<sub>4</sub> entérico en los bovinos (Hernández-Pineda et al., 2018; Vázquez-Carrillo et al., 2020; Valencia-Salazar et al., 2018; Vázquez-Carrillo et al. 2023).

#### 4.6. Modelación y pronóstico de la calidad del aire en la Megalópolis

La modelación de la calidad del aire es una simulación numérica de la transformación y dispersión de los contaminantes del aire en la atmósfera, y de cómo modifican la calidad del aire. Los modelos son útiles para cuantificar la relación entre emisiones, deposiciones (húmedas y secas), meteorología y concentraciones, así como para analizar escenarios pasados y futuros, y evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación de emisiones. Esto hace de la modelación de la calidad del aire una herramienta de investigación esencial para el diseño y evaluación de políticas públicas basadas en estrategias de control de emisiones, y es una herramienta básica en la gestión de la calidad del aire. En modo de pronóstico, los modelos de calidad del aire también son necesarios con fines de previsión y, por lo tanto, para alertar al público con anticipación sobre posibles episodios de contaminación del aire, así como implementar acciones de control antes de que ocurran (véase, por ejemplo, Baklanov y Zhang, 2020).

El uso de modelos es necesario para el diseño y evaluación de estrategias de gestión de la calidad del aire; sin embargo, es importante reconocer que los resultados del modelo pueden contener errores substanciales debido a datos de entrada, meteorológicos y de calidad del aire, incorrectos o inadecuados, así como por la incertidumbre inherente a la naturaleza estocástica del movimiento atmosférico turbulento que es responsable del transporte y la transformación de los contaminantes (Fox, 1982). Los modeladores deben cuantificar las incertidumbres, por ejemplo, validando los resultados del modelo con datos de observaciones. Además, es importante comunicar las incertidumbres a los responsables de la toma de decisiones y hacer hincapié en el desafío de tomar decisiones con una incertidumbre cuantificada.

En México, los principales esfuerzos de modelación de la calidad del aire se han realizado en la ZMVM. El uso de modelos meteorológicos en combinación con modelos de transporte se remonta a la década de 1990 durante el proyecto MARI (*The Mexico City Air Quality Research Initiative*) (LANL & IMP, 1994). Durante la campaña IMADA-AVER (*Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico-Aerosol and Visibility Research*), Fast & Zhong (1998) utilizaron datos meteorológicos de superficie y de altitud para evaluar la dinámica atmosférica durante diversos eventos de contaminación por O<sub>3</sub>. Young et al. (1997) modelaron la producción fotoquímica de O<sub>3</sub> utilizando un modelo de caja multinivel. Sin embargo, no fue hasta las campañas de campo basadas en la observación y simulaciones numéricas a partir de modelos, realizadas como parte de los proyectos MCMA-2003 y MILAGRO 2006 (Molina et al., 2007, 2010), que se obtuvieron grandes volúmenes de información para mejorar la comprensión de los procesos químicos, de dispersión y transporte de contaminantes emitidos a la atmósfera en la MCMA (por ejemplo, de Foy et al., 2005, 2008; Zhang et al., 2009; Song et al., 2010; Dzepina et al., 2011).

Desde el año 2000, la SEDEMA utiliza el modelo MCCM (siglas para *Multiscale Climate Chemistry Model*) para el diseño y evaluación de medidas de manejo. En 2017, con la colaboración del *Barcelona Supercomputing Center* (BSC), el gobierno de la Ciudad de México desarrolló un sistema de pronóstico de calidad del aire (AQFS-CDMX) para alertar al público de eventos de alta contaminación con 24 horas de anticipación. El sistema de pronóstico consiste en el modelo meteorológico WRF-ARW (*Weather Research and Forecasting - Advanced Research*), el modelo de transporte químico CMAQ (*Community Multi-scale Air Quality*) y HERMES-Mex (*High-Elective Resolution Modeling Emission System for Mexico*) para la desagregación de emisiones (SEDEMA, 2017; Guevara et al., 2017). El modelo de pronóstico utilizó información científica atmosférica obtenida de las campañas de campo MCMA-2003 y MILAGRO-2006 y mejoras recientes en los inventarios de emisiones realizadas por la SEDEMA. El rendimiento del modelo es relativamente bueno para O<sub>3</sub>; sin embargo, la incertidumbre del modelo aumenta a medida que la concentración de O<sub>3</sub> supera los 100 ppb, principalmente durante los eventos de alta contaminación que generalmente desencadenan contingencias atmosféricas en la ZMVM. El desempeño para el pronóstico de PM<sub>2.5</sub> no es tan bueno, tiene dificultades para reproducir la variabilidad diurna y tiende a subestimar las concentraciones.

Recientemente, el AQFS-CDMX se utilizó intensamente durante la elaboración de ProAire ZMVM 2021-2030 en la evaluación de acciones para diferentes escenarios de manejo (SEDEMA et al. 2021). La SEDEMA mantiene un esfuerzo continuo para garantizar el funcionamiento del

sistema y mejorar el desempeño del pronóstico. Es importante incrementar la resolución de los inventarios de emisiones de la región, actualizar el conocimiento de la química atmosférica en la ZMVM e incluir todas las fuentes de emisión.

Fuera de la Ciudad de México, no hay desarrollos operativos de actividades de modelación similares en el resto de las entidades de la Megalópolis. Las principales barreras son la disponibilidad de datos de monitoreo de calidad aceptable, el desarrollo de un inventario de emisiones robusto y un inventario de emisiones listo para modelación en la Megalópolis, personal técnico calificado y la necesidad de incrementar la infraestructura de cómputo y de almacenamiento de datos.

Existen esfuerzos de pronóstico realizados por instituciones académicas; por ejemplo, el ICAyCC-UNAM tiene un modelo de pronóstico a 72 horas basado en WRF-CHEM para CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> para el centro de México, que cubre las ciudades de Toluca, Cuernavaca, Tlaxcala, Puebla y la Ciudad de México (Rodríguez Zas & García Reynoso, 2021). Los resultados gráficos están disponibles para su consulta en línea (<http://grupo-ia.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/wrf-chem>, consultado el 31 de marzo de 2023). El sistema de pronóstico tiene un rendimiento aceptable. Los datos modelados para O<sub>3</sub> tienen un buen acuerdo con las observaciones, pero es más pobre para las partículas PM<sub>2.5</sub>. Durante los eventos de contingencia, las concentraciones son generalmente subestimadas por el modelo. Las áreas de mejora incluyen la inclusión de las emisiones de incendios en tiempo real, identificar y reducir la incertidumbre en el inventario nacional de emisiones (INEM), actualizar los parámetros de cobertura del suelo para el uso de modelos urbanos para mejorar la meteorología, aumentar el dominio de modelación para considerar fuentes regionales que influyen en la calidad del aire.

Los inventarios de emisiones proporcionan datos de entrada esenciales para los modelos atmosféricos de transporte químico. Por lo tanto, las incertidumbres de las fuentes de emisión son un factor importante para determinar la precisión simulada y prevista de los datos obtenidos de los modelos, ya que estas incertidumbres pueden tener impactos en el diseño de las estrategias de control. Los métodos para establecer un inventario de emisiones incluyen un enfoque ascendente (*bottom-up*) basado en la identificación de actividades humanas, estadísticas de consumo de energía y diversos factores de emisión, pero también pueden utilizar un enfoque descendente (*top-down*) con modelos inversos que utilizan datos de monitoreo de teledetección satelital y observaciones terrestres. El primer enfoque suele tener incertidumbres significativas en los datos estadísticos, los factores de emisión y los coeficientes de distribución espaciotemporal, por lo que el último enfoque puede complementar al primero reduciendo estas incertidumbres.

Durante muchos años, la falta de un inventario de emisiones listo para modelación fue una barrera importante en los esfuerzos de modelación, no solo en la Ciudad de México, también en el resto del país. La construcción de inventarios con una estructura y contenido que cumplieran con los requisitos para su uso en modelos de calidad del aire, es decir, entradas discretizadas a nivel de celdas de red, emisiones por hora y basadas en especies químicas, fue un desafío para los desarrolladores y los usuarios de los modelos. Para resolver esta situación, en el caso de la Ciudad de México, se realizó una revisión exhaustiva del inventario de emisiones, introduciendo un conjunto de mejoras y un sistema de procesamiento de emisiones para producir un inventario listo para modelación con una desagregación espacial y temporal adecuadas (Guevara et al., 2017).

Recientemente, INECC utilizó el inventario nacional de emisiones de 2014 (de fuentes de área, estacionarias y móviles) para preparar un inventario de emisiones listo para la modelación de contaminantes de criterios nacionales para su uso en WRF-Chem. El dominio de emisiones incluyó la República Mexicana y la zona central considerando las áreas metropolitanas de la Ciudad de México, Puebla, Tlaxcala, Pachuca, Tula, Toluca y Cuernavaca (INECC, 2017).

A nivel de Megalópolis, es necesario aumentar la resolución espacial, química y temporal del inventario de emisiones e incluir fuentes emergentes de contaminación. También es necesario acelerar la actualización continua del inventario de emisiones para modelación para que la información pueda ser útil en la toma de decisiones. Actualmente, sólo la Ciudad de México cuenta con un inventario de emisiones con resolución adecuada y mantiene un esfuerzo continuo para identificar y cuantificar nuevas fuentes de emisión, considerando el uso de observaciones en la estimación de perfiles de emisión y su variabilidad temporal.

Los modelos podrían beneficiarse de la disponibilidad de mejor información meteorológica y sobre la calidad del aire fuera de las zonas urbanas, así como de la disponibilidad de datos meteorológicos en niveles superiores de la atmósfera. Los productos satelitales abren un área de oportunidad para aumentar la cobertura espacial de los modelos y mejorar la información sobre las condiciones de contorno. En cuanto a la disponibilidad de datos meteorológicos de altura, el ICAYCC-UNAM y la SEDEMA mantienen su monitoreo continuo mediante el uso de perfiladores; sin embargo, estos datos no están disponibles públicamente. Por otro lado, el diseño de redes de monitoreo de la calidad del aire no siempre considera las necesidades de modelación en su configuración, por lo tanto, se recomienda que en las revisiones futuras de los programas de monitoreo se tome en consideración.

Con excepción de la ZMVM, los esfuerzos de modelación y pronóstico de la calidad del aire se encuentran en una etapa incipiente de desarrollo en otras regiones de la Megalópolis. Los desafíos más importantes a los que se enfrentan incluyen la falta de personal técnico en los sectores académico y gubernamental para el desarrollo y aplicación de las herramientas de modelación en el diseño y evaluación de estrategias de control de calidad del aire, la disponibilidad de datos de emisiones y parámetros meteorológicos de alta calidad y resolución, y falta de infraestructura informática para los estudios de modelación. Sin embargo, es posible superar algunos de estos desafíos aprovechando las oportunidades disponibles en la comunidad global de modelación.

Los resultados de los modelos globales de calidad del aire con datos abiertos se han convertido en una alternativa para el pronóstico de la calidad del aire en algunos entornos urbanos (Duncan et al., 2021). El proyecto CityAQ, desarrollado entre el WRI (siglas en inglés para Instituto de Recursos Mundiales) y la Oficina de Modelado y Asimilación Global de la NASA (NASA-GMAO, por sus siglas en inglés), utiliza los resultados del modelo global GEOS-Chem para desarrollar un pronóstico local de la calidad del aire, preajustando los datos del modelo con observaciones locales de calidad del aire empleando un algoritmo de aprendizaje automático (Keller et al., 2021). CityAQ tiene como objetivo crear modelos escalables para combinar la información de monitoreo de la calidad del aire disponible localmente con los resultados de modelos globales, productos satelitales y otros análisis abiertos, con el propósito de desarrollar herramientas personalizadas para ciudades interesadas (<https://www.wri.org/initiatives/cityaq>). Este desarrollo tiene el potencial de dotar de pronósticos locales o regionales a aquellas agencias

o entidades con recursos limitados. Sin embargo, tiene algunas limitaciones, por ejemplo, requiere datos de alta calidad para el entrenamiento del algoritmo, necesita una evaluación continua del pronóstico para identificar desviaciones del modelo, tiene dificultades para identificar eventos climáticos o de contaminación de microescala, ciudades pequeñas o medianas caben dentro de una celda del modelo, por lo tanto, la variabilidad espacial dependerá de la variabilidad que el algoritmo de ajuste logre capturar durante el entrenamiento. Actualmente, las salidas ajustadas del modelo GEOS-Chem para PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> están disponibles para Monterrey, Guadalajara y varias ciudades de Guanajuato. Las ciudades de la Megalópolis podrían explorar el uso de esta herramienta de modelado y pronóstico.

Una lista de recomendaciones para avanzar en los esfuerzos de modelado en la Megalópolis se proporciona en la Sección 4.8.

## **4.7. Impacto del COVID-19 en la calidad del aire de la Megalópolis**

### ***4.7.1. Pandemia de COVID-19 en México***

El descubrimiento a finales de 2019 y la rápida propagación del SARS-CoV-2, responsable de la enfermedad por coronavirus COVID-19, causó cambios dramáticos en las actividades de la población en todo el mundo (WHO 2020a, 2020b). La mayoría de los países promulgaron medidas estrictas para contener la propagación de la enfermedad a fin de proteger la salud pública, incluidos confinamientos, cuarentenas y restricciones de viaje reduciendo la actividad económica mundial. Se descubrió que la contaminación del aire aumenta sustancialmente el riesgo de infección y la gravedad de los síntomas de COVID-19. Un estudio realizado en EE. UU. informó un aumento en las tasas de mortalidad por COVID-19 en áreas con niveles promedio más altos de PM<sub>2.5</sub> en el largo plazo (Wu et al., 2020). En la Ciudad de México, López-Feldman et al. (2020) encontraron evidencia de que la exposición prolongada a PM<sub>2.5</sub> aumenta la probabilidad de morir por COVID-19. Estos estudios enfatizan la importancia de hacer cumplir las regulaciones existentes sobre contaminación del aire durante y después de la crisis de COVID-19.

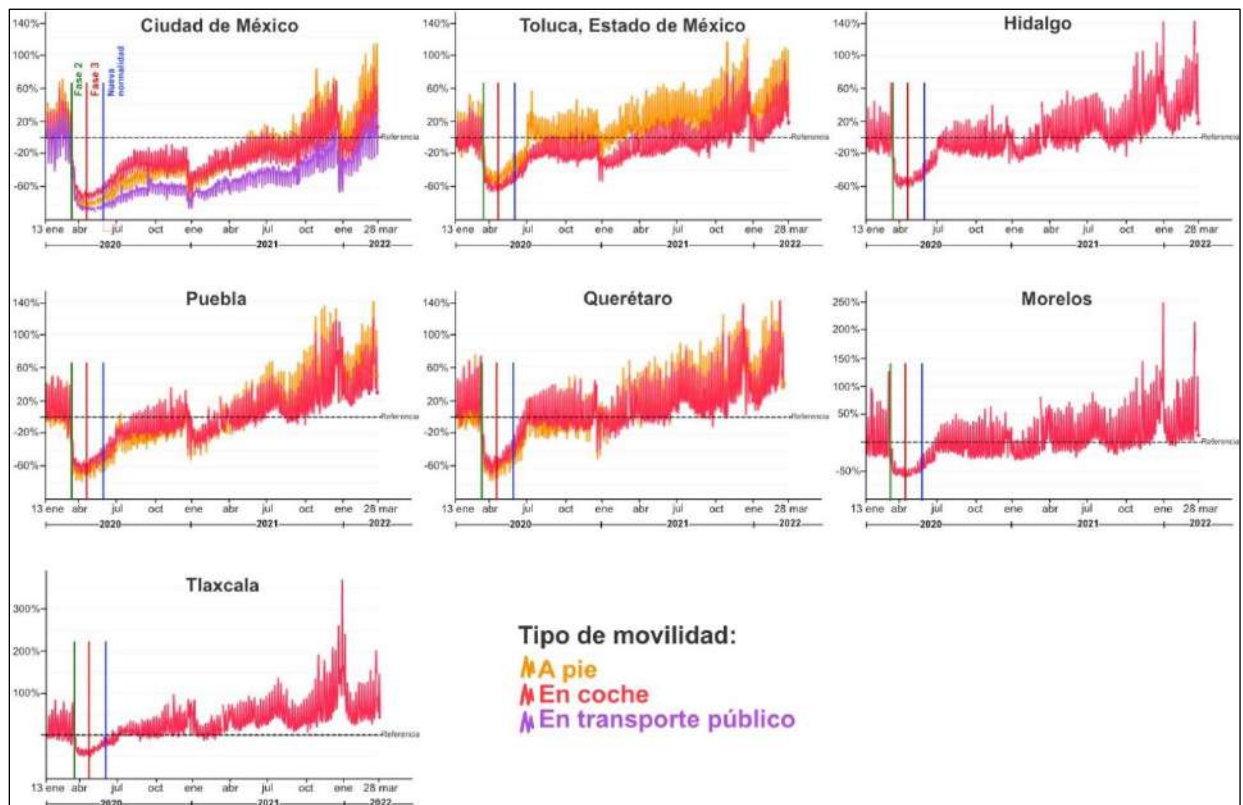
En México, los primeros casos se diagnosticaron durante la última semana de febrero de 2020. Como medida de precaución, las escuelas de educación básica suspendieron actividades a partir del 17 de marzo de 2020; esta acción se generalizó el 24 de marzo de 2020, cuando se suspendieron todas las actividades académicas como parte de las acciones de la Fase 2 para prevenir la propagación del virus. El 30 de marzo de 2020 se introdujeron medidas de confinamiento parcial para algunas actividades no esenciales, la suspensión de servicios ofrecidos por la administración pública y la cancelación de reuniones públicas de más de 25 personas. Ante el avance de la pandemia, las autoridades decidieron aplicar acciones de la Fase 3 a partir del 21 de abril de 2020, lo que implicó la prohibición total de cualquier actividad no esencial. En la ZMVM la suspensión se extendió a actividades industriales y comerciales no esenciales, la reducción del servicio de transporte público y la promoción del programa “Quédate en casa”.

Un experimento no planeado de las restricciones durante las Fases 2 y 3 fue la reducción de las emisiones de automóviles, industria y actividad comercial, en una escala sin precedentes en México, ofreciendo a los científicos atmosféricos y administradores de calidad del aire una oportunidad única para estudiar los efectos de reducciones extraordinarias en las actividades

antropogénicas en la calidad del aire. Teniendo en cuenta que la mayoría de las estrategias de reducción de la contaminación a largo plazo y las acciones de control durante los eventos de contaminación episódica, se centran en reducir las emisiones de los automóviles y la industria, este experimento no planificado fue de gran valor para estimar en condiciones reales el impacto máximo que podría alcanzarse con el esquema de gestión actual.

En la región de la Megalópolis, muchas actividades como las laborales y educativas, se realizaron a través de medios electrónicos, y otras utilizaron acuerdos de trabajo híbrido flexible (presencial y remoto a través de videoconferencias, correo electrónico y telecomunicaciones). La reducción de la motorización y otras actividades resultaron en la disminución de las concentraciones de algunos contaminantes según lo registrado en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, como se menciona más adelante.

Utilizando un indicador de la movilidad de las personas, fue posible mostrar la drástica reducción de la movilidad, pero también, como algunas entidades y ciudades de la Megalópolis volvieron al nivel anterior a la pandemia, mientras que otras permanecieron en niveles más bajos cuando se levantaron algunas de las restricciones de confinamiento. Esto se ilustra en la Figura 4.13 que muestra las tendencias en las solicitudes de modos de transporte en 2020 y 2021 publicadas por Apple (CAME, 2022), en comparación con los niveles de movilidad anteriores a la pandemia.



**Figura 4.13.** Reportes de las tendencias en la movilidad durante COVID-19 (Fuente: “COVID-19 – Informes de tendencia de movilidad – Apple” consultado el 16 de marzo de 2022, CAME, 2022.)

Los comportamientos de varias entidades y ciudades como Hidalgo, Morelos, Querétaro, Puebla, Tlaxcala y Toluca fueron parecidos a la situación prepandémica y sólo la Ciudad de México y su área metropolitana se mantuvieron con menor actividad. El retorno a las condiciones anteriores de circulación de los vehículos de motor implicó también el regreso a los niveles de emisión que existían antes de la pandemia, y por tanto a los niveles de calidad del aire anteriores, modulados por otros factores como las condiciones climáticas y meteorológicas, y la ocurrencia de incendios forestales.

#### ***4.7.2. Calidad del aire en la Ciudad de México y otras regiones durante el confinamiento por COVID-19***

##### *4.7.2.1. Zona Metropolitana de la Ciudad de México*

Durante la pandemia, el SIMAT mantuvo el monitoreo continuo en la mayoría de sus estaciones. Cabe destacar que el periodo de confinamiento en la Ciudad de México coincidió con la temporada en que se registran las mayores concentraciones de contaminantes secundarios ( $O_3$  y  $PM_{2.5}$ ), que va del 15 de febrero al 15 de junio, esto debido a la topografía única y las condiciones meteorológicas en la cuenca de México que favorecen la formación de compuestos secundarios, como se describe en el Capítulo 2. Además, la ciudad se encontraba bajo la influencia del transporte de contaminantes generados por los incendios forestales en los estados vecinos.

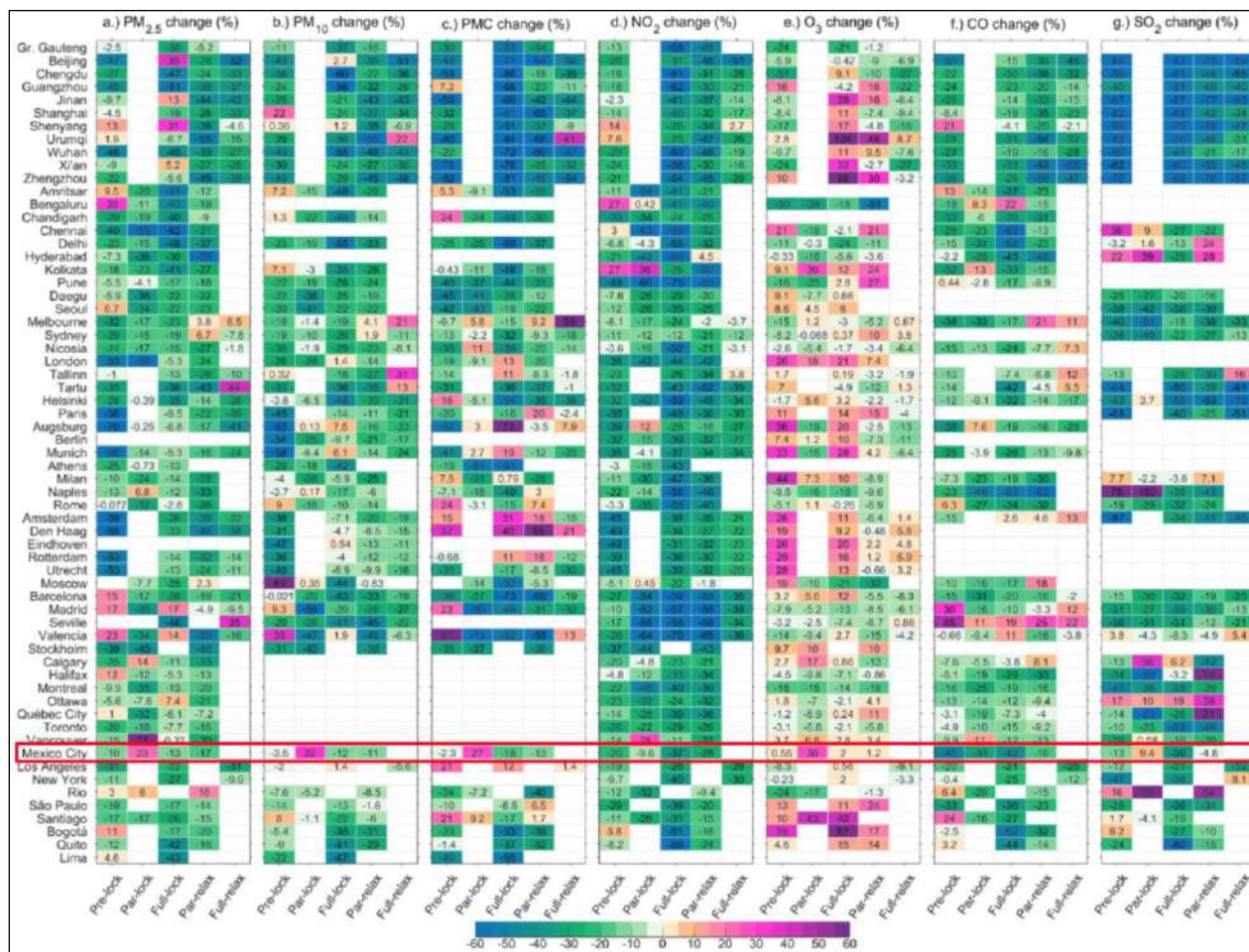
El SIMAT participó en un estudio coordinado por el programa *Global Atmospheric Watch* (GAW) de la OMM para comprender el comportamiento de las principales especies de contaminantes atmosféricos durante el período de pandemia de COVID-19, cuando se observaron emisiones excepcionalmente bajas en todo el mundo (Sokhi et al., 2021). En este estudio, se analizó la información sobre la calidad del aire y meteorología de 63 ciudades en 25 países de 7 regiones geográficas diferentes del mundo, incluida la Ciudad de México. La Figura 4.14 muestra los cambios porcentuales observados en las especies contaminantes clave para los períodos de confinamiento en 2020, en comparación con sus períodos correspondientes en 2015-2019 para las ciudades participantes en este estudio.

Como se observa en la Figura 4.14, en el caso de la Ciudad de México, la comparación de las concentraciones promedio de 2020 con las de 2015-2019, para el periodo del 1 de abril al 14 de junio, mostró reducciones de 13, 12, 18, 37, 42 y 39 % en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , partículas gruesas (PMC, partículas con diámetros entre 10 y  $2.5 \mu m$ ),  $NO_2$ , CO y  $SO_2$ , respectivamente, mientras que el  $O_3$  presentó un aumento del 2% (Sokhi et al., 2021).

La disminución del CO y del  $NO_2$  se atribuyó principalmente a la reducción del tráfico vehicular, estimada en alrededor del 66%, mientras que el aumento del  $O_3$  sugirió un régimen de producción de  $O_3$  limitado por COV. El  $O_3$  mantuvo superaciones de los valores de las directrices de la OMS y de las normas mexicanas durante la pandemia.

La evaluación adicional de los datos de medición durante la pandemia confirmó que la aplicación de las restricciones condujo a reducciones en los niveles de CO,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el aire ambiente, mientras que las concentraciones de  $O_3$  aumentaron (Hernández-Paniagua et al., 2021; Kutralam-Muniasamy et al., 2021; Peralta et al., 2021; Vega et al., 2021).





**Figura 4.14.** Cambios porcentuales observados para (a) PM<sub>2.5</sub>, (b) PM<sub>10</sub>, (c) PMC, (d) NO<sub>2</sub>, (e) O<sub>3</sub>, (f) CO y (g) SO<sub>2</sub> durante los períodos de confinamiento en 2020, en comparación con los períodos correspondientes para el periodo 2015-2019. (Fuente: Sokhi et al., 2021).

#### 4.7.2.2. Estado de Hidalgo

Se estimaron reducciones en las concentraciones de NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> durante el periodo de contingencia COVID-19 con datos de la Red de Monitoreo Atmosférico Automático del Estado de Hidalgo (INECC, 2021). Las concentraciones del 1 de marzo al 30 de junio de 2020 se compararon con los mismos periodos de los años anteriores. Además, también se evaluaron las columnas NO<sub>2</sub> y HCHO (como proxy de COVs) obtenidas del sensor TROPOMI (en la plataforma satelital Sentinel-5P). En Tula, de la comparación con el año anterior 2019, las disminuciones para O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y formaldehído (HCHO) fueron 19.5, 23.8, 3.8, 15.4, 13.8, 22.4 y 17%, respectivamente. Las reducciones en O<sub>3</sub> se atribuyeron a disminuciones en NO<sub>2</sub> y HCHO durante 2020, sin embargo, la disminución no fue proporcional.

#### 4.7.2.3. Área Metropolitana de Toluca

Se observaron reducciones en los niveles de todos los contaminantes criterio para Toluca durante el período de marzo a mayo de 2020. Los niveles de HCHO se analizaron utilizando productos satelitales que mostraron una reducción en HCHO, en comparación con el mismo período en 2019. Las reducciones en O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y HCHO fueron 14.8, 24.3, 23.8, 36.6, 29.7, 32 y 16 %, respectivamente (INECC, 2020).

Los resultados obtenidos en las evaluaciones descritas pueden ser de utilidad para determinar la reducción máxima de concentración que se podría alcanzar cuando las principales fuentes de emisión reducen significativamente su actividad y diseñar estrategias de mitigación de emisiones de contaminantes atmosféricos en el PROAIRE para el Estado de Hidalgo y la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

#### 4.7.3. Cambios en la generación de emisiones en la ZMVM durante la pandemia de COVID-19

Existe una brecha significativa de conocimiento sobre el impacto real en las emisiones durante la pandemia, así como la urgencia para obtener y analizar estos datos. En la Ciudad de México, como en toda la Megalópolis, esta información será relevante para la gestión de la calidad del aire. Al momento de elaborar este informe, los únicos datos disponibles se relacionaban con la evaluación de datos de terceros sobre la reducción del tráfico vehicular, la reducción del consumo de combustible y la disminución del producto interno bruto.

La siguiente información sobre los cambios en las emisiones para la ZMVM durante la pandemia de COVID-19 fue proporcionada por P. Camacho-Rodríguez (2022):

- Entre abril y mayo de 2020, el tráfico de la Ciudad de México disminuyó drásticamente. Según los datos del *Índice de Congestión TomTom*, se logró una reducción en la congestión del 80%. En comparación con 2019, la reducción promedio fue del 66%, esto tuvo impactos en las emisiones de los vehículos, tanto por las unidades que dejaron de circular, como por las unidades restantes que circularon a mayor velocidad. En 2020 hubo reducciones promedio de 19% y 16% en los consumos de gasolina y diésel, respectivamente, en comparación con 2019 (PEMEX, s. f.). Específicamente, en abril-junio de 2020, se tuvieron reducciones del 40 y 30% en el consumo de gasolina y diésel, respectivamente, en comparación con las restricciones durante la Fase 3 de la pandemia de COVID-19.
- En el sector industrial, el Producto Interno Bruto (PIB) en la ZMVM disminuyó un 11% durante 2020 (<https://www.inegi.org.mx/programas/pibent/2013/#Tabulados>). Algunos sectores como el textil disminuyeron entre un 33% y un 50%, en comparación con 2019. Por otro lado, durante la pandemia hubo un aumento en el consumo de plásticos (La Jornada, 2020), principalmente por su uso en mascarillas y tela sintética no tejida para trajes del personal médico. La producción de residuos de tipo biológico-infeccioso aumentó hasta en un 300%. En 2019, la producción de recubrimientos (por ejemplo, solventes, pinturas, repintado automotriz) aumentó en un 12%, mientras que en 2020 la producción total disminuyó en casi un 4%.

- A nivel doméstico, se observó un aumento en el uso de detergentes, limpiadores de superficies, blanqueadores y desinfectantes, aerosoles y ambientadores, y desodorantes (UNAM, 2021). Esto podría haber tenido un impacto no cuantificado en el aumento de las emisiones de COV a la atmósfera. Por otro lado, el consumo de GLP en los hogares se redujo en ~5-7%.
- Para las emisiones biogénicas, la estimación del modelo MEGAN (siglas en inglés para Modelo de Emisiones de Gases y Aerosoles de la Naturaleza) para la ZMVM sugirió un incremento en las emisiones de COV de 22% durante marzo-abril de 2020 en comparación con el mismo período en 2019. En comparación con 2018, el incremento fue del 29%.

En cuanto al inventario de emisiones, se espera que las estimaciones para 2020 proporcionen información relevante durante la pandemia; sin embargo, las estimaciones no podrán considerarse en las tendencias de emisiones debido a su naturaleza atípica.

#### ***4.7.4. Impacto del COVID-19 en la química atmosférica de la Megalópolis***

Considerando que la meteorología y las variaciones a largo plazo pudieron ser un factor adicional que influyó en los posibles cambios asociados a las restricciones durante la pandemia, Hernández-Paniagua et al. (2021) estimaron el cambio porcentual en las concentraciones durante la pandemia teniendo en cuenta los efectos meteorológicos y la variabilidad asociada a las tendencias a largo plazo durante el confinamiento en las Fases 2 y 3. Realizaron el análisis de las anomalías estimadas a partir de la diferencia entre los datos predichos utilizando series truncadas de Fourier y los datos observados en algunas estaciones representativas. A diferencia de las reducciones descritas anteriormente, durante la Fase 2 del confinamiento observaron disminuciones significativas ( $p < 0.05$ ) solo en NO<sub>2</sub> de entre 10 y 23%, mientras que el O<sub>3</sub> incrementó entre 16 y 40%. Durante la Fase 3, observaron disminuciones significativas en NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> con valores de 43, 20 y 32%, respectivamente. En esta fase, las concentraciones de O<sub>3</sub> continuaron aumentando, no obstante, observaron una mayor heterogeneidad espacial y solo en dos sitios los aumentos fueron significativos.

Según Hernández-Paniagua et al. (2021), en el caso del CO, no se observaron cambios importantes durante ambas fases, y para el SO<sub>2</sub> se observó una disminución significativa en un sitio representativo del tráfico vehicular sólo durante la Fase 3. La evaluación de las observaciones satelitales confirmó la disminución del NO<sub>2</sub> y la ausencia de cambios en el CO. La disminución del NO<sub>2</sub> se relacionó con las reducciones en el tráfico vehicular, mientras que el posible aumento en las emisiones domésticas compensó la disminución de las emisiones de CO atribuidas a los vehículos. Por otro lado, propusieron que las reducciones en las emisiones de NO<sub>x</sub> de los vehículos de motor fueron responsables del aumento del O<sub>3</sub> durante la Fase 2 por una menor titulación de O<sub>3</sub>. Sugirieron pocos cambios en las concentraciones de COV por la ausencia o incluso incremento en algunas fuentes de emisión (por ejemplo, las emisiones domésticas) durante la Fase 2. Durante la Fase 3, la mayor disminución en las ventas de gasolina y diésel tuvieron algún impacto en la emisión de COV, provocando estabilización en los niveles de O<sub>3</sub> debido a las reducciones combinadas en las emisiones de NO<sub>x</sub> y COV, resultando en una reducción menor que durante la Fase 2. También identificaron una variabilidad espacial en el comportamiento del O<sub>3</sub> en la Ciudad de México, con los mayores incrementos en el centro y sur de la ciudad. Estos resultados fueron consistentes con la heterogeneidad en la producción de O<sub>3</sub> descrita por Zavala et al. (2020).

El aumento en los niveles de O<sub>3</sub> observado durante las restricciones plantea preguntas que deberán abordarse desde la química atmosférica. Debido a las características de reacción en cadena no lineal de las reacciones fotoquímicas, la concentración de O<sub>3</sub> generalmente se comporta en la dirección opuesta a los cambios en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Los óxidos de nitrógeno tienen el efecto de consumir radicales libres, cuando su concentración en el aire ambiente disminuye, los radicales libres en la atmósfera se ven obligados a reaccionar con otras especies y, bajo reacciones fotoquímicas, aumentan la producción de O<sub>3</sub> (Wang & Li, 2021). Para explicar la situación observada en la Ciudad de México, Peralta et al. (2021) sugirieron un cambio en la relación VOC/NO<sub>x</sub> de un régimen sensible a COV a un régimen transitorio o sensible al NO<sub>x</sub> durante la pandemia. Según los autores, este cambio podría ser causado por la drástica reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> y un posible aumento en las emisiones de COV que compensaron la disminución de las emisiones de los vehículos, posiblemente provenientes de otras fuentes como, por ejemplo, las fuentes domésticas, las emisiones evaporativas (antropogénicas y biogénicas) y el aumento en el uso de productos de limpieza durante la pandemia.

No cabe duda sobre la mejora general de la calidad del aire en la Ciudad de México durante la pandemia, así como de su impacto positivo en la salud humana (Hernández-Paniagua et al., 2021; Kephart et al., 2021; Montiel-López et al., 2022) y en otros aspectos de la vida urbana (Estévez-Soto, 2021; Huerta, 2022; Vera-Valdés y Rodríguez Caballero, 2022). La experiencia durante las restricciones confirmó el rol de las emisiones de los vehículos, principalmente privados, e industriales en el deterioro de la calidad del aire; pero también planteó preguntas sobre la efectividad real de las estrategias de mitigación y el esquema de gestión actual, así como la necesidad urgente de un análisis detallado sobre lo que sucedió durante la pandemia para extraer lecciones que contribuyan a la identificación de nuevas políticas que complementen o reorienten las propuestas en el ProAire 2021-2030.

#### **4.8. Lecciones aprendidas, brechas de conocimiento y necesidades de investigación**

A continuación, se resumen algunas de las principales lecciones aprendidas, brechas de conocimiento y necesidades de investigación con respecto al estado actual del conocimiento científico sobre las fuentes y procesos de formación y destrucción de contaminantes atmosféricos en la ZMVM y las otras regiones de la Megalópolis, descritas previamente.

##### **4.8.1. Fuentes y procesamiento de los contaminantes atmosféricos**

###### **Lecciones aprendidas**

- Los estudios MCMA-2003 y MILAGRO sugirieron que, durante la primera década de este siglo, en el núcleo urbano la atmósfera de la ZMVM era altamente sensible a los COV, pero en la región periférica podía ser sensible a los COV o NO<sub>x</sub>, dependiendo de las condiciones meteorológicas (Jaimes-Palomera et al., 2016; Lei et al., 2007, 2008; Song et al., 2010). Estudios recientes indican que es probable que exista una diferencia espacial sustancial en la sensibilidad del O<sub>3</sub> a los COV, incluyendo diferencias importantes en diversas áreas de la Ciudad de México y su periferia (Zavala et al., 2020).

- Los niveles de contaminantes primarios (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) en la ZMVM son altamente sensibles a los cambios en las emisiones antropogénicas. Esto se demostró durante los problemas de suministro de combustible en 2019 (García-Franco, 2020) y en los efectos de la suspensión de actividades y restricciones de movilidad durante la pandemia de COVID-19 (Hernández-Paniagua et al., 2021; Peralta et al., 2021).
- La experiencia obtenida de los cambios en las emisiones resultantes de las medidas drásticas emprendidas por los gobiernos durante la pandemia de COVID-19, muestra que la formación de contaminantes secundarios como el O<sub>3</sub> no fue controlada por los cambios en los contaminantes primarios en las proporciones en que se redujeron. Además, eso resalta la importancia de comprender los efectos de la meteorología y las contribuciones episódicas al evaluar la calidad del aire durante grandes reducciones de emisiones (Sokhi et al., 2021). Durante la pandemia se modificaron los patrones de actividad y distribución de la flota vehicular, así como la actividad doméstica y de servicios, esto pudo tener impactos en la concentración y variedad de los precursores y, en consecuencia, en la reactividad química de la atmósfera.
- Deben investigarse las relaciones no lineales entre los contaminantes precursores y la formación de compuestos secundarios (incluidos sus efectos sobre las concentraciones máximas) en diversas condiciones meteorológicas, junto con el cambio climático y los factores socioeconómicos que podrían afectar a la calidad del aire en la Megalópolis en el futuro.
- Deben investigarse los efectos en las relaciones de los precursores y las variaciones en la composición química de los perfiles de emisión de los COV (tanto los de la combustión de combustibles fósiles, como de los procesos de evaporación) en la formación de contaminantes secundarios, en diversas condiciones meteorológicas en la Megalópolis.
- La producción de aerosoles secundarios responde a cambios en la composición de sus precursores y en la meteorología, por lo que se debe investigar la sensibilidad a diferentes compuestos gaseosos que los forman en diferentes contextos meteorológicos.

### **Brechas de conocimiento**

- ¿Qué procesos meteorológicos controlan la distribución temporal y espacial de los contaminantes gaseosos y particulados en la atmósfera inferior?
- ¿Cuáles son los factores emergentes (por ejemplo, regulaciones para nuevas emisiones, cambios tecnológicos, comportamiento social) que intervienen en la formación de contaminantes en la Megalópolis y cómo se pueden controlar?
- ¿Ha cambiado la producción de O<sub>3</sub> en la ZMVM? ¿En qué sectores de la ciudad la producción de O<sub>3</sub> es sensible a COV o NO<sub>x</sub>? ¿Hay transiciones estacionales, semanales y diurnas entre los regímenes químicos?
- ¿Cuáles son los perfiles actuales y la distribución espacial de mezclas de COV, de los compuestos orgánicos semivolátiles y los compuestos orgánicos persistentes, en la

Megalópolis? ¿Cuáles son las contribuciones de estos compuestos a la formación de O<sub>3</sub> y aerosoles orgánicos secundarios (SOA, por sus siglas en inglés)?

- ¿Cuáles son los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas naturales y las áreas agrícolas de la Megalópolis?

### **Impactos del corredor industrial de Tula-Tepeji en la calidad del aire en la ZMVM y la región de la Megalópolis**

- ¿Por qué no ha mejorado la calidad del combustible en el corredor Tula-Tepeji?
- ¿Es posible establecer un sistema de vigilancia para las emisiones provenientes del complejo industrial? ¿Cuáles son las alternativas viables para reducir emisiones de las fuentes prioritarias?
- ¿Cuál es el contenido de compuestos tóxicos presentes en las plumas que transportan contaminantes del aire desde Tula?
- ¿Cómo contribuyen las emisiones a la carga de enfermedad asociada con la contaminación del aire en Tula y sus alrededores, así como en las trayectorias de las plumas?
- ¿Cómo afectan las emisiones del corredor industrial a otras ciudades de la región (por ejemplo, Toluca, Pachuca, Tulancingo, San Juan del Río)?
- ¿Hay algún impacto de la deposición ácida atmosférica en áreas agrícolas y suelo de conservación en las entidades de la Megalópolis?
- Además del corredor industrial Tula-Tepeji, ¿existen otras fuentes de contaminación antropogénica con impactos regionales?
- ¿Cómo afectan a los objetivos de gestión las contribuciones regionales de contaminantes antropogénicos en las entidades de la Megalópolis?

### **Investigación científica regional**

- La información disponible del monitoreo indica que algunas ciudades dentro de la Megalópolis tienen niveles de contaminación similares e incluso mayores que los observados en la ZMVM.
- Los programas de gestión de la calidad del aire requieren de un sólido respaldo científico actualizado para el desarrollo y la evaluación de estrategias de control para mejorar la calidad del aire regional.
- Los estudios científicos que permiten entender los procesos de transporte y transformación de los contaminantes son escasos fuera de la ZMVM. Es necesario incrementar el apoyo para avanzar en el estudio de los fenómenos meteorológicos asociados al transporte regional de contaminantes, la identificación de fuentes naturales y antropogénicas con impacto regional, los efectos sobre la salud y los ecosistemas, los impactos en las metas locales de gestión y el diseño de estrategias para mitigar las emisiones regionales.
- La información sobre los efectos de la contaminación en la salud humana fuera de la ZMVM es escasa. Es prioritario conocer la situación en las demás entidades de la Megalópolis.

- El monitoreo de la calidad del aire en la región es limitado. Es necesario incrementar la cobertura espacial del monitoreo con un enfoque en los contaminantes prioritarios en las diferentes regiones y mejorar la difusión de la información, con fines de protección de la salud, incluidas las zonas no urbanas y de interés para la protección de cultivos y recursos forestales, modelación o validación de datos satelitales.
- Es necesario promover esfuerzos institucionales, financieros y técnicos para lograr la paridad en las actividades de monitoreo, inventario de emisiones, modelación, investigación científica y gestión en la región bajo la coordinación de la CAME.

#### ***4.8.2. Meteorología local y calidad del aire***

##### **Lecciones aprendidas**

- Es necesario estudiar las características de la capa límite planetaria (o atmosférica) y sus efectos en la contaminación del aire. Los perfiladores meteorológicos (por ejemplo, viento, temperatura y humedad) y de aerosoles han demostrado ser una herramienta robusta para medir e investigar con una resolución temporal alta del comportamiento de diversas variables en la capa límite planetaria. El estudio de las propiedades de la capa límite requiere de múltiples técnicas, combinando la teledetección con observaciones de radiosondeos, donde cada una de ellas proporcionará información diferente sobre los procesos de mezcla, ventilación y dispersión.
- Quedan preguntas abiertas sobre los diferentes procesos en la capa límite que controlan la mezcla y las concentraciones superficiales de contaminantes, así como la interacción de las capas límite entre cuencas vecinas, por lo que se necesitan diferentes instrumentos síncronos en múltiples localidades para comprender mejor su variabilidad temporal y espacial.
- Los estudios presentados en la Sección 4.4.2 describen el conocimiento reciente sobre la capa de mezclado, su variabilidad diaria y estacional, y los usos potenciales del ceilómetro para comprender mejor la relación entre estas características y la calidad del aire. Sin embargo, aún quedan por investigar preguntas sobre cómo esta interacción influye en los eventos de contaminación extrema en el contexto de un clima cambiante.
- Los posibles efectos de la radiación sobre la formación de O<sub>3</sub> son un aspecto relevante para la gestión, se ha observado que con el incremento de la radiación solar aumenta también la producción de O<sub>3</sub>.
- El ProAire 2021-2030 considera una reducción de aerosoles, sin embargo, esto podría inducir un aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub> por el incremento en la radiación solar que alcanza la superficie. Por otra parte, el clima cambiante podría impactar en los procesos de formación de los contaminantes secundarios.

##### **Brechas de conocimiento y necesidades de investigación**

- ¿Cuál es la intensidad del calentamiento urbano en los diferentes conglomerados urbanos de la Megalópolis?

- ¿Cómo afecta el calentamiento urbano a la micrometeorología de las ciudades de la Megalópolis?
- ¿Qué impactos tiene el calentamiento urbano en el clima regional y la química atmosférica?
- ¿Deberían los planes de gestión considerar los efectos del calentamiento urbano en los objetivos de reducción de contaminantes? ¿Deberían incluir acciones para su mitigación?
- ¿Cuáles son los efectos esperados del cambio climático sobre la meteorología y la calidad del aire en regiones urbanas y no urbanas en las entidades que conforman la Megalópolis?
- ¿Cómo influyen los cambios meteorológicos de escalas global, regional y local en los episodios de alta contaminación urbana?
- La evidencia disponible indica con cierto grado de certeza que el incremento de la temperatura traerá cambios en la química de la atmósfera y en la producción de O<sub>3</sub>, sin embargo, existe una gran incertidumbre en la magnitud. El concepto de penalización climática se refiere al posible incremento en la concentración de O<sub>3</sub> en ambientes con altos niveles de sus precursores. En este sentido, ¿cómo afectará la penalización climática a los objetivos de reducción de los diferentes planes de gestión? ¿Deberían los planes de gestión incluir la penalización climática?

#### ***4.8.3. Forzadores climáticos de vida corta***

##### **Emisiones de carbono negro de vehículos diésel en carretera y fuera de carretera**

- Los resultados de los estudios de campo en la ZMVM resaltan la necesidad de utilizar bases de datos de factores de emisión obtenidos localmente para los países en desarrollo, con el propósito de reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones y mejorar la evaluación de la eficacia de las medidas de reducción.
- La estimación de las emisiones de los vehículos fuera de carretera empleados en la construcción y la agricultura es un desafío, ya que el conjunto de datos de factores de emisión disponibles es considerablemente menor en comparación con los disponibles para vehículos en carretera.
- Debido a su durabilidad, los vehículos fuera de carretera a menudo se mantienen en servicio durante varias décadas y, por lo tanto, sus contribuciones relativas a las emisiones aumentan con el tiempo, mientras que las emisiones de los vehículos en carretera continúan reduciéndose por las mejoras tecnológicas. Por lo tanto, los vehículos fuera de carretera son potencialmente grandes contribuyentes a las emisiones de CN en muchos centros urbanos, destacando la importancia de diseñar estrategias de control de emisiones y la gran necesidad de incrementar las bases de datos de factores de emisión para vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo.

##### **Emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales**

- El drenaje y las plantas de tratamiento son una fuente importante de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.
- Adoptar sistemas de tratamiento con bajo consumo de energía, ya que esto representa más del 60% de las emisiones totales de CH<sub>4</sub>.



- Mejorar el funcionamiento de la sedimentación primaria (purgas frecuentes).
- Se debe dar un tratamiento adecuado de los lodos, preferiblemente uno que considere la producción y el uso de biogás.
- Las metodologías de Tier 1 del IPCC (2006 y 2019) representan una herramienta inexacta, ya que subestiman las emisiones.
- Es importante determinar factores de emisión específicos para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. En base a esto, se podrán identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

#### **Emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica del ganado**

- Es necesario continuar con los estudios sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica del ganado bovino bajo diferentes sistemas de producción y de alimentación de México, incluyendo otras especies de rumiantes como ovinos y caprinos.
- Fortalecer los estudios para la determinación de los factores de emisión específicos de CH<sub>4</sub> para el manejo de estiércol para México.
- Es necesario diseñar estrategias de mitigación de emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica del ganado bovino aplicables a escala comercial.
- Fortalecer los estudios de factores de emisión específicos de N<sub>2</sub>O para México. En este tema, el progreso ha sido mínimo.
- Realizar análisis del ciclo de vida de los GEI originarios del sector agrícola.

#### **4.8.4. Modelación de la calidad del aire y pronóstico**

##### **Mejorar el desarrollo y la aplicación de modelos**

- Emplear modelación inversa para complementar la evaluación de los inventarios *bottom-up*, teniendo en cuenta su potencial para mejorar la resolución espacial y temporal del inventario, y para estimar la ubicación e intensidad de las fuentes de emisión conocidas y emergentes.
- Asignar recursos para reducir la incertidumbre en los inventarios, mejorar los perfiles y estimaciones basados en mediciones, y avanzar en el conocimiento sobre la participación de los COV en la producción de aerosoles y contaminantes gaseosos de origen fotoquímico.
- Obtener datos sobre las características de los aerosoles primarios para diferentes ambientes representativos de la Megalópolis. Obtener datos meteorológicos y de calidad del aire fuera de las zonas urbanas.
- Explorar las mejores parametrizaciones del modelo para las diferentes regiones de interés en la Megalópolis, producir u obtener los datos con las resoluciones adecuadas para la entrada y evaluación del modelo.
- Considerar las necesidades de modelación dentro de los proyectos de investigación y las políticas de gestión, aumentar la resolución espacial y temporal de las mediciones de

calidad del aire y meteorológicas. Incluir las necesidades de modelado en el diseño de sistemas de monitoreo.

- Fortalecer las capacidades de modelación de la región a través de la construcción de un ensamble de modelos que incluya los modelos actualmente disponibles (por ejemplo, SEDEMA, ICAyCC-UNAM, Querétaro.), así como posibles desarrollos futuros.
- Apoyar los esfuerzos de la Ciudad de México para asegurar la mejora continua de su sistema de pronóstico y garantizar su sostenibilidad.
- Avanzar hacia la asimilación de datos de productos satelitales y de otras redes de observación y perfiladores, que pueden utilizarse tanto para estudios de casos como pronósticos. Con una capacidad informática adecuada, es posible pasar de modelos de área limitada a modelos globales multiescala y así estudiar la contaminación atmosférica en el contexto del cambio climático.
- Coordinar esfuerzos interinstitucionales en la producción, gestión y tratamiento de datos para generar productos útiles para la gestión de la calidad del aire.
- Aplicar algoritmos de aprendizaje automático para mejorar las parametrizaciones físicas de los modelos, en la estimación de emisiones, en el análisis de imágenes satelitales y salidas de modelos para ajustar los resultados, y con ello obtener mejores predicciones.

#### **Fortalecer los recursos humanos:**

- Formar investigadores en el área de asimilación de datos, uso de información satelital, evaluación de modelos, evaluación de la aplicación del aprendizaje automático en los procesos realizados por los modelos, así como en la evaluación y post-procesamiento de los productos obtenidos en la modelación.
- Es necesario incrementar el número de personal técnico para el mantenimiento de la infraestructura de supercómputo y uso del software.

#### **Desarrollo de infraestructura**

- Centralización de la infraestructura informática y virtualización de la prestación de servicios para dotar a entidades o instituciones de capacidades informáticas, o en su defecto asignar recursos a las entidades de la Megalópolis para la adquisición de infraestructura informática.

#### ***4.8.5. Impacto de COVID-19 en la calidad del aire***

##### **Brechas de conocimiento y necesidades de investigación**

- Se necesitan estimaciones precisas de las emisiones de NO<sub>x</sub> y COV en la ZMVM y las regiones circundantes, para comprender los cambios en la formación de O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y otros contaminantes secundarios durante el período de confinamiento por el COVID-19.

- La experiencia durante la pandemia mostró un nuevo escenario que confirmó la compleja interacción entre las emisiones, la meteorología y la química atmosférica en la atmósfera urbana de la ZMVM.
- Es necesario comprender cómo cambió la composición química de los COV durante la pandemia.
- Existe evidencia suficiente de que, durante el confinamiento por COVID, el sector del transporte se vio fuertemente afectado, reduciendo sustancialmente la congestión vehicular, pero al mismo tiempo, incrementando el tránsito de vehículos de reparto de mercancías a domicilio. En términos generales el sector industrial también disminuyó sus actividades, algunas industrias más que otras. Se modificaron las actividades de preparación de alimento en el hogar, en la venta informal y el sector restaurantero. Sin embargo, aumentaron las emisiones de productos para uso personal, productos para el hogar, pinturas, agentes impermeabilizantes, basura doméstica, desechos, desinfectantes, limpiadores, entre otros. Es necesario evaluar como modificaron sus operaciones los sectores de servicios y comercios.
- Es necesario comprender cómo la contribución de las emisiones domésticas (por ejemplo, productos de limpieza, preparación de alimentos, quema y fugas de GLP y GNC) y de fuentes distintas a los automóviles y la industria (por ejemplo, incendios agrícolas y forestales, emisiones biogénicas, emisiones evaporativas de otras fuentes) contribuyen a la contaminación del aire e influyen en la producción de O<sub>3</sub> y aerosoles secundarios.
- Con base en lo que se observó durante las restricciones de COVID-19 en la ZMVM, los resultados indicaron que las reducciones en las emisiones de los vehículos e industrias provocaron la disminución de las concentraciones de los contaminantes primarios en el aire ambiente, sin embargo, para el O<sub>3</sub> no se observó una reducción en las concentraciones ¿por qué? ¿Cómo podría esto afectar las metas de gestión de la calidad del aire y a las acciones que se aplican durante las contingencias ambientales?
- A partir de la experiencia durante la pandemia ¿cómo modifican la reactividad química de la atmósfera los cambios en la flota vehicular y de la actividad doméstica?
- Dadas las reducciones observadas en PM<sub>2.5</sub>, es necesario comprender cómo las disminuciones en las emisiones de precursores modificaron la química de la formación secundaria de aerosoles.
- Transporte regional de contaminantes atmosféricos durante el período de confinamiento:
  - ¿Cómo contribuyeron las fuentes de emisión de los estados cercanos a los niveles de contaminación del aire en la ZMVM?
  - ¿Cómo contribuyeron las emisiones de la ZMVM a los niveles de contaminación en los estados cercanos?
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la reactividad atmosférica, la disponibilidad de los radicales y la formación de contaminantes secundarios, durante el período de confinamiento a través de estudios de modelación para comprender la calidad del aire durante el confinamiento.

- La disponibilidad de la especiación integral de los COV durante el confinamiento por COVID-19 permitirá evaluar los cambios en la reactividad de OH-COV.
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la meteorología local y regional y los diferentes escenarios durante el confinamiento para identificar cualquier mejora potencial en la ventilación (es decir, condiciones de viento) o condición favorable para la fotoquímica (es decir, radiación solar más intensa).
  - ¿Cuáles fueron las condiciones meteorológicas que contribuyeron a la alta producción/acumulación de O<sub>3</sub> durante los días de alta contaminación?
  - ¿Qué patrones de viento regionales y locales ayudaron a dispersar los contaminantes durante el confinamiento?

## CAPÍTULO 5. ESTUDIOS DE SALUD PÚBLICA Y LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LA MEGALÓPOLIS

### 5.1. Introducción

El objetivo principal de las acciones destinadas a mejorar la calidad del aire es la reducción de la exposición de los habitantes a los contaminantes atmosféricos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aire es la crisis de salud ambiental más apremiante del mundo. Los efectos combinados de la contaminación del aire ambiental (exterior) y la contaminación del aire doméstico se asocian con aproximadamente siete millones de muertes prematuras al año (WHO, 2022).

La información sobre cómo responde la salud humana a la exposición a la contaminación del aire se puede obtener de diferentes fuentes: estudios epidemiológicos, estudios de exposición controlada e investigaciones que emplean animales de laboratorio o células y tejidos *in vitro*. Los estudios epidemiológicos se emplean para determinar si la contaminación del aire o una fuente de contaminación tiene algún riesgo para la salud humana, o en la caracterización de la relación entre el nivel de exposición y la respuesta, también para examinar las respuestas de potenciales grupos sensibles a la exposición a la contaminación. Estos estudios son de gran utilidad para asistir a los tomadores de decisiones en el diseño de las estrategias de gestión o determinar si una estrategia de control en particular ha tenido algún impacto. Por un lado, los estudios con sujetos humanos expuestos controladamente a concentraciones atmosféricas bien caracterizadas proporcionan información detallada sobre las respuestas clínicas al contaminante (s) inhalado (s). Por otro lado, los estudios de laboratorio que emplean modelos animales son de gran utilidad para estudiar las propiedades peligrosas de diferentes contaminantes del aire. Los efectos directos de los contaminantes sobre células y tejidos ya sean animales o humanos, se pueden estudiar en experimentos *in vitro* empleando diferentes condiciones de exposición. En conjunto, los estudios descritos anteriormente son necesarios y fundamentales para evaluar los mecanismos de acción de varios contaminantes del aire. El proceso permite a la gestión de la calidad del aire incorporar la mejor evidencia científica en las políticas de salud pública.

Los efectos adversos para la salud incluyen la reducción del crecimiento pulmonar y de la función respiratoria, infecciones respiratorias y asma agravada en los niños; mientras que la cardiopatía isquémica y los accidentes cerebrovasculares son las causas más comunes de muerte prematura en adultos. Hay evidencia emergente de otros efectos como el cáncer pulmonar (Santibáñez-Andrade et al., 2019), la diabetes, las enfermedades neurodegenerativas y los efectos a nivel psicológico. Un nuevo estudio en los Estados Unidos de América indicó que la exposición a largo plazo a niveles bajos de contaminación del aire, incluso por debajo de los permitidos por algunas de las regulaciones existentes, puede estar causando decenas de miles de muertes prematuras entre los ancianos y otros grupos vulnerables (Yazdi et al., 2021).

El cuerpo de evidencia sobre la contaminación del aire y la salud ha llevado a estimaciones de riesgo cada vez más grandes por lo que la OMS propuso directrices de calidad del aire más estrictas en septiembre de 2021, modificando las existentes desde 2005 (WHO, 2021a, 2021b); a esto le

siguió una actualización de las normas de calidad del aire en México (NOMs, ver Tabla 1.1, Capítulo 1). Esto cobra mayor relevancia en la región de la Megalópolis que presenta importantes problemas de contaminación del aire que se reflejan en frecuentes incumplimientos de las normas de calidad del aire, impactos en la salud, costos económicos directos e indirectos y daños a los ecosistemas. Los impactos en la salud pueden exacerbarse para los grupos de población más vulnerables, como los ancianos, las mujeres embarazadas, los niños, las personas con enfermedades crónicas o con sistemas inmunológicos débiles. De ahí que sea importante revisar el estado actual del conocimiento sobre los estudios de salud pública y contaminación del aire en la Megalópolis, y evaluar sus avances y los desafíos científicos.

Las mejoras en la calidad del aire se asocian directa o indirectamente con beneficios en la salud pública al reducir la exposición aguda y crónica a los contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, un estudio reciente (Dockery et al., 2019) concluyó que las mejoras en la calidad del aire en la Ciudad de México entre 1990 y 2015, evitaron aproximadamente 22,500 muertes prematuras (SPH-Harvard, 2016). Por cada disminución de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la media anual de partículas menores a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) se observó un aumento de la esperanza de vida de  $0.89 \pm 0.38$  años. Por cada disminución de 10 ppb en la concentración máxima promedio de ozono ( $\text{O}_3$ ) se observó un incremento de  $0.24 \pm 0.08$  años. No hubo diferencia en los beneficios estimados de la reducción de  $\text{PM}_{2.5}$  entre hombres y mujeres, sin embargo, para  $\text{O}_3$  los hombres mostraron una asociación casi tres veces mayor. En términos netos, las mejoras en la calidad del aire en la Ciudad de México durante los últimos 25 años produjeron un incremento estimado de 1.3 años en la esperanza de vida útil atribuida a la reducción en la exposición a las  $\text{PM}_{2.5}$ , y un aumento adicional de la esperanza de vida de 1.9 años atribuida a la reducción en la exposición a  $\text{O}_3$ .

En México y particularmente en la Megalópolis, se utilizan los Programas para Mejorar la Calidad del Aire, conocidos como ProAire, que conjuntan las estrategias, acciones y procedimientos para prevenir, controlar y atender la mala calidad del aire, elaborados a partir de un diagnóstico previo basado en los datos disponibles de calidad del aire, fisiografía, meteorología, salud y gestión, tomando en cuenta las capacidades tecnológicas y humanas de la entidad. Dentro de estos programas se incluye también el protocolo para la atención de los episodios de contingencia ambiental, conocido como Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) y para el caso de la Ciudad de México como Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas (PPRECAA). Estos protocolos buscan organizar las acciones de control aplicables durante episodios de mala calidad del aire, cuando la exposición y niveles de concentración exceden los límites establecidos y ponen en riesgo a la salud humana (ver la Sección 6.4.4 sobre PPRECAA, Capítulo 6).

Desde la década de 1980s en México se realizaron estudios especializados para mejorar el conocimiento sobre los impactos de los contaminantes atmosféricos en la salud. Un ejemplo palpable de ello son los estudios sobre los efectos en la salud humana por la exposición al plomo (Pb) ambiental derivado del uso del tetraetilo de plomo ( $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ ) como aditivo en las gasolinas. Los resultados de estos estudios fueron importantes para modificar las normas oficiales en las que se eliminó el Pb en los combustibles. Otros estudios que se han realizado en México incluyen las relaciones entre los contaminantes atmosféricos y el asma, índices de mortalidad, efectos cardiovasculares, el desarrollo pulmonar en los niños y, más recientemente, la relación entre los niveles de contaminación y los impactos en salud por COVID-19 (ver por ejemplo, López-Feldman

et al., 2020). Además de los impactos en la salud de los contaminantes criterio, en México se han realizado estudios de exposición a las partículas ultrafinas y contaminantes del aire no regulados, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). En este capítulo se presentan los resultados del Taller Virtual y se sintetiza el estado actual del conocimiento de los estudios en salud pública y la contaminación del aire, las lecciones aprendidas y los retos científicos en el tema. Algunos de los estudios relacionados con los impactos del COVID-19 se describen con mayor detalle en el Capítulo 4.

## **5.2. Estado actual del conocimiento sobre los impactos de la contaminación atmosférica en la salud pública en la Megalópolis**

Los estudios epidemiológicos y toxicológicos sobre los impactos en la salud por la contaminación del aire tradicionalmente se han centrado en contaminantes como el O<sub>3</sub> y el material particulado (Riojas-Rodríguez, 2022). La exposición al material particulado se ha asociado con enfermedades pulmonares, cardiovasculares, neurológicas y en general con enfermedades crónicas, tales como las enfermedades metabólicas y el cáncer. Por su tamaño diminuto, las partículas finas PM<sub>2.5</sub> y las ultrafinas con diámetros menores a 0.1 µm (PM<sub>0.1</sub>) pueden penetrar profundamente en las vías respiratorias. Debido a que estas partículas están asociadas con procesos de combustión, suelen tener alta toxicidad dada la compleja mezcla que representa su composición química. Se conoce que el material particulado impacta más que el O<sub>3</sub> en la mortalidad, aunque el O<sub>3</sub> tiene mayores impactos en la morbilidad de la población expuesta. En esta sección se muestra un resumen de los principales resultados de estudios recientes de impactos en salud por contaminantes atmosféricos en México.

### ***5.2.1. Estudios epidemiológicos de la exposición a los contaminantes del aire***

Un estudio longitudinal<sup>1</sup> de la asociación entre la exposición prenatal a PM<sub>2.5</sub> y el neuro-desarrollo de niños menores de dos años mostró que la exposición a PM<sub>2.5</sub> durante el embarazo afecta el desempeño de la función del lenguaje en la infancia temprana (Hurtado et al., 2021). La magnitud de la asociación se mantiene aun después de controlar por la estimulación en el hogar.

Ugalde-Resano et al. (2022) estimaron el riesgo de consultas a urgencias médicas en la Ciudad de México asociado a la exposición a los contaminantes del aire regulados por la Normas Oficiales Mexicanas (contaminantes criterio<sup>2</sup>), excepto plomo, utilizando el número de consultas por urgencia cardiovascular. El estudio fue de tipo ecológico, es decir la unidad de análisis fueron los

---

<sup>1</sup> En un estudio longitudinal, los investigadores realizan varias observaciones de los mismos sujetos durante un período de tiempo, que puede durar varios años. La mayoría de los estudios longitudinales examinan las asociaciones entre la exposición a causas conocidas o sospechadas de enfermedad y la morbilidad o mortalidad subsiguientes.

<sup>2</sup> Los contaminantes de criterio son contaminantes del aire para los cuales se han establecido límites de concentración aceptables sobre la base de la información disponible acerca de los efectos en la salud de cada contaminante (ver la Tabla 1.1, Capítulo 1).

municipios y no los individuos, con análisis retrospectivo<sup>3</sup> de series de tiempo de consultas diarias por urgencia cardiovascular. Los resultados indicaron un incremento porcentual en el número de consultas por urgencia cardiovascular asociado a la exposición a contaminantes criterio. Los estudios futuros podrían incluir datos individuales como el estado socioeconómico u otros factores potenciales, como el historial médico y la exposición a otros contaminantes.

La evidencia científica internacional ha planteado que la contaminación del aire es un factor de riesgo para la diabetes (tipo 1, 2 y gestacional). Estudios epidemiológicos transversales<sup>4</sup> pero también longitudinales, desarrollados principalmente en poblaciones de países en desarrollo han confirmado esta asociación. Mediante un estudio de cohorte<sup>5</sup> se investigó la exposición a la contaminación del aire por PM<sub>2.5</sub> y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y la incidencia en diabetes en México (Cervantes-Martínez et al., 2022). Los resultados mostraron un incremento del riesgo de desarrollo de diabetes tipo 2 por la exposición de mediano y de largo plazo a las PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>2</sub>. Para el mediano plazo, por cada incremento de 10 unidades de PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) y NO<sub>2</sub> (ppb), el riesgo de diabetes incrementó en 72% y 52% respectivamente. Para las exposiciones anuales y bianuales los incrementos del riesgo fueron del 88% y 70% para PM<sub>2.5</sub> y del 44% y 39% para NO<sub>2</sub>, respectivamente. Los resultados persistieron en diferentes análisis de sensibilidad, incluyendo la evaluación de la exposición únicamente en el domicilio de las participantes y la evaluación de una definición más estricta del caso incidente de diabetes, entre otros.

Dos estudios de cohorte se enfocaron a evaluar los efectos de la contaminación del aire sobre las enfermedades metabólicas en niños. En el primer estudio se reclutaron mujeres embarazadas para evaluar el efecto de la exposición prenatal a óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y su efecto sobre el peso al momento de nacer (Mendoza Ramírez et al., 2018). Los resultados mostraron que el 50% de los niños estuvieron expuestos de manera pre-gestacional a diversas concentraciones ambientales de NO<sub>x</sub> y se observó una disminución significativa en el peso al nacer por la exposición a incrementos de NO<sub>x</sub>, aun al considerar otros factores que pudieran contribuir como la altura y tabaquismo pasivo en la madre y la edad gestacional y género del niño. En el segundo estudio de cohorte, se investigó la exposición a NO<sub>x</sub> desde la etapa prenatal y en los niños en desarrollo desde la edad de 7 hasta los 12 años, sobre el riesgo cardiovascular a través del índice cintura-altura. Se encontró que los niños en el segundo y tercer tercil de exposición a NO<sub>x</sub> tuvieron mayor posibilidad de tener un índice cintura-altura por arriba del valor límite para riesgo cardiovascular comparado con el tercil más bajo (Ceja Esparza, 2021).

Tamayo-Ortiz et al. (2021) estimaron la concentración de PM<sub>2.5</sub> empleando un modelo híbrido de exposición basado en datos en superficie y satelitales en combinación con datos de superficie, uso de suelo e información meteorológica, para evaluar los impactos en muestras representativas de la población, estratificadas por grupos de edad (0-9, 10-19 y ≥20 años) y que fueron obtenidas de los

---

<sup>3</sup> Un análisis retrospectivo se inicia después que los individuos han desarrollado la enfermedad o característica investigada y se dirigen hacia atrás en el tiempo para determinar la situación de los sujetos antes del inicio de la enfermedad.

<sup>4</sup> Un estudio transversal mide la prevalencia de cambios en la salud o determinantes de la salud, o ambos, en una población en un momento dado o durante un período corto.

<sup>5</sup> Un estudio de cohorte es un estudio de tipo longitudinal que sigue a dos grupos de individuos previamente seleccionados, en el que se realiza una comparación de la frecuencia de aparición de un evento comparando ambos grupos, uno de los cuales ha estado expuesto a un factor que no está presente en el otro grupo.



datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) realizadas en los años 2006 y 2012. Encontraron que la exposición a  $PM_{2.5}$  se asoció con mayores probabilidades de obesidad y en todos los grupos de edad, pero con resultados más robustos en los adolescentes. Por cada incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $PM_{2.5}$ , las probabilidades de obesidad fueron de 3.53 en 2006 y de 3.79 en 2012. Por otra parte, Pérez-Humara et al. (2020) realizaron un estudio longitudinal en adolescentes de 9 a 21 años con sobrepeso y obesidad de la Ciudad de México para evaluar las asociaciones entre la exposición de corto-plazo al  $O_3$  ambiental y la actividad metabólica, empleando tres índices: de acilcarnitina, de aminoácidos y un índice mixto. Sus resultados encontraron una asociación significativa entre concentraciones mayores de  $O_3$  y puntuaciones menores en el índice de aminoácidos y en las concentraciones de aminoácidos individuales, sugiriendo una menor actividad metabólica en este sector de la población joven.

Los niños son particularmente vulnerables a la exposición a las partículas suspendidas ya que sus pulmones y su sistema inmunológico se encuentran en desarrollo; tienen una frecuencia respiratoria más alta, que aumenta la dosis inhalada de tóxicos, y vías respiratorias de menor diámetro, que incrementan la resistencia relativa del flujo de aire. Los resultados del Estudio de Salud y Contaminación Atmosférica en Latinoamérica (ESCALA), que incluyó a cuatro grandes centros urbanos (Ciudad de México, México; Santiago, Chile; Sao Paulo y Rio de Janeiro, Brasil), mostraron los efectos que la contaminación atmosférica tiene en la mortalidad respiratoria entre la población infantil (Gouveia et al., 2018). Aun cuando el número diario de muertes fue relativamente bajo en todas las ciudades y los resultados variados, el metanálisis encontró impactos estadísticamente significativos de la contaminación del aire en la mortalidad de bebés y niños, con resultados más consistentes para  $PM_{10}$  que mostró riesgos positivos y significativos, que para  $O_3$  que presentó menos estimaciones de efectos positivos.

Barraza-Villareal et al. (2008) evaluó los efectos de la exposición a  $PM_{2.5}$  en una cohorte de 158 niños asmáticos que vivían en tres demarcaciones densamente pobladas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Iztapalapa, Iztacalco y Nezahualcóyotl; donde los altos niveles de emisiones relacionadas con el tráfico eran la principal fuente de contaminantes. Sus resultados mostraron que la exposición a  $PM_{2.5}$  provocó una inflamación aguda de las vías respiratorias y una disminución de la función pulmonar tanto en niños asmáticos como no asmáticos. Téllez-Rojo et al. (2020) emplearon observaciones satelitales con datos de profundidad óptica para estimar la concentración de  $PM_{2.5}$  y datos interpolados de las mediciones de  $PM_{2.5}$  realizadas por las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), para estimar la exposición promedio de dos semanas a  $PM_{2.5}$  en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Sus resultados mostraron una asociación significativa positiva entre la exposición de corto plazo a  $PM_{2.5}$  con el aumento de reportes de síntomas respiratorios agudos en niños.

### ***5.2.2. Estudios toxicológicos de las partículas suspendidas***

Aun cuando se desconocen muchos de los mecanismos se ha encontrado evidencia entre la exposición a partículas suspendidas de la fracción fina con la alteración lipídica y aumento de hormonas de estrés que promueve alteraciones metabólicas, la inducción de daño en el ácido desoxirribonucleico (ADN) y el aumento en la capacidad oxidativa, los efectos en la inducción de mediadores, el daño renal temprano y desequilibrio antioxidante e inmunológico, y la perturbación neuroendócrina, o el desbalance del sistema nervioso autónomo o el ritmo cardiaco afectados por la unión con receptores en el tejido pulmonar o terminaciones nerviosas (De Vizcaya-Ruiz, 2022).

De Vizcaya-Ruiz et al. (2006) caracterizaron los efectos biológicos del material particulado obtenido en las estaciones seca-fría y seca caliente en diversos puntos de la Megalópolis. Los resultados mostraron la presencia de inducción de muerte celular en cultivos de células de epitelio alveolar humano relacionada con el tamaño de la partícula, la ubicación y la temporada del año. También encontraron evidencia de la inducción de daño al ADN en células humanas con todas las muestras de material particulado, así como una mayor capacidad oxidativa principalmente por la fracción fina. Las partículas colectadas al norte de la ciudad mostraron un mayor contenido de metales y compuestos biológicos, así como la inducción de muerte celular apoptótica y daño más extenso en el ADN. En otro estudio toxicológico se investigó el efecto de la composición química del material particulado (Gutiérrez-Castillo et al., 2006). Los resultados mostraron efectos de muerte celular y daño al ADN dependiendo de la distribución espacial y temporal del sitio de colecta del material particulado, así como de su tamaño y reactividad oxidativa. Estudios toxicológicos posteriores han confirmado la relación entre la exposición a PM y la inducción de daño a nivel celular y del ADN, así como la exacerbación del estrés oxidativo (Sánchez-Pérez et al., 2009; Chirino et al., 2010; Quezada-Maldonado et al., 2018, 2021; Corona-Vázquez et al., 2019; Maher et al., 2020).

En un estudio sobre la asociación entre incrementos de morbilidad y la exposición a los compuestos orgánicos del PM<sub>10</sub>, se investigaron las correlaciones entre compuestos mutagénicos en mezclas orgánicas con diferentes polaridades y sus respuestas mutagénicas en bioensayos (Villalobos-Pietrini et al., 2007). Este estudio se centró en los compuestos orgánicos polares tales como compuestos hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en la fase particulada, que se originan de precursores gaseosos producto de la combustión incompleta de fuentes móviles y quema de biomasa. Estos compuestos tuvieron una correlación con efectos mutagénicos dependiendo de su polaridad. En un estudio de tendencias de compuestos HAP cancerígenos, Amador-Muñoz et al. (2020) mostraron reducciones de hasta 40 % de HAPs en PM<sub>2.5</sub> en el periodo de 2016-2017 con respecto a 2006.

La exposición al material particulado se ha relacionado con mecanismos subyacentes del daño pulmonar y las alteraciones cardiovasculares a través de estudios toxicológicos utilizando modelos experimentales en animales. Estos estudios permiten establecer el mecanismo fisiopatológico de una enfermedad asociada a la concentración y tiempo de exposición. Falcon-Rodríguez et al. (2017) encontraron que la exposición a partículas en suspensión eran un coadyuvante en el asma alérgica en cobayos previamente sensibilizados. Observaron metaplasia de células mucosas en el epitelio bronquial, el cual incrementaba cuando los animales sensibilizados se exponían a partículas PM<sub>2.5</sub> de la Ciudad de México. En un estudio toxicológico en ratas expuestas al material particulado, los resultados mostraron la inducción de mediadores inflamatorios en el pulmón en respuesta a la exposición a corto plazo o aguda por la exposición a PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>0.1</sub>, pero no a partículas menores a 10 µm (PM<sub>10</sub>) (Aztatzi-Aguilar et al., 2018). También se observó la activación del receptor responsable del equilibrio de la contracción vascular y presión arterial en los pulmones y el corazón de ratas por la exposición a PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>0.1</sub> (Aztatzi-Aguilar et al., 2015) y que la exposición sub-crónica a PM<sub>2.5</sub> provocó un daño renal temprano, así como un desequilibrio antioxidante e inmunológico (Aztatzi-Aguilar et al., 2016).

Otro estudio toxicológico con modelos experimentales en animales con exposición a PM<sub>0.1</sub> mostró que la inducción de estrés placentario durante la vida intrauterina causó un daño epigenético y daño cardiovascular que se manifestó en los ratones cuando alcanzaron la vida adulta (Morales-Rubio et al., 2019). Los resultados sugirieron que la exposición al material particulado contribuyó al desarrollo de enfermedades crónicas en sistemas del organismo, que fueron más allá de los pulmones y que impactaron en el desarrollo de enfermedades cardiovasculares (Morales-Rubio et al., 2022).

Un estudio evaluó de la participación del material orgánico extraíble (MOE) de las PM<sub>2.5</sub> como causa de alteraciones en biomoléculas y la producción del surfactante pulmonar (Déciga-Alcaraz, 2022). Los resultados mostraron que los neumocitos tipo II presentaron alteraciones morfológicas posteriores a la exposición por MOE, lo que generó un aumento en la producción de proteínas totales. Los neumocitos tipo II tienen un papel importante en el pulmón ya que, además de producir el surfactante alveolar, tienen la capacidad de regenerarse, proliferar y diferenciarse a neumocitos tipo I para restaurar el daño causado por agentes externos. Los resultados indicaron que la exposición a MOE causaba alteraciones en la producción del surfactante de los neumocitos tipo II, lo cual podía tener como consecuencia que las células fueran susceptibles a infecciones por virus, bacterias u hongos. Estos resultados abren una puerta de investigación sobre los efectos toxicológicos causados por exposición a MOE sobre el surfactante pulmonar que no están del todo descritos aún.

### ***5.2.3. Estudios de exposición a contaminantes del aire***

En un estudio de la exposición personal a la contaminación por partículas en el transporte público, Velasco et al. (2019) utilizaron instrumentos portátiles para investigar el efecto del modo de transporte público en la exposición, estudiando una ruta en una zona concurrida de la Ciudad de México. Los modos de transporte investigados fueron los sistemas Metro y Metrobús, taxi, Uber, caminando y en bicicleta. El modo de transporte Uber con aire acondicionado se identificó como el modo de transporte más limpio, con concentraciones de exposición por debajo de las registradas en un sitio de referencia alejado de la vialidad, mientras que el sistema Metro registró las mayores concentraciones de partículas. Se observó que la exposición personal estuvo altamente influenciada por las emisiones provenientes de comercios informales de comida en las calles. Se encontró también que los ciclistas y peatones inhalaban la mayor concentración de partículas, en comparación con los otros modos de transporte. El modo de transporte de Metrobús o Metro presentó menores concentraciones en comparación con los desplazamientos a pie y en taxi. El 80% de las partículas en los diferentes modos de transporte midieron menos de 70 nm, con una media geométrica de 40 nm.

En un estudio reciente se investigó la exposición crónica a contaminantes no regulados y su impacto en el cáncer de mama, enfocándose en la comprensión de las relaciones con contaminantes disruptores endócrinos como los ftalatos (Segovia-Mendoza et al., 2022). Los ftalatos son compuestos asociados con la fabricación de plásticos, como aquellos empleados en material médico, cosméticos, envases, pinturas de uñas, empaques de alimentos, juguetes, etc. En ese estudio se evaluó el impacto de los ftalatos en la alteración de distintas vías metabólicas y en el cáncer de mama. Se encontraron diferencias en las concentraciones de los ftalatos parentales en pacientes con tumores mamarios. Dependiendo del tipo de tumor, podrían tener mayores niveles de algunos ftalatos. Los resultados indican que la exposición a los ftalatos puede ser parte de las

comorbilidades que podrían estar modificando la susceptibilidad e incluso la mortalidad de pacientes con cáncer de mama.

Existe controversia sobre la relación entre la exposición a compuestos cancerígenos no regulados como los HAPs y el desarrollo del cáncer de mama. Actualmente se conoce que la principal asociación reside en su interacción con los receptores de estrógeno y progesterona.

Las partículas ultrafinas o nanopartículas se han asociado con diversos problemas de salud (Calderón-Garcidueñas et al., 2021), existe evidencia creciente que sugiere que las partículas ultrafinas pueden tener impactos adversos en la salud de los habitantes de la Ciudad de México. En los jóvenes residentes de la Ciudad de México se han observado déficits cognitivos y del olfato, alteración de la marcha y del equilibrio, de potenciales evocados auditivos del tronco encefálico y trastornos del sueño (Calderón-Garcidueñas & Ayala, 2022).

La exposición a PM<sub>2.5</sub> y nanopartículas se asoció con una disminución significativa motora y cognitiva en adultos jóvenes, posiblemente como resultado de interacciones complejas entre las puertas de entrada, la composición química de las nanopartículas, las interacciones de las proteínas y un daño celular final en las células cerebrales (Calderón-Garcidueñas et al., 2020). La presencia y acumulación de nanopartículas provenientes de la combustión y fricción, en el ventrículo izquierdo de sujetos jóvenes expuestos crónicamente a altas concentraciones se asoció con daño significativo en la unidad neurovascular y enfermedad de Alzheimer en evolución (Calderón-Garcidueñas et al., 2019). En el caso de enfermedades cardiovasculares, la presencia de nanopartículas ricas en hierro dentro de las mitocondrias miocárdicas parece asociarse con la disfunción mitocondrial y la formación excesiva de especies reactivas de oxígeno a través de la reacción de Fenton catalizada por hierro. La sobrecarga de hierro del miocardio derivada de la inhalación de nanopartículas ricas en metales en el aire es un factor de riesgo ambiental plausible y modificable para el estrés oxidativo cardíaco y la enfermedad cardiovascular (Maher et al., 2020). Estos resultados sugieren la necesidad de controlar y monitorear la presencia de nanopartículas en el aire urbano.

La meteorología en combinación con la morfología urbana, las características de las fuentes de emisión de contaminantes y las transformaciones químicas que ocurren en la atmósfera de las ciudades, producen una distribución heterogénea de la contaminación del aire con múltiples microambientes interactuando dentro del contexto urbano. La composición del aire puede variar dentro de una misma ciudad y durante el día. Dependiendo de la mezcla y concentración de contaminantes estos pueden tener efectos sinérgicos, antagónicos o indiferentes en la salud humana, dificultando la evaluación de los impactos en la salud pública. La Megalópolis carece de estudios sobre los efectos sinérgicos de la exposición a la mezcla urbana que consideren otras especies químicas además de los contaminantes criterio.

### **5.3. Los costos-beneficios y la comunicación de riesgos**

Las políticas de regulación de las emisiones y los niveles de contaminación en la atmósfera pueden tener fuertes impactos económicos o sociales. Su implementación no es fácil y requiere justificar económicamente sus acciones e intervenciones ante los sectores afectados y la sociedad en general.

La justificación se fundamenta principalmente en la asignación de un valor monetario a los beneficios esperados en la salud pública, el bienestar de la población, la seguridad alimentaria y en el medio ambiente. En términos económicos, el nivel óptimo se encuentra en el punto en que el costo de reducir las emisiones iguala a los beneficios de la disminución resultante de los daños. En la Sección 6.4.6 del Capítulo 6 se ofrecen algunos ejemplos recientes del análisis de los costos-beneficios en la Megalópolis.

Por otra parte, la comunicación continua de los riesgos por la contaminación a partir de los datos del monitoreo es la mejor estrategia para prevenir los impactos en la salud de la población frente al deterioro de la calidad del aire. El uso de índices de calidad del aire ha resultado de una herramienta de comunicación de riesgos efectiva en los principales centros urbanos, alrededor del mundo. México cuenta con el Índice Aire y Salud que armoniza la manera en la que se reporta el estado de la calidad del aire y sus efectos. La Ciudad de México utiliza también el Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS) basado en la evidencia de los efectos de salud por múltiples contaminantes. En la Sección 6.5 del Capítulo 6 se describen con mayor detalle ambos índices.

#### **5.4. Lecciones aprendidas**

Es importante mencionar que algunos de los resultados de los estudios en salud sobre material particulado y el O<sub>3</sub> se emplearon para formular algunas de las políticas y programas para el control de calidad del aire en la Megalópolis. Sin embargo, quedan aún interrogantes y temas clave sobre los efectos en la salud por los contaminantes atmosféricos y la cuantificación de los costos y beneficios en salud derivados del control de fuentes de emisión clave. Es necesario comprender mejor la relación entre los efectos crónicos y agudos en la salud, que son agravados por la exposición a la mala calidad del aire. En esta sección se presenta un resumen de las lecciones aprendidas de los estudios recientes de impactos en salud por contaminantes atmosféricos en México.

- ***Incorporación de resultados de estudios en salud en programas del control de la contaminación del aire.*** Los resultados de estudios recientes muestran evidencia de las correlaciones entre diversos tipos de morbilidad y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, principalmente para PM<sub>2.5</sub>. La investigación de los impactos en la salud incluye: efectos a nivel celular y ácido desoxirribonucleico (ADN), enfermedades pulmonares crónicas, diferentes tipos de cáncer, enfermedades metabólicas, efectos neurológicos, funciones de concentración-respuesta, y el valor estadístico de la vida. Existe un rango amplio de estudios que proveen evidencia de los impactos en salud por contaminantes atmosféricos. Sin embargo, es importante que estos resultados puedan incorporarse como soporte del diseño de normatividad y programas para reducir la contaminación atmosférica. Para ello, la comunidad científica en México debe abordar el tema de la representatividad y robustez de los resultados, para que puedan aportar al establecimiento de una base científica para el diseño de estrategias de control de la contaminación. Más aún, se deben crear mecanismos para reducir las brechas para una integración eficiente de los resultados de los estudios en salud en el diseño de políticas públicas, incluyendo las actividades para la prevención y para la disminución de la exposición a contaminantes dañinos a la salud.

- ***Divulgación de información para disminuir la exposición.*** Otro avance substancial ha sido la divulgación en tiempo real sobre las condiciones de la calidad del aire y sus posibles impactos en la salud en la población de la Megalópolis, con base en la información proveniente de las redes de monitoreo atmosférico disponibles. La divulgación continua de la información a través de aplicaciones, reportes públicos, medios informativos y de las redes sociales, ayuda a la población a tomar decisiones informadas para realizar sus actividades en espacios interiores y exteriores para disminuir la exposición a contaminantes del aire, mejorando con ello su salud y calidad de vida. Estas acciones han sido claves antes, durante y después de la declaración de las contingencias ambientales de O<sub>3</sub> y de material particulado en el PCAA para alertar e informar a la población. Las actividades de divulgación de la información forman parte de las acciones listadas en los ProAire para la Megalópolis.
- ***La evidencia epidemiológica señala que no existe un umbral de exposición segura a material particulado y contaminantes gaseosos.*** De acuerdo con los resultados presentados, existe evidencia que sugiere que los efectos en la salud por la contaminación atmosférica no están relacionados a límites específicos. La mezcla de contaminantes atmosféricos en las diferentes zonas urbanas de la Megalópolis puede ser compleja, su caracterización química y los posibles efectos en la salud son retos importantes. Esto sugiere que la exposición a concentraciones de material particulado, incluso por debajo de las guías de calidad del aire de la OMS puede ser peligrosa para la salud de la población.

### 5.5. Preguntas científicas clave

- ***Representatividad de los estudios de morbilidad.*** Una pregunta clave tiene que ver con la necesidad de entender mejor la representatividad de los resultados obtenidos en los estudios de morbilidad, tales como enfermedades metabólicas, diabetes, y efectos en el desarrollo neurológico, entre otras. Es importante saber si los resultados obtenidos en los estudios de morbilidad son lo suficientemente robustos para sustentar el desarrollo de nuevas iniciativas para políticas públicas y nuevas regulaciones.
- ***La integración de los resultados de estudios de salud en el diseño de políticas públicas.*** Un tema que debe ser abordado entre la comunidad científica y los tomadores de decisiones es el establecimiento de los mecanismos para integrar los resultados de los estudios de salud en la agenda pública. Más allá del establecimiento científico de las relaciones entre efectos en la morbilidad y la exposición a contaminantes atmosféricos, es vital que la información generada asista el desarrollo de estrategias de mejoramiento de la calidad del aire.
- ***Estudios de salud por exposición a otros contaminantes.*** Tradicionalmente los estudios en salud se han enfocado en contaminantes criterio como el O<sub>3</sub> y el material particulado. Sin embargo, la población en zonas urbanas se encuentra expuesta a complejas mezclas de gases y partículas. Así, existe la necesidad de expandir los estudios de los efectos en la salud por exposición a las mezclas químicas de compuestos orgánicos volátiles (COVs),

HAPs, contaminantes tóxicos, metales, nanopartículas, contaminantes emergentes<sup>6</sup> y las complejas combinaciones de compuestos en el material particulado. Estas investigaciones son necesarias no solo para estudios de mortalidad sino también de morbilidad.

- ***Estudios de exposición.*** Es necesario aumentar y mejorar nuestro entendimiento de las características de la exposición a los contaminantes atmosféricos. Esto incluye también mejorar los mecanismos para generar la información necesaria para los estudios de exposición a nivel local y regional. Es importante determinar si los resultados podrían emplearse para mejorar nuestro entendimiento de la exposición a los contaminantes del aire.
- ***Integración de otras metodologías.*** La mejora de las evaluaciones de exposición implica también mejorar la colaboración entre las agencias que producen la información, así como la integración de otras metodologías de generación de datos, tales como información satelital, monitoreo personal, inventarios de emisiones y de modelación de la calidad del aire. La integración de estas metodologías permitiría mejorar substancialmente la disponibilidad de las bases de datos necesarias para entender la exposición a contaminantes atmosféricos.

## 5.6. Retos científicos y recomendaciones

- ***Perfiles toxicológicos.*** Los resultados de los estudios toxicológicos muestran evidencia de causas biológicas y mecanismos que pueden explicar impactos en salud agudos, crónicos, y transgeneracionales. Existe sin embargo el reto de determinar los perfiles toxicológicos del contenido orgánico del material particulado en diferentes partes de la Megalópolis. Es importante conocer las diferencias regionales de los perfiles toxicológicos para correlacionarlos con impactos en salud específicos para grupos poblacionales en la Megalópolis.
- ***Impactos por mezclas de contaminantes atmosféricos y patógenos.*** El estudio de los impactos en salud por mezclas o combinación de contaminantes del aire con patógenos (por ejemplo, virus) es todavía un reto importante que debe ser abordado por la comunidad científica. Esto incluye también la necesidad de desarrollar los métodos toxicológicos necesarios a utilizar para abordar el problema. La complejidad de este reto aumenta en la medida que la variabilidad de las distribuciones espaciales de los microorganismos patógenos y los contaminantes atmosféricos sean grandes dentro de la Megalópolis.
- ***Interacción entre el cambio climático, la calidad del aire y salud.*** Existe una compleja interacción en múltiples escalas entre el cambio climático y la calidad del aire, sin embargo, es muy clara la conexión entre las fuentes de contaminación del aire local y las emisiones que impulsan el cambio climático. Además de los efectos adversos de los contaminantes

---

<sup>6</sup> Los contaminantes emergentes, o contaminantes de preocupación emergente, son sustancias de origen y naturaleza química diversa que están presentes en el medio ambiente pero que no se controlan ni regulan de manera rutinaria, que tienen el potencial de afectar negativamente la salud humana y el medio ambiente. Incluyen productos de cuidado personal o de limpieza del hogar, pesticidas, y aditivos industriales.

antropogénicos en la salud humana, los contaminantes atmosféricos naturales como el polen, los compuestos orgánicos volátiles biogénicos, el humo de los incendios forestales y el polvo arrastrado por el viento pueden verse afectados por el cambio climático y convertirse en un riesgo cada vez mayor para la salud. La modificación del clima también inducirá cambios en los hábitos de la población, por ejemplo, el tiempo que los individuos permanecen en el interior, así como también modificará la disponibilidad y distribución de alérgenos derivados de plantas y hongos, esto tendrá efectos sobre el asma y la rinitis alérgica en niños y adultos; en consecuencia, será necesario abordar los ajustes de política y los cambios de estilo de vida necesarios para mitigar estos efectos nocivos.

Al estimar el impacto futuro en la salud, además de la incertidumbre en las concentraciones de O<sub>3</sub> y partículas suspendidas, existen incertidumbres en las estimaciones de riesgo, como la modificación del efecto por la temperatura en las relaciones entre contaminantes y en la respuesta humana a los contaminantes, alterando la posible adaptación futura resultante de estos cambios y un potencial nuevo de riesgo asociado a la exposición (ver, por ejemplo, Kinney, 2018; Doherty et al., 2017). Es necesario comenzar a evaluar las implicaciones del cambio climático en la salud humana y orientar las políticas hacia la mitigación del cambio climático y la contaminación del aire, potenciando así los beneficios para la salud y optimizando recursos y costos.

- **Sistema de vigilancia de la salud.** Una propuesta interesante sería el diseño e implementación de un sistema de vigilancia de la salud en conjunto con las redes de monitoreo ambiental existentes en la Megalópolis. La integración de los sistemas podría ayudar substancialmente a la identificación temprana de acciones para mitigar la exposición a contaminantes del aire, incluyendo eventos extraordinarios como los presentados durante la pandemia de COVID-19. Más aún, la integración propuesta puede ayudar a mejorar la evaluación de la efectividad de los programas de mejora y control de la calidad del aire.
- **Composición química del material particulado y tóxicos emergentes.** Las asociaciones entre los impactos en salud y la toxicidad de las diferentes especies químicas en el material particulado deben continuar y aumentarse, sobre todo para los componentes de HAPs, metales, carbono negro (CN) y componentes orgánicos. Esto permitirá entender cómo la agregación química y la formación de aerosoles determinan la activación molecular de procesos fisiopatológicos de enfermedades agudas y crónicas. Se requiere también realizar estudios de partículas tóxicas emergentes, como son las partículas ultrafinas, partículas de microplásticos y aquellas que no derivan de combustión como el desgaste de frenos y llantas, identificando sus fuentes de emisión y potencial tóxico.
- **Métodos de estudios en salud.** Para ayudar en el desarrollo de políticas para mejorar la calidad del aire, es necesario integrar los resultados de diferentes métodos de estudios epidemiológicos tales como ecológicos, series de casos, estudios cros-seccionales, casos y controles, estudios de cohorte e intervenciones. Para los estudios en salud se deben integrar también modelos *in vitro* e *in vivo* de exposición a tóxicos, técnicas moleculares de alto desempeño y parámetros de función fisiológica de enfermedades crónicas. Es necesario avanzar en el estudio de los efectos sinérgicos de la mezcla urbana, así como de los efectos



de los contaminantes emergentes. Los modelos de exposición empleados en los estudios epidemiológicos se pueden beneficiar del uso de datos obtenidos de plataformas satelitales y de las tecnologías de bajo costo, así como de las salidas de ensambles de modelos numéricos.

- **Datos de contaminantes criterio y de otras especies de interés.** Se requieren datos de los contaminantes criterio con coberturas y resoluciones espaciales y temporales adecuadas, para los estudios epidemiológicos y de exposición. Es necesario mejorar la calidad de los datos para reducir la incertidumbre en las evaluaciones de los impactos. La evaluación de los efectos de los contaminantes emergentes requerirá de la aplicación de nuevas tecnologías en las redes de monitoreo y de la realización de campañas de campo.
- **Desarrollo de indicadores de gestión basados en la mejora de la salud pública.** La gestión de la calidad del aire podría beneficiarse con el desarrollo e incorporación de indicadores basados en salud que pudieran relacionar los cambios en la incidencia de enfermedades o en la mortalidad atribuidas con los cambios en los niveles de contaminantes como el O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

### **Brechas de conocimiento**

- En el contexto mexicano, ¿existe nueva información científica sobre los efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire? ¿Cuál ha sido la información reciente sobre contaminación del aire y salud?
- ¿Existe evidencia de efectos crónicos y agudos agravados por la exposición a la mala calidad del aire?
- ¿Existe evidencia de efectos sinérgicos relacionados con la exposición a las diversas mezclas de contaminantes encontradas en los distintos ambientes urbanos? ¿Existen datos suficientes para su evaluación?
- ¿Es necesario desarrollar factores de concentración respuesta adecuados para la población mexicana?
- ¿Cuáles son los costos sociales y económicos asociados con la contaminación del aire? ¿Es necesario desarrollar metodologías para apoyar las evaluaciones del costo beneficio en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles han sido los avances para estimar mejor cuantitativamente los efectos de la calidad del aire en la salud?
- ¿Cuál es la contribución de la contaminación del aire ambiente exterior a la exposición en interiores?
- ¿Cuáles son los umbrales para la exposición a partículas y contaminantes gaseosos? ¿cuáles serían los retos para alcanzarlos?
- ¿Es necesario incluir algún otro contaminante o contaminantes (por ejemplo, partículas ultrafinas, HAPs) dentro de las regulaciones de calidad del aire ambiente?
- ¿Cómo modificará los impactos en la salud el cambio climático?

## CAPÍTULO 6. PROGRAMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA MEGALÓPOLIS

### 6.1. Proceso de gestión de la calidad del aire y el papel de la investigación científica

La gestión de la calidad del aire se refiere a todas las actividades que una autoridad reguladora realiza para ayudar a proteger la salud pública y el medio ambiente de los efectos nocivos de la contaminación del aire. Es un proceso iterativo y dinámico representado como un ciclo de elementos interrelacionados, como se muestra en la Figura 6.1 (NRC, 2004; Bachman, 2007). Por lo general, el proceso comienza con una institución gubernamental que define objetivos, metas y estándares de calidad del aire que establecen las concentraciones umbral para especies contaminantes clave con la finalidad de proteger la salud pública y el medio ambiente. Los administradores de la calidad del aire deberán determinar las reducciones de emisiones necesarias para cumplir con los estándares y objetivos. Para comprender mejor el desafío que plantea la contaminación del aire se valen de la aplicación de diversas herramientas de evaluación, incluidos los inventarios de emisiones, el monitoreo de la calidad del aire y la modelación.

Al desarrollar las estrategias de control, los administradores de la calidad del aire deben incluir en un cronograma los planes de cumplimiento e implementación. Para lograr con éxito las reducciones de emisiones requeridas deben implementar los programas y hacer cumplir las reglas y regulaciones. Es importante mantener una evaluación continua para valorar la eficacia de las estrategias y medir el progreso hacia el cumplimiento de los objetivos de calidad del aire. Además, dado que la gestión de la calidad del aire contiene importantes incertidumbres científicas, tecnológicas y sociales, es necesario revisar y evaluar continuamente los objetivos y las estrategias a medida que se dispone de nueva información; por ejemplo, las emisiones y la meteorología que afectan a la zona bajo control o vigilancia. Una definición precisa del problema permite la identificación de los nuevos desafíos a resolver para mejorar la calidad del aire. El ciclo de gestión inicia de nuevo, incorporando los cambios apropiados. En algunos casos, podría requerir el establecimiento de nuevos estándares de calidad del aire. A lo largo de cada etapa del proceso, la comunicación con el público sobre el estado de la calidad del aire es esencial.

Como se muestra en la Figura 6.1, la ciencia y la tecnología contribuyen a la gestión a través de la supervisión, el análisis, la investigación y el desarrollo, mismas que proporcionan a los administradores las bases para tomar decisiones informadas. Es importante destacar que el éxito de la gestión de la calidad del aire demandará de los encargados la adopción de decisiones que utilicen la mejor evidencia disponible, así como datos e información respaldada por las comunidades científica y tecnológica para alcanzar reducciones adecuadas y rentables de las emisiones contaminantes.



**Figure 6.1.** El proceso de la gestión de la calidad del aire (Adaptado de NRC, 2004 y Bachman, 2007).

En los Estados Unidos, la Ley de Aire Limpio (CAA, 1970) proporciona el marco legal que autoriza a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) para fijar las concentraciones máximas permitidas de seis contaminantes atmosféricos comunes, ozono (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), plomo (Pb) y partículas suspendidas (PM), mediante el establecimiento de Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente (NAAQS, por sus siglas en inglés). Luego, los estados desarrollan planes estatales de implementación que muestran cómo, con la asistencia de los programas nacionales de control, se cumplirán estos estándares a través del programa de gestión de la calidad del aire (US EPA, 2022).

El gobierno mexicano estableció los primeros estándares de calidad del aire ambiente (Normal Oficial Mexicana, NOM) para O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Pb y PM<sub>10</sub> (partículas con diámetro de 10 micrómetros o menores) en 1994 con el objetivo de proteger la salud pública, siguiendo el ejemplo de los Estados Unidos (DOF, 1994a, b, c). Como se describe en el Capítulo 1, las normas son definidas y expedidas por la Secretaría de Salud quien las revisa periódicamente; las normas vigentes de calidad del aire se presentan en el Capítulo 1, Tabla 1.1.

En México, el gobierno federal mantiene un enfoque integral de gestión de la calidad del aire a través de programas de mejora de la calidad del aire (ProAire, *Programa Para Mejorar la Calidad del Aire*), los cuales responden a la necesidad de cada una de las 32 entidades que conforman la federación de disponer de un instrumento de carácter preventivo y/o correctivo en materia de calidad del aire y protección de la salud, y para cumplir con el marco jurídico aplicable en este ámbito. Hasta diciembre de 2022, todos los estados de la Megalópolis contaban con un ProAire vigente, solo el de Puebla se encontraba en proceso de actualización (SEMARNAT, 2022).

Debido a los elevados niveles de la contaminación del aire de la Ciudad de México y su área metropolitana, las autoridades mexicanas centraron en ella las primeras actividades de gestión. El gobierno reconoció por primera vez la existencia de un grave problema ambiental en la década de 1980, cuando la nueva red de monitoreo de la calidad del aire (la Red Automática de Monitoreo Atmosférico, RAMA) reveló concentraciones elevadas de todos los contaminantes criterio con picos de O<sub>3</sub> mayores a 300 ppb en 40-50 días por año. En ese momento, la Ciudad de México fue clasificada como la megaciudad más contaminada del mundo (UNEP & WHO, 1992). En las últimas tres décadas la calidad del aire en la ZMVM ha sido objeto de extensos esfuerzos de control de la contaminación. Además, la combinación de población, topografía, meteorología y densidad de las emisiones de múltiples contaminantes de la ZMVM atrajo el interés de la investigación científica, que impulsó varias grandes campañas de medición de campo entre 1995 y 2006, que proporcionaron una gran cantidad de información sobre las emisiones, dispersión y transformación de especies contaminantes emitidas a la atmósfera de la ZMVM y sus impactos urbanos, regionales y hemisféricos (Molina et al., 2019).

La Sección 6.2 describe los programas de gestión de la calidad del aire en la ZMVM como un ejemplo para ilustrar el proceso y la evolución en el diseño e implementación de programas de mejora de la calidad del aire, así como el rol de la ciencia y la tecnología en la gestión. La Sección 6.3 describe los programas de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis. La Sección 6.4 evalúa algunos de los principales programas de la ZMVM y otras entidades de la Megalópolis para mejorar la calidad del aire y menciona los desafíos que involucra.

## **6.2. Programas de gestión de la calidad del aire en la ZMVM**

Durante la década de 1990, el gobierno federal mexicano estableció varias agencias administrativas para abordar cuestiones ambientales, incluida la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM), para coordinar los diversos niveles de gobierno que se ocupan de los problemas ambientales metropolitanos, así como un Fideicomiso Ambiental Metropolitano del Valle de México para apoyar proyectos de la CAM mediante la recepción de dinero recaudado por la aplicación de un recargo fiscal a la gasolina vendida en la ZMVM. La mayoría de los programas

mexicanos de control de la contaminación del aire en las décadas de 1960 y 1970 se centraron en el hollín y el humo emitidos por las grandes instalaciones industriales. A fines de la década de 1980 y principios de la década de 1990, a medida que la información de monitoreo mostraba tendencias crecientes tanto en O<sub>3</sub> como en partículas, las estrategias se centraron en reducir las emisiones de plomo (Pb), SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) y PM, dentro de las fuentes de estos compuestos destacaban el sector del transporte y varias fuentes puntuales grandes, como una refinería dentro de la cuenca (Molina and Molina, 2002).

El primer programa de gestión de la calidad del aire, Programa Integral contra la Contaminación del Aire (PICCA), se implementó en 1990 (DDF, 1990) y seis años más tarde fue reemplazado por el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 o ProAire 1995-2000 en 1996 (DDF, 1996). En 2002, se desarrolló el programa de gestión de la calidad del aire de 10 años ProAire 2002-2010 (CAM, 2002), y en 2010 se promulgó el ProAire 2011-2020, (CAM, 2011). En 2021 se lanzó el nuevo ProAire 2021-2030 (SEDEMA et al., 2021).

### **Colaboración internacional**

Durante el diseño de los programas de gestión de la calidad del aire, la ZMVM se benefició de la experiencia de Los Ángeles en California mediante la adopción de estrategias y tecnologías de control de emisiones, tras el reconocimiento del problema del smog en la década de 1950 por Haagen-Smit (1952). Las acciones incluyeron la introducción de gasolina sin plomo y la eventual eliminación del plomo en la gasolina, el uso de convertidores catalíticos de tres vías, el estricto control de NO<sub>x</sub> para O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> (partículas con diámetros de 2.5 micrómetros o menores), la disponibilidad de combustibles con bajo contenido de azufre y el uso de los filtros de partículas en vehículos diésel introducidos por la Junta de Recursos del Aire de California (<https://ww2.arb.ca.gov/>).

Los organismos e instituciones financieras internacionales sobre el medio ambiente, las instituciones académicas internacionales y nacionales, y los gobiernos extranjeros proporcionaron apoyo financiero y técnico, incluyendo la US EPA, el Banco Mundial, la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA, por sus siglas en inglés), la Asociación de Gobernadores del Oeste (WGA) y la Agencia Alemana de Cooperación Internacional (GIZ, Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit).

### **Papel de la ciencia en la gestión de la calidad del aire en la ZMVM**

El gobierno de México tiene un historial de colaboración con expertos científicos y técnicos nacionales e internacionales. En el año 2000, a solicitud de la autoridad mexicana para apoyar el diseño de un nuevo plan estratégico para los siguientes 10 años, el Programa Integral de Contaminación del Aire Urbana, Regional y Global del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés), realizó una evaluación completa de la calidad del aire en la ZMVM, la cual proporcionó la base científica para el ProAire 2002-2010. Este trabajo fue documentado en el libro de Molina y Molina (2002). Una de las recomendaciones importantes de la evaluación fue la necesidad de obtener datos experimentales más amplios, derivados de mediciones de campo para actualizar y mejorar el inventario de emisiones de la ZMVM e incrementar el conocimiento actual de la química, la dispersión y los procesos de transporte de los contaminantes emitidos a la

atmósfera de la ZMVM. Estas recomendaciones dieron lugar a la campaña de medición de campo MCMA-2002/2003 patrocinada por la CAM (Molina et al. 2007).

Los hallazgos científicos de MCMA-2002/2003 fueron fundamentales en la planificación de la campaña MILAGRO en marzo de 2006 (Molina et al. 2010; Singh et al. 2009). Las campañas MCMA-2002/2003 y MILAGRO-2006 proporcionaron mediciones meteorológicas, de gas y aerosoles, de amplio alcance. De ambas campañas intensivas resultaron más de 200 publicaciones revisadas por pares. La revisión de estas publicaciones mejoró significativamente la comprensión de los procesos meteorológicos y fotoquímicos que participan en la formación de O<sub>3</sub>, de los aerosoles secundarios y otros contaminantes, así como su transporte, transformación y destino. Los hallazgos científicos de los estudios de campo y las implicaciones políticas fueron incorporados por los funcionarios del gobierno mexicano como base científica en el diseño del programa de gestión de la calidad del aire de México, ProAire 2011-2020 (CAM, 2011).

Después de tres décadas de programas integrales de gestión de la calidad del aire basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales y políticas, la ZMVM ha logrado avances significativos hacia la solución de los problemas de contaminación del aire. Las concentraciones atmosféricas de SO<sub>2</sub>, CO y Pb se redujeron drásticamente, y actualmente se encuentran por debajo de los estándares vigentes de calidad del aire. Aunque las concentraciones de O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> también han disminuido significativamente, aún se encuentran en niveles que están lejos de cumplir con los respectivos estándares. Las concentraciones ambientales de O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> se han estancado desde 2010 y amenazan con volver a aumentar (Velasco & Retama, 2017; Zavala et al., 2020).

Previo al desarrollo del nuevo ProAire 2021-2030, la SEDEMA en coordinación con el MCE2 y la Iniciativa Climática de México (ICM), realizaron un taller para evaluar el ProAire 2011-2020 e identificar estrategias para mejorar la calidad del aire de la Ciudad de México (SEDEMA, 2018a). Al taller asistieron expertos nacionales e internacionales en ciencia y política de contaminación del aire. El informe del taller enfatizó la necesidad de implementar medidas adicionales de control que requerirían inversiones sustanciales, particularmente en el sector del transporte, así como decisiones políticas firmes del gobierno federal y las autoridades de los gobiernos del Estado de México y la Ciudad de México.

En el taller quedó claro que la gestión adecuada de la calidad del aire debe incluir el análisis y la evaluación de los siguientes componentes de la cuenca atmosférica: un inventario detallado de las contaminantes provenientes de fuentes de emisiones, la modelación del transporte y la dispersión, el monitoreo atmosférico de los contaminantes y la determinación de los patrones espaciales y temporales de sus concentraciones, la identificación y evaluación de los impactos en la salud a través de estudios de exposición y epidemiológicos. Con base en esta información técnico-científica, se recomendó formular e implementar las regulaciones, normas y políticas públicas para la reducción de emisiones contaminantes, que, junto con una adecuada vigilancia para garantizar su aplicación y cumplimiento, conducirían a una mejora progresiva de la calidad del aire. Un resultado exitoso sería llegar a estrategias de control integradas que sean efectivamente implementadas y aceptadas por el público.

El documento con los resultados del taller (SEDEMA, 2018a) destacó la importancia de fortalecer la colaboración entre los estados de la Megalópolis y las autoridades municipales correspondientes, especialmente en el monitoreo de la calidad del aire y el desarrollo del inventario de emisiones (SEDEMA, 2018). En el taller se confirmó que la ZMVM contaba con la mejor infraestructura instalada y la experiencia técnica en el monitoreo de la calidad del aire en la región, así como con un sólido inventario de emisiones que se actualizaba cada dos años; donde se consideraba beneficioso para las demás entidades de la Megalópolis aprender de la experiencia y las mejores prácticas de SEDEMA. Los hallazgos y las recomendaciones de este taller se incorporaron en el nuevo ProAire 2021-2030 (SEDEMA et al., 2021).

### **ProAire 2021-2030**

El ProAire 2021-2030 de la ZMVM incluye 19 medidas de política pública, 40 acciones y 127 actividades destinadas a prevenir, controlar y reducir las emisiones de fuentes prioritarias, al tiempo que aborda temas transversales que fortalecen la gestión de la calidad del aire, como los procesos de comunicación de riesgos, la participación ciudadana, los arreglos institucionales, el monitoreo, la coordinación metropolitana y la investigación científica (SEDEMA et al., 2021).

La gestión de la calidad del aire se centrará en las siguientes estrategias:

- 1) Aumentar el uso de tecnologías más limpias y fortalecer las regulaciones en el sector del transporte.
- 2) Establecer la gestión de la demanda de viajes para reducir el número de viajes, distancias y tiempos.
- 3) Ampliar las opciones de transporte masivo y de bajas emisiones.
- 4) Promover el desarrollo urbano sostenible.
- 5) Extender el uso de combustibles fósiles más limpios (menor volatilidad y contenido de azufre) para los sectores de transporte e industrial.
- 6) Modificar las regulaciones para reducir las emisiones industriales y aplicar esquemas de vigilancia para controlar las emisiones de las industrias de acero, aluminio, vidrio, petróleo y generación de energía.
- 7) Reducir el uso de gas licuado de petróleo (GLP) y las fugas asociadas en diferentes etapas de la cadena de suministro.
- 8) Limitar el contenido de compuestos orgánicos volátiles (COV) en productos cosméticos y domésticos, así como aquellos destinados a uso industrial y comercial.
- 9) Abordar la emisión de partículas fugitivas del tráfico vial, las actividades agrícolas y la erosión eólica, a través del barrido húmedo y el mantenimiento de carreteras, las buenas prácticas agrícolas y los programas de reforestación, respectivamente.
- 10) Mejorar la gestión de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales.
- 11) Mejorar la capacidad de lucha contra los incendios forestales.
- 12) Limitar la contaminación por SO<sub>2</sub> en el corredor industrial Tula-Vito-Apasco.
- 13) Promover hábitos saludables y conciencia de la calidad del aire entre la población urbana para reducir su exposición y vulnerabilidad a los contaminantes atmosféricos.

14) Mejora del monitoreo de la calidad del aire en el ZMVM.

15) Generar conocimiento científico para ayudar a mejorar la calidad del aire y las políticas de salud pública.

Según SEDEMA, el costo estimado de implementar el ProAire será de aproximadamente \$377.35 mil millones de pesos mexicanos a precios de 2021. Se prevé que la aplicación exitosa del programa reducirá entre un 20% y un 25% de las emisiones de los contaminantes atmosférico para 2030, incluido el 20% de PM<sub>10</sub>, el 35% de PM<sub>2.5</sub>, el 35% de NO<sub>x</sub> y el 20% de COV. Esto resultaría en una posible reducción de 4.3 µg/m<sup>3</sup> en PM<sub>2.5</sub>, por debajo de la concentración promedio anual de 29.2 µg/m<sup>3</sup> de 2018, y podría prevenir 2,302 muertes prematuras, equivalente a una valuación económica estimada de \$2,114 millones de pesos anuales. Se esperaría que la implementación efectiva de las estrategias de mejora de la calidad del aire logre beneficios sustanciales para la salud y la economía.

### **6.3. Gestión de la calidad del aire en la Megalópolis**

Como se describió previamente, a través de la implementación de los programas integrales de mejora de la calidad del aire (ProAire) basados en consideraciones científicas, técnicas, sociales y políticas, las autoridades mexicanas consiguieron avances significativos en la mejora de la calidad del aire de la ZMVM. Se fortalecieron los estándares de calidad del aire y el programa de contingencia ambiental, reconociendo la evidencia científica sobre los efectos en la salud asociados con la exposición a concentraciones cada vez más bajas de contaminantes nocivos. Sin embargo, las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> todavía están por encima de los respectivos estándares de calidad del aire; aún quedan desafíos sustanciales para reducir efectivamente las concentraciones de estos contaminantes.

El crecimiento de la población, la expansión urbana mal planificada, las actividades comerciales e industriales intensivas y la alta motorización del área metropolitana y la región de la Megalópolis circundante han ejercido cambios sustanciales en el uso de suelo y la movilidad en la región, impactando en última instancia al medio ambiente. Las deficiencias en la planificación urbana regional y las diferencias en los marcos administrativos y regulatorios entre las diversas entidades gubernamentales de la Megalópolis contribuyen aún más a la falta de un desarrollo sostenible integrado en la región, exacerbando los impactos sobre la calidad del aire y el medio ambiente en la Megalópolis (INECC, 2015).

En respuesta a los retos ambientales del conglomerado urbano que se desarrolla en el centro del país, al que se designó como Megalópolis, las autoridades de seis entidades (Ciudad de México, Estado de México, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo) en coordinación con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), crearon en 2013 la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) para planificar y ejecutar estrategias de protección, preservación y restauración del equilibrio ecológico en la región megalopolitana (DOF, 2013). La CAM fue reemplazada por la CAME, ampliando el alcance de las actividades para incluir a los seis estados vecinos, a los cuales se integró posteriormente Querétaro. La información sobre las actividades de CAME está disponible en su sitio web (<https://www.gob.mx/comisionambiental>).



Una de las prioridades de la CAME ha sido buscar la armonización y mejora de las políticas públicas ambientales existentes en cada entidad. En este sentido, debido a los episodios de alta concentración de contaminantes atmosféricos que se produjo durante el primer semestre de 2016 en la ZMVM, en agosto de 2017 se introdujo el Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire en la Megalópolis 2017-2030 (SEMARNAT, 2017b). Este programa contiene seis líneas estratégicas y 38 acciones para lograr el objetivo de mejorar la calidad del aire en la región de la Megalópolis, cuya implementación exige la participación comprometida de todos los actores involucrados, incluidos los tres niveles de gobierno (federal, estatal y local), la industria, la academia y la población en general.

Las acciones estratégicas presentadas en el ProAire de la Megalópolis 2017-2030 tenían como objetivo reducir y controlar las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos en la Megalópolis, incluidos los contaminantes precursores del O<sub>3</sub> como NO<sub>x</sub> y COV, así como CO, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), SO<sub>2</sub>, partículas finas y gruesas (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y carbono negro (CN). En la estimación de las reducciones emplearon el año 2015 como la línea base para evaluar los resultados de la implementación de las estrategias para el año 2030.

En los últimos años se registraron varios episodios de altas concentraciones de O<sub>3</sub> en la Ciudad de México y en otras entidades de la Megalópolis. Debido a la no linealidad en los procesos fotoquímicos involucrados en la formación de O<sub>3</sub>, las fuentes de emisión pueden tener contribuciones muy diferentes en la formación de los contaminantes atmosféricos secundarios y es difícil evaluar los impactos de las estrategias de mitigación. Las contribuciones se pueden comprender mejor utilizando modelos validados de calidad del aire que toman en cuenta las diversas condiciones meteorológicas, los procesos químicos en la atmósfera y las distribuciones temporales, espaciales y químicas de las emisiones de los precursores de O<sub>3</sub>. Por lo tanto, los estudios basados en modelos de los procesos físicos y químicos que provocan las altas concentraciones de O<sub>3</sub>, son un paso importante hacia el diseño de estrategias de control de emisiones destinadas a reducir los impactos en la salud de la población.

El LTM Center for Energy and the Environment (LTMCE2) realizó un estudio de modelación para estimar los impactos en las concentraciones de O<sub>3</sub> provocados por la implementación de las estrategias integradas para el control de las emisiones identificadas en el ProAire 2017-2030 para la Megalópolis (LTMCE2, 2017). En este estudio, se seleccionaron tres episodios meteorológicos durante la temporada alta de O<sub>3</sub> (estación seca-cálida) en la Megalópolis. Se diseñó un escenario integrado de reducción de emisiones, que incluyó todas las estrategias de control listadas en el ProAire 2017-2030 para la Megalópolis, empleando las emisiones de línea base obtenidas para fuentes móviles puntuales, de área y en carretera para la Megalópolis y el Estado de Querétaro. Se emplearon los archivos de emisiones listos para el modelo, con el propósito de simular las concentraciones de O<sub>3</sub> en la Megalópolis, tanto para la línea de base como para el escenario integrado de reducción de emisiones de los tres episodios meteorológicos seleccionados, utilizando el modelo de calidad del aire WRF-Chem.

Los resultados sugirieron que las reducciones incluidas en el escenario global de control de emisiones afectaban los niveles de concentración de O<sub>3</sub> con una variación espacial significativa. Se obtuvieron beneficios sustanciales de la reducción de O<sub>3</sub> en las regiones norte y noreste de la Ciudad de México y en las ciudades de Toluca, Cuernavaca, Pachuca y Querétaro, pero impactos

negativos de O<sub>3</sub> en las regiones centro y sur de la Ciudad de México y en las regiones de Puebla y Tula. Estos resultados fueron consistentes para los tres episodios meteorológicos seleccionados. Sin embargo, es importante señalar que la evaluación de los impactos en las concentraciones de contaminantes atmosféricos dependió en gran medida de la exactitud de los inventarios de emisiones. Por consiguiente, en el informe se recomendaba realizar estudios en campo sobre los precursores de O<sub>3</sub>, además de estudios adicionales para evaluar las incertidumbres de los inventarios de emisiones utilizados para estimar los efectos de los contaminantes atmosféricos en la región.

Diez meses después de la implementación del ProAire 2017-2030, la CAME informó sobre la publicación de cinco Normas Oficiales Mexicanas (NOM-016-CRE-2016, NOM-167-SEMARNAT-2017, NOM-044-SEMARNAT-2017, NOM-045-SEMARNAT-2017, NOM-004-ASEA-2017) para regular las emisiones de fuentes móviles en circulación, fomentar la tecnología de motores en vehículos pesados, evitar la evaporación de hidrocarburos en las estaciones de servicio y garantizar el suministro de diésel de ultra bajo azufre en el sector industrial. Además, se reforestaron más de 10,000 hectáreas de ecosistemas prioritarios y se redujeron en un 17% los incendios forestales en la región megalopolitana. Este aporte a la calidad del aire de la región evitó la emisión de 5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (SEMARNAT, 2018).

Sin embargo, todavía hay episodios de alta contaminación en la ZMVM y la Megalópolis. Uno de los eventos más severos se ocurrió el 14 de mayo de 2019. Una serie de incendios forestales en las afueras de la ciudad, combinados con condiciones climáticas de estancamiento llevaron a niveles extremadamente altos de PM<sub>2.5</sub>. La CAME declaró Contingencia Ambiental Extraordinaria. En junio de 2019, la CAME introdujo las siguientes 14 medidas para mejorar la calidad del aire en respuesta al evento de alta contaminación extraordinaria (CAME, 2019).

- 1) Reducción de emisiones en la distribución y uso del GLP.
- 2) Reducción de compuestos orgánicos volátiles en recubrimientos y productos para el hogar.
- 3) Inspección y vigilancia estratégica para el control de emisiones en gasolineras.
- 4) Distribución de gasolina menos volátil en la Megalópolis.
- 5) Mejores prácticas para el manejo y prevención de incendios.
- 6) Control de emisiones y uso de combustibles limpios en el sector industrial.
- 7) Reducción de emisiones por mantenimiento urbano.
- 8) Regulación de la circulación del transporte de mercancías y detección de vehículos ostensiblemente contaminantes.
- 9) Normas de emisiones de vehículos: las nuevas regulaciones estipularán límites de emisiones más estrictos para los automóviles nuevos y proporcionarán incentivos para el uso de vehículos eléctricos e híbridos.
- 10) Regulación de emisiones de motos nuevas en planta.
- 11) Implementación de un nuevo esquema para la concesión de hologramas de verificación de vehículos.
- 12) Promoción de la movilidad sustentable.

- 13) Aumento de la capacidad del transporte público sustentable.
- 14) Desarrollo tecnológico para mejorar la calidad del aire.

Entre las principales medidas se identificaron la reducción en la distribución y uso de GLP, la mejora de la calidad de la gasolina y la supervisión en las estaciones. Las disposiciones contemplaron las mejores prácticas para el manejo y la prevención de incendios con acciones coordinadas entre todos los organismos. En el sector industrial, se propuso un control de las emisiones y el uso de combustibles limpios.

El 6 de mayo de 2022 se declaró otra contingencia ambiental por las altas concentraciones de O<sub>3</sub> en el valle de México, la autoridad gubernamental de la Ciudad de México convocó a una reunión con un grupo de científicos para discutir los recientes episodios de contaminación. Se sugirió que el aumento en el número de contingencias en esta temporada de O<sub>3</sub> probablemente se debía a un sistema de alta presión que se estancó en la región central del país, así como al aumento de las temperaturas debido al cambio climático, una isla de calor y el aumento de la radiación ultravioleta, y las complejas reacciones químicas. Un acuerdo de esta reunión fue que el ICAyCC de la UNAM coordinaría un estudio para investigar el posible aumento en las emisiones de COV que afectan el O<sub>3</sub> y la implementación de medidas a corto plazo, incluido el programa de reforestación, la mitigación de islas de calor y el impacto del uso intensivo de productos de limpieza durante el reciente período de pandemia (La Jornada, 2022, Excelsior Digital, 2022).

La activación de contingencias ambientales atmosféricas no es exclusiva para la ZMVM, también ocurre en las otras entidades de la Megalópolis, por lo que, en el contexto de la coordinación megalopolitana, el INECC realiza el proyecto *Definición de umbrales y diseño del protocolo general de actuación de contingencias ambientales atmosféricas para la megalópolis y evaluación del costo – beneficio de su aplicación en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM)* (INECC, 2023). El proyecto tiene como objetivo desarrollar una guía para la definición de los valores de activación de las diferentes fases de contingencia para los contaminantes criterio O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Si bien el título hace referencia a la ZMVM, en realidad se pretende como un documento con aplicación en la Megalópolis.

Como se ilustra en la Figura 6.1, el proceso de gestión de la calidad del aire es iterativo, dinámico y sensible al cambio. Es fundamental que la CAME continúe desarrollando e implementando estrategias adicionales para mejorar la calidad del aire en la ZMVM y las demás entidades de la Megalópolis, con el apoyo de nueva información científica y técnica.

Tal como lo señala la Estrategia Nacional de Calidad del Aire Visión 2017-2030 (SEMARNAT, 2017a), existe la necesidad de generar datos confiables y fortalecer la investigación científica y tecnológica para apoyar y orientar acciones para mejorar la calidad del aire. La línea estratégica F del ProAire de la Megalópolis 2017-2030 indica que la "mejora de las capacidades de gestión de la calidad del aire incluye la preparación y desarrollo de una agenda de investigación científica y la actualización de las herramientas de gestión de la calidad del aire" (SEMARNAT, 2017b). Sin embargo, a pesar de la importancia de las acciones descritas en ambos documentos, no existen metas específicas, ni plan de trabajo o estrategia de implementación, tampoco los mecanismos para el seguimiento y evaluación. Aunque se han realizado esfuerzos para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en varias áreas urbanas de las entidades, no hay avances documentados en términos

de la investigación científica. Por otra parte, cuando las actividades de investigación son realizadas por las autoridades gubernamentales, los protocolos de medición y los datos generalmente no están disponibles para la comunidad científica, ni los resultados son sometidos a una revisión por pares.

Finalmente, existe una importante disparidad geográfica en el trabajo de investigación, el estudio de la contaminación del aire es escaso o no existe fuera en la Ciudad de México. A pesar de la reciente expansión urbana y el desarrollo más allá de la periferia de la ZMVM, algunos centros urbanos tienen niveles significativos de industrialización o problemas evidentes de contaminación atmosférica, hay pocos especialistas y centros de investigación dedicados a las ciencias atmosféricas y estudios de salud. Como ya se mencionó anteriormente, existe una necesidad urgente de fortalecer la colaboración entre los seis estados de Megalópolis, incluida la investigación científica colaborativa y los estudios de medición de campo. Además, será benéfico para las demás entidades de la Megalópolis aprender de la experiencia y las mejores prácticas de SEDEMA en el monitoreo atmosférico y el desarrollo de inventarios de emisiones.

## **6.4. Evaluación de los principales programas de calidad del aire**

### ***6.4.1. Integración del transporte-uso del suelo-gestión de la calidad del aire en la Megalópolis***

Al igual que en muchos grandes centros urbanos de todo el mundo, el transporte es una fuente importante de contaminación del aire en la ZMVM y en la región de la Megalópolis, pero también es un facilitador crítico de la actividad económica y las interacciones sociales benéficas. Los servicios de transporte son necesarios para el movimiento de bienes y servicios, y mejorar el acceso al trabajo, la educación y otras actividades. A medida que las ciudades crecen en población, área y riqueza, sus sistemas de transporte se vuelven más complejos, con más personas y bienes que viajan mayores distancias a orígenes y destinos más dispersos. Esta complejidad da lugar a limitaciones ambientales, financieras y sociales que a menudo inhiben el desarrollo del sistema de transporte. Además, a medida que las poblaciones aumentan y las actividades se extienden, surgen problemas adicionales de la necesidad de una coordinación multi-institucional, multi-jurisdiccional y multi-gubernamental para la planificación, el desarrollo, las operaciones y la gestión del sistema.

El gobierno de la Ciudad de México continúa fortaleciendo el control de emisiones vehiculares con tecnologías avanzadas y programas de vigilancia, sensores remotos para identificar vehículos de alta emisión o en incumplimiento, el monitoreo de la calidad del combustible tanto para diésel como para gasolina, la mejora del transporte público (Metrobús), el equipamiento de autobuses con nuevas tecnologías diésel, la introducción de taxis híbridos y eléctricos, la mejora de la movilidad a través del programa de bicicletas compartidas (Ecobici) y la mejora de las áreas peatonales. De acuerdo con el inventario de emisiones de 2018 (SEDEMA, 2021), los vehículos son la principal fuente de emisiones contaminantes a la atmósfera con contribuciones de 94.6, 85.8, 43.0, 39.6, 34.5 y 22.2% para CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y COV, respectivamente (véase la Figura 3.1 del Capítulo 3).

Como se señaló en la evaluación exhaustiva del sistema de transporte de la ZMVM por Gakenheimer et al. (2002), el desafío que enfrentan los grandes centros urbanos como la ZMVM es darse cuenta de los beneficios que el transporte puede proporcionar, sin incurrir en los impactos

negativos que también pueden resultar del "círculo vicioso" del transporte urbano, incluida la contaminación del aire, la congestión, los accidentes, contaminación acústica y seguridad. Este dilema se vuelve aún más apremiante en condiciones del rápido crecimiento urbano en el Estado de México y las ciudades cercanas de Puebla, Tlaxcala, Cuernavaca, Toluca y Pachuca, que aumentan significativamente la demanda de viajes.

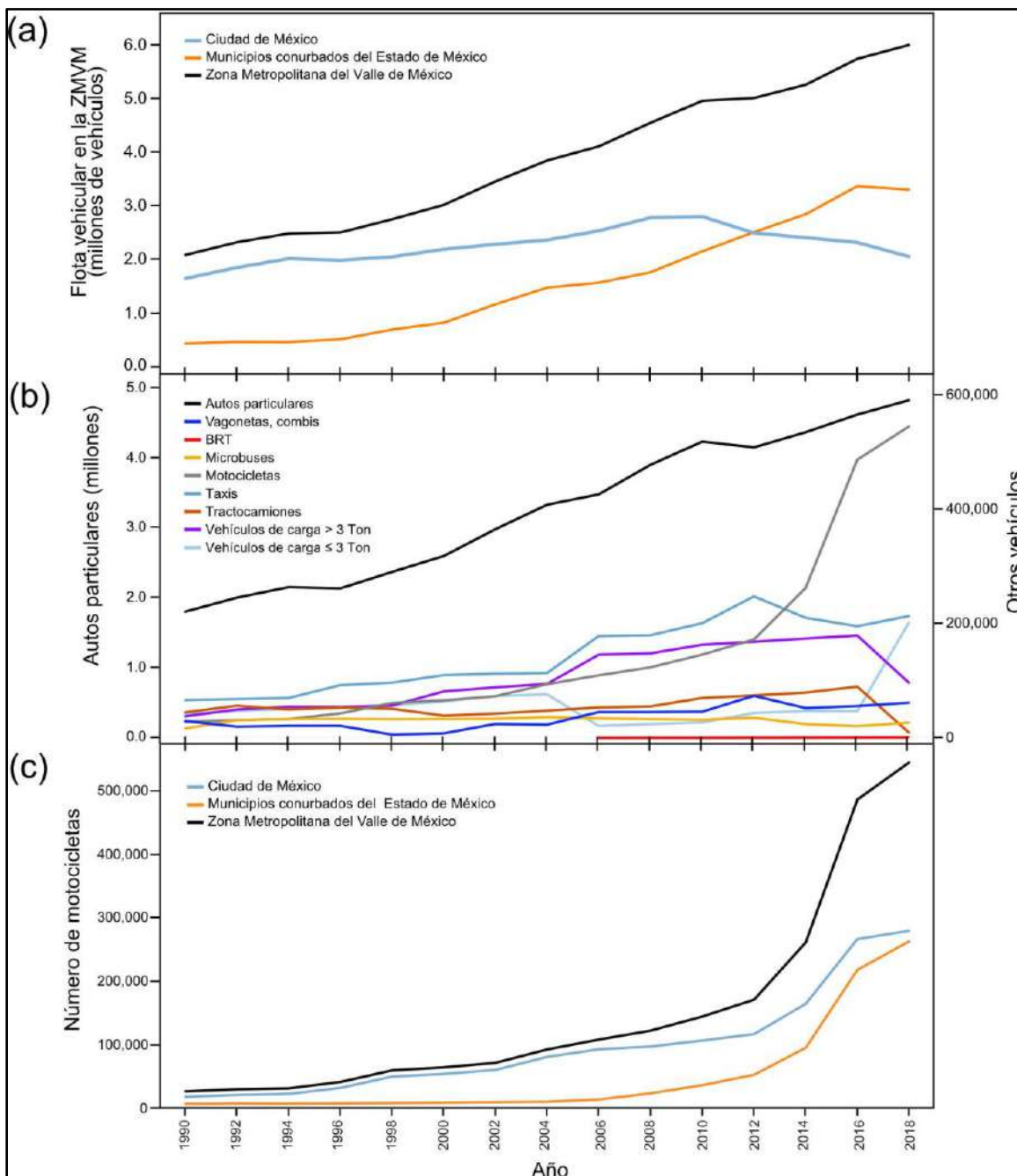
A medida que la población aumenta y las áreas residenciales se descentralizan, los patrones de elección del modo de viaje de pasajeros en la Megalópolis también cambian drásticamente. El número de automóviles privados ha aumentado significativamente, en gran medida porque el sistema de transporte público existente no se ha adaptado adecuadamente a la distribución espacial demográfica cambiante, lo que resulta en nuevos patrones de viaje debido a una planificación urbana estratégica inadecuada, las áreas para vivir, trabajar y otras actividades están dispersas y desconectadas. El resultado es un aumento en el número de viajes desde la periferia hasta el centro urbano, y viceversa, lo que lleva a un empeoramiento de la congestión, un aumento de los riesgos de accidentes y emisiones localizadas de contaminantes tóxicos y gases de efecto invernadero.

Las siguientes subsecciones describen algunos de los factores que contribuyen a las emisiones relacionadas con el transporte y el impacto en la movilidad.

### **Evolución del tamaño y composición de la flota de vehículos**

En 2020, en los siete estados que conforman la Megalópolis la población aumentó 1.3 veces en comparación con 2000, mientras que la flota vehicular (18.8 millones) creció 3.6 veces en el mismo período. Esto implica que, en la Megalópolis el parque vehicular ha crecido diez veces más que la población en las últimas dos décadas, con automóviles, transporte de pasajeros, transporte de mercancías y motocicletas que aumentaron un 256%, 159%, 146% y 2087%, respectivamente (Lomeli-Covarrubias, 2022). Además de la creciente tasa de motorización, los viajeros han pasado de modos de transporte de alta ocupación (por ejemplo, autobuses y Metro) a vehículos de transporte de ocupación media y baja (colectivos) y automóviles privados, como se muestra en la Tabla 6.1.

En la ZMVM, a pesar del fortalecimiento del transporte público y la promoción de la movilidad personal, el parque vehicular continúa con una tasa positiva de crecimiento en toda el área metropolitana, dominada por el vehículo privado (ver Figura 6.2). Como se puede ver en la Figura 6.2a la evolución de la flota vehicular en la ZMVM mantiene una tendencia creciente, determinada principalmente por el aumento sostenido de la flota de uso privado (Figura 6.2b). En los últimos años la tasa de crecimiento en los municipios conurbados del Estado de México ha sido mayor que en la Ciudad de México. Por otra parte, existe una disparidad significativa en la edad de los vehículos, según el inventario de emisiones para 2018 (SEDEMA, 2021), la edad promedio de la flota en el área metropolitana fue de 8.2 años para los vehículos de gasolina y 10.1 años para la flota diésel. La edad promedio del parque vehicular en la Ciudad de México fue de 6.4 y 7.7 años, para los vehículos de gasolina y diésel, respectivamente. Aunque la mayoría de los vehículos cuentan con alguna tecnología avanzada para reducir las emisiones, los beneficios en su control podrían ser superados por el crecimiento de la flota de vehículos, la disminución de la velocidad del tráfico y el aumento de los tiempos y distancias de viaje.



**Figura 6.2.** (a) Evolución de la flota vehicular en la ZMVM desagregada por entidad federativa; (b) composición de la flota vehicular de la ZMVM; y (c) crecimiento de la flota de motocicletas en la ZMVM desagregado por entidad federativa (elaboración propia a partir de los datos de los inventarios de emisiones de la SEDEMA de 2018).

Es importante evaluar la tasa a la que los vehículos más antiguos se eliminan de la flota de la ZMVM. Según un estudio realizado por Zavala et al. (2009) sobre los impactos de los cambios en

las características de la flota vehicular a gasolina entre 2000 y 2006 en las tendencias de concentración de los contaminantes del aire, observaron que a pesar del aumento en el tamaño de la flota vehicular durante este período, las concentraciones ambientales de CO y NO<sub>x</sub> durante la madrugada no aumentó en consecuencia, probablemente debido a las bajas tasas de eliminación reportadas de vehículos más antiguos, que no tienen tecnologías de control de emisiones, y en parte debido a las emisiones más bajas de los vehículos de gasolina nuevos. Este estudio sugiere que una estrategia de mejora de la calidad del aire basada en emisiones que apunte a grandes reducciones de las emisiones de fuentes móviles debería estar dirigida a un aumento significativo de la tasa de eliminación de vehículos más antiguos altamente contaminantes. Esto es aún más importante para las flotas de vehículos diésel en carretera y fuera de carretera (Zavala et al., 2017a, 2017b). Además de fortalecer las normas de emisiones, es importante proporcionar incentivos para vehículos más limpios y eficientes.

A medida que los pasajeros buscan opciones de transporte alternativo para compensar los problemas de congestión, la flota de motocicletas en México ha aumentado significativamente en los últimos años (ver Figura 6.2c). Las motocicletas en México tienen motores de 4 tiempos y pueden ser proporcionalmente altas emisoras de tóxicos, CO, COV, partículas y otros contaminantes, ya que no tienen tecnologías instaladas para el postratamiento de las emisiones. Más importante aún, actualmente no existe una infraestructura de inspección y mantenimiento para verificar las emisiones de las motocicletas en México.

El aumento en el número de motocicletas en circulación, no solo como medio de transporte sino también para la prestación de servicios de mensajería y entrega de mercancías, fue alentado durante la pandemia de COVID-19. De acuerdo con los datos del INEGI, en 2020 las motocicletas representaron el 20% de los vehículos matriculados en la ciudad<sup>1</sup>. Como se discute a continuación (bajo "Hoy No Circula") la CAME propone regulaciones centradas en motocicletas nuevas, incluida la promoción del uso de motocicletas eléctricas.

### **Tecnología del vehículo y calidad del combustible**

La modernización de la flota vehicular en la ZMVM inició en la década de 1990 con la introducción de convertidores catalíticos en vehículos nuevos, la distribución de gasolina sin plomo y la implementación de límites de emisión más estrictos. Además, la gasolina se reformuló para limitar el contenido de compuestos reactivos (olefinas y aromáticos), para reducir las emisiones de evaporación (reducción de la presión de vapor) y para permitir un contenido mínimo de oxígeno (requerimiento de oxigenación), con el objetivo de reducir la formación potencial de O<sub>3</sub> y otros oxidantes, así como la emisión de tóxicos del aire, como el benceno.

Se han realizado inversiones sustanciales en la modernización de la refinería para reducir el contenido de azufre de la gasolina y el diésel distribuidos en la ZMVM. Desde hace algunos años, estos combustibles cumplen con estándares que son comparables con combustibles de calidad urbana de bajas emisiones en los Estados Unidos y Europa con un contenido máximo de azufre permitido de 20 ppm (p/p) para gasolina y 15 ppm (p/p) para diésel. Sin embargo, excepto en las

---

<sup>1</sup> INEGI-Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (s.f.). Vehículos de motor registrados en circulación, <https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp>, consultado el 22 de julio de 2022.

principales áreas metropolitanas (ZMVM, Monterrey, Guadalajara), los principales corredores industriales y las regiones fronterizas México-Estados Unidos, el resto del país se utilizaba diésel con alto contenido de azufre con un máximo permitido de 500 ppm (NOM-016-CRE-2016) (DOF 2016). Según la NOM, el diésel de ultra bajo azufre debe distribuirse en todo el país desde 2019. Un documento elaborado por el INECC (2019) indicó que este tipo de combustible ya se comercializaba en la mayor parte del país en 2019 incluyendo los estados CAME, sin embargo, hasta este momento no existe una confirmación oficial.

En un esfuerzo por reducir las emisiones de COV en la Megalópolis, de marzo a agosto de 2020 y también para el mismo periodo de 2021, Petróleos Mexicanos–Transformación Industrial (PEMEX-TRI) cambió la distribución de gasolina en las terminales de almacenamiento y distribución ubicadas en Puebla, Puebla; Tlaxcala, Tlaxcala; Cuernavaca y Cuautla, Morelos; Toluca y San Juan Ixhuatepec, Estado de México y Pachuca, Hidalgo; para cumplir con el suministro de gasolina con una presión de vapor Reid (RVP) de un máximo de 62 kPa, correspondiente a la clase de volatilidad A (CAME, 2022a). Esta medida se sumó a la vigente en el ZMVM donde se distribuye a lo largo del año gasolina con una clase de volatilidad AA (RVP de un máximo de 54 kPa).

Actualmente, la CAME promueve la *movilidad eléctrica* en el uso de motocicletas, automóviles, furgonetas, autobuses, y los vehículos de transporte de pasajeros y carga, que podría mejorar la calidad del aire en la Megalópolis. Sin embargo, el desafío es el costo inicial de adquisición de los vehículos eléctricos (CAME, 2022b). La Ciudad de México cuenta con una flota de 493 vehículos eléctricos, de los cuales 483 son trolebuses y 10 buses articulados (Metrobús) (E-BUS RADAR, s.f.).

### **Planes de movilidad sostenible en lugares de trabajo y escuelas**

De acuerdo con la más reciente Encuesta Origen-Destino en la ZMVM (INEGI, 2017), de los 34.56 millones de viajes realizados en un día laborable por la población de 6 años y más, 44% de los viajes son por trabajo, 24% por estudio, 13% para dejar y recoger, y 13% por compras. La comparación de la distribución de los viajes por propósito de 2007 y 2017 muestra un patrón similar, con un ligero aumento en la proporción de viajes realizados por trabajo. La Tabla 6.1 muestra la modalidad de estos viajes para la ZMVM, Ciudad de México (CDMX) y los 59 municipios conurbados del Estado de México y Tizayuca, Hidalgo.

Los resultados de la encuesta origen-destino de la ZMVM muestran que la mayoría de los viajes realizados se relacionaron con el trabajo y con el estudio. Además, de los 15.57 millones de viajes en transporte público en la ZMVM, en tres de cada cuatro se utilizó Colectivo; el Metro ocupó el segundo lugar en frecuencia de uso. En cuanto al transporte privado, el uso de la motocicleta aumentó exponencialmente en los últimos años a medida que los viajeros buscaron alternativas de transporte para aumentar la movilidad. En general, debe fomentarse el uso de modos de mayor ocupación. Es particularmente importante promover el uso del transporte público como sustituto de los viajes privados en automóvil. Para atraer a los pasajeros, el transporte público debe mejorarse.



**Tabla 6.1.** Viajes realizados en un día laborable por la población, por tipo y modo de transporte utilizado en al menos uno de sus tramos según la zona geográfica de origen del viaje.

	<b>ZMVM: 34.56 millones de viajes</b>		<b>CDMX: 7.30 millones de viajes</b>		<b>Municipios conurbados: 17.09 millones de viajes</b>	
	Millones de viajes	%	Millones de viajes	%	Millones de viajes	%
<b>Caminando</b>	11.15	32.23%	4.50	26.0%	6.62	38.74%
<b>Transporte público</b>	15.57	45.00%	8.62	49.8%	6.88	40.26%
<b>Transporte privado</b>	7.29	21.07%	4.06	23.5%	3.17	18.55%
<b>Bicicleta</b>	0.72	2.08%	0.24	1.39%	0.48	2.81%
<b>Otros</b>	0.04	0.12%	0.02	0.12%	0.02	0.12%
<b>Transporte público: 15.57 millones de viajes</b>						
	<b>ZMVM</b>		<b>CDMX</b>		<b>Municipios conurbados</b>	
<b>Microbús (colectivos)</b>	74.1%		67.8%		82.1%	
<b>Metro</b>	28.7%		38.2%		16.8%	
<b>Taxi</b>	10.5%		11.2%		9.7%	
<b>Metrobús o Mexibús</b>	7.1%		8.8%		5.1%	
<b>Autobús suburbano</b>	5.8%		5.3%		6.3%	
<b>Autobús RTP o M1</b>	2.6%		4.0%		0.9%	
<b>Mototaxi</b>	1.7%		1.1%		2.6%	
<b>Otros</b>	3.5%		4.1%		2.7%	
<b>Transporte privado 7.29 millones de viajes</b>						
	<b>ZMVM</b>		<b>CDMX</b>		<b>Municipios conurbados</b>	
<b>Auto o camión</b>	90.6%		92.7%		87.9%	
<b>Motocicleta</b>	5.1%		3.7%		6.9%	
<b>Transporte de personal</b>	4.4%		3.6%		5.3%	

Fuente: INEGI. Encuesta Origen -Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2017 (consultado en octubre de 2022).

La CAME, en conjunto con el Centro Interdisciplinario de Investigación y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) y el Programa de Estudios Avanzados en Desarrollo Sustentable (LEAD-México) de El Colegio de México (COLMEX) organizaron el seminario virtual *Buenas prácticas para planes de movilidad sustentable en lugares de trabajo y escuelas*, con el objetivo de compartir experiencias sobre cómo reducir los viajes en automóvil al trabajo y centros escolares. La discusión destacó estrategias

como la movilidad activa, los planes de movilidad sostenible en las organizaciones, el uso del transporte público y de personal, así como el teletrabajo (CAME, 2022c).

Durante el confinamiento por COVID-19, muchas actividades, como las laborales y educativas, se realizaron a través de medios electrónicos, otras utilizaron el acuerdo de trabajo híbrido flexible (presencial y remoto a través de videoconferencias, correo electrónico y telecomunicaciones). Se observó una disminución de hasta el 70% en el tránsito vehicular en comparación con los niveles prepandémicos en la ZMVM (Figura 4.13 del Capítulo 4). La reducción de la motorización y otras actividades dieron lugar a la reducción en las concentraciones de algunos contaminantes criterios registrados en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, así como de CO<sub>2</sub>.

El confinamiento pandémico ofreció una oportunidad única para experimentar el teletrabajo a mayor escala. De acuerdo con la Secretaría de Movilidad de la CDMX, como parte de la gestión de la demanda de viajes en la CDMX, alrededor del 35% de la ocupación laboral es susceptible de realizarse a distancia y los sectores más compatibles con el teletrabajo son: servicios profesionales, técnicos y científicos; personal administrativo empresarial y corporativo; financiero y educativo. Los horarios flexibles pueden aumentar los beneficios sociales del teletrabajo.

Para mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte y reducir sus emisiones, es necesaria una coordinación regional que integre la red de transporte, la planificación urbana, la movilidad urbana y la gestión de la calidad del aire. Se necesita la cooperación entre las agencias federales y locales responsables del medio ambiente, el transporte, la salud, el desarrollo urbano y las obras públicas, así como la participación pública, lo que lleva a una menor dependencia de vehículos individuales a través de una mejor provisión de transporte público y medidas que permitan realizar más viajes a pie o en bicicleta. Además, es fundamental desarrollar políticas e infraestructura de transporte público metropolitano que vinculen rutas suficientes y eficientes con los municipios aledaños a la Ciudad de México, de donde se origina un número significativo de viajes de larga distancia.

### **Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO)**

El Programa de Verificación Vehicular Obligatoria (PVVO) se aplicó por primera vez en la ZMVM a partir de 1988, con el objetivo de reducir las emisiones de los vehículos mediante la inspección obligatoria del desempeño ambiental de la flota y garantizar su mantenimiento adecuado. El programa exige que las emisiones de cada vehículo que circula en la ZMVM deben inspeccionarse cada seis meses (Gakenheimer et al., 2002; SEDEMA, 2022a). El programa se ha combinado con el programa "Hoy No Circula" (ver más abajo): dependiendo del año del modelo y los niveles de emisiones, los vehículos pueden obtener diferentes exenciones, fomentando así la renovación de la flota. El PVVO adoptó la prueba de emisiones del modo de simulación de aceleración (ASM, siglas en inglés) e incluyó mediciones del tubo de escape de las emisiones de NO<sub>x</sub>. A partir de 2011, se implementó una importante actualización tecnológica para mejorar el rendimiento de las pruebas y minimizar las posibilidades de manipulación de los resultados por parte de los técnicos. A partir de 2016, se incluyó la prueba de emisiones OBD (siglas en inglés para diagnóstico a bordo) como parte de las pruebas para vehículos nuevos (CDMX, 2019).

Los límites máximos de emisiones permisibles se han reforzado varias veces e incorporando nuevos instrumentos de prueba para mejorar las capacidades de medición, como dinamómetros para calibración dinámica y equipos para la medición de emisiones contaminantes, así como el

aprovechamiento del sistema de diagnóstico a bordo. La NOM-167-SEMARNAT-2017, “Que establece los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para los vehículos automotores que circulan en las entidades federativas Ciudad de México, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala; los métodos de prueba para la evaluación de dichos límites y las especificaciones de tecnologías de la información y hologramas” (DOF, 2017), y que es la referencia para el PVVO, se encuentra actualmente en proceso de revisión. Se espera que en actualizaciones futuras se incluyan cambios en las especificaciones para vehículos propulsados por combustibles derivados del petróleo, combustibles alternativos y vehículos híbridos.

### **Hoy No Circula**

El programa *Hoy No Circula* (HNC) tiene sus raíces en 1987 en una iniciativa ciudadana de participación voluntaria para evitar el uso del automóvil una vez por semana (ver Apéndice B de Molina y Molina, 2002). Se hizo obligatorio en 1989 como parte de un programa de emergencia a corto plazo para los meses de invierno. Según el último dígito de la matrícula, alrededor del 20% de todos los vehículos privados tenía prohibido circular un día laborable por semana entre las 05:00 y las 22:00, con el objetivo de reducir la contaminación, el tráfico vehicular y el consumo de combustible. El HNC se convirtió en permanente en 1990 y se vinculó al PVVO. En 1991, los taxis y los vehículos de transporte público se incluyeron en el programa HNC. En 1992, los vehículos que utilizan gas natural comprimido (GNC) o GLP fueron excluidos de las restricciones de circulación (Molina et al., 2019).

Una consecuencia no esperada de la obligatoriedad del HNC fue que algunas familias adquirieron un vehículo adicional, generalmente más antiguo, lo que incrementó la flota vehicular durante los primeros años del programa. La adquisición de otro vehículo y sus características dependía de la situación económica familiar. A pesar de esto, se observó una reducción dramática en la contaminación relacionada con el tráfico en los años siguientes promovida por los controles tecnológicos de las emisiones de escape y la mejora del mantenimiento de los vehículos.

Para lograr que el programa HNC sea más eficiente, se han realizado modificaciones significativas a la restricción de circulación y las políticas relacionadas. En 1997, se utilizó un código adhesivo ("holograma") para identificar el nivel de emisiones utilizando el número "0" para los vehículos de bajas emisiones, y "1" y "2" para emisores altos. Los vehículos equipados con convertidor catalítico de tres vías que cumplían con estándares de emisiones más estrictos fueron reconocidos con una etiqueta "Cero" ("0") y quedaron exentos de la prohibición de conducir. En 1999, los vehículos nuevos que cumplían con límites de emisiones aún más estrictos recibieron un holograma de "Doble Cero" ("00"), eximiéndolos de las restricciones de conducción y las inspecciones de emisiones durante los primeros dos años. Los vehículos identificados con un holograma "2" se incluyeron en la prohibición de conducir un día a la semana durante los días laborables y restricciones adicionales durante la alerta de contingencia. Una consecuencia natural en estas acciones fue la renovación gradual de la flota vehicular, con impactos positivos en la calidad del aire a pesar del crecimiento vehicular.

El programa HNC ha sufrido más cambios en los últimos años, generalmente hacia el aumento de las restricciones de circulación para vehículos más antiguos y contaminantes durante los días laborables y los sábados. Durante 2007, el holograma "1" fue eliminado del programa y en 2008

se prohibió la circulación de vehículos no registrados dentro de la ZMVM entre las 05:00 y las 11:00. En 2014, los vehículos eléctricos e híbridos recibieron el holograma "0", eximiéndolos de cualquier restricción de conducción. El holograma "1" se reanudó, pero se prohibió que los vehículos circularan un día laborable por semana y dos sábados por mes, mientras que aquellos con el holograma "2" tenían prohibido circular un día laborable por semana y durante todos los sábados. Recientemente, los vehículos no registrados en las entidades de la Megalópolis no solo tienen restricciones de circulación matutinas, sino que están prohibidos un día laborable por semana y un sábado por mes (Molina et al., 2019).

En julio de 2015, hubo una polémica decisión de la Suprema Corte de Justicia de México que retiraba el requisito de antigüedad del vehículo para obtener el holograma "0" y eximía a cualquier vehículo de las restricciones de circulación si cumplía con el límite de emisiones. Una consecuencia inmediata de esta decisión judicial fue el aumento en el número de vehículos en circulación, lo que provocó un aumento de las emisiones móviles (Velasco and Retama, 2017). En 2016, después de un episodio extremo de O<sub>3</sub> durante marzo, las autoridades ambientales implementaron cambios en el programa y ordenaron la instalación de un sistema de diagnóstico a bordo (OBD II) además de las emisiones de escape y las pruebas de inspección visual. La falta de OBD II en los vehículos más antiguos les impidió cumplir con los nuevos requisitos para el holograma "0", revirtiendo en cierta medida el impacto de la decisión judicial anterior sobre los requisitos de antigüedad del vehículo. En abril de 2016, el HNC se modificó temporalmente en respuesta a los episodios de O<sub>3</sub> ese año: además de las restricciones regulares, se prohibió a todos los vehículos circular un día laborable por semana y un sábado por mes durante la Fase I de Contingencia. A partir de junio de 2016, la verificación de OBD II se convirtió en parte de las pruebas regulares de la PVVO.

En marzo de 2019, la CAME anunció algunos cambios en el programa (CAME, 2019). En 2020, todos los vehículos eléctricos e híbridos quedaron exentos de las restricciones de conducción. El holograma "00" se concedió dos veces a los vehículos nuevos con un rendimiento (expresado en términos del número de kilómetros recorridos por litro de gasolina consumido, km L<sup>-1</sup>) igual o superior a 16 km L<sup>-1</sup> y una vez a los vehículos nuevos con un rendimiento igual o superior a 13.5 km L<sup>-1</sup> e inferior a 16 km L<sup>-1</sup>. El holograma "0" se otorgó a los vehículos que cumplieron con el OBD II, las emisiones de escape y las pruebas de inspección visual. Se encuentra en elaboración un proyecto de norma para establecer límites máximos permisibles para la emisión de contaminantes a la atmósfera procedentes del escape de motocicletas equipadas con motor de combustión.

En conclusión, el programa HNC ha evolucionado a lo largo de los años con un cambio importante en el objetivo principal, de la prohibición de circulación a la iniciativa de renovación de la flota de vehículos al acoplarse con el Programa PVVO y proporcionar fuertes incentivos. La retirada de la circulación de los vehículos más antiguos y contaminantes debería contribuir a reducir las emisiones de los vehículos. Sin embargo, a pesar del relativo éxito de ambos programas (HNC y PVVO) durante los años previos, ante el aumento en el número de vehículos en la Megalópolis y específicamente en la ZMVM, podría haber una atenuación gradual de los beneficios. Por otro lado, el programa no está exento de otros imponderables como las prácticas fraudulentas, la judicialización de algunas acciones y los nuevos desafíos tecnológicos (Ugalde, 2020). Se sabe que, a pesar de los avances en los sistemas de verificación vehicular y vigilancia en centros de

verificación, persisten problemas de corrupción en el otorgamiento de hologramas (Oliva, 2015), donde la sofisticación en las prácticas fraudulentas se mueve a la par de las innovaciones tecnológicas. Lo anterior obliga a las autoridades ambientales a mantener una revisión permanente del programa, incorporando continuamente tecnologías, instrumentos, modalidades, sistemas de monitoreo y soluciones innovadoras, lo anterior para mantener la vigencia y efectividad del programa. Sin embargo, la implementación y estandarización de nuevas y mejores prácticas a nivel de Megalópolis presentan desafíos adicionales debido a la disparidad en las capacidades económicas y técnicas de las diferentes entidades. Actualmente, el Centro Mario Molina (CMM) con el apoyo del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) desarrolla el proyecto “Evaluación Integral a los PVVO Federal y Local de la Megalópolis” el cual tiene como metas (1) evaluar las bases de datos del PVVO; (2) evaluar el equipo, hardware y software empleados en los centros de verificación; (3) la evaluación técnica mediante tecnologías de los equipos a bordo; (4) evaluación del PVVO mediante tecnologías de percepción remota; y (5) evaluación de la aplicación de la NOM-167-SEMARNAT-2017. Los resultados de este estudio estarán disponibles en el segundo semestre de 2023 (CAME, 2022a).

### **Combustibles alternativos: gas natural comprimido (GNC) y gas licuado de petróleo (GLP)**

En la década de 1990 las autoridades ambientales alentaron la conversión de vehículos de uso intensivo a GLP con equipos certificados. También promovieron el uso de GNC mediante la introducción de vehículos construidos para funcionar con gas natural. Para fomentar el uso de combustibles alternativos, los vehículos que consumen GLP o GNC se exentaron del programa HNC. Posteriormente, el gobierno revisó el cumplimiento de los lineamientos técnicos y administrativos para vehículos convertidos a GLP o GNC, para asignarles un holograma "0", permitiéndoles circular todos los días de la semana. Más recientemente, el PVVO definió límites para asignar los hologramas "0", "1" y "2" a los vehículos que utilizan GLP o GNC. Una cuestión importante relacionada con el uso de GNC y GLP es el potencial de aumento de las emisiones fugitivas de dichos vehículos. Actualmente, menos del 0.6% de la flota vehicular funciona con GLP o GNC.

#### ***6.4.2. Emisiones de fuentes domésticas e informales***

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles provenientes de fuentes informales (por ejemplo, vendedores de comida callejera, pintura de autopartes y talleres mecánicos al aire libre) deben caracterizarse mejor. Los esfuerzos para reducir las emisiones de COV de los sectores del transporte y de la gran industria, han desplazado la contribución relativa de estas fuentes de emisión a las cargas atmosféricas de COV en las zonas urbanas, aumentando la contribución relativa de las emisiones de COV procedentes de fuentes de área. Por lo tanto, para continuar con la mejora de la calidad del aire, los esfuerzos regulatorios y los cambios tecnológicos deben incluir estrategias de control para reducir los compuestos clave de COV asociados a las fuentes de área formal e informal, y tener una mejor comprensión de la contribución de los COV de los productos de consumo en la química atmosférica.

Estudios recientes han encontrado que las fugas en los sistemas de almacenamiento y distribución de GLP y gas natural contribuyen a las altas concentraciones de metano ( $\text{CH}_4$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) y butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) en la atmósfera de la Ciudad de México (Velasco et al., 2007; Jaimes-Palomera et al., 2016). La evidencia científica más reciente indica que los hidrocarburos

asociados a las emisiones de GLP (propano y butano) son los más abundantes en la atmósfera, y a pesar de tener baja reactividad, debido a su abundancia juegan un papel importante en la producción de O<sub>3</sub> (Zavala et al, 2020). Los sectores residenciales, comercial, de servicios e industrial son los principales consumidores de ambos combustibles. Las estimaciones sugieren que el 57% del GLP en la ZMVM se consume en el sector residencial para cocinar y calentar agua, mientras que más del 93% del gas natural es consumido por el sector industrial (SEDEMA 2021). Por lo tanto, es importante establecer programas de inspección y mantenimiento para instalaciones industriales, comerciales y domésticas. Como parte de los programas de calidad del aire y acción climática, el gobierno de la Ciudad de México está fomentando el uso de calentadores solares para reducir la dependencia del GLP (SEDEMA, 2022b).

### ***6.4.3. Reducción de emisiones en industrias y servicios***

En la ZMVM hay más de 77,000 establecimientos industriales de los cuales 1925 están sujetos a regulación ambiental, ya sea local o federal. El consumo de gas natural proporciona la mayor parte de la energía requerida por la planta industrial, con un consumo anual de  $4.6 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. En términos generales, la industria tiene una contribución menor a las emisiones de los contaminantes criterio, con la excepción del SO<sub>2</sub>, donde contribuyen con alrededor del 33% de las emisiones totales (SEDEMA 2021). Actualmente, las regulaciones para controlar las emisiones están bien establecidas para las grandes industrias, no ocurre así para las medianas, pequeñas y microindustrias.

La sustitución parcial de combustóleo por gas natural en las dos centrales eléctricas de la Ciudad de México y el uso de diésel con bajo contenido de azufre en las principales industrias alrededor de la ZMVM, han tenido éxito en la reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub>, así como en las de partículas y sus precursores. Sin embargo, el gran corredor industrial Tula-Tepeji, ubicado a unos 70 km al noroeste del centro de la Ciudad de México, continua como una de las principales fuentes de SO<sub>2</sub> y sulfato en partículas para la ZMVM. Las autoridades ambientales consideran limitar la emisión de SO<sub>2</sub> de esta región como una meta importante del ProAire 2021-2030. Como se señaló en la Sección 4.3.5.1 del Capítulo 4, la CAME ha patrocinado un estudio de medición a corto plazo coordinado por INECC; sin embargo, al momento de la preparación de este documento los resultados no se encontraban disponibles (INECC, 2021).

El establecimiento de los permisos ambientales para las industrias de jurisdicción local (Licencia Ambiental Única, LAU) y para las instalaciones de jurisdicción federal (Cédula de Operación Anual, COA), es una medida importante para la gestión ambiental de las industrias. Sin embargo, el inventario de emisiones muestra que las industrias de jurisdicción local se mantienen como grandes emisoras de COV-NM (compuestos orgánicos volátiles-no metano), mientras que las industrias de jurisdicción federal son grandes emisoras de PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Algunos de los COV-NM emitidos por el sector industrial son altamente tóxicos y reactivos. Además, muchas industrias no están incluidas en el inventario de emisiones de la ZMVM porque no están reguladas y no tienen requisitos de información de emisiones. También hay confusión en la clasificación de fuentes industriales pequeñas pero que son abundantes, ya que algunos talleres se clasifican como fuentes de área.

Actualmente, los gobiernos de las entidades están trabajando en la construcción de acciones dirigidas a reducir las emisiones de la industria de jurisdicción local. En el caso de la Ciudad de México, la SEDEMA preparó una propuesta de acciones para reducir las emisiones de PM, COV y NO<sub>x</sub> a través de programas de autorregulación.

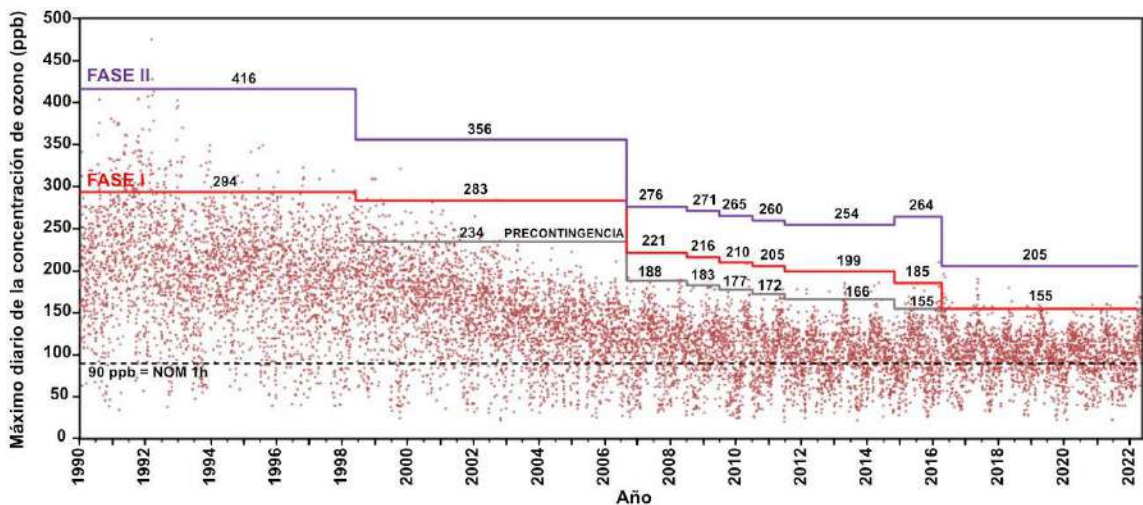
#### **6.4.4. El Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas**

El 29 de mayo de 2019 entró en vigor el *Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas* (PPRECAA) para su aplicación en la Ciudad de México y en los 59 municipios del Estado de México que forman parte de la ZMVM (Diario Oficial de la Ciudad de México, 2019). Este programa reemplazó al *Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas* (PCAA) en funcionamiento desde 1986.

El PCAA integraba un conjunto de medidas de aplicación de emergencia en caso de un episodio de contaminación severa y tenía dos objetivos fundamentales: (1) alertar al público sobre los niveles de riesgo de contaminación del aire, y (2) aplicar acciones para aliviar los niveles de contaminación. Su activación ocurría cuando las concentraciones de O<sub>3</sub> o PM<sub>10</sub> en el aire ambiente superaban los umbrales establecidos por las autoridades ambientales. El PCAA utilizaba datos de las mediciones realizadas por la RAMA para el promedio horario de O<sub>3</sub>, el promedio móvil de 24 horas de PM<sub>10</sub>, así como el pronóstico del tiempo. Los valores de activación se actualizaban periódicamente en acuerdos entre las autoridades ambientales de los gobiernos federal y local involucrados en la CAM.

El PCAA inició en 1986 con dos fases de activación, Fase I y Fase II. La Fase II correspondía a una situación crítica de emergencia ambiental donde la salud de toda la población se encontraba comprometida. El umbral de activación de la Fase I era mayor que el valor de la norma vigente, pero significativamente menor que el valor de activación de la Fase II. En 1996, se incluyó una Fase de Precontingencia que se activaba a niveles inferiores a la Fase I y se consideraba como una etapa de alerta preventiva que tenía el objetivo principal de informar y motivar a la acción voluntaria para evitar el agravamiento de la calidad del aire. Desde 1986, los umbrales de activación y las acciones de control de las Fases I y II se han actualizado periódicamente, adaptándolos a los avances de la gestión o como una respuesta a alguna situación extraordinaria de contaminación, principalmente para aliviar la presión social, como ocurrió en 2016 después de un episodio de contaminación grave por O<sub>3</sub> o como el caso de mayo de 2019 mencionado anteriormente (véase la Figura 6.3).

El PPRECAA mantuvo las Fases I y II pero se actualizaron los umbrales de activación, se eliminó la Fase de Precontingencia sustituyéndola por la Fase Preventiva que se activa cuando el pronóstico de calidad del aire indica una probabilidad superior al 70% de alcanzar una concentración de O<sub>3</sub> >140 puntos (>143 ppb) en el índice de calidad del aire para el día siguiente o cuando los niveles de PM<sub>10</sub> o PM<sub>2.5</sub> superan los 135 puntos (>172 o >81 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente) en el índice para ese día. Con la inclusión de PM<sub>2.5</sub>, el programa implementa un nuevo protocolo para la reducción de emisiones de este contaminante y lo incluye en la Fase Combinada que en el PCAA solo consideraba al O<sub>3</sub> y las PM<sub>10</sub>.



**Figura 6.3.** Concentraciones máximas diarias de ozono (1990-2022) que ilustran los cambios en el umbral utilizado para desencadenar la contingencia ambiental (elaboración propia con datos de la Dirección de Monitoreo de la Calidad del Aire de la SEDEMA).

Al igual que el PCAA, el PPRECAA establece los mecanismos de coordinación entre las autoridades de los gobiernos federal, de la Ciudad de México y el Estado de México, así como las acciones a implementar por las autoridades correspondientes, titulares de industrias, empresas, servicios y ciudadanos en general, con el propósito de prevenir y controlar las emisiones de contaminantes atmosféricos y reducir los efectos adversos en la salud de la población. Al igual que el PCAA, este programa se activa con los insumos proporcionados por la RAMA, que incluyen datos de calidad del aire para O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, así como pronósticos meteorológicos y calidad del aire. Durante un episodio de contaminación, la CAME es el organismo responsable de activar el PPRECAA.

Aunque incluye una fase preventiva basada en la previsión numérica, el PPRECAA continúa como un programa correctivo para mitigar los riesgos en caso de un episodio de contaminación, de manera similar a como ocurría con el PCAA. Dado que las acciones de mitigación se aplican después de que ocurre el evento, es ineficaz para reducir los niveles de contaminación que desencadenaron la contingencia. Los impactos y beneficios de la alerta de contingencia son efectivos al día siguiente, al reducir la carga de emisiones a la atmósfera, sin embargo, su efectividad podría ser mínima cuando las condiciones meteorológicas son favorables para la actividad fotoquímica y adversas para la dispersión de la contaminación. La Fase Preventiva, que podría tener un impacto precautorio, rara vez se aplica aun cuando se presenten las condiciones para ello.

Hasta ahora no se ha evaluado científicamente el impacto del PCAA, y ahora el PPRECAA, en la mitigación de los niveles de contaminación y la protección de la salud durante los episodios de contaminación, pero es un hecho que el PPRECAA tiene una consecuencia positiva inmediata al mantener un sentido de urgencia entre la población frente a los riesgos para la salud por la contaminación atmosférica. La aplicación de las Fases I o II del PPRECAA tiene impactos en la



actividad económica y productiva; por lo tanto, ante la posible incertidumbre en su desempeño, es recomendable evaluar su efectividad y realizar un análisis de costo-beneficio.

La eficacia de los sistemas de pronóstico para anticipar un evento crítico de contaminación es un aspecto que requiere la atención de las autoridades ambientales, ya que, debido a la naturaleza determinista de los modelos numéricos y a las limitaciones en el conocimiento de la química y física atmosféricas, los sistemas podrían experimentar dificultades para anticipar con un margen razonable de incertidumbre algunos de los eventos que podrían ocurrir por situaciones atípicas de la atmósfera no representadas por las parametrizaciones del modelo. El sistema de pronóstico de la Ciudad de México tiene un desempeño aceptable para O<sub>3</sub>, con porcentajes de certeza alrededor del 80% para los pronósticos de 24 horas y de 48 horas (SEDEMA, 2018b). Sin embargo, durante los eventos de contingencia, es posible que el modelo no prediga correctamente algunos de los casos. La mejora del modelo requiere de la evaluación caso por caso para analizar las condiciones que motivaron el evento e identificar las causas detrás del pobre desempeño y avanzar hacia la propuesta de mejores parametrizaciones, pero este proceso requerirá un esfuerzo extraordinario para obtener o generar los datos necesarios. A nivel de Megalópolis, en algunas zonas urbanas se ha replicado la experiencia de la Ciudad de México; sin embargo, existen limitaciones importantes por la falta de datos de monitoreo y la ausencia de un sistema adecuado de pronóstico de la calidad del aire.

El Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) y el INECC realizaron una propuesta de nuevos niveles de activación de contingencias atmosféricas basada en la revisión bibliográfica de programas de contingencia ambiental en México y en otras partes del mundo, los estudios epidemiológicos locales y el análisis de efectos en la salud para la ZMVM. El objetivo principal de esta propuesta era proporcionar los fundamentos para el diseño de un programa de contingencia basado en la salud, soportada con elementos técnicos y científicos para el análisis y definición de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos a considerar en un nuevo programa de contingencia ambiental atmosférica. Del análisis de los datos diarios sobre la concentración de contaminantes y los eventos de salud realizado por el INSP se encontró que los niveles a los que se decretan las contingencias actualmente previenen un número limitado de eventos de salud, por lo que debieran ajustarse, además de establecer umbrales para otros contaminantes como el NO<sub>2</sub> y el SO<sub>2</sub> (INSP, 2022).

El reciente estudio para la “Definición de umbrales y diseño del protocolo general de actuación de contingencias ambientales atmosféricas para la megalópolis y evaluación del costo – beneficio de su aplicación en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM)” (INECC, 2023) plantea cambios en los umbrales para las fases Preventiva, Fase I y Fase II para O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>; propone umbrales para SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>; adiciona una nueva fase al programa denominada Fase Estacional con acciones permanentes; y revisa las acciones transitorias durante las Fases I y II. A continuación, se describen las propuestas para O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>:

Para O<sub>3</sub>:

- Una fase estacional del 15 de marzo al 15 de junio con medidas restrictivas en varias actividades, principalmente en la movilidad.

- Una fase preventiva con un umbral en 0.135 ppm en al menos tres estaciones por al menos dos horas con acciones informativas y de difusión.
- Una Fase I con un umbral en 0.155 ppm, en al menos tres estaciones por al menos dos horas con restricciones de algunas actividades que no impliquen cargas adicionales a las aplicadas en la Fase Estacional.
- Una Fase II con un umbral en 0.175 ppm en al menos dos estaciones durante al menos dos horas, con restricciones extraordinarias a la movilidad y actividades productivas, escolares y de servicios.

Para PM<sub>2.5</sub>:

- Una fase estacional del 1 de diciembre al 15 de marzo con medidas restrictivas en varias actividades generadoras de partículas.
- Una Fase I con un umbral de 71 µg/m<sup>3</sup> para el promedio móvil de 24 horas, durante dos horas seguidas en al menos tres de las estaciones aptas para activar el PCAA, incluye restricciones adicionales a las de la fase estacional.
- Una Fase II con un umbral de 110 µg/m<sup>3</sup> para el promedio móvil de 24 horas, por dos horas seguidas en al menos dos de las estaciones aptas para activar el PCAA, con restricciones extraordinarias a la movilidad y actividades productivas, escolares y de servicios

Considerando el conjunto de modificaciones que se proponen para todos los contaminantes, su implementación podría ofrecer múltiples retos en diferentes ámbitos institucional, social y económico, los cuales podrían magnificarse si se pretende la aplicación a toda la Megalópolis. Será necesario implementar reglas de operación claras para cada uno de los involucrados, realizar los cambios o mejoras normativa aplicables, mejorar el monitoreo y el pronóstico. Una de las principales limitaciones de la propuesta tiene que ver con la posibilidad de que el impacto económico de la aplicación de las acciones sea mayor que los beneficios esperados.

#### ***6.4.5. Planes de mitigación del cambio climático***

El cambio climático y la calidad del aire están intrincadamente conectados por fuentes e impactos. Es importante integrar la calidad del aire y los planes de acción climática en el diseño de la política ambiental para obtener posibles beneficios sinérgicos.

El gobierno de México, a través de SEMARNAT e INECC, ha participado activamente en negociaciones internacionales sobre el clima. Desde la firma de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC o UNFCCC, por sus siglas en inglés), ratificada por el Senado mexicano en diciembre de 1992, México ha presentado seis Comunicaciones Nacionales a la UNFCCC. En 2012, México se unió como miembro fundador a la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC) para reducir los contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés)<sup>2</sup>. Posteriormente, con la colaboración del MCE2, México

---

<sup>2</sup> Los contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés) también se conocen como forzadores climáticos de vida corta (FCVC o SLCF, por sus siglas en inglés).

desarrolló la planificación nacional piloto para SLCP, que proporcionó una revisión estratégica de posibles opciones para reducir los SLCP en México (MCE2-INECC, 2013). México presentó su Contribución Nacional Determinada (CND o NDC por sus siglas en inglés) como parte de su compromiso con la Conferencia de las Partes de la UNFCCC (COP21) celebrada en París en diciembre de 2015, comprometiéndose a reducir los gases de efecto invernadero (GEI) y las emisiones de CN. Durante la COP 26 en Glasgow, Escocia, en noviembre de 2021, México se unió a más de 100 países para comprometerse a reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> en un 30% para 2030 (UNEP, 2021). Como se señaló en la Sección 4.5 del Capítulo 4, es importante mejorar las estimaciones de las emisiones de CH<sub>4</sub>, especialmente del sector energético y las fuentes agrícolas, para identificar y aplicar políticas de mitigación efectivas.

Además de reducir las emisiones de contaminantes criterio y precursores de O<sub>3</sub>, la Ciudad de México tiene como objetivo reducir las emisiones de los GEI y de los contaminantes climáticos de vida corta (CN, CH<sub>4</sub> y algunos hidrofluorocarbonos), a través de una serie de programas de gestión de la calidad del aire y planes de acción climática desarrollados e implementados en las últimas décadas. Estas acciones incluyen el fortalecimiento de los estándares de control de emisiones para vehículos, el desarrollo de planes de movilidad sostenible en lugares de trabajo y escuelas, la promoción de la movilidad eléctrica, la promoción de la eficiencia energética para edificios públicos y privados, el fomento del calentamiento solar del agua, la mejora de la recolección y eliminación de residuos sólidos y el uso de la recuperación de gases de vertedero para suministrar energía limpia (SEDEMA, 2022b).

Recientemente, la atmosfera de la ZMVM y otras entidades de la Megalópolis ha experimentado un calentamiento progresivo, posiblemente como resultado de la interacción sinérgica entre el aumento del calentamiento antropogénico, la modificación de la cubierta terrestre y los cambios de temperatura asociados con el cambio climático global. La calidad del aire depende en gran medida del clima y, por lo tanto, es sensible al cambio climático. Las temperaturas elevadas de las islas de calor urbano y el cambio climático pueden afectar la calidad del aire, así como contribuir a las enfermedades y molestias relacionadas con el calentamiento. Por lo tanto, es importante diseñar e implementar estrategias para reducir los efectos de las islas de calor urbano, lo que, a su vez, puede ayudar a mitigar el cambio climático. La integración de la calidad del aire y los objetivos de estabilización del clima en el diseño de políticas ambientales sería muy beneficiosa.

#### ***6.4.6. Análisis de costo-beneficio para la aplicación de las medidas de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis***

Para guiar las políticas de gestión, es esencial la valoración monetaria de los costos y beneficios de la reducción de la contaminación. Las acciones regulatorias suelen ser restrictivas y pueden tener fuertes impactos económicos o sociales. Por lo tanto, este equilibrio de costos es necesario para justificar económicamente las acciones e intervenciones gubernamentales ante los sectores afectados y la sociedad en general.

Como se muestra en la Figura 6.1, en el desarrollo de las estrategias, el debate se centra en determinar el nivel adecuado de reducción de emisiones. En términos económicos, el nivel óptimo se encuentra en el punto en que el costo de reducir las emisiones es igual a los beneficios de la disminución resultante de los daños. Identificar este punto óptimo requiere asignar un valor

monetario a las medidas de reducción y al daño causado por la contaminación. El escenario ideal ocurre cuando los costos derivados de los beneficios de las políticas de reducción exceden los costos de implementación, facilitando la identificación del nivel adecuado de mitigación de las emisiones y justificando su implementación ante la sociedad (Lanigan, 1993).

El análisis de costo-beneficio proporciona una contabilidad de los costos y beneficios reales de las políticas ambientales mediante la cuantificación de sus efectos. Los costos asociados a la implementación de políticas ambientales a menudo se dividen en tres sectores económicos: los costos del sector privado, los costos sociales y el costo regulatorio del gobierno. Los costos incurridos por el sector privado incluyen costos directos e indirectos. Los costos directos incluyen los costos de capital, como los gastos de instalaciones y equipos, y los costos operativos para la operación y el mantenimiento de los procesos de control de la contaminación. Los costos indirectos se derivan de los requisitos de control de la contaminación, como el desvío de capital para comprar y operar equipos de control de la contaminación. Los costos sociales se refieren a la pérdida de ingresos de otros usos de un recurso, porque el recurso se utilizó para cumplir con las regulaciones ambientales. Los costos para las agencias reguladoras nacionales y locales se refieren a los recursos del presupuesto de la agencia asignados al diseño, implementación, monitoreo y supervisión de programas ambientales, incluyendo personal, contratos y asistencia financiera a empresas reguladas, dentro de estos se pueden incluir los costos asociados a la evaluación de los impactos.

La valoración de los beneficios ambientales puede hacerse utilizando relaciones físicas que describan formalmente las relaciones de causa y efecto para obtener medidas objetivas del daño resultante del cambio ambiental, suponiendo que los individuos estén dispuestos a pagar una cantidad menor o igual a los costos incurridos como resultado del efecto. La valoración también puede realizarse utilizando precios *proxy* de mercado, basados en la evaluación de los posibles daños expresados o revelados en el comportamiento real o hipotético del mercado (Voorhees et al., 2001).

### **Evaluación de los efectos en la salud en la Megalópolis**

En los últimos años, se han realizado varias evaluaciones de impactos en la salud (EIS) en la región de Megalópolis, sin embargo, la mayoría corresponden a la Ciudad de México y su área metropolitana, esto debido a la mayor disponibilidad de datos de monitoreo de calidad del aire, características poblacionales y registros de morbilidad y mortalidad. La sección 6.4 del ProAire 2021-2030 (SEDEMA et al., 2021) presenta un resumen completo de estos estudios. Los resultados de dos estudios recientes se describen a continuación.

El Instituto Nacional de Salud Pública cuantificó el número de muertes prematuras que podrían evitarse si se redujeran las concentraciones de los principales contaminantes atmosféricos (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub>) en los municipios de las entidades que conforman la Megalópolis (INECC, 2016). El estudio utilizó los datos de calidad del aire de 2014 reportados por los diferentes sistemas de monitoreo en la región para estimar el año base, asignando un radio de 10 km a la cobertura espacial de las estaciones de monitoreo. Las funciones de concentración respuesta (FCR) se obtuvieron de una revisión de la literatura internacional. La EIS consideró tres escenarios de reducción:

- 1) los valores límite NOM (medias anuales para PM<sub>2.5</sub>: 12 µg/m<sup>3</sup> y PM<sub>10</sub>: 40 µg/m<sup>3</sup>, promedio de 8 horas para O<sub>3</sub>: 70 ppb);

- 2) los valores guía de la OMS (medias anuales para  $PM_{2.5}$ :  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $PM_{10}$ :  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio de 8 horas para  $O_3$ : 50 ppb); y
- 3) un escenario intermedio (medias anuales para  $PM_{2.5}$ :  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{10}$ :  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , promedio de 8 horas para  $O_3$ : 60 ppb).

Solo con fines de aclaración, los valores de las directrices de la OMS se actualizaron recientemente (2021), los utilizados en los estudios descritos en esta sección corresponden a la revisión de 2005. En la Tabla 1.1 del Capítulo 1 se enumeran los valores guía vigentes de la OMS y las normas de calidad del aire de México.

En la evaluación económica se utilizó el valor de una vida estadística (VVE), que consiste en calcular la disposición de los individuos a pagar para asegurar una disminución marginal del riesgo de muerte prematura. Se utilizaron dos estimadores para los valores de VVE, uno basado en estudios locales previos ( $VVE = \$1.68$  millones de pesos) y el otro determinado por transferencia de beneficios ( $VVE = \$13.85$  millones de pesos) (Kochi et al., 2006; SEMARNAT & INECC, 2014, de Lima, 2019). Usando en la evaluación de los escenarios el VVE local de  $\$1.68$  millones de pesos, los beneficios de reducir los niveles de  $PM_{2.5}$  a los niveles NOM y OMS arrojaron valores para el número de muertes evitadas de 8,464 y 9,767, respectivamente, lo que corresponde a una valuación económica de  $\$14.3$  y  $\$16.5$  mil millones de pesos; en el escenario promedio el beneficio sería de  $\$14.6$  mil millones de pesos. En el caso de  $PM_{10}$ , el número de muertes evitadas fue de 2,756 y 12,089, respectivamente, con una valoración económica de 4.7 y 20.4 mil millones de pesos. En el escenario intermedio se evitarían 7,422 muertes con un beneficio de  $\$12$  mil millones de pesos. Finalmente, para el  $O_3$ , el número de muertes prevenidas fue de 260 y 1,089 para los escenarios NOM y OMS, respectivamente, con valores de  $\$0.4$  y  $\$1.8$  millones de pesos. En el escenario intermedio se evitarían 674 muertes prematuras con un beneficio económico de mil millones de pesos. En los tres escenarios, el mayor número de muertes evitadas se observó en la ZMVM debido a la mayor densidad de población y una mejor cobertura de monitoreo.

En 2020, la SEDEMA en colaboración con el INSP estimó la mortalidad atribuible a concentraciones asumidas de  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  en la ZMVM, considerando cuatro escenarios: (1) cumplimiento de los valores límite de la NOM, (2) cumplimiento de los valores guía de la OMS, (3) reducción del 10% en los niveles actuales, y (4) un escenario ideal con un valor de  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{2.5}$  y 38 ppb para  $O_3$  (INSP & SEDEMA, 2020). La estimación de la mortalidad se realizó sólo para la población con representación de monitoreo; esto equivale al 43% y al 72% de la población total del área metropolitana para  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ , respectivamente. Los resultados indicaron que, en el caso de que se cumplieran los valores de NOM y los valores de la línea guía de la OMS, se evitarían 3,539 y 4,357 muertes prematuras, respectivamente. El escenario con una reducción del 10% en los niveles actuales resultó en una disminución de 814 muertes prematuras, mientras que el escenario con la mejor calidad del aire evitaría 8,983 muertes. La mayoría de las muertes evitadas para cada escenario se atribuyeron a la reducción de  $PM_{2.5}$ . Una salvedad importante en este estudio fue la limitada cobertura espacial del monitoreo, principalmente en los municipios de conurbación en el Estado de México, lo que resultó en la subestimación de los valores calculados. En este estudio no se realizó la valoración económica. Las principales fuentes de incertidumbre se asociaron con el monitoreo, los datos poblacionales y la selección de las funciones de concentración-respuesta (FCR) empleados en la estimación de la mortalidad.

## **Costos y beneficios de la implementación del ProAire 2021-2030**

Como parte de la elaboración del ProAire 2021-2030, la SEDEMA realizó una evaluación del costo-beneficio de la aplicación del programa, considerando los costos de su implementación y los beneficios esperados para la salud (SEDEMA et al., 2021). El costo estimado para la implementación del ProAire fue de \$280.71 mil millones de pesos (a precios de 2021), éste incluyó los costos de la ejecución de las 14 medidas para reducir contaminantes en la ZMVM (\$255.4 mil millones de pesos), los costos de la medida correspondiente al corredor Tula-Tepeji (\$24.4 mil millones de pesos), así como los gastos de comunicación, seguimiento institucional, monitoreo de calidad del aire y la agenda de investigación (\$965 millones de pesos). Cerca del 96% de los recursos estimados de la reducción de emisiones correspondió al sector transporte.

La ejecución de todas las acciones de ProAire podría reducir la concentración promedio anual de PM<sub>2.5</sub> hasta en ~22% (equivalente a ~4 µg/m<sup>3</sup>) considerando el escenario sin la aplicación de ProAire. Para COV y NO<sub>x</sub>, la reducción proyectada sería del 40 y 29%, respectivamente. En el caso de O<sub>3</sub>, la reducción estimada fue de ~2% (~3 ppb) en el promedio anual de los valores máximos diarios, esta estimación estaría dentro de la incertidumbre del modelo. En un escenario en donde se aplicarán todas las acciones descritas en el ProAire se estimó que sería posible evitar al menos 6,000 muertes en el año 2030, lo que equivale a un valor estimado de 119 mil 256 millones de pesos. Este ahorro económico en 2030 compensaría en más del 40% los costos de implementación de todo el Programa. Es importante mencionar que esta evaluación de costo-beneficio no incluyó los impactos y beneficios sobre la morbilidad, la infraestructura urbana, los parques urbanos y el suelo de conservación.

## **Costos y beneficios de la implementación de las contingencias ambientales**

Como parte del estudio “*Definición de umbrales y diseño del protocolo general de actuación de contingencias ambientales atmosféricas para la megalópolis y evaluación del costo – beneficio de su aplicación en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM)*” (INECC, 2023) se realizó una evaluación del costo-beneficio de la aplicación del Programa de Contingencias Ambientales (PCAA) usando diferentes valores propuestos para el umbral en los contaminantes O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, basados en los valores límite para evitar el 5% de la mortalidad atribuible para cada contaminantes empleando como año base 2019. Por ejemplo, para el caso de O<sub>3</sub> se propuso un valor umbral para la activación de 136 ppb que, aplicado a los datos de 2019, podría evitar hasta 181 muertes, equivalentes al 5% de las muertes atribuibles.

La evaluación se realizó para tres escenarios con distintos VVE obtenidos de estudios previos: \$10 millones de pesos para un escenario bajo, \$24 millones y \$66 millones de pesos para escenarios medio y alto, respectivamente. El beneficio estimado de la aplicación y cumplimiento del PCAA por muertes evitadas fue de \$4,660 millones de pesos anuales para el escenario bajo, de \$11,184 millones de pesos anuales para el escenario medio, y de \$30,756 millones de pesos anuales para el escenario alto, en la Tabla 6.2 se muestra el detalle del análisis por contaminante. En la estimación de los beneficios se tomaron en cuenta también los costos relacionados con la morbilidad. Los resultados indicaron que, cuando se utilizó el VVE alto, el beneficio superó los costos de las acciones en \$271 millones de pesos; sin embargo, cuando se empleó el VVE medio, el costo superó al beneficio en \$7,668 millones de pesos. En el escenario bajo los costos de las acciones fueron significativamente superiores que el beneficio y por lo tanto no se tomó en consideración. El

estudio indicó que el valor del beneficio podría estar subestimado al no incluir los costos de tratamiento extrahospitalarios y por incapacidades médicas o cuidados paternos, ni todas las enfermedades relacionadas directa o indirectamente con los contaminantes.

**Tabla 6.2.** Estimación de los beneficios económicos anuales asociados con la reducción del 5% en la mortalidad atribuible por contaminante en la ZMVM (adaptada de INECC, 2023).

Contaminante	Valor de la concentración umbral	Reducción anual del 5% en la mortalidad atribuible	Beneficios económicos anuales esperado (en millones de pesos)		
			Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
<b>O<sub>3</sub> (ppb)</b>	136	181	1,810	4,344	11,946
<b>PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	96	81	810	1,944	5,346
<b>PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>)</b>	71	67	670	1,608	4,422
<b>NO<sub>2</sub> (ppb)</b>	86	119	1,190	2,856	7,854
<b>SO<sub>2</sub> (ppb)</b>	192	18	180	432	1,188
<b>Beneficios totales</b>	---	---	<b>4,660</b>	<b>11,184</b>	<b>30,756</b>

### **Consideraciones para la evaluación de los impactos de la contaminación en la Megalópolis**

Valorar los costos ambientales es desafiante y está sujeto a incertidumbres. Los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana y en la productividad, son los más susceptibles de valoración en el mercado. Mientras que los efectos sobre el confort (como la visibilidad, el olor y el ruido) son más susceptibles a la evaluación subjetiva. La salud de los ecosistemas no tiene un valor de mercado, ni puede valorarse fácilmente con precios de mercado sustitutos. A los daños a la propiedad y a los sistemas no vivos se les puede asignar un valor basado en el mercado, utilizando la combinación de una función dosis-respuesta con una función de daño, sin embargo, a menudo no se cuantifican por la falta de funciones dosis-respuesta adecuadas. Por otro lado, los costos relacionados con el comportamiento de los grupos sensibles a la contaminación son difíciles de cuantificar.

Debido a la complejidad que implica la contaminación atmosférica y sus impactos, las evaluaciones de impacto generalmente establecen supuestos para simplificar el trabajo, pero éstos apenas reflejan el estado real del problema, lo que incrementa considerablemente la incertidumbre de las estimaciones.

#### *Identificación y evaluación de daños por contaminación.*

Los daños atribuibles a la contaminación del aire pueden incluir daños a la salud, disminución de los rendimientos agrícolas, daños a edificios y al patrimonio histórico, e impactos en los ecosistemas. El tipo y el alcance de los daños pueden tener la influencia de factores distintos a la contaminación, por ejemplo, los efectos en la salud dependerán críticamente del estado de salud y nutricional previo, la edad y el acceso a los servicios médicos. Hay otros efectos de la contaminación del aire que son más difíciles de evaluar, como los impactos en la infraestructura,

la agricultura o los ecosistemas. Estos efectos apenas son considerados en las evaluaciones de costo-beneficio de las entidades de la Megalópolis. En la mayoría de los casos, esta información no está disponible, es difícil de recopilar, o puede ser difícil aislar el impacto de la contaminación del aire de otras influencias.

La ausencia de datos sobre la concentración de contaminantes atmosféricos o la disponibilidad de datos de mala calidad es un problema común en la región. Las observaciones proporcionadas por el monitoreo atmosférico son necesarias para evaluar los impactos de la contaminación. No será posible estimar los costos reales del daño ambiental, si se desconocen los niveles y la variabilidad de los contaminantes. La falta de funciones de concentración respuesta (FCR) adecuadas para la población mexicana es una fuente importante de incertidumbre en la evaluación de los impactos en la salud.

Otro problema es la disponibilidad de metodologías para estimar los valores que deben asignarse a los diferentes impactos de la contaminación. Para monetizar los impactos en la salud, generalmente se emplean los métodos utilizados en los países desarrollados, no obstante, su aplicación se enfrenta a la ausencia de los datos necesarios para realizar las estimaciones. A veces se utilizan los valores obtenidos de otros estudios, pero pueden no ser aplicables para la región. Por ejemplo, el impacto sobre la mortalidad requiere la estimación del VVE, que corresponde a la disposición de las personas a pagar por mejoras ambientales o aceptar una compensación por los efectos. El VVE podría sobreestimarse cuando se transfiere de los valores empleados por los países desarrollados, o podría subestimarse cuando las personas tienden a ser menos conscientes de los efectos de los daños relacionados con la contaminación, o cuando no hay información suficiente para valorar los beneficios ambientales. En otro ejemplo, cuando se utilizan como indicador de productividad los salarios perdidos por las enfermedades relacionadas con la contaminación, podrían existir diferencias a nivel regional debido a que el valor de la vida de un trabajador dependerá de la distribución del ingreso y de las diferencias salariales en la región donde se encuentra, lo que revelaría también una situación de injusticia ambiental. Por lo tanto, la construcción de una metodología adecuada para monetizar los impactos de la contaminación en la salud, los ecosistemas y los sistemas no vivos, es un proyecto que merece la atención de las autoridades ambientales y de salud en la región de la Megalópolis.

### **La importancia de los datos de monitoreo de la calidad del aire y las capacidades de modelación**

Las políticas regulatorias generalmente se centran en reducir las emisiones de diversas fuentes, pero es difícil anticipar el impacto que tendrán en las concentraciones de aire ambiente y sus daños. No existe una relación simple y predecible entre las emisiones y las concentraciones, tampoco entre las concentraciones y los daños. Esta situación es aún más complicada para los contaminantes secundarios, donde las complejas transformaciones químicas tienen lugar fuera del control de las políticas de gestión. Esto lleva a un proceso de prueba y error para la evaluación previa del cumplimiento de los objetivos de reducción para los niveles de contaminación y sus efectos. Este proceso se complica por el aumento del número de fuentes, la complejidad de las emisiones y la extensión del área de estudio.

Las redes de vigilancia de la calidad del aire son la principal fuente de datos para evaluar los cambios en las concentraciones de los contaminantes asociados con la reducción de emisiones. Sin



embargo, estas no tienen las resoluciones espaciales necesarias para las evaluaciones de costo-beneficio o a menudo tienen un desempeño deficiente y sus datos pueden conducir a inferencias erróneas. La falta de datos sobre la calidad del aire explica en parte la ausencia de evaluaciones de costos y beneficios de los programas de gestión ambiental en la Megalópolis. Si bien, los datos podrían obtenerse de modelación, plataformas satelitales o sensores de bajo costo, su uso podría incrementar la incertidumbre de las evaluaciones.

El monitoreo en combinación con modelos numéricos puede proporcionar información sobre los impactos regionales de la contaminación proveniente de otras urbanizaciones, incendios forestales o el transporte transfronterizo. La modelación de la contaminación del aire puede llenar las brechas espaciales de las redes de monitoreo y proveer datos para la evaluación de los impactos en la agricultura y los sistemas no vivos. Los estudios retrospectivos y prospectivos también pueden beneficiarse del uso de modelos. Las incertidumbres en los resultados de la modelación pueden ser un problema importante cuando se utilizan para la evaluación de impactos, sin embargo, pueden reducirse comparándolas con datos observacionales, cuando están disponibles, o utilizando ensambles de múltiples modelos con un enfoque de ajuste de sesgo (Solazzo et al., 2018).

## **6.5. Comunicación, educación y desarrollo de capacidades**

El éxito y la sostenibilidad de las políticas ambientales requiere de un alto nivel de conciencia ciudadana y de la participación informada de las partes interesadas (por ejemplo, Muñoz-Pizza et al., 2022; Molina, 2021). El gobierno de la Ciudad de México ha mantenido una amplia infraestructura de comunicación y tiene diversas estrategias para difundir la información al público. La SEDEMA cuenta con un sitio web que, además de difundir el índice de calidad del aire, ofrece contenidos sobre diversos temas relacionados con la contaminación y la calidad del aire (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/>), incluye infografías, informes anuales, datos abiertos y un espacio especializado para niños (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/teporingo/>). Dentro de la institución se encuentra la Dirección de Cultura Ambiental, que se encarga de las actividades de comunicación, difusión y educación ambiental en la Ciudad de México. Además, hacen uso de las plataformas móviles y las redes sociales como canales de difusión e información.

En el resto de las entidades de la Megalópolis no existen programas de comunicación y educación similares, ni una estructura orgánica con personal especializado e infraestructura para la comunicación y la promoción de la educación y cultura ambiental. Por otro lado, recientemente, la CAME lanzó la campaña "*Pon buen ambiente*" disponible en redes sociales, el objetivo era motivar a la población a realizar acciones en beneficio de la calidad del aire y el medio ambiente (<https://www.portalambiental.com.mx/calidad-del-aire/20201228/pon-buen-ambiente-para-mejorar-la-calidad-del-aire-y-la-salud>).

En cuanto al desarrollo de capacidades, como se mencionó anteriormente, existe disparidad entre la gestión de la calidad del aire de la Ciudad de México y de las otras entidades de la Megalópolis, esto se refleja en la disponibilidad de datos del monitoreo, en el desarrollo de inventarios de emisiones y en la experiencia en el uso de modelos y pronósticos de calidad del aire. Aunque las entidades de la Megalópolis han presentado ideas para controlar la contaminación del aire en sus respectivos ProAires, su progreso se ha visto obstaculizado por la limitada capacidad técnica para definir las e implementarlas. No cuentan con la suficiente información para establecer estándares

de emisión, construir inventarios de emisiones y redes de monitoreo. Las capacidades de monitoreo y modelación son débiles, y falta investigación sobre los impactos en la salud.

Es esencial mejorar la capacidad de los recursos humanos para el análisis, formulación, ejecución y evaluación de las políticas y programas destinados a mejorar la calidad del aire, incluyendo la colaboración con instituciones nacionales e internacionales. Por ejemplo, en enero de 2020, el LTMCE2 organizó un simposio y un taller intensivo de capacitación sobre la modelación de la contaminación del aire y la evaluación de estrategias de control de la calidad del aire, en el laboratorio de computación de la UNAM, con la colaboración de la Universidad de California en San Diego. Participaron 35 interesados de instituciones académicas, de investigación y gubernamentales, bajo la guía de expertos en modelación de la calidad del aire mexicanos e internacionales. Posteriormente, se desarrolló e implementó un tutorial en línea, que ahora forma parte del curso de modelación de calidad del aire en la UNAM y está disponible para otras personas interesadas en aprender sobre el tema.

### *6.5.1. La comunicación de riesgos*

#### **El Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS) de la Ciudad de México**

Considerando que la población se expone no a uno sino a múltiples contaminantes, que no existe evidencia de un umbral seguro de exposición a la contaminación y que algunas personas son más sensibles a la contaminación que otras y pueden presentar efectos incluso a bajas concentraciones; en 2017 la SEDEMA y el Instituto Marrón de la Universidad de Nueva York desarrollaron el Índice de Riesgo para Personas Susceptibles (IRPS) ) (<http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/>, consultado el 31 de marzo de 2023; Cromar et al., 2021). El IRPS es un índice basado en la salud que captura los efectos aditivos de múltiples contaminantes en el riesgo para la salud pública con el objetivo de mejorar la comunicación de riesgos. Es complementario al Índice Aire y Salud descrito por la NOM-172-SEMARNAT-2019, que no utiliza directamente los efectos en la salud para estimar el riesgo diario a la población.

En la construcción del índice de IRPS se empleó un modelo lineal generalizado para evaluar la asociación entre la contaminación del aire ( $O_3$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  y  $SO_2$ ) y la morbilidad respiratoria (Cromar et al., 2021; CDMX, 2023). Para el modelo se utilizó una distribución de Poisson y se incluyeron como variables de ajuste el día de la semana, la duración del periodo de estudio, el número de días desde la exposición a la respuesta, la temperatura y la humedad relativa. El índice tiene las siguientes características:

- Es predictivo de la morbilidad respiratoria en dos grupos: niños y adultos.
- Incluye al menos tres contaminantes del aire ambiente, ya que los índices basados solamente en un contaminante pueden no capturar con precisión el riesgo general de salud para una población que se expone diariamente a múltiples contaminantes.
- El índice presenta una distribución normal para permitir una comunicación de riesgos efectiva, particularmente a niveles relativamente bajos de contaminación.
- El índice es sencillo y fácil de interpretar, provee un solo valor al día para toda la Ciudad de México asociado directamente al riesgo en salud por la exposición a  $O_3$ ,  $PM_{2.5}$  y  $NO_2$ , que es representativo de la mezcla compleja de aire en la ciudad. Pero también se puede

reportar con una mayor resolución espacial (por ejemplo, a nivel de estación de monitoreo o similar a la usada por el modelo de pronóstico de calidad del aire).

- Está construido considerando los riesgos a la salud observables en la población y utiliza coeficientes desarrollados específicamente para la población de la Ciudad de México.
- Utiliza el pronóstico de la calidad del aire para anticipar los niveles de riesgo.

Por su diseño, este índice se aplica sólo en la Ciudad de México, se actualiza y publica diariamente en el sitio web <http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/>.

### **El Índice Aire y Salud**

El Índice Aire y Salud es un indicador elaborado por las autoridades mexicanas para comunicar el grado de contaminación atmosférica y la probabilidad de que ocurra un efecto adverso en la salud de las personas expuestas a los contaminantes. La NOM-172-SEMARNAT-2019 describe los lineamientos para su elaboración y difusión.

Se calcula para seis contaminantes del aire: PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y CO, normalizando las concentraciones por ponderación. Se compone de cinco bandas o intervalos de concentración que definen la calidad del aire como buena, aceptable, mala, muy mala y extremadamente mala (ver Tabla 6.3). Cada una tiene asociada una categoría de riesgo a la salud definido como bajo, moderado, alto, muy alto y extremadamente alto (ver Tabla 6.4). Cada categoría, a su vez, tiene asociado un color: verde, amarillo, naranja, rojo y morado, respectivamente. A diferencia del IRPS, el Índice Aire y Salud toma en cuenta los valores límite descritos en las NOM para cada uno de los contaminantes, pero no considera la información de morbilidad o mortalidad en su construcción.

El Índice Aire y Salud es de aplicación obligatoria en todo el país. Cabe señalar este índice asigna categorías de calidad del aire y recomendaciones relacionadas con el riesgo para la salud, a diferencia del índice anterior (IMECA), que los transformaba a una escala adimensional o puntos índice, sin embargo, en el caso de la ZMVM la activación de la Contingencia Ambiental Atmosférica utiliza los valores de concentración de los contaminantes y no el índice.

**Tabla 6.3.** Categorías de calidad del aire e intervalos de concentración por contaminante de la NOM-172-SEMARNAT-2019.

Calidad del aire	Color	Nivel de riesgo asociado	PM <sub>10</sub> Prom. movil ponderado 12-h (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> Prom. movil ponderado 12-h (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> Prom. 1-h (ppm)	O <sub>3</sub> Prom. movil 8-h (ppm)	NO <sub>2</sub> Prom. 1-h (ppm)	SO <sub>2</sub> Prom. movil ponderado 24-h (ppm)	CO Prom. movil 8-h (ppm)
Buena	Verde	Bajo	≤50	≤25	≤0.051	≤0.051	≤0.107	≤0.008	≤8.75
Aceptable	Amarillo	Moderado	>50 a 75	>25 a 45	>0.051 a 0.095	>0.051 a 0.070	>0.107 a 0.210	>0.008 a 0.110	>8.75 a 11.00
Mala	Naranja	Alto	>75 a 155	>45 a 79	>0.095 a 0.135	>0.070 a 0.092	>0.210 a 0.230	>0.110 a 0.165	>11.00 a 13.30
Muy mala	Rojo	Muy alto	>155 a 235	>79 a 147	>0.135 a 0.175	>0.092 a 0.114	>0.230 a 0.250	>0.165 a 0.220	>13.30 a 15.50
Extremadamente mala	Morado	Extremadamente alto	>235	>147	>0.175	>0.114	>0.250	>0.220	>15.50

**Tabla 6.4.** Mensajes asociados a las categorías de calidad del aire y riesgos a la salud descritos en la NOM-172-SEMARNAT-2019.

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Recomendaciones	
		Para grupos sensibles	Para toda la población
Buena	Bajo	Disfruta las actividades al aire libre	
Aceptable	Moderado	Considera reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre	Disfruta las actividades al aire libre
Mala	Alto	Evita las actividades físicas (tanto moderadas como vigorosas) al aire libre	Reduce las actividades físicas vigorosas al aire libre
Muy Mala	Muy Alto	No realices actividades al aire libre. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos	Evita las actividades físicas moderadas y vigorosas al aire libre.
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	Permanece en espacios interiores. Acudir al médico si se presentan síntomas respiratorios o cardíacos	

### **Limitaciones**

El IRPS es el primer ejercicio en el país para incorporar la evidencia del riesgo a la salud de un ambiente multicontaminante en un índice, este esfuerzo puede resultar en una extraordinaria herramienta para la protección de la salud. A continuación, se describen algunas áreas de oportunidad para mejorar el IRPS:

- El índice utiliza el riesgo obtenido de estudios que exploran el impacto en la población general, es posible que no sea apropiado apuntar a las poblaciones susceptibles, ya que esto transmite un mensaje que podría no ser universal que desalentaría su uso por parte de personas que no se perciben como “susceptibles”.
- El índice requiere validación al igual que los valores de riesgo utilizados en su construcción.
- Sería recomendable ampliar la cobertura a toda la ZMVM, así como explorar la posibilidad de incrementar la resolución espacial, por ejemplo, a nivel de zonas, alcaldías, entre otros.

El Índice Aire y Salud ha logrado armonizar la manera en la que se comunica la calidad del aire en el país, sin embargo, algunos aspectos que ameritan una revisión para futuras actualizaciones incluyen:

- A pesar de considerar varios contaminantes en su construcción, no es un índice multicontaminante ¿podría mejorarse para reflejar los efectos de la exposición a la compleja mezcla urbana?
- No es un índice basado en salud, por lo tanto, incluir el término en el nombre del índice no es apropiado.

- Se recomienda incluir una descripción clara sobre cuáles son las bases de las recomendaciones de salud y de la definición de las distintas categorías.

## **6.6. Retos y recomendaciones**

Se ha avanzado mucho en la lucha contra los problemas de contaminación del aire en la Ciudad de México y en algunas de las entidades de la Megalópolis. Sin embargo, aún persisten desafíos para reducir eficazmente las concentraciones de contaminantes nocivos para la protección de la salud pública y el medio ambiente. El crecimiento de la población, la expansión urbana y la alta motorización del área metropolitana y la región de la Megalópolis circundante, continuarán generando emisiones contaminantes. Además, los cambios en el paisaje urbano y el cambio climático han contribuido al aumento progresivo de la temperatura en la ZMVM y en otras entidades en la Megalópolis, con impactos en la meteorología local y en la calidad del aire. Los incendios forestales regionales causados por períodos de sequías cada vez más frecuentes e intensos, inducen episodios severos de contaminación por partículas. A excepción de la ZMVM, el monitoreo de la calidad del aire, los inventarios de emisiones y los estudios de contaminación del aire en la Megalópolis son limitados, lo que dificulta la evaluación de la calidad del aire regional y los impactos de los contaminantes en la región necesarios para diseñar estrategias eficaces de reducción de emisiones.

### **Brechas de conocimiento**

- ¿Cómo promover el desarrollo del conocimiento científico y promover la creación de centros de investigación fuera de la Ciudad de México?
- ¿Cómo promueve el gobierno federal el trabajo científico y el desarrollo de capacidades en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Qué datos adicionales se necesitan para diseñar y evaluar las medidas de los ProAires de las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las principales necesidades de investigación en cada uno de los centros urbanos de la Megalópolis?
- La evidencia disponible sugiere que la química y la física de la atmósfera de la ZMVM están cambiando. ¿cómo puede el gobierno liderar una nueva campaña integral de monitoreo para la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las lecciones científicas aprendidas por la gestión ambiental de las restricciones durante la pandemia de COVID-19?

### **Papel de la CAME en la coordinación de la gestión regional de la calidad del aire**

La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) fue creada en 2013 como un órgano de coordinación para la planeación y ejecución de políticas, programas, proyectos y acciones en materia de protección al ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico, en la región que conforma la Megalópolis del centro de México.

La CAME está integrada por siete entidades federativas: la Ciudad de México y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala y también por cuatro Secretarías del gobierno federal: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y la de SALUD. Cuenta con un Órgano de Gobierno, que está integrado por los Titulares de las Secretarías federales, los Gobernadores de los estados y la Jefatura de Gobierno. Cuenta también con un Comité Científico Asesor, constituido por 15 científicos, académicos y expertos en materia ambiental, quienes tienen la facultad de asesorar y brindar sus opiniones y recomendaciones sobre las acciones prioritarias de la Comisión.

Para su operación y funcionamiento, la CAME cuenta con una Coordinación Ejecutiva, que convoca a las sesiones del Órgano de Gobierno, propone acciones y da seguimiento a los acuerdos. El Coordinador Ejecutivo articula la actuación de ocho Grupos de Trabajo, integrados por el personal técnico de las entidades e instituciones participantes en la CAME.

La CAME cuenta con el Fideicomiso 1490 Para apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis (FIDAM 1490). Éste es alimentado con \$5.00 pesos por cada verificación vehicular realizada en los centros de verificación de las entidades. El FIDAM 1490 también puede recibir aportaciones de otras fuentes como donaciones, remanentes de economías presupuestarias de sus integrantes, entre otras.

La CAME podría fortalecerse con acciones como las siguientes:

- Incluir como integrante de la Comisión a la Secretaría de Energía (SENER) y a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (HACIENDA) del gobierno federal, para reforzar la implementación de políticas, programas y acciones ambientales regionales de alto impacto.
- Crear un Consejo Consultivo integrado por representantes de organizaciones ambientales de la sociedad civil, y cámaras y asociaciones empresariales y de servicios del sector ambiental, donde puedan opinar y dar seguimiento a temas de interés común, así como promover el diálogo constructivo entre las autoridades ambientales y la sociedad civil en general.
- Fomentar aportaciones y donaciones al FIDAM 1490 provenientes de otras fuentes, como la verificación vehicular obligatoria de emisiones de vehículos de placa federal que realiza la SICT, aportaciones por las industrias con mayores emisiones de contaminantes, y fortalecer el compromiso de las aportaciones derivadas de la verificación vehicular estatal.
- Avanzar en otros temas ambientales prioritarios en los que la CAME puede contribuir a armonizar programas y acciones, por ejemplo, en la atención simultánea y armonizada de la calidad del aire y el cambio climático, economía circular, temas de calidad del agua, residuos, y movilidad y transporte, así como de conservación de Áreas Naturales Protegidas, entre otros.
- De inicio, tomar como una prioridad apoyar el impulso de las medidas establecidas en los ProAires de las entidades para reducir las emisiones de los contaminantes en las cuencas atmosféricas de la región.

- Impulsar la evaluación basada en evidencia de la efectividad de los programas y proyectos en las decisiones presupuestarias y las políticas públicas, incluyendo la creación de requisitos de desempeño en subvenciones y contratos para garantizar que los programas se ejecutan y cumplen con sus objetivos de manera efectiva.

### **Monitoreo de la calidad del aire**

Si bien la ZMVM tiene una red de monitoreo de la calidad del aire bien desarrollada que comprende gran parte del área urbana, la cobertura espacial del monitoreo de calidad del aire en la creciente zona conurbada de la Ciudad de México es limitada. A nivel de la Megalópolis el monitoreo está restringido a los centros urbanos. Además, existe disparidad importante en la calidad de los datos.

La CAME tiene la oportunidad de contribuir con su liderazgo en la gestión para mejorar las condiciones de monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis. En la Sección 2.7 del Capítulo 2 se listan una serie de valiosas recomendaciones que deben ser gestionadas por la CAME y las autoridades ambientales para mejorar la cantidad, cobertura y calidad de los datos de las redes monitoreo, destacando:

- Desarrollar capacidades estratégicas de la Red Regional de Monitoreo, incluyendo diferentes tipos de sitios (urbanos, periurbanos, rurales).
- Proporcionar apoyo financiero para mejorar la infraestructura y las capacidades técnicas de la red de monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis, incluida la capacitación en el análisis y validación de datos satelitales.

### **Inventarios de emisiones**

Los inventarios de emisiones son una herramienta esencial de gestión de la calidad del aire para evaluar el progreso de las estrategias de control de emisiones y planificar acciones futuras. En el Capítulo 3 se presenta una descripción detallada de los retos y recomendaciones para mejorar los inventarios de emisiones.

El inventario de emisiones de la ZMVM está bien desarrollado y se utiliza para informar las estrategias de reducción de emisiones. En la Sección 3.4 del Capítulo 3 se describieron los retos y las oportunidades que existen para mejorar los inventarios de emisiones en la Megalópolis y que puedan ser verdaderamente útiles en la gestión de la calidad del aire. La CAME puede contribuir decisivamente en la implementación de las recomendaciones listadas en la Sección 3.4 al fungir como líder en el proceso de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis. En el resto de las entidades existen áreas de oportunidad para su mejora, que incluyen:

- verificar los objetivos del inventario y su alineación con las necesidades de la gestión,
- mejorar la cobertura y resolución espaciales,
- revisar los perfiles de emisiones y la especiación química,
- incrementar la resolución temporal, y
- publicar la información de los cálculos e incertidumbres.

En todos los casos es necesario incluir o mejorar la información sobre las fuentes de área relacionadas con el uso de solventes en los sectores residencial, comercial y de servicios. Se requieren estudios específicos para obtener o mejorar los factores de emisión y datos de actividad, así como para las distribuciones temporales y la especiación química.

### **Modelación y pronóstico de la calidad del aire**

La modelación numérica es una herramienta esencial para ayudar a los tomadores de decisiones en el diseño de políticas de calidad del aire y en la evaluación de medidas de control en escenarios climáticos y de emisiones presentes y futuros, así como en el pronóstico de la calidad del aire. El gobierno de la Ciudad de México ha implementado un sistema de pronóstico de calidad del aire para alertar al público sobre la alta contaminación por O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> con 24 horas de anticipación<sup>3</sup>. El modelo se emplea también en la evaluación de las políticas de reducción de emisiones para mejorar la calidad del aire y otros beneficios colaterales. Aún persisten desafíos sustanciales en la implementación del sistema de pronóstico de la calidad del aire en el resto de las Megalópolis debido a la falta de datos e investigación para respaldar los esfuerzos de modelación y pronóstico, así como al limitado personal técnico calificado.

Hay esfuerzos de parte de las instituciones académicas para pronosticar la calidad del aire. El ICAYCC-UNAM cuenta con un modelo de pronóstico a 72 horas basado en WRF-CHEM para CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> con una cobertura espacial que comprende a la Ciudad de México y las entidades aledañas, las salidas gráficas se encuentran disponibles en línea. Existen otros esfuerzos de modelación y pronóstico en el sector académico y otras entidades, pero la información no es pública.

La CAME podría proporcionar los recursos financieros y ser un catalizador para desarrollar un sistema para modelar y pronosticar la calidad del aire en las entidades de la Megalópolis, incluyendo la colaboración con expertos nacionales e internacionales para brindar la capacitación adecuada.

### **Transporte y movilidad: integración transporte-uso del suelo-gestión de la calidad del aire**

La expansión urbana descontrolada y el aumento de la motorización en la Megalópolis son los principales orígenes de la contaminación del aire y de la congestión vial. La creación de un sistema de transporte equilibrado con el medio ambiente requiere de una estrategia transversal que integre al sector transporte, cambios en el uso del suelo, la gestión de la calidad del aire, y que involucre a los diferentes organismos responsables (medio ambiente, transporte, desarrollo urbano, energía y obras públicas) y con participación pública. El objetivo sería una menor dependencia de los vehículos individuales a través de la provisión de un mejor transporte público y de medidas que permitan realizar más desplazamientos a pie o en bicicleta. Algunas de las acciones en que la CAME debe tomar un liderazgo para su implementación incluyen:

- Impulsar la infraestructura para la movilidad activa o no motorizada.

---

<sup>3</sup> El pronóstico se ejecuta a 24 y 48 horas, pero entre mayor sea el periodo para pronosticar mayor será la incertidumbre, es por lo que la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire solo publica el valor a 24 horas en su sitio web y mantiene el de 48 horas con propósitos de seguimiento y evaluación.



- Desarrollar políticas públicas para la ubicación óptima de infraestructura y equipamiento (ciudades compactas con usos mixtos del suelo).
- Desarrollo de sistemas de transporte masivo inter e intraurbano (carga y pasajeros).
- Orientar el desarrollo urbano de la Megalópolis hacia la contención de su expansión (densificación del territorio).
- Estudios de origen-destino más frecuentes para la planificación de infraestructuras y mejorar las operaciones.
- Promover la movilidad sostenible (teletrabajo, transporte público de alta capacidad, caminar y andar en bicicleta)
- Establecer incentivos para la introducción de vehículos de baja emisión, como automóviles eléctricos e híbridos, así como motocicletas eléctricas.
- Considerar la limitación del uso de vehículos privados en áreas altamente transitadas.

### **Ciencia de la atmósfera**

El estudio de los procesos atmosféricos es fundamental para comprender los impactos y evaluar las mejores opciones para mitigar la contaminación atmosférica. La investigación científica ha desempeñado un papel importante para ayudar a las autoridades ambientales de la ZMVM a caracterizar las fuentes de emisión de especies contaminantes, su transporte y transformación en la atmósfera; así como para identificar estrategias efectivas de reducción de emisiones y monitorear el progreso de las regulaciones que ya existen para garantizar que los programas se implementen con éxito. El Capítulo 4 proporciona una extensa lista de desafíos y recomendaciones para mejorar la comprensión científica de la calidad del aire en la Megalópolis.

Las observaciones actuales en la ZMVM y otras entidades de la Megalópolis indican que las concentraciones atmosféricas de contaminantes como el O<sub>3</sub> y las partículas suspendidas no han disminuido a límites aceptables y muestran incrementos en los últimos años, lo que plantea la necesidad de actualizar el estado del conocimiento científico de los procesos que controlan la formación, el transporte y el destino de estos contaminantes. La comprensión sólida de los cambios en la meteorología, en las emisiones y los procesos que controlan la formación de ozono y otros contaminantes secundarios en la ZMVM y sobre todo en la región de la Megalópolis, es fundamental para el diseño de nuevas acciones políticas. A continuación, se describen algunas de las necesidades de investigación que la CAME debe promover el desarrollo de estrategias de gestión de la calidad del aire.

- ***Se necesitan mediciones extensivas de la atmósfera y estudios de modelación*** para definir estrategias óptimas de control de emisiones para cada entidad en la Megalópolis, considerando las circunstancias institucionales, técnicas, económicas, sociales y políticas locales.
  - La aplicación y validación de modelos de calidad del aire requieren de datos de emisiones resueltos espacial y temporalmente, así como del conocimiento de la meteorología y la radiación solar. Además de la medición de los contaminantes medidos comúnmente (O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO y la masa de las partículas suspendidas), se necesitan mediciones de COV individuales y de la composición química de las

- partículas. Esta información detallada requerirá estudios especiales para comprender mejor las causas de tales emisiones y medir el progreso en su limitación.
- Los responsables de la formulación de políticas deben utilizar esta información para equilibrar los beneficios económicos y sociales de las mejoras sanitarias, con los costos del control de emisiones.
  - ***Impactos del cambio climático en la calidad del aire y la salud.*** El cambio climático puede afectar la calidad del aire y, a la inversa, la calidad del aire puede afectar el cambio climático. Las emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) y forzadores climáticos de vida corta (CH<sub>4</sub>, CN, O<sub>3</sub>) en el aire, pueden provocar cambios en el clima.
    - Perfeccionar el conocimiento de los impactos del cambio climático en la salud humana y el medio ambiente en la región de la Megalópolis, mejorando la capacidad de los administradores estatales y locales de calidad del aire para considerar el cambio climático en sus decisiones para proteger la calidad del aire y reducir los impactos de un clima cambiante, así como de las comunidades para abordar el cambio climático de manera efectiva y sostenible.
    - Integrar la mitigación del cambio climático y los inventarios de emisiones, con la gestión de la calidad del aire.
    - Cuantificar los beneficios sanitarios y económicos de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos y de gases de efecto invernadero.
    - Proporcionar herramientas y recursos para desarrollar un sistema energético más sostenible.
    - Evaluar cómo las diferentes estrategias de control multi-contaminante/multi-sectorial pueden afectar las emisiones de gases de efecto invernadero y de otros contaminantes atmosféricos.
    - Desarrollar información y recursos basados en evidencia para informar al público y a las comunidades para prepararse mejor sobre las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente en las poblaciones más vulnerables.

### **Impactos de la contaminación del aire**

La contaminación del aire afecta negativamente a la salud humana, causa bruma regional y deposición ácida, daña los cultivos y los ecosistemas. La mayoría de los estudios en México se han centrado en comprender los impactos de los contaminantes del aire en la salud humana. Existen brechas de información sobre los impactos en los cultivos, los bosques, los ecosistemas, el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada.

Las políticas y programas para la gestión de la calidad del aire en la Megalópolis han incorporado algunos de los resultados de los estudios de salud sobre partículas y O<sub>3</sub>. Sin embargo, persisten preguntas y cuestiones clave sobre la relación entre los efectos crónicos y agudos para la salud que se ven agravados por la exposición a la mala calidad del aire, y sobre la cuantificación de los costos

y beneficios en la salud del control de las principales fuentes de emisión. En este contexto, es necesario:

- Proporcionar recursos suficientes para la investigación sobre la contaminación del aire y la salud.
- Generar estándares y regulaciones para otros tóxicos ambientales de interés para la región, por ejemplo, benceno, hidrocarburos poliaromáticos, entre otros.
- Realizar más estudios sobre la composición de partículas para estimar sus riesgos en la salud.
- Fortalecer y mejorar los sistemas de vigilancia de la contaminación del aire y la salud.
- Fortalecer los estudios sobre los impactos y beneficios de los programas de gestión de la calidad del aire en la salud.
- Generar conocimiento científico sobre los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas, los bosques, la vegetación, los cultivos.
- Generar evidencia sobre los efectos de la lluvia ácida en los cultivos, cuerpos de agua, el patrimonio cultural, en la infraestructura pública y privada.

### **Comunicación, desarrollo de capacidades y participación de las partes interesadas**

El éxito y la sostenibilidad de las políticas ambientales dependen de altos niveles de conciencia ciudadana y de la participación informada de las partes interesadas. Los cambios permanentes en las actitudes y el comportamiento de la población requieren del desarrollo de una cultura ambiental y mejoras en la educación. Muchas políticas no funcionarán a menos que las partes interesadas se apropien de ellas y compartan la responsabilidad de su implementación. Su participación puede proporcionar apoyo a medidas impopulares pero rentables adoptadas en aras del interés público, especialmente si estas medidas son transparentes para la población. Es esencial, mejorar la capacidad de los recursos humanos necesarios para diagnosticar problemas ambientales, así como para formular, ejecutar y evaluar las políticas y programas destinados a mejorar la calidad del aire. Personal más capacitado mejorará el desempeño del gobierno, los sectores privado y académico, y las organizaciones no gubernamentales. La CAME debe ser líder en la gestión de la calidad del aire fomentando la implementación de las siguientes recomendaciones:

- Apoyar las actividades educativas en curso de las entidades de la Megalópolis destinadas a la sensibilización ambiental del público en general.
- Asignar recursos financieros para programas de educación ambiental.
- Apoyar la investigación sobre la contaminación del aire en universidades e instituciones gubernamentales, para fortalecer la capacidad de gestión ambiental en las agencias gubernamentales federales, estatales y locales, así como en los sectores industrial y académico.
- Desarrollar información y recursos basados en evidencia para mejorar la comunicación con el público y las comunidades, de tal manera que puedan estar mejor preparados para las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente entre las poblaciones más vulnerables.

- Involucrar a las partes interesadas y al público en general en el diseño e implementación de estrategias de reducción de emisiones, incluido el desarrollo de campañas de información sobre los beneficios de reducir las emisiones para la población.
- Involucrar a las comunidades y grupos no gubernamentales en estudios de monitoreo y detección de áreas de alta contaminación mediante el uso de sensores de bajo costo.

## **CAPÍTULO 7. RETOS, LECCIONES APRENDIDAS, Y RECOMENDACIONES**

A continuación se resumen algunos de los principales desafíos, lecciones aprendidas, brechas de conocimiento y necesidades de investigación con respecto al estado actual del monitoreo de la calidad del aire, la construcción de inventarios de emisiones, el desarrollo de modelos de pronóstico de la calidad del aire, la investigación en ciencias atmosféricas y salud pública en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y las otras regiones de la Megalópolis, así como algunas opciones de política pública para mejorar la calidad del aire y proteger a la población de los efectos adversos de la contaminación. Las descripciones detalladas de cada uno de estos temas se encuentran disponibles en el Capítulo correspondiente bajo cada título de la sección a continuación.

### **7.1. Monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis**

#### **Retos del monitoreo de la calidad del aire en la Ciudad de México**

El Sistema de Monitoreo de la Ciudad de México (SIMAT) ha mantenido una calidad constante en su trabajo durante las últimas dos décadas, lo que permite contar con información valiosa para construir las tendencias de los principales contaminantes del aire con el propósito de evaluar objetivamente la evolución de los impactos del desarrollo urbano y los resultados de la gestión. A pesar de la creciente importancia del SIMAT para la gestión ambiental y la contribución a la protección y mejora de la salud de la gran población de la ZMVM, los recursos humanos y el presupuesto anual asignados para el monitoreo son limitados y esto podría afectar el cumplimiento de las necesidades básicas de operación y mantenimiento. Por ello, es necesario explorar mecanismos de cooperación para incrementar la participación técnica y económica entre las entidades que conviven en la ZMVM.

#### **Desafíos del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis**

El monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis se ha enfocado principalmente en los centros urbanos. Por lo tanto, hay poca información sobre la situación de la calidad del aire en los asentamientos urbanos periféricos, zonas rurales y las áreas naturales. A pesar de que en la mayoría de las entidades que conforman la Megalópolis se realiza un monitoreo de la calidad del aire desde hace más de una década, los sistemas de monitoreo presentan diferentes niveles de madurez lo que se refleja directamente en su operación y desempeño, con una disparidad significativa en la calidad de los datos. La mayoría de las redes no cuentan con objetivos del monitoreo, objetivos de calidad de los datos, ni planes o protocolos adecuados para el control y aseguramiento de la calidad. Se desconocen la representatividad espacial de las redes/estaciones en función de los objetivos del monitoreo y las métricas para la evaluación de la calidad durante el monitoreo y la validación de los datos. Existe poca información sobre el nivel de certidumbre de los datos y el impacto de estas limitaciones en la toma de decisiones y en el cumplimiento de las metas de gestión.

Si bien, este documento no pretende realizar una evaluación del desempeño de las redes de monitoreo, de la revisión de los datos públicos surgieron algunos aspectos clave que requieren de la atención de las autoridades ambientales y los cuales se mencionan a continuación:

- La región de la Megalópolis está subrepresentada por el monitoreo atmosférico. Existen importantes brechas en el conocimiento sobre la distribución espacial de los contaminantes del aire tanto a escala urbana como regional. Existe poca evidencia sobre la situación de la calidad del aire en zonas rurales, áreas de valor ecológico, extensiones agrícolas (importantes para la seguridad alimentaria) y poblaciones pequeñas.
- Existen desafíos para reducir la disparidad en la calidad de los datos entre los diferentes sistemas de monitoreo. En algunos casos los datos tienen incertidumbres difíciles de cuantificar, limitando su uso para la gestión de la calidad del aire y la información pública.
- Algunos sistemas de monitoreo de calidad del aire no realizan una validación adecuada, antes de publicar sus datos en sus repositorios locales o en el SINAICA (Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire). Los datos con deficiencias deben identificarse e invalidarse durante el proceso del monitoreo, antes de su publicación. Por otro lado, la aprobación y publicación de estos datos en el repositorio del SINAICA da una falsa sensación de confianza para aquellas redes de monitoreo que están produciendo datos deficientes.
- La falta de recursos económicos, técnicos o humanos es una constante en todos los sistemas de monitoreo. Esta es una limitación muy importante que debe ser atendida, ya que la gestión de la calidad del aire depende de ellos y también son una herramienta para la protección de la salud pública.
- La mayoría de los sistemas de monitoreo no tienen un programa de gestión de la calidad de los datos adecuado.
- Todos los sistemas de monitoreo reportan concentraciones que exceden los valores límite de las Normas Oficiales Mexicanas, principalmente para ozono ( $O_3$ ), partículas menores a  $10\ \mu m$  ( $PM_{10}$ ) y partículas menores a  $2.5\ \mu m$  ( $PM_{2.5}$ ). Las mayores concentraciones de  $O_3$  se observan de marzo a mayo, mientras que las de partículas en suspensión ( $PM$ ) entre noviembre y mayo, durante la estación seca. Entre junio a octubre, durante la temporada de lluvia, los niveles de contaminación disminuyen en toda la región. Es importante tener en cuenta que dos de los días más contaminados en todas las entidades suelen presentarse en Navidad y Año Nuevo debido a la quema de pirotecnia y fogatas.
- La lluvia ácida continua como un problema en el territorio de la Ciudad de México; no obstante, la gestión ambiental ha sido omisa y se desconoce cuál es la situación en las otras entidades de la Megalópolis.

### **Recomendaciones para mejorar el monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis**

Las recomendaciones que se presentan a continuación tienen el propósito de invitar a las autoridades locales y federales a que realicen un diagnóstico sobre cómo están operando las redes de monitoreo y de la calidad de los datos que están colectando. Esto les permitirá tomar las acciones necesarias para mejorar el desempeño del monitoreo atmosférico en la región de la Megalópolis. La lista de recomendaciones expuestas aquí no es exhaustiva, pero sí cubre las

mayores deficiencias encontradas en las redes de monitoreo de la calidad del aire durante la elaboración de este documento.

- **Implementar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas.** Realizar auditorías del sistema y evaluaciones técnicas de las redes de monitoreo con el propósito de identificar sus capacidades y deficiencias en cada etapa del proceso. Estas evaluaciones deben realizarse con personal especializado, preferiblemente por terceros independientes ajenos a los programas de monitoreo. Con base en los resultados, establecer metas y planes de trabajo realistas para garantizar la mejora continua y permanente de la operación adecuada en el corto plazo.
- **Implementar planes de control de calidad.** Diseñar y establecer planes estandarizados para el aseguramiento y control de la calidad en las diferentes etapas del monitoreo, con el propósito de avanzar hacia la armonización de la calidad de los datos generados en la región. Establecer métricas de calidad adecuadas para evaluar la calidad del trabajo realizado por las redes de monitoreo.
- **Definir objetivos y métricas de validación.** Definir objetivos, criterios y métricas para la validación de datos, previo al envío al SINAICA, así como protocolos de validación previos a su publicación.
- **Evaluar la representatividad espacial.** Desarrollar protocolos para la evaluación de la representatividad espacial y a partir de ellos realizar una revisión de la ubicación y de los contaminantes medidos en todas las estaciones de monitoreo en la región. En aquellas donde su ubicación comprometa los objetivos del monitoreo, realizar las acciones necesarias para su reubicación, utilizando protocolos armonizados basados en evidencia científica (por ejemplo, modelos regionales de calidad del aire).
- **Incorporar mecanismos de financiamiento a largo plazo.** Garantizar la sostenibilidad de las redes de monitoreo con presupuestos apropiados que incluyan participaciones estatales, municipales y federales. Explorar mecanismos de financiamiento, por ejemplo, fondos fiduciarios, así como la participación de recursos privados, como fundaciones, que permitan el funcionamiento de las redes de monitoreo a largo plazo.
- **Establecer el monitoreo en áreas no-urbanas.** Considerar el establecimiento de estaciones de monitoreo para cubrir las brechas espaciales, generar datos sobre niveles de contaminación en áreas rurales y en áreas de interés ecológico. Incorporar criterios de justicia ambiental en la selección de los sitios de monitoreo.
- **Validación retrospectiva de datos.** Con base en los objetivos del monitoreo, realizar un análisis retrospectivo de los datos generados por los diferentes sistemas de monitoreo e identificar con banderas apropiadas aquellos datos de calidad dudosa.
- **Fortalecer la infraestructura de monitoreo.** A través del Programa de Reforzamiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la Megalópolis se destinaron 150 millones de pesos para fortalecer la infraestructura de monitoreo y apuntalar un Sistema Megalopolitano de Monitoreo de la Calidad del Aire. Hasta diciembre de 2022 el programa presentaba un avance físico y financiero del 94%. Si bien, existe la evidencia de los equipos e infraestructura adquiridos, aún está pendiente la presentación de la evidencia clara y

objetiva de los beneficios alcanzados en la mejora del monitoreo, en la calidad de los datos y en la difusión de la información por parte de las entidades financiadas.

- **Ampliar las capacidades técnicas**. Desarrollar programas de capacitación continua para incrementar las capacidades técnicas del personal de las redes de monitoreo atmosférico.
- **Incorporar mediciones satelitales**. La creciente disponibilidad de datos satelitales y una nueva generación de monitoreo satelital de la calidad del aire puede proporcionar a los científicos y responsables del diseño de políticas información adicional sobre las concentraciones de contaminantes criterio, que puede ser valiosa para regiones de la Megalópolis fuera de la cobertura de las redes de monitoreo. Sin embargo, los datos satelitales no reemplazarán el monitoreo en la superficie, sino que son complementarios. Es necesario establecer nuevas estaciones y continuar el monitoreo de la calidad del aire ambiente de manera rutinaria con instrumentos de grado regulatorio en tales áreas.
- **Incorporar monitores de bajo costo calibrados y validados**. Los desarrollos recientes en la tecnología de sensores han mejorado el rendimiento de los monitores de bajo costo y permiten que se utilicen en condiciones particulares para complementar los sistemas de monitoreo actuales y crear nuevas aplicaciones para informar mejor sobre el estado de la calidad del aire. Sin embargo, esto solo será posible si se implementa un esquema sólido de calibración y validación para reducir las incertidumbres en sus mediciones.
- **Difusión pública de la información**. Es importante mantener la difusión permanente de los resultados del monitoreo a la población a través de medios de comunicación masiva, sitios web, aplicaciones y redes sociales.

## 7.2. Emisiones de contaminantes atmosféricos en la Megalópolis

### **Retos y recomendaciones para mejorar la estimación de las emisiones**

- **Incorporación de métodos de control de calidad durante la construcción de inventarios de emisiones**. Es importante que los grupos de trabajo responsables del desarrollo de inventarios de emisiones relevantes para la Megalópolis implementen las metodologías de control de calidad disponibles durante la preparación de inventarios de emisiones. La aplicación sistemática del control de calidad durante la elaboración de un inventario es crucial para obtener coherencia, integridad, comparabilidad, representatividad y transparencia de la información obtenida.

La aplicación de controles de calidad permitirá identificar las principales áreas con incertidumbre en el inventario, así como los retos existentes para mejorar las estimaciones en cada versión sucesiva. El control de calidad debe incorporarse con técnicas estadísticamente robustas paralelas a la preparación del inventario y no después. Uno de los principales desafíos para incorporar sistemáticamente los procesos de control de calidad es institucionalizar el apoyo a los grupos de trabajo en términos de asignación de los recursos financieros, de infraestructura y de capacitación necesarios.

- **Evaluación independiente de inventarios**. El Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto



Invernadero (INEGYCEI) y el Inventario de Emisiones de la ZMVM (IE-ZMVM) generalmente utilizan una combinación de métodos para estimar las emisiones, que incluyen: (1) muestreo directo de fuentes (principalmente para fuentes industriales); (2) estimaciones indirectas utilizando una combinación de técnicas de balance de masa y modelos, por ejemplo, MOVES-México, Modelo Mexicano de Biogás, el modelo *Non-Road* para fuentes fuera de carretera, y el Sistema de Modelación de Emisiones y Dispersión (EDMS, por sus siglas en inglés); (3) técnicas de extrapolación para la combinación de factores de emisión con datos de actividad, y (4) las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para estimar las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI).

La aplicación conjunta de diversos métodos representa un esfuerzo significativo para obtener, procesar y analizar la información necesaria para elaborar los inventarios de emisiones. Sin embargo, es necesario incorporar técnicas para evaluar la incertidumbre y revisiones independientes. Las emisiones estimadas en los inventarios deben basarse en la verificación y análisis independientemente de la fuente de información utilizada. El primer desafío por resolver es la promoción sistemática del trabajo y la colaboración continua con instituciones y agencias federales, estatales y locales que generan y procesan la información de datos de actividad, para garantizar la coherencia entre los datos reportados, las aproximaciones utilizadas y los datos obtenidos en condiciones reales de operación.

La experiencia de las campañas de medición de campo en la ZMVM en 2002, 2003 y 2006 mostró que la información integral obtenida de estudios de campo, actividades de modelación, redes de monitoreo, consultas dirigidas y visitas guiadas, es una herramienta importante que puede utilizarse con éxito para la evaluación y el análisis de las emisiones estimadas en los inventarios locales. Algunas herramientas valiosas para la evaluación independiente de las emisiones utilizan métodos indirectos como la modelación independiente de emisiones en combinación con campañas de medición de emisiones, así como estudios a largo plazo con la aplicación conjunta de diversas técnicas, incluidos sensores remotos para fuentes móviles e industriales, técnicas de modelación inversa, procesamiento de información satelital, torres de flujo de covarianza de vórtices turbulentos (*eddy covariance*) para fuentes de área, muestreo en túneles y con sistemas portátiles para emisiones vehiculares.

- **Actualización de factores de emisión y datos de actividad.** Debido a los continuos cambios en la tecnología, los requisitos regulatorios de combustibles y los cambios en los procesos, es necesario realizar la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad. Es indispensable que los tomadores de decisiones y las autoridades ambientales de la Megalópolis promuevan estudios de campo y encuestas para actualizar la información utilizada en los inventarios.

Hay fuentes de emisión clave que deben priorizarse para la actualización periódica de los factores de emisión y los datos de actividad, ejemplos de estas fuentes incluyen: los vehículos de gasolina, los vehículos fuera de carretera, las motocicletas, los vehículos diésel pesados y los empleados en el transporte de pasajeros y carga. Las emisiones de resuspensión de polvo en las carreteras, las de los compuestos orgánicos volátiles (COV)

provenientes de las pinturas, el manejo de solventes, desinfectantes, limpiadores, impermeabilizantes y desechos infecciosos, así como las emisiones de la cocción en el sector informal y de los servicios, son ejemplos de fuentes clave con una alta incertidumbre en sus estimaciones y que deben revisarse continuamente.

- **Coordinación entre autoridades ambientales y grupos de trabajo que desarrollan inventarios de emisiones.** Se ha observado que cada entidad que conforma la Megalópolis es tanto emisora como receptora de contaminantes, por lo que es necesario fortalecer la coordinación entre las diferentes entidades para mejorar las estimaciones de emisiones a nivel regional. Además, es imprescindible mejorar la coordinación entre los grupos de trabajo que elaboran los inventarios de emisiones lo que permitirá que la generación, procesamiento y análisis de la información sea eficiente y transparente. Esto contribuirá a mejorar la gestión de la calidad del aire y reducir los niveles de contaminación en la Megalópolis. Es importante comprender la emisión y el transporte regional de contaminantes para coordinar las medidas de control dentro de la Megalópolis. Muchas de las políticas públicas sólo podrán maximizar su beneficio si existe coordinación entre las dependencias gubernamentales de las diferentes entidades.
- **Aumentar y ampliar las capacidades técnicas.** Como parte de la implementación de un proceso para mejorar la coordinación entre las autoridades ambientales, también es importante aumentar y ampliar las capacidades técnicas para la elaboración de inventarios por parte de los grupos de trabajo de las diferentes entidades de la Megalópolis a nivel federal, estatal y municipal. Se requiere de una mejor coordinación y capacidad técnica para generar (en versiones sucesivas) un inventario regional de emisiones para la Megalópolis que sea integral, robusto, preciso, confiable y que sirva de apoyo en la modelación, el pronóstico y el diseño de programas que permitan mejorar la calidad del aire. Es necesario que los informes de los inventarios de emisiones, la metodología de cálculo y el manejo de las incertidumbres, sean de acceso público.
- **Mejorar la estimación de fuentes móviles.** En el caso de las emisiones de vehículos, la mayoría de los inventarios en México desarrollados actualmente, utilizan el modelo MOVES-México, el cual es una adaptación del modelo MOVES (*Motor Vehicle Emissions Simulator*) de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés). El modelo MOVES-México permite estimar las emisiones ajustando los cálculos con bases de datos locales como datos de campañas de monitoreo con sensores remotos, datos de programas de verificación vehicular, pruebas de emisiones en vehículos nuevos y formulación de combustible, además de las condiciones climáticas y características locales y regionales. Sin embargo, un desafío importante en la adaptación es la representación adecuada de las condiciones reales de manejo. Por lo tanto, debido a las particularidades del tránsito que tienen las distintas ciudades deben mejorarse las estimaciones de los factores de emisión y datos de actividad.

La primera versión del MOVES-México fue usada en el país en el año 2016, realizando ajustes al modelo MOVES de Estados Unidos versión 2014a, para la estimación de emisiones de vehículos en carretera. En el año 2022, se actualizó el modelo para México llamándolo MOVES-México 2022, ajustando las bases de datos con información reciente

de sensores remotos, programas de verificación vehicular, flota y actividad vehicular. El modelo estará disponible públicamente durante el segundo semestre de 2023.

MOVES-México 2022 se basó en el modelo MOVES de Estados Unidos 2014b, en lugar del MOVES3, que fue publicado por la EPA en 2022 e incluyó el estado de la ciencia sobre las emisiones de fuentes móviles. Sin embargo, las modificaciones de MOVES3 no aplicarían en México, ya que presentan nuevas mediciones de emisiones en Estados Unidos y también ajustes a las emisiones de vehículos fuera de carretera cuyos factores de emisión no han sido evaluados para México.

Como parte de la campaña de forzadores climáticos de vida corta (FCVC o SLCF, por sus siglas en inglés)<sup>1</sup>, coordinada por el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2) en la Ciudad de México en 2013, se determinaron los componentes de las partículas suspendidas (carbono negro (CN), carbono orgánico y otros componentes inorgánicos de PM<sub>2.5</sub>) y los gases (monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), COV) presentes en las emisiones de varios vehículos diésel (autobuses, camiones de carga) con diferentes años modelo y tecnologías de control de emisiones, en condiciones reales de conducción utilizando la técnica de persecución con el Laboratorio Móvil Aerodyne (ver Capítulo 4, Sección 4.5). La comparación de los resultados con el modelo US-EPA MOVES 2014b mostró desacuerdos para varias especies, demostrando la necesidad de utilizar una base de datos con factores de emisión obtenidos localmente para reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones. Es necesario considerar no solo el ajuste del modelo MOVES-México a las condiciones locales, también la actualización de su versión base para mejorar las estimaciones.

También en 2014, se obtuvieron factores de emisión para gases (CO, CO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub>) y partículas suspendidas (el componente CN y concentración total) para una variedad de vehículos diésel fuera de carretera (equipos de construcción y agrícolas) con y sin filtro de partículas diésel, utilizando la técnica de Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés) en alta resolución temporal. Los resultados mostraron que las reducciones de los factores de emisión de CN fueron significativamente mayores (>99%) con filtros instalados. A diferencia de los vehículos en carretera, aún no existe una regulación para los niveles de emisiones de los vehículos fuera de carretera pero se encuentra en proceso la elaboración de una NOM. Sus contribuciones relativas aumentan con el tiempo a medida que las emisiones de los vehículos de carretera continúan reduciéndose gracias al uso de mejores tecnologías. Existe una gran necesidad de aumentar la base de datos de factores de emisión para los vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo y de continuar estudiando los beneficios de las tecnologías de control de emisiones de estos vehículos en la Megalópolis.

Además de las emisiones de los sistemas de escape de automóviles, es importante caracterizar las emisiones evaporativas del sistema de combustible y aquellas provenientes del uso y desgaste de neumáticos, frenos y otros sistemas que no son de escape, los cuales incluyen a los metales tóxicos.

---

<sup>1</sup> Los forzadores climáticos de vida corta (FCVC o SLCF, por sus siglas en inglés) también se conocen como contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés).

Actualmente se encuentra en ejecución el proyecto *Inventario de emisiones contaminantes de fuentes móviles carreteras para la Megalópolis con año base 2018 y la actualización del modelo MOVES México*, por parte de la CAME y SEMARNAT financiado con recursos del FIDAM-1490. Este proyecto apoyará y brindará capacitación a las siete entidades que conforman la CAME para el desarrollo y actualización de su inventario de emisiones.

- **Mejorar la estimación de las emisiones evaporativas de los combustibles fósiles.** El control de las pérdidas de combustible por evaporación durante los procesos de trasiego y suministro debe basarse en una estrategia integral de regulación, optimización, actualización y mejora en las diferentes fases de la distribución, desde las refinerías, las terminales de almacenamiento y las estaciones de servicio, así como en la aplicación de métodos técnicos para medir las emisiones y evaluar su eficiencia. Es necesario garantizar la reducción de las emisiones durante el almacenamiento, trasiego y expendio mediante el uso de Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV), cuyo funcionamiento debe ser continuo y eficiente de acuerdo con la NOM-004-ASEA-2017. La NOM-006-ASEA-2017 establece las especificaciones, criterios técnicos y requisitos para la seguridad industrial, la seguridad operacional y la protección del medio ambiente que deben realizarse en las instalaciones terrestres de almacenamiento de petróleo y productos petrolíferos. Indica que las instalaciones deben controlar los vapores de gasolina durante la carga de camiones cisterna con una eficiencia igual o superior al 95%, pero no establece los métodos de prueba, por lo que no hay evidencia de su funcionamiento ni cuantificación del control de emisiones. De igual forma, la NOM-005-ASEA-2016 indica que las estaciones de servicio deben contar con dispositivos herméticos para controlar los vapores de gasolina durante la descarga de camiones cisterna. Sin embargo, la norma no establece los parámetros ni métodos de prueba. Actualmente, mediante un proyecto de la CAME se evalúa la cobertura y desempeño de los SRV en gasolineras y propondrá modificaciones a las NOM-005-ASEA-2016 y NOM-006-ASEA-2017.
- **Mejorar las estimaciones de las fuentes industriales.** En las estimaciones se aplican principalmente los factores de emisión de la US EPA, los cuales no necesariamente son aplicables a las condiciones de operación y tecnológicas de los procesos industriales en México. Más aún, cuando no se sigue un control de calidad riguroso los cálculos suelen tener errores, y la gran mayoría de los datos registrados en las Cédulas de Operación Anual (COA) no tienen la representatividad de operación necesaria para los inventarios de emisiones. Los datos son recalculados tomando en cuenta los datos de actividad, información histórica y otras fuentes de información, debido a que los reportes de la industria tienen múltiples errores. Varias entidades no cuentan con los reportes anuales de la industria de jurisdicción estatal o éstas no reportan anualmente o de manera confiable. También hay una gran incertidumbre respecto de las emisiones fugitivas y la eficiencia de operación de los sistemas de control que reporta la industria. Estas limitaciones subrayan la necesidad de reducir la incertidumbre en las estimaciones de fuentes industriales.
- **Mejorar las estimaciones de las fuentes área.** Las fuentes del área son pequeñas pero numerosas y contribuyen significativamente a PM, CO<sub>2</sub>, COV, amoníaco (NH<sub>3</sub>), SO<sub>2</sub> y compuestos tóxicos emitidos por diversas fuentes, incluyendo: almacenamiento de

productos y distribución de transporte (gasolina, GLP), uso comercial y doméstico de solventes, productos de consumo, gestión de residuos (rellenos sanitarios, quema de basura a cielo abierto, tratamiento de aguas residuales, aguas residuales no tratadas), actividades agrícolas (quema de cultivos, labranza, aplicación de fertilizantes y plaguicidas, corrales de engorda de ganado, fermentación entérica, manejo del estiércol), resuspensión de polvo, entre otros. A diferencia de las grandes fuentes estacionarias, las fuentes de área generalmente deben cumplir con límites de emisiones menos estrictos. Muchas de las microindustrias pertenecen al sector de la industria informal que no está regulado eficazmente; son pequeñas y numerosas para ser inventariadas, lo que contribuye a una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de emisiones. Por ejemplo, las fuentes de área contribuyeron al 66% de los COV en la ZMVM en 2018. Existen numerosos talleres pequeños de manufactura, pintura, servicios mecánicos, entre otros, que forman parte del sector informal que en conjunto pueden tener aportes significativos de algunos contaminantes como los COV. A medida que las emisiones de COV urbanos procedentes de fuentes relacionadas con el transporte han disminuido debido a los avances tecnológicos y las medidas reglamentarias, los productos químicos volátiles procedentes de fuentes como el cuidado personal y los productos para el hogar, el recubrimiento de aerosoles, la pintura, el uso de disolventes y los plaguicidas han ganado importancia, lo que pone de relieve la necesidad de adoptar medidas reglamentarias para controlar las fuentes. Como se describe a continuación en categorías específicas (COV, quema de biomasa, gases de efecto invernadero), es importante apoyar las mediciones de campo para estimar los factores de emisión para las fuentes de área, así como los estudios para mejorar la estimación de los datos de actividad.

- **Caracterización de emisiones de COV y compuestos orgánicos tóxicos.** Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son de interés en parte porque participan en reacciones fotoquímicas atmosféricas que contribuyen a la formación de O<sub>3</sub> y tiene un rol en la formación de aerosoles orgánicos secundarios. Además, se sabe que muchos COV individuales son perjudiciales para la salud humana (tóxicos del aire).

El inventario de emisiones de COV tiene una de las mayores incertidumbres en las estimaciones de emisiones. Los COV en la ZMVM durante 2018 se emitieron desde una variedad de fuentes, incluidos vehículos motorizados, instalaciones de fabricación de productos químicos, refinerías, fábricas, productos comerciales y de consumo, y fuentes naturales (biogénicas) (principalmente isopreno y monoterpenos de árboles). Alrededor de dos tercios de las emisiones totales (66%) son generadas por fuentes de área, incluido el uso comercial y doméstico de solventes, junto con fugas de GLP (principalmente propano y butano).

El uso comercial y doméstico de disolventes contribuye con aproximadamente el 32% de las emisiones totales de COV. Dentro de esta actividad, ciertos productos tienen un mayor aporte, como productos de cuidado personal, pesticidas y otros productos para consumo doméstico, limpiadores industriales, recubrimientos arquitectónicos y productos para el cuidado automotriz. Con esto en mente, se debe alentar la creación de estándares que limiten el contenido de COV en productos prioritarios, al tiempo que se promueve la adquisición de mercancías con menor contenido de estas sustancias. Los esfuerzos para

controlar las emisiones de COV también deben centrarse en abordar las fugas de GLP en hogares, empresas, servicios e industrias, que en conjunto generan el 20% de las emisiones. Se requieren medidas para reducir las fugas, promover el consumo responsable de esta energía y avanzar hacia combustibles más respetuosos con el medio ambiente y tecnologías de energía renovable, como el sistema de calefacción y calentadores solares de agua.

Los contaminantes tóxicos son compuestos que tienen la capacidad de producir directamente efectos adversos sobre la salud de la población o el medio ambiente. La mayoría de estos contaminantes son COV como el tolueno y los xilenos, aunque la clasificación también incluye elementos como el plomo, otros metales pesados, fósforo y sus compuestos.

Los compuestos orgánicos tóxicos representan el 29% de las emisiones totales de COV y las fuentes de área son la principal fuente de emisión, con una contribución del 69% del total de tóxicos en la ZMVM en 2018. Las principales actividades emisoras están relacionadas con el uso doméstico y comercial de disolventes, la gestión de residuos urbanos y la distribución de gasolina.

En la actualidad se realizan esfuerzos por mejorar la caracterización de los compuestos orgánicos tóxicos no regulados en la Megalópolis. Un ejemplo de ello es el empleo de técnicas como el termodesorbedor de aerosoles – cromatógrafo de gases – espectrómetro de masas (TAG-GC-MS, por sus siglas en inglés) por el Laboratorio de Especiación Química de Aerosoles Orgánicos Atmosféricos del ICAYCC-UNAM. El objetivo es mejorar el entendimiento del origen de los compuestos tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y su relación con fuentes móviles, industriales, solventes, productos del hogar, pinturas, impermeabilizantes, basura y de productos de uso personal, entre otros.

Debido a su relevancia en la química atmosférica y sus efectos tóxicos, es importante mantener y aumentar el apoyo para los estudios dirigidos a la caracterización de las emisiones de COV y de los compuestos orgánicos tóxicos. Además de caracterizar la especiación química de los COV, los estudios deben priorizar un mejor entendimiento de las distribuciones espaciales y temporales de los compuestos orgánicos en la Megalópolis.

- **Emisiones de motocicletas.** Un desafío importante es la regulación del uso y mejoramiento de la estimación de las emisiones provenientes de las motocicletas en la Megalópolis. En los últimos años el crecimiento en el uso de motocicletas en la región ha sido explosivo. Entre otros factores, se debe a la versatilidad de este tipo de unidades para circular en condiciones de alta congestión vehicular (generalmente haciendo caso omiso al reglamento de tránsito), el menor precio de adquisición y la falta de regulación adecuada. La importancia de reglamentar el uso y mantenimiento de las motocicletas, así como mejorar las estimaciones de sus emisiones, radica en el hecho de que en su mayoría circulan con tecnologías emisoras altamente contaminantes y potencialmente pueden impactar negativamente en la calidad del aire. Actualmente no hay regulaciones para las emisiones de motocicletas, pero la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

(SEMARNAT) coordina un grupo de trabajo para la preparación de un proyecto de NOM para limitar sus emisiones.

- **Mejorar las estimaciones de los incendios, la quema de biomasa y las tolveneras.** La quema de biomasa es una de las mayores fuentes de gases traza y aerosoles emitidos a la atmósfera global y es la fuente dominante de CN y aerosoles orgánicos primarios. El humo del fuego también es una fuente importante de gases de efecto invernadero, incluidos el CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Otros contaminantes emitidos incluyen CO, compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y no volátiles, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, cianuro de hidrógeno (HCN) y ácido nitroso (HONO). Hay muchas fuentes y tipos de incendios relacionados con las emisiones de quema de biomasa; algunos son fuentes naturales como los incendios forestales no controlados y no planificados, mientras que otros, como las emisiones de la quema de residuos de cultivos, los desechos sólidos municipales, la quema de madera residencial para cocinar y calentar, y el biocombustible para la producción de ladrillos, son el resultado de actividades humanas. Se han utilizado diferentes enfoques para estimar los factores de emisión para la quema de biomasa en la Ciudad de México y la región circundante, incluidas las mediciones directas sobre incendios en experimentos de campo, mediciones de aeronaves y mediciones de laboratorio como parte de las campañas MILAGRO y FCVC. A pesar de los importantes avances en las mediciones de los factores de emisión, la detección y la cuantificación de la quema de biomasa, es necesario mejorar la precisión de las estimaciones de actividad, tanto para la quema a cielo abierto como para el uso de biocombustibles.

La evidencia sugiere que los episodios excepcionales con concentraciones elevadas de contaminación en la región están vinculados a condiciones meteorológicas particulares, junto con la contribución de grandes fuentes de emisión regionales, como la quema de biomasa (agrícola y forestal) y las emisiones de partículas provenientes del suelo descubierto y erosionado. Es importante promover y apoyar estudios de campo, monitoreo, satelitales y modelación para caracterizar mejor las emisiones de estas fuentes y así gestionar los procedimientos a seguir por la población y las autoridades ambientales durante las contingencias ambientales.

- **Mejorar las estimaciones de gases de efecto invernadero.** Las directrices del IPCC se utilizan generalmente para estimar las emisiones de los GEI con técnicas comparables en todos los países, incluido México. Como parte de la campaña FCVC, coordinada por el MCE2, para caracterizar las principales fuentes de CN, CH<sub>4</sub> y contaminantes asociados, los estudios de campo realizados en México para estudiar las emisiones de CH<sub>4</sub> de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la fermentación entérica del ganado indicaron que las metodologías del IPCC son una herramienta inexacta para estimar los gases de efecto invernadero locales (ver Capítulo 4, Sección 4.5). Es importante determinar factores de emisión específicos a cada fuente emisora para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. Con base en estas mejores estimaciones, se pueden identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

Además, los estudios de campo demostraron la importancia de obtener factores de emisión de CN y contaminantes asociados en condiciones reales de operación provenientes de

vehículos en y fuera de carretera, hornos de ladrillos, estufas, para mejorar las estimaciones de emisiones, ya que México fue el primer país comprometido a reducir el CN como parte de su NDC (siglas en inglés para Contribución Nacional Determinada) presentada a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

- **Incorporación de datos satelitales y de percepción remota para la evaluación de emisiones.** Existen esfuerzos por parte del sector académico en conjunto con autoridades ambientales por incorporar el uso de información satelital como una herramienta de evaluación de los inventarios de emisiones. Un ejemplo de ello es el uso de columnas de NO<sub>2</sub> y formaldehído (HCHO) del instrumento TROPOMI de Sentinel-5P para evaluar cambios en las emisiones en regiones de la Megalópolis. Debido a su gran potencial para evaluar las estimaciones de las emisiones en los inventarios, es importante que se expanda el uso de estas técnicas en México. La incorporación de datos satelitales para la evaluación de emisiones debe también incluir la aplicación de técnicas que caracterizan la estructura vertical, los procesos de mezcla, ventilación y dispersión de la atmosfera tales como mediciones con ceilómetro, radiosondeos, lidars Doppler y ejercicios de modelación. La integración de estas técnicas es necesaria para comprender y predecir la interacción entre las emisiones, la meteorología y los niveles de contaminación de la Megalópolis.

### **7.3. Investigación en ciencias de la atmósfera en la Megalópolis**

A continuación, se resumen algunas de las principales lecciones aprendidas, brechas de conocimiento y necesidades de investigación con respecto al estado actual del conocimiento científico sobre las fuentes y procesos de formación y destrucción de contaminantes atmosféricos en la ZMVM y las otras regiones de la Megalópolis descrito previamente.

#### **Fuentes y procesamiento de los contaminantes atmosféricos**

##### ***Lecciones aprendidas***

- Los estudios MCMA-2003 y MILAGRO sugerían que, durante la primera década de este siglo, en el núcleo urbano de la ZMVM la atmósfera era altamente sensible a los COV, pero en la región periférica podría ser sensible a los COV o NO<sub>x</sub>, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Estudios recientes indican que es probable que exista una diferencia espacial sustancial en la sensibilidad del O<sub>3</sub> a los COV, incluyendo diferencias importantes en diversas áreas de la Ciudad de México y su periferia.
- Los niveles de contaminantes primarios (como CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) en la ZMVM son altamente sensibles a los cambios en las emisiones antropogénicas. Esto se demostró durante los problemas de suministro de combustible en enero de 2019 y en los efectos de la suspensión de actividades y restricciones de movilidad durante la pandemia de COVID-19 después de marzo de 2020.
- La experiencia obtenida de los cambios en las emisiones resultantes de las medidas drásticas emprendidas por los gobiernos durante la pandemia de COVID-19, muestra que la formación de contaminantes secundarios como el O<sub>3</sub> no fue controlada por los cambios en los contaminantes primarios en las proporciones en que fueron reducidos. Además, eso resalta la importancia de comprender los efectos de la meteorología y las contribuciones



episódicas al evaluar la calidad del aire durante grandes reducciones de emisiones. Durante la pandemia se modificaron los patrones de actividad y distribución de la flota vehicular, así como la actividad doméstica y de servicios, esto pudo tener impactos en la concentración y variedad de los precursores y, en consecuencia, en la reactividad química de la atmósfera.

- Deben investigarse las relaciones no lineales entre los contaminantes precursores y la formación de compuestos secundarios (incluidos sus efectos sobre las concentraciones máximas) en diversas condiciones meteorológicas, junto con el cambio climático y los factores socioeconómicos que podrían afectar a la calidad del aire en la Megalópolis en el futuro.
- Deben investigarse los efectos en las relaciones de los precursores y las variaciones en la composición química de los perfiles de emisión de COV (tanto los de la combustión de combustibles fósiles, como de los procesos de evaporación) en la formación de contaminantes secundarios, en diversas condiciones meteorológicas en la Megalópolis.
- La producción de aerosoles secundarios responde a cambios en la composición de sus precursores y las condiciones meteorológicas, por lo que se debe investigar su sensibilidad a diferentes compuestos gaseosos en distintos contextos meteorológicos.

### ***Brechas de conocimiento***

- ¿Qué procesos meteorológicos controlan la distribución temporal y espacial de los contaminantes gaseosos y particulados en la atmósfera?
- ¿Cuáles son los factores emergentes (por ejemplo, regulaciones para nuevas emisiones, cambios tecnológicos, comportamiento social) que intervienen en la formación de contaminantes en la Megalópolis y cómo se pueden controlar?
- ¿Ha cambiado la producción de O<sub>3</sub> en la ZMVM? ¿En qué sectores de la ciudad la producción de O<sub>3</sub> es sensible a COV o NO<sub>x</sub>? ¿Hay transiciones estacionales, semanales y diurnas entre los regímenes químicos?
- ¿Cuáles son los perfiles actuales y la distribución espacial de mezclas de COV, de los compuestos orgánicos semivolátiles y los compuestos orgánicos persistentes en la Megalópolis? ¿Cuáles son las contribuciones de estos compuestos a la formación de O<sub>3</sub> y aerosoles orgánicos secundarios (SOA, por sus siglas en inglés)?
- ¿Cuáles son los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas naturales y las áreas agrícolas de la Megalópolis?

### **Impactos de la contaminación proveniente de fuentes regionales**

- ¿Por qué no ha mejorado la calidad del combustible en el corredor Tula-Tepeji?
- ¿Es posible establecer un sistema de vigilancia para las emisiones provenientes del complejo industrial? ¿Cuáles son las alternativas viables para reducir emisiones de las fuentes prioritarias?
- ¿Cuál es el contenido de compuestos tóxicos presentes en las plumas que transportan contaminantes del aire desde Tula?

- ¿Cómo contribuyen las emisiones a la carga de enfermedad asociada con la contaminación del aire en Tula y sus alrededores, así como en las trayectorias de las plumas?
- ¿Cómo afectan las emisiones del corredor industrial a otras ciudades de la región, por ejemplo, Toluca, Pachuca, Tulancingo, San Juan del Río?
- ¿Hay algún impacto de la deposición ácida atmosférica en áreas agrícolas y suelo de conservación en las entidades de la Megalópolis?
- Además del corredor industrial Tula-Tepeji, ¿existen otras fuentes de contaminación antropogénica con impactos regionales?
- ¿Cómo afectan a los objetivos de gestión las contribuciones regionales de contaminantes antropogénicos en las entidades de la Megalópolis?

### **Investigación científica regional**

- La información disponible del monitoreo indica que algunas ciudades dentro de la Megalópolis tienen niveles de contaminación similares e incluso mayores que los observados en la ZMVM.
- Los programas de gestión de la calidad del aire requieren de un sólido respaldo científico actualizado para el desarrollo y la evaluación de estrategias de control para mejorar la calidad del aire regional.
- Los estudios científicos que permiten entender los procesos de transporte y transformación de los contaminantes son escasos fuera de la ZMVM. Es necesario avanzar en el estudio de los fenómenos meteorológicos asociados al transporte regional de contaminantes, la identificación de fuentes naturales y antropogénicas con impacto regional, los efectos sobre la salud y los ecosistemas, los impactos en las metas locales de gestión y el diseño de estrategias para mitigar las emisiones regionales.
- La información sobre los efectos de la contaminación en la salud humana fuera de la ZMVM es escasa. Es prioritario conocer la situación en las demás entidades de la Megalópolis.
- El monitoreo de la calidad del aire en la región es limitado, es necesario incrementar la cobertura espacial con un enfoque en los contaminantes prioritarios en las diferentes regiones y mejorar la difusión de la información, con fines de protección de la salud, incluidas las zonas no urbanas y de interés para la protección de cultivos y recursos forestales, modelación o validación de datos satelitales.
- Es necesario promover esfuerzos institucionales, financieros y técnicos para reducir la disparidad en las actividades de monitoreo, inventario de emisiones, modelación, investigación científica y gestión en la región, bajo la coordinación de la CAME.

### **Meteorología local y calidad del aire**

#### ***Lecciones aprendidas***

- Es necesario estudiar las características de la capa límite planetaria (o atmosférica) y sus efectos en la contaminación del aire. Los perfiladores meteorológicos (por ejemplo, viento,

temperatura, humedad) y de aerosoles han demostrado ser una herramienta robusta para medir e investigar con una resolución temporal alta el comportamiento de diversas variables en la capa límite planetaria. El estudio de las propiedades de la capa límite requiere de múltiples técnicas, combinando la teledetección con observaciones de radiosondeos, donde cada una de ellas proporcionará información diferente sobre los procesos de mezcla, ventilación y dispersión.

- Quedan preguntas abiertas sobre los diferentes procesos en la capa límite que controlan la mezcla y las concentraciones superficiales de contaminantes, así como la interacción de las capas límite entre cuencas vecinas, por lo que se necesitan diferentes instrumentos síncronos en múltiples localidades para comprender mejor su variabilidad temporal y espacial.
- Los estudios presentados en la Sección 4.4.2 del Capítulo 4 describen el conocimiento reciente sobre la capa de mezclado, su variabilidad diaria y estacional, y los usos potenciales del ceilómetro para comprender mejor la relación entre la capa de mezcla y la calidad del aire. Sin embargo, aún quedan por investigar preguntas sobre cómo esta interacción influye en los eventos de contaminación extrema en el contexto de un clima cambiante.
- Los posibles efectos de la radiación sobre la formación de O<sub>3</sub> son un aspecto relevante para la gestión, se ha observado que con el incremento de la radiación solar aumenta también la producción de O<sub>3</sub>.
- El ProAire 2021-2030 considera una reducción de aerosoles, sin embargo, esto podría inducir un aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub> por el incremento en la radiación solar que alcanza la superficie. Por otra parte, el clima cambiante podría impactar en los procesos de formación de los contaminantes secundarios.

### ***Brechas de conocimiento y necesidades de investigación***

- ¿Cuál es la intensidad del calentamiento urbano en los diferentes conglomerados urbanos de la Megalópolis?
- ¿Cómo afecta el calentamiento urbano a la micrometeorología de las ciudades de la Megalópolis?
- ¿Qué impactos tiene el calentamiento urbano en el clima regional y la química atmosférica?
- ¿Deberían los planes de gestión considerar los efectos del calentamiento urbano en los objetivos de reducción de contaminantes? ¿Deberían incluir acciones para su mitigación?
- ¿Cuáles son los efectos esperados del cambio climático sobre la meteorología y la calidad del aire en regiones urbanas y no urbanas en las entidades que conforman la Megalópolis?
- ¿Cómo influyen los cambios meteorológicos de escalas global, regional y local en los episodios de alta contaminación urbana?
- La evidencia disponible indica con cierto grado de certeza que el incremento de la temperatura traerá cambios en la química de la atmósfera y en la producción de O<sub>3</sub>, sin embargo, existe una gran incertidumbre en la magnitud. El concepto de penalización climática se refiere al posible incremento en la concentración de O<sub>3</sub> en ambientes con altos

niveles de sus precursores. En este sentido ¿cómo afectará la penalización climática los objetivos de reducción de los diferentes planes de gestión? ¿Deberían los planes de gestión incluir la penalización climática?

### **Forzadores climáticos de vida corta**

#### ***Emisiones de carbono negro de vehículos diésel en carretera y fuera de carretera***

- Los resultados de los estudios de campo en la ZMVM resaltan la necesidad de utilizar bases de datos de factores de emisión obtenidos localmente para los países en desarrollo, con el propósito de reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisiones y mejorar la evaluación de la eficacia de las medidas de reducción.
- La estimación de las emisiones de los vehículos fuera de carretera que se usan para la construcción y la agricultura es un desafío, ya que el conjunto de datos de factores de emisión disponibles es considerablemente menor en comparación con los disponibles para vehículos en carretera.
- Debido a su durabilidad, los vehículos fuera de carretera a menudo se mantienen en servicio durante varias décadas y sus contribuciones relativas a las emisiones aumentan con el tiempo, mientras que las emisiones de los vehículos en carretera se reducen por la mayor frecuencia de renovación y las mejoras tecnológicas. Por lo tanto, los vehículos fuera de carretera son potencialmente grandes contribuyentes a las emisiones de CN en muchos centros urbanos, destacando la importancia de diseñar estrategias de control de emisiones y la gran necesidad de incrementar las bases de datos de factores de emisión para vehículos fuera de carretera a través de estudios de campo.

#### ***Emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales***

- El drenaje y las plantas de tratamiento son una fuente importante de CH<sub>4</sub> y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).
- Adoptar sistemas de tratamiento con bajo consumo de energía, ya que esto representa más del 60% de las emisiones totales de CH<sub>4</sub>.
- Mejorar el funcionamiento de la sedimentación primaria (purgas frecuentes).
- Se debe dar un tratamiento adecuado de los lodos, preferiblemente uno que considere la producción y el uso de biogás.
- Las metodologías de Tier 1 del IPCC (2006 y 2019) representan una herramienta inexacta, ya que subestiman las emisiones.
- Es importante determinar factores de emisión específicos para estimar con mayor precisión los inventarios de emisiones de los GEI. En base a esto, se podrán identificar y aplicar políticas de mitigación más efectivas.

### ***Emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica del ganado***

- Es necesario continuar con los estudios sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica del ganado bovino bajo diferentes sistemas de producción y de alimentación de México, incluyendo otras especies de rumiantes como ovinos y caprinos.
- Fortalecer los estudios para la determinación de los factores de emisión específicos de CH<sub>4</sub> para el manejo de estiércol para México.
- Es necesario diseñar estrategias de mitigación de emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica del ganado bovino aplicables a escala comercial.
- Fortalecer los estudios para la determinación de factores de emisión específicos de N<sub>2</sub>O para México. En este tema, el progreso ha sido mínimo.
- Realizar análisis del ciclo de vida de los GEI originarios del sector agrícola.

### **Modelación de la calidad del aire y pronóstico**

#### ***Mejorar el desarrollo y la aplicación de modelos***

- Emplear modelación inversa para complementar la evaluación de los inventarios *bottom-up*, teniendo en cuenta su potencial para mejorar la resolución espacial y temporal del inventario, y para estimar la ubicación e intensidad de las fuentes de emisión conocidas y emergentes.
- Asignar recursos para reducir las incertidumbres en los inventarios, mejorar los perfiles y estimaciones basados en mediciones, y avanzar en el conocimiento sobre la participación de los COV en la producción de aerosoles y contaminantes gaseosos de origen fotoquímico.
- Obtener datos sobre las características de los aerosoles primarios para diferentes ambientes representativos de la Megalópolis. Obtener datos meteorológicos y de calidad del aire fuera de las zonas urbanas.
- Explorar las mejores parametrizaciones del modelo para las diferentes regiones de interés en la Megalópolis, producir u obtener los datos con las resoluciones adecuadas para la entrada y evaluación del modelo.
- Considerar las necesidades de modelación dentro de los proyectos de investigación y las políticas de gestión, aumentar la resolución espacial y temporal de las mediciones de calidad del aire y meteorológicas. Incluir las necesidades de modelación en el diseño de sistemas de monitoreo.
- Fortalecer las capacidades de modelación de la región a través de la construcción de un ensamble de modelos que incluya los modelos actualmente disponibles (SEDEMA, ICAyCC, Querétaro, entre otros), así como posibles desarrollos futuros.
- Apoyar los esfuerzos de la Ciudad de México para asegurar la mejora continua de su sistema de pronóstico y garantizar su sostenibilidad.
- Avanzar hacia la asimilación de datos de productos satelitales y de otras redes de observación y perfiladores, que pueden utilizarse tanto para estudios de casos como pronóstico. Con una capacidad informática adecuada, es posible pasar de modelos de área

limitada a modelos globales multiescala y así estudiar la contaminación atmosférica en el contexto del cambio climático.

- Coordinar esfuerzos interinstitucionales en la producción, gestión y tratamiento de datos para generar productos útiles para la gestión de la calidad del aire.
- Aplicar algoritmos de aprendizaje automático para mejorar las parametrizaciones físicas de los modelos, en la estimación de emisiones, en el análisis de imágenes satelitales y salidas de modelos para ajustar los resultados, y con ello obtener mejores predicciones.

#### ***Fortalecer los recursos humanos:***

- Formar investigadores en el área de asimilación de datos, uso de información satelital, evaluación de modelos, evaluación del uso y aplicación del aprendizaje automático en los procesos realizados por los modelos, así como en la evaluación y post-procesamiento de los productos obtenidos en la modelación.
- Es necesario incrementar el número de personal técnico para el mantenimiento de la infraestructura de supercómputo y uso del software.

#### ***Desarrollar infraestructura***

- Centralización de la infraestructura informática y virtualización de la prestación de servicios para dotar a entidades o instituciones de capacidades informáticas, o en su defecto asignar recursos a las entidades de la Megalópolis para la adquisición de la infraestructura informática.

### **Impacto del COVID-19 en la calidad del aire**

#### ***Brechas de conocimiento y necesidades de investigación***

- La experiencia durante la pandemia mostró un nuevo escenario que confirmó la compleja interacción entre las emisiones, la meteorología y la química atmosférica en la atmósfera urbana de la ZMVM.
- Se necesitan estimaciones precisas de las emisiones de NO<sub>x</sub> y COV en la ZMVM y las regiones circundantes para comprender los cambios en la formación de O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y otros contaminantes secundarios durante el período de confinamiento por el COVID-19.
- Es necesario comprender cómo cambió la composición química de los COV durante la pandemia.
- Existe evidencia suficiente de que, durante el confinamiento por COVID, el sector del transporte se vio fuertemente afectado, reduciendo sustancialmente la congestión vehicular, pero al mismo tiempo, incrementando el tránsito de vehículos de reparto de mercancías a domicilio. En términos generales el sector industrial también disminuyó sus actividades, algunas industrias más que otras. Se modificaron las actividades de preparación de alimento en el hogar, en la venta informal y el sector restaurantero. Sin embargo, aumentaron las emisiones de productos para uso personal, productos para el hogar, pinturas, agentes impermeabilizantes, basura doméstica, desechos, desinfectantes,

limpiadores, entre otros. Es necesario evaluar como modificaron sus operaciones los sectores de servicios y comercios.

- Es necesario comprender cómo la contribución de las emisiones domésticas (por ejemplo, productos de limpieza, preparación de alimentos, quema y fugas de GLP y gas natural) y de fuentes distintas a los automóviles y la industria (por ejemplo, incendios agrícolas y forestales, emisiones biogénicas, emisiones evaporativas de otras fuentes) contribuyen a la contaminación del aire e influyen en la producción de O<sub>3</sub> y aerosoles secundarios.
- Con base en lo que se observó durante las restricciones de COVID-19 en la ZMVM, los resultados indicaron que las reducciones en las emisiones de los vehículos e industrias provocaron la disminución de las concentraciones de los contaminantes primarios en el aire ambiente, sin embargo, para el O<sub>3</sub> no se observó una reducción en las concentraciones ¿por qué? ¿Cómo podría esto afectar las metas de gestión de la calidad del aire y las acciones que se aplican durante las contingencias ambientales?
- A partir de la experiencia durante la pandemia ¿cómo modifican la reactividad química de la atmósfera los cambios en la flota vehicular y de la actividad doméstica?
- Dadas las reducciones observadas en PM<sub>2.5</sub>, es necesario comprender cómo las disminuciones en las emisiones de precursores modificaron la química de la formación secundaria de aerosoles.
- Transporte regional de contaminantes atmosféricos durante el período de confinamiento:
  - ¿Cómo contribuyeron las fuentes de emisión de los estados cercanos a los niveles de contaminación del aire en la ZMVM?
  - ¿Cómo contribuyeron las emisiones de la ZMVM a los niveles de contaminación en los estados cercanos?
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la reactividad atmosférica, la disponibilidad de los radicales y la formación de contaminantes secundarios, durante el período de confinamiento a través de estudios de modelación para comprender la calidad del aire durante el confinamiento.
- La disponibilidad de la especiación integral de los COV durante el confinamiento por COVID-19 permitirá evaluar los cambios en la reactividad de OH-COV.
- Se necesita una caracterización exhaustiva de la meteorología local y regional y los diferentes escenarios durante el confinamiento para identificar cualquier mejora potencial en la ventilación (es decir, condiciones de viento) o condición favorable para la fotoquímica (es decir, radiación solar más intensa).
  - ¿Cuáles fueron las condiciones meteorológicas que contribuyeron a la alta producción/acumulación de O<sub>3</sub> durante los días de alta contaminación?
  - ¿Qué patrones de viento regionales y locales ayudaron a dispersar los contaminantes durante el confinamiento?

## 7.4. Estudios de salud pública y contaminación del aire en la Megalópolis

### Lecciones aprendidas

Es necesario comprender mejor la relación entre los efectos crónicos y agudos en la salud, y que son agravados por la exposición a la mala calidad del aire. En esta sección se presenta un resumen de las lecciones aprendidas de los estudios recientes de impactos en salud por contaminantes atmosféricos en México.

- ***Incorporación de resultados de estudios en salud en programas del control de la contaminación del aire.*** Los resultados de estudios recientes muestran evidencia de las correlaciones entre diversos tipos de morbilidad y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, principalmente para PM<sub>2.5</sub>. La investigación de los impactos en la salud incluye: efectos a nivel celular y ácido desoxirribonucleico (ADN), enfermedades pulmonares crónicas, diferentes tipos de cáncer, enfermedades metabólicas, efectos neurológicos, funciones de concentración-respuesta, y el valor estadístico de la vida. Existe un rango amplio de estudios que proveen evidencia de los impactos en salud por contaminantes atmosféricos. Sin embargo, es importante que estos resultados puedan incorporarse como soporte del diseño de normatividad y programas para reducir la contaminación atmosférica. Para ello, la comunidad científica en México debe abordar el tema de la representatividad y robustez de los resultados, para que puedan aportar al establecimiento de una base científica para el diseño de estrategias de control de la contaminación. Más aún, se deben crear mecanismos para reducir las brechas para una integración eficiente de los resultados de los estudios en salud en el diseño de políticas públicas, incluyendo las actividades para la prevención, y para la disminución de la exposición a contaminantes dañinos a la salud.
- ***Divulgación de información para disminuir la exposición.*** Otro avance substancial ha sido la divulgación en tiempo real sobre las condiciones de la calidad del aire y sus posibles impactos en la salud en la población de la Megalópolis, con base en la información proveniente de las redes de monitoreo atmosférico disponibles. La divulgación continua de la información a través de aplicaciones, reportes públicos, medios informativos y de las redes sociales ayuda a la población a tomar decisiones informadas para realizar sus actividades en espacios interiores y exteriores para disminuir la exposición a contaminantes del aire, mejorando con ello su salud y calidad de vida. Estas acciones han sido claves antes, durante y después de la declaración de las contingencias ambientales de O<sub>3</sub> y de material particulado en el PCAA (Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas) para alertar e informar a la población. Las actividades de divulgación de la información forman parte de las acciones listadas en los ProAire para la Megalópolis.
- ***La evidencia epidemiológica señala que no existe un umbral de exposición segura a material particulado y contaminantes gaseosos.*** De acuerdo con los resultados presentados, existe evidencia que sugiere que los efectos en la salud por la contaminación atmosférica no están relacionados a límites específicos. La mezcla de contaminantes atmosféricos en las diferentes zonas urbanas de la Megalópolis puede ser compleja, su caracterización química y los posibles efectos en la salud son retos importantes. Esto sugiere que la exposición a concentraciones de material particulado, incluso por debajo de las guías de calidad del aire de la OMS puede ser peligrosa para la salud de la población.



## Preguntas científicas clave

- **Representatividad de los estudios de morbilidad.** Una pregunta clave tiene que ver con la necesidad de entender mejor la representatividad de los resultados obtenidos en los estudios de morbilidad, tales como enfermedades metabólicas, diabetes, y efectos en el desarrollo neurológico, entre otras. Es importante saber si los resultados obtenidos en los estudios de morbilidad son lo suficientemente robustos para sustentar el desarrollo de nuevas iniciativas para políticas públicas y nuevas regulaciones.
- **La integración de los resultados de estudios de salud en el diseño de políticas públicas.** Un tema que debe abordarse entre la comunidad científica y los tomadores de decisiones es el establecimiento de los mecanismos para integrar los resultados de los estudios de salud en la agenda pública. Más allá del establecimiento científico de las relaciones entre efectos en la morbilidad y la exposición a contaminantes atmosféricos, es vital que la información generada asista el desarrollo de estrategias de mejoramiento de la calidad del aire.
- **Estudios de salud por exposición a otros contaminantes.** Tradicionalmente los estudios en salud se han enfocado en contaminantes criterio como el O<sub>3</sub> y el material particulado. Sin embargo, la población en zonas urbanas se encuentra expuesta a complejas mezclas de gases y partículas. Así, existe la necesidad de expandir los estudios de los efectos en la salud por exposición a las mezclas químicas de COV, HAPs, contaminantes tóxicos, metales, nanopartículas, contaminantes emergentes<sup>2</sup> y las complejas combinaciones de compuestos en el material particulado. Estas investigaciones son necesarias no solo para estudios de mortalidad sino también de morbilidad.
- **Estudios de exposición.** Es necesario aumentar y mejorar nuestro entendimiento de las características de la exposición a los contaminantes atmosféricos. Esto incluye también mejorar los mecanismos para generar la información necesaria para los estudios de exposición a nivel local y regional. Es importante determinar si los resultados de esos estudios pueden utilizarse para mejorar nuestro entendimiento de la exposición a los contaminantes del aire.
- **Integración de otras metodologías.** La mejora de las evaluaciones de exposición implica también reforzar la colaboración entre las agencias que generan la información, así como la integración de otras metodologías de generación de datos tales como información satelital, monitoreo personal, inventarios de emisiones y de modelación de la calidad del aire. La integración de estas metodologías permitiría mejorar substancialmente la disponibilidad de las bases de datos necesarias para entender la exposición a contaminantes atmosféricos.

---

<sup>2</sup> Los contaminantes emergentes, o contaminantes de preocupación emergente, son sustancias de origen y naturaleza química diversa que están presentes en el medio ambiente pero que no se controlan ni regulan de manera rutinaria, que tienen el potencial de afectar negativamente la salud humana y el medio ambiente. Incluyen productos de cuidado personal o de limpieza del hogar, pesticidas, aditivos industriales, entre otros.

## **Retos científicos y necesidades de investigación**

- **Perfiles toxicológicos.** Los resultados de los estudios toxicológicos muestran evidencia de causas biológicas y mecanismos que pueden explicar impactos en salud agudos, crónicos, y transgeneracionales. Existe sin embargo el reto de determinar los perfiles toxicológicos del contenido orgánico del material particulado en diferentes partes de la Megalópolis. Es importante conocer las diferencias regionales de los perfiles toxicológicos para correlacionarlos con impactos en salud específicos para grupos poblacionales en la Megalópolis.
- **Impactos por mezclas de contaminantes atmosféricos y patógenos.** El estudio de los impactos en salud por mezclas o combinación de contaminantes del aire con patógenos (por ejemplo, virus) es todavía un reto importante que debe ser abordado por la comunidad científica. Esto incluye también la necesidad de desarrollar los métodos toxicológicos necesarios a utilizar para abordar el problema. La complejidad de este reto aumenta en la medida que la variabilidad de las distribuciones espaciales de los microorganismos patógenos y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos sea grande dentro de la Megalópolis.
- **Interacción entre el cambio climático, la calidad del aire y salud.** Existe una compleja interacción en múltiples escalas entre el cambio climático y la calidad del aire, sin embargo, es muy clara la conexión entre las fuentes de contaminación del aire local y las emisiones que impulsan el cambio climático. Además de los efectos adversos de los contaminantes antropogénicos en la salud humana, los contaminantes atmosféricos naturales como el polen, los compuestos orgánicos volátiles biogénicos, el humo de los incendios forestales y el polvo arrastrado por el viento pueden verse afectados por el cambio climático y convertirse en un riesgo cada vez mayor para la salud. La modificación del clima también inducirá cambios en los hábitos de la población, por ejemplo, el tiempo que los individuos permanecen en el interior, así como también modificará la disponibilidad y distribución de alérgenos derivados de plantas y hongos, esto tendrá efectos sobre el asma y la rinitis alérgica en niños y adultos, en consecuencia, será necesario abordar los ajustes de políticas y los cambios de estilo de vida necesarios para mitigar estos efectos nocivos.

Al estimar el impacto futuro en la salud, además de la incertidumbre en las concentraciones de O<sub>3</sub> y partículas suspendidas, existen incertidumbres en las estimaciones de riesgo, como la modificación del efecto por la temperatura en las relaciones entre contaminantes y en la respuesta humana, alterando la posible adaptación futura resultante de estos cambios y un potencial nuevo de riesgo asociado a la exposición. Es necesario comenzar a evaluar las implicaciones del cambio climático en la salud humana y orientar las políticas hacia la mitigación del cambio climático y la contaminación del aire, potenciando así los beneficios para la salud y optimizando recursos y costos.

- **Sistema de vigilancia de la salud.** Una propuesta interesante sería el diseño e implementar un sistema de vigilancia de la salud en conjunto con las redes de monitoreo ambiental existentes en la Megalópolis. La integración de los sistemas podría ayudar sustancialmente a la identificación temprana de acciones para mitigar la exposición a contaminantes del aire, incluyendo eventos extraordinarios como los presentados durante la pandemia de COVID-19. Más aun, la integración propuesta puede ayudar a mejorar la evaluación de la efectividad de los programas de control de la calidad del aire.

- **Composición química del material particulado y tóxicos emergentes.** Las asociaciones entre los impactos en salud y la toxicidad de las diferentes especiaciones químicas en el material particulado deben continuar y aumentarse, sobre todo para los componentes de HAPs, metales, CN y componentes orgánicos. Esto permitirá entender cómo la agregación química y la formación de aerosoles determinan la activación molecular de procesos fisiopatológicos de enfermedades agudas y crónicas. Se requiere también llevar a cabo estudios de partículas tóxicas emergentes como son las partículas ultrafinas, partículas de microplásticos y aquellas que no derivan de combustión como el desgaste de frenos y llantas, identificando sus fuentes de emisión y potencial tóxico.
- **Métodos de estudios en salud.** Para ayudar en el desarrollo de políticas para mejorar la calidad del aire, es necesario integrar los resultados de diferentes métodos de estudios epidemiológicos tales como ecológicos, series de casos, estudios cross-seccionales, controles de caso, estudios de cohorte, e intervenciones. Para los estudios en salud se deben integrar también modelos *in vitro* e *in vivo* de exposición a tóxicos, técnicas moleculares de alto rendimiento y parámetros de función fisiológica de enfermedades crónicas. Es necesario avanzar en el estudio de los efectos sinérgicos de la mezcla urbana, así como de los efectos de los contaminantes emergentes. Los modelos de exposición empleados en los estudios epidemiológicos se pueden beneficiar del uso de datos obtenidos de plataformas satelitales y de las tecnologías de bajo costo, así como de las salidas de ensambles de modelos numéricos.
- **Datos sobre contaminantes criterio y de otras especies de interés.** Se requieren datos de los contaminantes criterio con coberturas y resoluciones espaciales y temporales adecuadas, para los estudios epidemiológicos y de exposición. Es necesario mejorar la calidad de los datos para reducir la incertidumbre en las evaluaciones de los impactos. La evaluación de los efectos de los contaminantes emergentes requerirá de la aplicación de nuevas tecnologías en las redes de monitoreo y de la realización de campañas de campo.
- **Desarrollo de indicadores de gestión basados en la mejora de la salud pública.** La gestión de la calidad del aire podría beneficiarse con el desarrollo e incorporación de indicadores basados en salud que pudieran relacionar los cambios en la incidencia de enfermedades o en la mortalidad atribuidas con los cambios en los niveles de contaminantes como el O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

### **Brechas de conocimiento**

- En el contexto mexicano, ¿existe nueva información científica sobre los efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire? ¿Cuál ha sido la información reciente sobre contaminación del aire y salud?
- ¿Existe evidencia de efectos crónicos y agudos agravados por la exposición a la mala calidad del aire?
- ¿Existe evidencia de efectos sinérgicos relacionados con la exposición a las diversas mezclas de contaminantes encontradas en los distintos ambientes urbanos? ¿Existen datos suficientes para su evaluación?
- ¿Es necesario desarrollar factores de concentración-respuesta adecuados para la población mexicana?

- ¿Cuáles son los costos sociales y económicos asociados con la contaminación del aire? ¿Es necesario desarrollar metodologías para apoyar las evaluaciones del costo beneficio en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles han sido los avances para estimar mejor cuantitativamente los efectos de la calidad del aire en la salud?
- ¿Cuál es la contribución de la contaminación del aire ambiente exterior a la exposición en interiores?
- ¿Cuáles son los umbrales para la exposición a partículas y contaminantes gaseosos? ¿cuáles serían los retos para alcanzarlos?
- ¿Es necesario incluir algún otro contaminante o contaminantes (por ejemplo, partículas ultrafinas, HAPs), dentro de las regulaciones de calidad del aire ambiente?
- ¿Cómo modificará el cambio climático los impactos en la salud?

## **7.5. Gestión de la calidad del aire en la Megalópolis**

Se ha avanzado mucho en la lucha contra los problemas de contaminación del aire en la Ciudad de México y en algunas de las entidades de la Megalópolis. Sin embargo, aún persisten desafíos para reducir eficazmente las concentraciones de contaminantes nocivos a fin de proteger la salud pública y el medio ambiente. El crecimiento de la población, la expansión urbana y la alta motorización del área metropolitana y la región de la Megalópolis circundante, continuarán generando emisiones contaminantes. Además, los cambios en el paisaje urbano y el cambio climático han contribuido al aumento progresivo de la temperatura en la ZMVM y algunas otras entidades en la Megalópolis, lo que podría afectar la meteorología local y la calidad del aire. Los incendios forestales regionales causados por períodos de sequías cada vez más frecuentes e intensas, inducen episodios severos de contaminación por partículas. A excepción de la ZMVM, el monitoreo de la calidad del aire, los inventarios de emisiones y los estudios de contaminación del aire en la Megalópolis son limitados, lo que dificulta la evaluación de la calidad del aire regional y los impactos de los contaminantes en la región necesarios para diseñar estrategias eficaces de reducción de emisiones.

### **Brechas de conocimiento**

- ¿Cómo promover el desarrollo del conocimiento científico y promover la creación de centros de investigación fuera de la Ciudad de México?
- ¿Cómo promueve el gobierno federal el trabajo científico y el desarrollo de capacidades en las entidades de la Megalópolis?
- ¿Qué datos adicionales se necesitan para diseñar y evaluar las medidas de los ProAires de las entidades de la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las principales necesidades de investigación en cada uno de los centros urbanos de la Megalópolis?

- La evidencia disponible sugiere que la química y la física de la atmósfera de la ZMVM están cambiando ¿cómo puede el gobierno liderar una nueva campaña integral de monitoreo para la Megalópolis?
- ¿Cuáles son las lecciones científicas aprendidas para la gestión ambiental de las restricciones durante la pandemia de COVID-19?

### **Papel de la CAME en la coordinación de la gestión regional de la calidad del aire**

La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) fue creada en 2013 como un órgano de coordinación para la planeación y ejecución de políticas, programas, proyectos y acciones en materia de protección al ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico, en la región que conforma la Megalópolis del centro de México.

La CAME está integrada por siete entidades federativas: la Ciudad de México y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala y también por cuatro Secretarías del gobierno federal: La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), la de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) y la de SALUD. Cuenta con un Órgano de Gobierno, que está integrado por los Titulares de las Secretarías federales, los Gobernadores de los estados y la Jefa de Gobierno. Cuenta también con un Comité Científico Asesor, constituido por 15 científicos, académicos y expertos en materia ambiental, quienes tienen la facultad de asesorar y brindar sus opiniones y recomendaciones sobre las acciones prioritarias de la Comisión.

Para su operación y funcionamiento, la CAME cuenta con una Coordinación Ejecutiva, que convoca a las sesiones del Órgano de Gobierno, propone acciones y da seguimiento a los acuerdos. El Coordinador Ejecutivo articula la actuación de ocho Grupos de Trabajo, integrados por el personal técnico de las Entidades e Instituciones participantes en la CAME.

La CAME cuenta con el Fideicomiso 1490 Para apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis (FIDAM 1490). Éste recibe aportaciones anuales de \$5.00 pesos por cada verificación vehicular realizada en los centros de verificación de las entidades de la CAME. El FIDAM 1490 también puede recibir aportaciones de otras fuentes como donaciones, remanentes de economías presupuestarias de sus integrantes, entre otras.

La CAME podría fortalecerse con acciones como las siguientes:

- Incluir como integrante de la Comisión a la Secretaría de Energía (SENER) y a la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (HACIENDA) del gobierno federal, para reforzar la implementación de políticas, programas y acciones ambientales regionales de alto impacto.
- Crear un Consejo Consultivo integrado por representantes de organizaciones ambientales de la sociedad civil, y cámaras y asociaciones empresariales y de servicios del sector ambiental, donde puedan opinar y dar seguimiento a temas de interés común, así como promover el diálogo constructivo entre las autoridades ambientales y la sociedad civil en general.
- Fomentar aportaciones y donaciones al FIDAM 1490 provenientes de otras fuentes, como la verificación vehicular obligatoria de emisiones de vehículos de placa federal que realiza

la SICT, aportaciones por las industrias con mayores emisiones de contaminantes, y fortalecer el compromiso de las aportaciones derivadas de la verificación vehicular estatal.

- Avanzar en otros temas ambientales prioritarios en los que la CAME puede contribuir a armonizar programas y acciones, por ejemplo, en la atención simultánea y armonizada de la calidad del aire y el cambio climático, economía circular, temas de calidad del agua, residuos, movilidad y transporte, así como de conservación de Áreas Naturales Protegidas, entre otros.
- De inicio, tomar como una prioridad apoyar el impulso de las medidas establecidas en los ProAires de las entidades para reducir las emisiones de los contaminantes en las cuencas atmosféricas de la región.
- Impulsar la evaluación basada en evidencia de la efectividad de los programas y proyectos en las decisiones presupuestarias y las políticas públicas, incluyendo la creación de requisitos de desempeño en subvenciones y contratos para garantizar que los programas se ejecutan y cumplen con sus objetivos de manera efectiva.

### **Monitoreo de la calidad del aire**

Si bien la ZMVM tiene una red de monitoreo de la calidad del aire bien desarrollada que comprende gran parte del área urbana, la cobertura espacial del monitoreo de calidad del aire en la creciente zona conurbada de la Ciudad de México es limitada. A nivel de la Megalópolis el monitoreo está restringido a los centros urbanos. Además, existe disparidad importante en la calidad de los datos.

La CAME tiene la oportunidad de contribuir con su liderazgo en la gestión para mejorar las condiciones del monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis. En la sección 7.1 de este documento se listan una serie de valiosas recomendaciones que deben ser gestionadas por la CAME y las autoridades ambientales para mejorar la cantidad, cobertura, y calidad de los datos de las redes monitoreo, destacando:

- Desarrollar capacidades estratégicas de la Red Regional de Monitoreo, incluyendo diferentes tipos de sitios (urbanos, periurbanos, rurales).
- Proporcionar apoyo financiero para mejorar la infraestructura y las capacidades técnicas de la red de monitoreo de la calidad del aire en la Megalópolis, incluida la capacitación en el análisis y validación de datos satelitales.

### **Inventario de emisiones**

Los inventarios de emisiones son una herramienta esencial de gestión de la calidad del aire para evaluar el progreso de las estrategias de control de emisiones y planificar acciones futuras. En el Capítulo 3 se presenta una descripción detallada de los retos y recomendaciones para mejorar los inventarios de emisiones.

El inventario de emisiones de la ZMVM está bien desarrollado y se utiliza para informar las estrategias de reducción de emisiones. En la sección 7.2 de este documento se describieron los retos y las oportunidades que existen para mejorar los inventarios de emisiones en la Megalópolis y que puedan ser verdaderamente útiles en la gestión de la calidad del aire. La CAME puede contribuir decisivamente en la implementación de las recomendaciones listadas en la sección 7.2

al fungir como líder el proceso de gestión de la calidad del aire en la Megalópolis. Dentro de las áreas de oportunidad que se pueden destacar se incluyen:

- verificar los objetivos del inventario y su alineación con las necesidades de la gestión,
- mejorar la cobertura y resolución espaciales,
- revisar los perfiles de emisiones y la especiación química,
- incrementar la resolución temporal, y
- publicar la información de los cálculos e incertidumbres.

En todos los casos es necesario incluir o mejorar la información sobre las fuentes de área relacionadas con el uso de solventes en los sectores residencial, comercial y de servicios. Se requieren estudios específicos para obtener o mejorar los factores de emisión y datos de actividad, así como para las distribuciones temporales y la especiación química.

### **Modelación y pronóstico de la calidad del aire**

El gobierno de la Ciudad de México ha implementado un sistema de pronóstico de calidad del aire para alertar al público sobre la alta contaminación por O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> con 24 horas de anticipación, y en la evaluación de las políticas de reducción de emisiones para mejorar la calidad del aire y otros beneficios colaterales. Aún persisten desafíos sustanciales en la implementación del sistema de pronóstico de la calidad del aire en el resto de las Megalópolis debido a la falta de datos e investigación para respaldar los esfuerzos de modelación y pronóstico, así como al limitado personal técnico calificado.

Hay esfuerzos de parte de las instituciones académicas para pronosticar la calidad del aire. El ICAyCC-UNAM cuenta con un modelo de pronóstico a 72 horas basado en WRF-CHEM para CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> con una cobertura espacial que comprende a la Ciudad de México y las entidades aledañas, las salidas gráficas se encuentran disponibles para consulta en línea). Existen otros esfuerzos de modelación y pronóstico en el sector académico y otras entidades, pero la información no es pública.

La CAME podría proporcionar los recursos financieros y ser un catalizador para desarrollar un sistema para el modelo y pronóstico de la calidad del aire en las entidades de la Megalópolis, incluyendo la colaboración con expertos nacionales e internacionales para brindar capacitación en modelación y pronóstico de la calidad del aire.

### **Transporte y movilidad: integración transporte-uso del suelo-gestión de la calidad del aire**

La expansión urbana descontrolada y el aumento de la motorización en la Megalópolis son los principales orígenes de la contaminación del aire y de la congestión vial. La creación de un sistema de transporte equilibrado con el medio ambiente requiere de una estrategia transversal que integre al sector transporte, cambios en el uso del suelo, la gestión de la calidad del aire, y que involucre a los diferentes organismos responsables (medio ambiente, transporte, desarrollo urbano, energía y obras públicas) y con participación pública. El objetivo sería una menor dependencia de los vehículos individuales a través de la provisión de un mejor transporte público y de medidas que permitan realizar más desplazamientos a pie o en bicicleta. Algunas de las acciones en que la CAME debe tomar un liderazgo para su implementación incluyen:

- Impulsar la infraestructura para la movilidad activa o no motorizada.
- Desarrollar políticas públicas para la ubicación óptima de infraestructura y equipamiento (ciudades compactas con usos mixtos del suelo).
- Desarrollo de sistemas de transporte masivo inter e intraurbano (carga y pasajeros).
- Orientar el desarrollo urbano de la Megalópolis hacia la contención de su expansión (densificación del territorio).
- Estudios de origen-destino más frecuentes para la planificación de infraestructuras y para mejorar las operaciones.
- Promover la movilidad sostenible (teletrabajo, transporte público de alta capacidad, caminar y andar en bicicleta)
- Establecer incentivos para la introducción de vehículos de baja emisión, como automóviles eléctricos e híbridos, así como motocicletas eléctricas.
- Considerar la limitación del uso de vehículos privados en áreas muy transitadas.

### **Ciencia de la atmósfera**

Las observaciones actuales en la ZMVM y otras entidades de la Megalópolis indican que las concentraciones atmosféricas de contaminantes como el O<sub>3</sub> y las partículas suspendidas no han disminuido a límites aceptables y muestran incrementos en los últimos años, lo que plantea la necesidad de actualizar el estado del conocimiento científico de los procesos que controlan la formación, el transporte y el destino de estos contaminantes. La comprensión sólida de los cambios en la meteorología, en las emisiones y los procesos que controlan la formación de O<sub>3</sub> y otros contaminantes secundarios en la ZMVM y sobre todo en la región de la Megalópolis, es fundamental para el diseño de nuevas acciones políticas. A continuación, se describen algunas de las necesidades de investigación que la CAME debe promover para el desarrollo de estrategias de gestión de la calidad del aire.

- ***Se necesitan mediciones atmosféricas extensivas y estudios de modelación*** para definir estrategias óptimas de control de emisiones para cada entidad particular en la Megalópolis, considerando las circunstancias institucionales, técnicas, económicas, sociales y políticas locales.
  - La aplicación y validación de modelos de calidad del aire requiere de datos de emisiones con alta resolución espacial y temporal, así como del conocimiento de la meteorología y la radiación solar. Además de la medición de los contaminantes medidos comúnmente como el O<sub>3</sub>, óxido nítrico (NO), NO<sub>2</sub>, CO y la masa de las partículas suspendidas, se necesitan mediciones de COV individuales y de la composición química de las partículas. Esta información detallada requerirá estudios especiales para comprender mejor las causas de tales emisiones y evaluar el progreso en su reducción.
  - Los responsables de la formulación de políticas deben utilizar esta información para equilibrar los beneficios económicos y sociales de las mejoras sanitarias con los costos del control de emisiones.



- ***Impactos del cambio climático en la calidad del aire y la salud.*** El cambio climático puede afectar la calidad del aire y, a la inversa, la calidad del aire puede afectar el cambio climático. Las emisiones de gases de efecto invernadero (por ejemplo, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) y forzadores climáticos de vida corta (CH<sub>4</sub>, CN, O<sub>3</sub>) en el aire, pueden provocar cambios en el clima.
  - Perfeccionar el conocimiento de los impactos del cambio climático en la salud humana y el medio ambiente en la región de la Megalópolis, mejorando la capacidad de los administradores estatales y locales de calidad del aire para considerar el cambio climático en sus decisiones para proteger la calidad del aire y reducir los impactos de un clima cambiante, así como las comunidades para abordar el cambio climático de manera efectiva y sostenible.
  - Integrar la mitigación del cambio climático y los inventarios de emisiones con la gestión de la calidad del aire, como se ha hecho en la Ciudad de México.
  - Cuantificar los beneficios sanitarios y económicos de reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos y de gases de efecto invernadero.
  - Proporcionar herramientas y recursos para desarrollar un sistema energético más sostenible.
  - Evaluar cómo las diferentes estrategias de control multi-contaminante/multi-sectorial pueden afectar los gases de efecto invernadero y otras emisiones de contaminantes atmosféricos.
  - Desarrollar información y recursos basados en evidencia para informar al público y a las comunidades para prepararse mejor sobre las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente en las poblaciones más vulnerables.

### **Impactos de la contaminación del aire**

La contaminación del aire afecta negativamente a la salud humana, causa el deterioro de la visibilidad a escala regional y deposición ácida, daña los cultivos y los ecosistemas. La mayoría de los estudios en México se han centrado en comprender los impactos de los contaminantes del aire en la salud humana. Existen brechas de información sobre los impactos en los cultivos, los bosques, los ecosistemas, el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada. Las políticas y programas para el control de la calidad del aire en la Megalópolis han incorporado algunos de los resultados de los estudios de salud sobre partículas y O<sub>3</sub>. Sin embargo, persisten preguntas y cuestiones clave sobre la relación entre los efectos crónicos y agudos para la salud, que se ven agravados por la exposición a la mala calidad del aire, y la cuantificación de los costos y beneficios para la salud del control de las principales fuentes de emisión. A continuación se describen algunas de las necesidades de investigación que la CAME debería promover para el desarrollo de programas que mejoren la estimación de estos impactos.

- Proporcionar recursos suficientes para la investigación sobre la contaminación del aire y la salud.
- Generar estándares y regulaciones para otros tóxicos ambientales de interés para la región, por ejemplo, benceno, hidrocarburos poliaromáticos, entre otros.

- Realizar más estudios sobre la composición de partículas para estimar sus riesgos en la salud.
- Fortalecer y mejorar los sistemas de vigilancia de la contaminación del aire y de salud.
- Fortalecer los estudios sobre los impactos y beneficios de los programas de gestión de la calidad del aire en la salud.
- Generar conocimiento científico sobre los impactos de la contaminación del aire en los ecosistemas, los bosques, la vegetación, los cultivos.
- Generar evidencia sobre los efectos de la lluvia ácida en los cultivos, cuerpos de agua, el patrimonio cultural, en la infraestructura pública y privada.

### **Comunicación, desarrollo de capacidades y participación de las partes interesadas**

El éxito y la sostenibilidad de las políticas ambientales dependen de altos niveles de conciencia ciudadana y de la participación informada de las partes interesadas. Los cambios permanentes en las actitudes y el comportamiento de la población requieren del desarrollo de una cultura ambiental y mejoras en la educación. Muchas políticas no funcionarán a menos que las partes interesadas se apropien de ellas y compartan la responsabilidad de su implementación. Su participación puede proporcionar apoyo a medidas impopulares pero rentables adoptadas en aras del interés público, especialmente si estas medidas son transparentes para la población. Es esencial, mejorar la capacidad de los recursos humanos necesarios para diagnosticar problemas ambientales, así como para formular, ejecutar y evaluar las políticas y programas destinados a mejorar la calidad del aire. Personal más capacitado mejorará el desempeño del gobierno, los sectores privado y académico, y las organizaciones no gubernamentales. La CAME debe ser líder en la gestión de la calidad del aire fomentando la implementación de las siguientes recomendaciones:

- Apoyar las actividades educativas en curso de las entidades de la Megalópolis destinadas a la sensibilización ambiental del público en general.
- Asignar recursos financieros para programas de educación ambiental.
- Apoyar la investigación sobre la contaminación del aire en universidades e instituciones gubernamentales para fortalecer la capacidad de gestión ambiental en las agencias gubernamentales federales, estatales y locales, así como en los sectores industrial y académico.
- Desarrollar información y recursos basados en evidencia para mejorar la comunicación con el público y a las comunidades de tal manera que puedan estar mejor preparados para las posibles amenazas climáticas creadas por incendios forestales, inundaciones, sequías y otros eventos extremos, particularmente entre las poblaciones más vulnerables.
- Involucrar a las partes interesadas y al público en general en el diseño e implementación de estrategias de reducción de emisiones, incluido el desarrollo de campañas de información sobre los beneficios de reducir las emisiones para la población.
- Involucrar a las comunidades y grupos no gubernamentales en estudios de monitoreo y detección de áreas de alta contaminación mediante el uso de sensores de bajo costo.

## REFERENCIAS

### CAPÍTULO 1

Bravo, A.H. (1960) Variation of different pollutants in the atmosphere of Mexico City. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 10, 447–449.

CAA (Clean Air Act). (1970) Clean Air Act Extension of 1970. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/STATUTE-84/pdf/STATUTE-84-Pg1676.pdf> (Consultado el 10 de octubre de 2022).

CAM (Comisión Ambiental Metropolitana). (2002) Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010; DF, GEMEX, SEMARNAT, SS: CDMX. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/> (Consultado el 27 de junio del 2019).

CAM (Comisión Ambiental de la Metropolitana). (2011) Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011–2020. CDMX. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/> (Consultado el 27 de junio de 2019).

CAMe (Comisión Ambiental de la Megalópolis) (2016) Segundo convenio modificatorio del fideicomiso 1490 Modificación al Fideicomiso para Apoyar Programas, Proyectos y Acciones para la Prevención y control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México, 10 de febrero de 2016. <https://www.gob.mx/comisionambiental/documentos/segundo-convenio-modificatorio-del-fideicomiso-1490> (Consultado el 19 de abril de 2023).

CDMX (Ciudad de México). (2017) Constitución Política de la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 1. 5 febrero 2017. <https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/index.php/gaceta> (Consultado el 17 de agosto de 2019).

DDF (Departamento del Distrito Federal). (1990) *Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica: Un Compromiso Común (PICCA)*; Departamento del Distrito Federal: Mexico City, Mexico, pp. 1–77. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/programa\\_integral\\_contra\\_la\\_contaminacion\\_atmosferica.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/programa_integral_contra_la_contaminacion_atmosferica.pdf) (Consultado el 8 de julio de 2019).

DDF (Departamento del Distrito Federal). (1996) Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, 1995–2000 (PROAIRE); Mexico City, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Secretaría de Salud: CDMX. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire\\_2002-2010.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf) (Consultado el 8 de julio de 2019).

de Foy, B.; Varela, J. R.; Molina, L. T.; Molina, M. J. (2006) Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2321–2335.

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1971) Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental. <http://saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/2188/2078> (Consultado el 8 de julio de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1988) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148\\_050618.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_050618.pdf) (Consultado el 16 de abril de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1996) Convenio de coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental Metropolitana 1996. <http://www.dof.gob.mx/> (Consultado el 16 de abril, de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2013) Convenio de coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental de la Megalópolis, que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Gobierno del Distrito Federal y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Puebla y Tlaxcala 2013. <http://www.dof.gob.mx/> (Consultado el 16 de abril de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994a) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-023-SSA1-1993.pdf> (Consultado el 2 de mayo de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994b) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-021-SSA1-1993.pdf> (Consultado el 2 de mayo de 2019)

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994c) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-026-SSA1-1993.pdf> (Consultado el 2 de mayo de 2019)

DOF (Diario Oficial de la Federación), (2019) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019. 2019. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-022-SSA1-2019.pdf> (Consultado el 24 de octubre de 2022).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2021a) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valores normados para la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021. 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-023-SSA1-2021.pdf> (Consultado el 24 de octubre de 2022).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2021b) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021. 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-025-SSA1-2021.pdf> (Consultado el 24 de octubre de 2022).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2021c) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O<sub>3</sub>). Valores normados para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021. 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-020-SSA1-2021.pdf> (Consultado el 24 de octubre de 2022).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2021d) 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. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021. 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-021-SSA1-2021.pdf> (Consultado el 2 de octubre de 2021).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2021e) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-2021. 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-026-SSA1-2021.pdf> (Consultado el 24 de octubre de 2021).

Doran, J. C., Abbott, S., Archuleta, J., Bian, X., Chow, J., Coulter, R. L., de Wekker, S. F. J., Edgerton, S., Elliott, S., Fernandez, A., et al. (1998) The IMADA-AVER Boundary Layer Experiment in the Mexico City Area. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 79, 2497–2508.

Edgerton, S. A., Bian, X.; Doran, J.C., Fast, J. D., Hubbe, J. M., Malone, E. L., Shaw, W. J., Whiteman, C. D., Zhong, S., Arriaga, J. L., et al. (1999) Air Pollution in Mexico City: A Collaborative Research Project. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 49, 1221–1229.

Grutter, M., Rivera, O., Retama, A., Contreras, J., González, E., Porras, S., López, O., Arredondo, T., Díaz, A., Robles, M. A., Sánchez, B., Azpra, E., Ladino, L. A. (2023) Proyecto: Evaluación de dispositivos basados en microsensores para el monitoreo continuo de la calidad del aire. Informe Final, SECTEI 190/2021 (31 de marzo del 2023). <http://www.epr.atmosfera.unam.mx/Microsensores-2022/> (Consultado el 25 de abril de 2023).

Haagen-Smit, A. J. (1952) Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog. *Ind. Eng. Chem.*, 44, 1342–1346.

INE-MCE2-UNAM (Instituto Nacional de Ecología, Molina Center for Energy and the Environment, Universidad Nacional Autónoma de México). (2011) Temas emergentes en el cambio climático: el metano y el carbono negro, posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación. Prepared by L. T. Molina and L. G. Ruiz Suarez. [https://www.researchgate.net/publication/262915533\\_Temas\\_emergentes\\_en\\_cambio\\_climatico\\_metano\\_y\\_carbono\\_negro\\_sus\\_posibles\\_co-beneficios\\_y\\_desarrollo\\_de\\_planes\\_de\\_investigacion](https://www.researchgate.net/publication/262915533_Temas_emergentes_en_cambio_climatico_metano_y_carbono_negro_sus_posibles_co-beneficios_y_desarrollo_de_planes_de_investigacion).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) (2021) Censo Nacional de Población y Vivienda 2020, 16 de marzo 2021. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> (Consultado el 18 de abril de 2023).

Jauregui, E. (1997) Heat Island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821–3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2).

Lezama, J.; Favela, R., Galindo, L., Ibarra, M., Sanchez, S., Molina, L. T. (2002) Forces driving pollutant emissions in the MCMA. In *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 61–104. ISBN 978-1-4020-0507-7.

MCE2-INECC (Molina Center for Energy and the Environment, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2013) Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de

Vida Corte en México, informe final, 2013.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191436/2013\\_Plan\\_Nacional\\_de\\_Contaminantes.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191436/2013_Plan_Nacional_de_Contaminantes.pdf).

NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2022a) Air Quality Observations from Space. <https://airquality.gsfc.nasa.gov/> (Consultado el octubre 20, 2022).

NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2022b) TEMPO. [https://weather.msfc.nasa.gov/tempo/#:~:text=The%20NASA%20TEMPO%20mission%20is,For\)%20covering%20Greater%20North%20America](https://weather.msfc.nasa.gov/tempo/#:~:text=The%20NASA%20TEMPO%20mission%20is,For)%20covering%20Greater%20North%20America) (Consultado el octubre 20, 2022).

Molina, L. T. and Molina, M. J. (2002) *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, ISBN 978-1-4020-0507-7.

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

Molina, L. T., Velasco, E., Retama, A., & Zavala, M. (2019). Experience from integrated air quality management in the Mexico City Metropolitan Area and Singapore. *Atmosphere*, 10(9), 512.

Molina, L. T. (2021) Introductory lecture: air quality in megacities. *Faraday Discuss.*, 226, 9-52, doi:10.1039/d0fd00123f.

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

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México). (2018) Taller para la Evaluación del PROARIE 2011–2020, Identificación de Estrategias para Mejorar la Calidad del Aire de la CDMX. Ciudad de México. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/> (Consultado el 28 de junio de 2019).

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México). (2021a). *Inventario de Emisiones de la CDMX, 2018*; SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México): Ciudad de México, Mexico, 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf> (Consultado el 24 de octubre de 2022)

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2021b) Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018. Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH, SEMARNAT (2021) Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021-2030). Ciudad de México. Diciembre, 2021.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2017) Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la Megalópolis, PROAIRE de la Megalópolis 2017-2030. Ciudad de México. [https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa\\_de\\_Gesti%C3%B3n\\_Federal\\_2017-2030\\_final.pdf](https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa_de_Gesti%C3%B3n_Federal_2017-2030_final.pdf).

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2022) Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire ProAire, 17 de octubre de 2022. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire> (Consultado el 6 de noviembre de 2022)

Singh, H. B., Brune, W. H., Crawford, J. H., Flocke, F., Jacob, D. J. (2009) Chemistry and transport of pollution over the Gulf of Mexico and the Pacific: Spring 2006 INTEX-B campaign overview and first results. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2301–2318.

Streit, G. E.; Guzmán, F. (1996) Mexico City Air quality: Progress of an international collaborative project to define air quality management options. *Atmos. Environ.* 30, 723–733.

United Nations. (2018a.) 2018 Revision of World Urbanization Prospects. <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (Consultado el 9 de julio de 2019).

United Nations. (2018b) *The World's Cities in 2018: Data Booklet*; Statistical Papers—United Nations (Ser. A), Population and Vital Statistics Report; UN, New York, NY, USA. ISBN 978-92-1-047610-2.

UNEP (United Nations Environment Programme) (2011a) Near-term climate protection and clean air benefits: Actions for controlling short-lived climate forcers, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 78 pp.

UNEP (United Nations Environment Programme) (2011b). HFCs: A critical link in protecting climate and the ozone layer, 40 pp.

UNEP-CCAC (United Nations Environment Programme–Climate & Clean Air Coalition) (2018). Progress and opportunities for reducing short-lived climate pollutants in Latin America and the Caribbean [<https://www.ccacoalition.org/en/resources/progress-and-opportunities-reducing-slcps-across-latin-america-and-caribbean>]. Coordinated by L. T. Molina and V. H. Paramo. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/progress-and-opportunities-reducing-slcps-across-latin-america-and-caribbean> (Consultado el octubre del 2020).

UNEP and WHO (United Nations Environment Program and World Health Organization). (1992) *Urban Air Pollution in Megacities of the World: Earthwatch: Global Environment Monitoring System*; World Health Organization, United Nations Environment Programme, Eds.; Published on behalf of World Health Organization and United Nations Environment Programme by Blackwell Reference: Oxford, UK, ISBN 978-0-631-18404-1

UNEP-WMO (United Nations Environment Programme and World Meteorological Organization) (2011) Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone. Nairobi, Kenya, 303 pp.

US EPA (US Environmental Protection Agency). (2022). Summary of the Clean Air Act. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act> (Consultado el 10 de octubre de 2022).

Velasco, E. and Retama, A. (2017) Ozone's threat hits back Mexico City. *Sustain. Cities Soc.* 31, 260–263.

Velasco, E., Retama, A., Zavala, M., Guevara, M., Rappenglück, B., & Molina, L. T. (2021). Intensive field campaigns as a means for improving scientific knowledge to address urban air pollution. *Atmospheric Environment*, 246, 118094. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118094>.

Whiteman, C.D.; Zhong, S.; Bian, X.; Fast, J.D.; Doran, J.C. (2000) Boundary layer evolution and regional-scale diurnal circulations over the Mexican plateau. *J. Geophys. Res.*, 105, 10081–10102.

WHO (World Health Organization). (2021) WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

WHO (World Health Organization) (2020a) Director General’s opening remarks at the media briefing. <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>. (Consultado el 20 de septiembre de 2020).

WHO (World Health Organization). (2020b) Strengthening preparedness for COVID-19 in cities and urban settings: interim guidance for local authorities. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331896>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. (Consultado el 20 de septiembre de 2020).

Zavala, M., Brune, W. H., Velasco, E., Retama, A., Cruz-Alavez, L. A., Molina, L. T. (2020). Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmos. Environ.*, 238, 117747. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117747>.



## CAPÍTULO 2

Almanza, V. H., Molina, L. T., & Sosa, G. (2012) Soot and SO<sub>2</sub> contribution to the supersites in the MILAGRO campaign from elevated flares in the Tula Refinery. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 10583-10599. <https://doi.org/10.5194/acp-12-10583-2012>.

Anenberg, S. C., Bindl, M., Brauer, M., Castillo, J. J., Cavalieri, S., Duncan, B. N., et al. (2020) Using satellites to track indicators of global air pollution and climate change impacts: Lessons learned from a NASA-supported science-stakeholder collaborative. *GeoHealth*, 4, e2020GH000270. <https://doi.org/10.1029/2020GH000270>.

CAMe (Comisión Ambiental de la Megalópolis) (2020) La CAMegalópolis apoya el Fortalecimiento de las Capacidades de Monitoreo de la Calidad del Aire en la región, comunicado de prensa, 30 de marzo de 2020. <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/la-comision-ambiental-de-la-megalopolis-apoya-el-fortalecimiento-de-las-capacidades-de-monitoreo-de-la-calidad-del-aire-en-la-region> (Consultado el 12 de febrero de 2023).

Carabali, G., Villanueva-Macias, J., Ladino, L. A., Álvarez-Ospina, H., Raga, G. B., Andraca-Ayala, G., Miranda, J., Grutter, M., Silva, M. M., Riveros-Rosas, D. (2021) Characterization of aerosol particles during a high pollution episode over Mexico City. *Scientific reports*, 11(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01873-4>.

CEOS (Committee on Earth Observation Satellites). (2019) Geostationary Satellite Constellation for Observing Global Air Quality: Geophysical Validation Needs. CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation, CEOS Working Group on Calibration and Validation, Oct 2, 2019. [https://ceos.org/observations/documents/GEO\\_AQ\\_Constellation\\_Geophysical\\_Validation\\_Needs\\_1.1\\_2\\_Oct2019.pdf](https://ceos.org/observations/documents/GEO_AQ_Constellation_Geophysical_Validation_Needs_1.1_2_Oct2019.pdf). (Consultado el 20 de julio de 2022).

Chance, K. V., Liu, X., Suleiman, R. M., Flittner, D. E., Al-Saadi, J., & Janz, S. J. (2013) Tropospheric emissions: Monitoring of pollution (TEMPO). In J. J. Butler, X. Xiong, & X. Gu (Ed.), *Proceeding of SPIE 8866, Earth observing systems XVIII*, 88660D. SPIE—International Society for Optical Engineering. <https://doi.org/10.1117/12.2024479>.

de Foy, B., Krotkov, N. A., Bei, N., Herndon, S. C., Huey, L. G., Martínez, A.-P., Ruiz-Suárez, L. G., Wood, E. C., Zavala, M., and Molina, L. T. (2009) Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO<sub>2</sub> retrievals during the MILAGRO field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 9599–9617, <https://doi.org/10.5194/acp-9-9599-2009>, 2009.

de Souza, P., Kahn, R. A., Limbacher, J. A., Marais, E. A., Duarte, F., and Ratti, C. (2020) Combining low-cost, surface-based aerosol monitors with size-resolved satellite data for air quality applications, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 5319–5334, <https://doi.org/10.5194/amt-13-5319-2020>.

Doran, J. C., Barnard, J. C., Arnott, W. P., Cary, R., Coulter, R., Fast, J. D., Kassianov, E. I., Kleinman, L., Laulainen, N. S., Martin, T., Paredes-Miranda, G., Pekour, M. S., Shaw, W. J., Smith, D. F., Springston, S. R., and Yu, X.-Y. (2007) The T1-T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1585–1598, <https://doi.org/10.5194/acp-7-1585-2007>.

Duncan, B. N., Prados, A. I., Lamsal, L., Liu, Y., Streets, D. G., et al. (2014). Satellite data of atmospheric pollution for U.S. Air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid. *Atmos. Environ.*, 94, 647–662. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.061>.

Dunlea, E. J., Herndon, S.C., Nelson, D. D., Volkamer, R. M., San Martini, F., Sheehy, P. M., Zahniser, M.S., Shorter, J. H., Wormhoudt, J. C., Lamb, B. K., Allwine, E. J., Gaffney, J. S., Marley, N. A., Grutter, M., Marquez, C., Blanco, S., Cardenas, B., Retama, A., Ramos Villegas, C.R., Kolb, C. E., Molina, L. T., Molina, M. J. (2007). Evaluation of nitrogen dioxide chemiluminescence monitors in a polluted urban environment. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 2691–2704. <https://doi.org/10.5194/acp-7-2691-2007>.

Dutta, V., Kumar, S. & Dubey, D. Recent advances in satellite mapping of global air quality: evidences during COVID-19 pandemic. *Environmental Sustainability* 4, 469–487 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00166-w>.

EFE (2020) Alta contaminación de la planta de Tula agrava la amenaza para la salud. Agencia EFE. 21 de mayo 2020. <https://www.efe.com/efe/usa/mexico/alta-contaminacion-de-la-planta-tula-agrava-amenaza-para-salud/50000100-4252301>.

Fast, J. D., & Zhong, S. (1998) Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 103(D15), 18927-18946. <https://doi.org/10.1029/98JD01725>.

Gani, S., Pant, P., Sarkar, S., Sharma, N., Dey, S., Guttikunda, S. K., AchutaRao, K. M., Nygard, J., Sagar, A. D. (2022). Systematizing the approach to air quality measurement and analysis in low and middle income countries. *Environ. Res. Lett.*, 17, 021004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a9e>

García-Escalante, J. S., García-Reynoso, J. A., Jazcilevich-Diamant, A., & Ruiz-Suárez, L. G. (2014). The influence of the Tula, Hidalgo complex on the air quality of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmósfera*, 27(2), 215-225. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71111-7](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71111-7).

García-Yee, J. S., Torres-Jardón, R., Barrera-Huertas, H., Castro, T., Peralta, O., García, M., Gutiérrez, W., Robles, M., Torres-Jaramillo, J.A., Ortíz-Álvarez, A. & Ruiz-Suárez, L. G. (2018). Characterization of NO<sub>x</sub>-O<sub>x</sub> relationships during daytime interchange of air masses over a mountain pass in the Mexico City megalopolis. *Atmos. Environ.*, 177, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.017>.

Gobierno del Estado de Hidalgo (2016) Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo PROAIRE 2016-2024. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Estado de Hidalgo. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249576/ProAire\\_Hidalgo.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249576/ProAire_Hidalgo.pdf)

Gobierno del Estado de México (2018) Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México ProAire 2018-2030. Secretaría del Medio Ambiente. Metepec, Estado de México, noviembre de 2018. <http://proaire.edomex.gob.mx/sites/proaire.edomex.gob.mx/files/files/mis%20pdf/ProAire%202018-2030.pdf>.

Gobierno del Estado de Morelos (2019) Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de México ProAire 2018-2027. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323929/30\\_ProAire\\_Morelos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323929/30_ProAire_Morelos.pdf).

Gobierno de México, enero 2023. (Disponible en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/806537/Informe\\_CAMe\\_2022\\_vf\\_27feb2023.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/806537/Informe_CAMe_2022_vf_27feb2023.pdf))

Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H., Cowling, E. (2020) Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio*, 49, 849–864. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4>.

Grutter, M., Rivera, O., Retama, A., Contreras, J., González, E., Porras, S., López, O., Arredondo, T., Díaz, A., Robles, M. A., Sánchez, B., Azpra, E., Ladino, L. A. (2023) Proyecto: Evaluación de dispositivos basados en microsensores para el monitoreo continuo de la calidad del aire. Informe Final, SECTEI 190/2021 (31 de marzo del 2023). <http://www.epr.atmosfera.unam.mx/Microsensores-2022/> (Consultado el 25 de abril de 2023).

Holloway, T., Miller, D., Anenberg, S., Diao, M., Duncan, B., Fiore, A. M., et al., (2021) Satellite monitoring for air quality and health. *Annu. Rev. Biomed. Data Sci.*, 4, 417-447. <https://doi.org/10.1146/annurev-biodatasci-110920-093120>.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (s. f.). Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire, SINAICA. <https://sinaica.inecc.gob.mx/index.php>. (Consultado el 29 de julio de 2022).

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2016) Informe de Visita Técnica Sistema de Monitoreo de la Ciudad de Puebla. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2016.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2016a). Informe de Auditoría Técnica al Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Hidalgo. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2016b). Informe de Visita de Diagnóstico Sistema de Monitoreo del Estado de Hidalgo. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2020). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2022). Informe de Actividades de La Campaña de Caracterización y Diagnóstico de la Calidad del Aire en la Cuenca Atmosférica de Tula y su relación con otros Problemas ambientales de la Zona.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2017) Marco Geoestadístico. Diciembre 2017. (Consultado el 29 de julio de 2022).

ICM (Iniciativa Climática de México). (2021) Estudio sobre la influencia de la central termoeléctrica de Tula, Hidalgo, en la calidad del aire regional. Ciudad de México, Febrero 2021. <https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/03/Central-Termoele%cc%81ctrica-Tula.pdf> (Consultado el noviembre de 2022).

Judd, L. M., Al-Saadi, J. A., Valin, L. C., Pierce, R. B., Yang, K., Janz, S. J., Kowalewski, M. G., Szykman, J. J., Tiefengraber, M. Mueller, M. (2018) The dawn of geostationary air quality monitoring: Case studies from Seoul and Los Angeles. *Frontiers in environmental science*, 6, 85. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00085>.

Just, A. C., Wright, R. O., Schwartz, J., Coull, B. A., Baccarelli, A. A., Tellez-Rojo, M. M., Moody, E., Wang, Y., Lyapustin, A., Kloog, I. (2015) Using High-Resolution Satellite Aerosol Optical Depth To Estimate Daily PM<sub>2.5</sub> Geographical Distribution in Mexico City. *ES&T*, 49(14), 8576–8584. doi:10.1021/acs.est.5b00859.

- Lamsal, L. N., Martin, R. V., van Donkelaar, A., Steinbacher, M., Celarier, E. A., Bucsela, E., et al. (2008) Ground-level nitrogen dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument. *J. Geophys. Res.*, 113, D16308. <https://doi.org/10.1029/2007jd009235>
- Lewis, A., Peltier, W., von Schneidmesser, E. (2018) Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: Overview of topic and future applications. Research Report. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Li, J., Zhang, H., Chao, C. Y., Chien, C. H., Wu, C. Y., Luo, C. H., Chen, L.-J., Biswas, P. (2020) Integrating low-cost air quality sensor networks with fixed and satellite monitoring systems to study ground-level PM<sub>2.5</sub>. *Atmos. Environ.*, 223, 117293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117293>.
- Lin, C., Labzovskii, L. D., Mak, H. W. L., Fung, J. C., Lau, A. K., Kenea, S. T., Bilal, M., Vande Hey J. D., Lu, X., Ma, J. (2020) Observation of PM<sub>2.5</sub> using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring. *Atmos. Environ.*, 227, 117410. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117410>.
- Liu, M., Huang, X., Song, Y., Tang, J., Cao, J., Zhang, X., Zhang, Q., Wang, S., Xu, T., Kang, L., Cai, X., Zhang, H., Yang, F., Wang, H., Yu, J. Z., Lau, A. K. H., He, L., Huang, X., Duan, L., Ding, A., Xue, L., Gao, J., Liu, B., & Zhu, T. (2019) Ammonia emission control in China would mitigate haze pollution and nitrogen deposition but worsen acid rain. *PNAS*, 116(16), 7760-7765, <https://doi.org/10.1073/pnas.1814880116>
- Livingston, R. A. (2016) Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective. *Atmos. Environ.*, 146, 332-345. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.029>.
- Malings, C., Westervelt, D. M., Haurlyiuk, A., Presto, A. A., Grieshop, A., Bittner, A., Beekmann, M., Subramanian R. (2020) Application of low-cost fine particulate mass monitors to convert satellite aerosol optical depth to surface concentrations in North America and Africa, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 3873–3892, <https://doi.org/10.5194/amt-13-3873-2020>.
- MCE2-INE (Molina Center for Energy and the Environment - Instituto Nacional de Ecología). (2009) “Estudio sobre los Impactos de las Emisiones de SO<sub>2</sub> Provenientes de la Región de Tula en la Calidad del Aire de la ZMVM” en “Análisis y síntesis de los resultados de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 para su uso en la formulación de estrategias en materia de cambio climático y contaminación local en la ZMVM.” Informe Final, Convenio No. INE/ADE-051/2009, 12 de octubre de 2009.
- Melgar-Paniagua, E. M., Vega-Rangel, E., Del Razo, L. M., Lucho-Constantino, C. A., Rothenberg, S. J., & Vizcaya-Ruiz, D. (2013) Distributed lag associations between respiratory illnesses and mortality with suspended particle concentration in Tula, a highly polluted industrial region in Central Mexico. *Int. J. Occup. Environ. Health*, 86(3), 321-332. <https://doi.org/10.1007/s00420-012-0768-2>.
- Molina, L.T., Kolb, C.E., de Foy, B., Lamb, B.K., Bruce, W.H., Jimenez, J.L., Ramos- Villegas, R., Sarmiento, J., Paramo-Figueroa, V.H., Cardenas, B., Gutierrez- Avedoy, V., Molina, M.J. (2007) Air quality in North America’s most populous city - overview of the MCMA-2003 campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 2447–2473. <https://doi.org/10.5194/acp-7-2447-2007>.
- Molina, L.T., Madronich, S., Gaffney, J.S., Apel, E., de Foy, B., Fast, J., Ferrare, R., Herndon, S., Jimenez, J.L., Lamb, B., Osornio-Vargas, A.R., Russell, P., Schauer, J.J., Stevens, P.S., Volkamer, R., Zavala, M.

(2010) An overview of the MILAGRO 2006 campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 8697–8760. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8697-2010>.

Molina, L. T., Velasco, E., Retama, A., Zavala, M. (2019) Experience from integrated air quality management in the Mexico City Metropolitan Area and Singapore. *Atmosphere*, 10(9), 512. <https://doi.org/10.3390/atmos10090512>.

Monroy A. (2019) Declara SEMARNAT emergencia ambiental en Tula por contaminación. *Forbes México*, 17 de julio 2019. <https://www.forbes.com.mx/declara-semarnat-emergencia-ambiental-en-tula-por-contaminacion/>.

Moya, M., Grutter, M., and Báez, A. (2004) Diurnal variability of size-differentiated inorganic aerosols and their gas-phase precursors during January and February of 2003 near downtown Mexico City, *Atmos. Environ.*, 38, 5651–5661, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.045>.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). (2022) Air Quality Observations from Space. <https://airquality.gsfc.nasa.gov/>, Jan 06, 2022.

Retama, A. and Velasco, E. (2022) Chemical characterization of winter PM<sub>1</sub> pollution in Mexico City. (In review)

Ríos, B. & Raga, G. B. (2018) Spatio-temporal distribution of burned areas by ecoregions in Mexico and Central America. *International Journal of Remote Sensing*, 39(4), 949-970. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1392641>.

Rivera, C., Sosa, G., Wöhrnschimmel, H., de Foy, B., Johansson, M., Galle, B. (2009) Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> during the MCMA 2006 field campaign using a Mini-DOAS system. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6351-6361. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6351-2009>.

Salcedo, D., Castro, T., Ruiz-Suárez, L. G., García-Reynoso, A., Torres-Jardón, R., Torres-Jaramillo, A., Mar-Morales, B. E., Salcido, A., Celada, A. T., Carreón-Sierra, S., Martínez, A. P., Fentanes, O. A., Deustúa, E., Ramos-Villegas R., Retama-Hernández, A., Saavedra, M. I., Suárez-Lastra, M. (2012) Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos State). *Sci. Total Environ.*, 414, 417–432. [doi:10.1016/j.scitotenv.2011.09](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09)

San Martini, F. M., West, J. J., de Foy, B., Molina, L. T., Molina, M. J., Sosa, G., McRae, G. J. (2005) Modeling Inorganic Aerosols and Their Response to Changes in Precursor Concentration in Mexico City, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 55:6, 803-815, DOI: 10.1080/10473289.2005.10464674.

Salcido, A., Carreón-Sierra, S., & Celada-Murillo, A. T. (2019) Air pollution flow patterns in the Mexico City region. *Climate*, 7(11), 128. <https://doi.org/10.3390/cli7110128>.

Secretaría de Finanzas, Gobierno de la Ciudad de México. (2022) Programa Operativa Anual (disponible en [https://servidoresx3.finanzas.cdmx.gob.mx/egresos/programa\\_operativo\\_anual/2022/POA\\_Global\\_2022.pdf](https://servidoresx3.finanzas.cdmx.gob.mx/egresos/programa_operativo_anual/2022/POA_Global_2022.pdf) (Consultado el 14 de enero de 2023)).

SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano). (2018) Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Geografía e Informática. México, febrero de 2016.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México) (2018) Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Octubre, 2018.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México) (2020) Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH y SEMARNAT (2021) Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021- 2030). Ciudad de México. Diciembre, 2021.

SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano) (2018) Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Geografía e Informática. México, febrero de 2016.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2016) Anunció CAME medidas emergentes para modificar Programa de Contingencias Ambientales y Hoy No Circula, 30 de marzo de 2016, <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/anuncio-came-medidas-emergentes-para-modificar-programa-de-contingencias-ambientales-y-hoy-no-circula> (Consultado el 12 de febrero de 2023).

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2017) Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la Megalópolis, PROAIRE de la Megalópolis 2017-2030. Ciudad de México. [https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa\\_de\\_Gesti%C3%B3n\\_Federal\\_2017-2030\\_final.pdf](https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa_de_Gesti%C3%B3n_Federal_2017-2030_final.pdf).

Sosa-Echeverría, R., Alarcón-Jiménez, A. L., Torres-Barrera, M. C., Sánchez-Álvarez, P., Granados-Hernández, E., Vega, E., Jaimes-Palomera, M., Retama, A., Gay, D. A. (2022) Nitrogen and sulfur compounds in ambient air and in wet atmospheric deposition at Mexico City Metropolitan Area. *Atmos. Environ.*, 119411. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119411>.

Tamayo-Ortiz, M., Téllez-Rojo, M. M., Rothenberg, S. J., Gutiérrez-Avila, I., Just, A. C., Kloog, I., Texcalac-Sangrador, J. L.; Romero-Martínez M., Bautista-Arredondo L. F., Schwartz, J., Wright R. O., Riojas-Rodriguez, H. (2021) Exposure to PM<sub>2.5</sub> and obesity prevalence in the greater Mexico City area. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18(5), 2301. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052301>.

Téllez-Rojo, M. M., Rothenberg, S. J., Texcalac-Sangrador, J. L., Just, A., Kloog, I., Romero, M., Rojas-Saunero, P., Hurtado-Díaz, M., Chilian-Herrera, O. L., Tamayo-Ortiz, M., Bautista-Arredondo L. F., Schwartz, J., Wright R. O., Riojas, H. (2018) Association of PM<sub>2.5</sub> Exposure and Health Outcomes in a Representative Population Sample of the Mexico City Metropolitan Area Using Satellite and Monitor-Based Exposure Estimations. In *ISEE Conference Abstracts* (Vol. 2018, No. 1), September 2018.

US EPA (United States Environmental Protection Agency) (s. f.) Air Sensor Performance Targets and Testing Protocols. Disponible en <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols> (Consultado el 14 de abril de 2023).

Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., et al. (2012) TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES Mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality, and ozone layer applications. *Remote Sens. Environ.*, 120, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.

Vega, E., López-Veneroni, D., Ramírez, O., Chow, J. C., & Watson, J. G. (2021) Particle-bound PAHs and chemical composition, sources and health risk of PM<sub>2.5</sub> in a highly industrialized area. *Aerosol Air Qual. Res.*, 21, 210047. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210047>.

WMO (World Meteorological Organization). (2021) *An Update on Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition*, December 2020. Edited by R. Peltier. Geneva 2, Switzerland. ISBN: 978-92-63-11215-6. Disponible en: [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10620](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10620) (Consultado el 14 de abril de 2023).

Zavala, M., Brune, W. H., Velasco, E., Retama, A., Cruz-Alavez, L. A., Molina, L. T. (2020) Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmos. Environ.*, 238, 117747. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117747>.

### CAPÍTULO 3

Amador-Muñoz, O. (2022) *Introducción a la sección 5* [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Andreae, M. O. (2019) Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 8523–8546, <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>.

Camacho, P. (2022) *Incertidumbre de los inventarios de emisiones*. [Presentación] Taller virtual: diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Burgos-Cuevas, A., Adams, D. K., García-Franco, J. L., & Ruiz-Angulo, A. (2021) A Seasonal Climatology of the Mexico City Atmospheric Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 180(1), 131-154.

Christian, T. J., Yokelson, R. J., Cárdenas, B., Molina, L. T., Engling, G., and Hsu, S.-C. (2010) Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in central Mexico, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 565–584, <https://doi.org/10.5194/acp-10-565-2010>.

García-Franco, J. L., Stremme, W., Bezanilla, A., Ruiz-Angulo, A., & Grutter, M. (2018) Variability of the mixed-layer height over Mexico City. *Boundary-Layer Meteorology*, 167(3), 493-507. <https://doi.org/10.1007/s10546-018-0334-x>.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2022) <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Emisiones.html> (Consultado el octubre de 2022).

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2021) INECC - CGMCC, Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI), 1990-2019. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei/resource/ced2f504-6cc0-4e89-bbf8-b49d460e96b0> (Consultado el abril de 2023).

IPCC (International Panel on Climate Change). (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (Consultado el abril de 2023).

IPCC (International Panel on Climate Change). (2021) IPCC Emission factor data base (EFDB) Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php> (Consultado el abril de 2023).

Molina, L. T., Molina, M. J., Favela, R., Fernandez-Bremauntz, A., Slott, R., and Zavala, M. A. (2002) Cleaning the Air: A Comparative Study. In *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2002. p 21-59. ISBN 1-4020-0507-5.

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



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

Padilla-Barrera, Z., Torres-Jardón, R., Ruiz-Suarez, L. G., Castro, T., Peralta, O., Saavedra, M. I., Masera, O., Molina, L. T., Zavala, M. (2019). Determination of emission factors for climate forcers and air pollutants from improved wood-burning cookstoves in Mexico, *Energy for Sustainable Development*, 50, 61-68, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.004>.

Retama, A., Baumgardner, D., Raga, G., McMeeking, G., and Walker, J. (2015). Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9693-9709.

Santiago-De La Rosa, N., González-Cardoso, G., Figueroa-Lara, J., Gutiérrez-Arzaluz, M., Octaviano-Villasana, C., Ramírez-Hernández, I. F., and Mugica-Álvarez, V. (2018) Emission Factors of atmospheric and climatic pollutants from crop residues burning, *Journal of the Air & Waste Management Association*, DOI: 10.1080/10962247.2018.1459326.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2021) Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México. Agosto, 2021.

UACH (Universidad Autónoma Chapingo) (2021) “Diagnóstico para elaborar la estrategia y los programas de manejo del fuego para el área forestal de la Megalópolis 2021 – 2024 “ Informe Final. Disponible en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/757327/25.\\_Diagnostico\\_para\\_la\\_Estrategia\\_y\\_Programas\\_de\\_Manejo\\_de\\_Fuego.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/757327/25._Diagnostico_para_la_Estrategia_y_Programas_de_Manejo_de_Fuego.pdf) (Consultado 16 de mayo de 2023).

US EPA (US Environmental Protection Agency). (1999) Handbook for criteria pollutant inventory development: A beginner’s guide for point and area sources. United States: Office of Air Quality Planning and Standards.

US EPA (US Environmental Protection Agency). (2022) MOVES3: Latest Version of Motor Vehicle Emission Simulator. <https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves> (Consultado el october de 2022).

Velasco, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina, J. L., Jobson, B. T., Alexander, M. L., Prazeller, P., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Grutter, M., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., and Molina, M. J. (2007) Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 and 2003 field campaigns, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 329–353. <http://www.atmos-chem-phys.net/7/329/2007/>

Yokelson, R. J., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Toohey, D. W., Alvarado, E. C., Crounse, J. D., Wennberg, P. O., Fisher, M. E., Wold, C. E., Campos, T. L., Adachi, K., Buseck, P. R., and Hao, W. M. (2007) Emissions from forest fires near Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5569–5584, <https://doi.org/10.5194/acp-7-5569-2007>.

Yokelson, R. J., Burling, I. R., Urbanski, S. P., Atlas, E. L., Adachi, K., Buseck, P. R., Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Toohey, D. W., and Wold, C. E. (2011) Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 6787–6808, <https://doi.org/10.5194/acp-11-6787-2011>.

Zavala, M., Molina, L. T., Yacovitch, T. I., Fortner, E. C., Roscioli, J. R., Floerchinger, C., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Knighton, W. B., Paramo, V. H., Zirath, S., Mejía, J. A., and Jazcilevich, A. (2017a) Emission factors of black carbon and co-pollutants from diesel vehicles in Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 15293-15305, <https://doi.org/10.5194/acp-17-15293-2017>.

Zavala, M., Huertas, J. I., Prato, D., Jazcilevich, A., Aguilar, A., Balam, M., Misra, C., and Molina, L. T. (2017b) Real world emissions of in-use off-road vehicles in Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Sep; 67 (9): 958-972. doi: 10.1080/10962247.2017.1310677.

Zavala, M., Molina, L. T., Maiz, P., Monsivais, I., Chow, J. C., Watson, J. G., Munguia, J. L., Cardenas, B., Fortner, E. C., Herndon, S. C., Roscioli, J. R., Kolb, C. E., and Knighton, W. B. (2018) Black carbon, organic carbon, and co-pollutant emissions and energy efficiency from artisanal brick production in Mexico, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 6023-6037, <https://doi.org/10.5194/acp-18-6023-2018>.

## CAPÍTULO 4

Aguilera, A., Bautista, F., Gutiérrez-Ruiz, M., Cenicerós-Gómez, A. E., Cejudo, R., Goguitchaichvili, A. (2021) Heavy metal pollution of street dust in the largest city of Mexico, sources and health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 1-16.

Aiken, A. C., Salcedo, D., Cubison, M. J., Huffman, J. A., DeCarlo, P. F., Ulbrich, I. M., Docherty, K. S., Sueper, D., Kimmel, J. R., Worsnop, D. R., Trimborn, A., Northway, M., Stone, E. A., Schauer, J. J., Volkamer, R. M., Fortner, E., de Foy, B., Wang, J., Laskin, A., Shutthanandan, V., Zheng, J., Zhang, R., Gaffney, J., Marley, N. A., Paredes-Miranda, G., Arnott, W. P., Molina, L. T., Sosa, G., and Jimenez, J. L. (2009) Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0) – Part 1: Fine particle composition and organic source apportionment, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6633–6653, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6633-2009>.

Akther, T., Rappenglueck, B., Osibanjo, O., Retama, A., Rivera-Hernández, O. (2023) Ozone precursors and boundary layer meteorology before and during a severe ozone episode in Mexico City. *Chemosphere*, 318, 137978. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137978>.

Almanza, V. H., Molina, L. T., Li, G., Fast, J., and Sosa, G. (2014) Impact of external industrial sources on the regional and local SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> levels of the Mexico megacity, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 8483–8499, <https://doi.org/10.5194/acp-14-8483-2014>.

Almanza, V. H., Molina, L. T., and Sosa, G. (2012) Soot and SO<sub>2</sub> contribution to the supersites in the MILAGRO campaign from elevated flares in the Tula Refinery, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 10583–10599, <https://doi.org/10.5194/acp-12-10583-2012>.

Amador-Muñoz O., González-Ramírez, A. E., Villalobos-Pietrini, R. (2022a) Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM<sub>2.5</sub> in the metropolitan zone of Mexico Valley: Impact of air quality management programmes. *Urban Climate*, 42, 101096. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101096>.

Amador-Muñoz, O. (2022b) *Introducción a la sección 5* [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Amador-Muñoz Omar, Martínez-Domínguez Y. Margarita, García-Ibarra A., Lira-González E., Hernández-López E.A. (2022c) Compuestos orgánicos marcadores de la quema de biomasa. Resultados de la campaña EQAA2. En: Informe de la Calidad del Aire 2019. Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México. Cap 7. En prensa.

Amador-Muñoz O., Martínez-Domínguez Y. M., Gómez-Arroyo, S. Peralta O. (2020) Current situation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in PM<sub>2.5</sub> in a receptor site in Mexico City and estimation of carcinogenic PAH by combining non-real-time and real-time measurement techniques. *Sci. Total Environ.*, 703, 134526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134526>.

Amador-Muñoz, O., Villalobos-Pietrini, R., Miranda, J., & Vera-Avila, L. E. (2011) Organic compounds of PM<sub>2.5</sub> in Mexico Valley: Spatial and temporal patterns, behavior and sources. *Sci. Total Environ.*, 409(8), 1453-1465.

Apel, E. C., Emmons, L. K., Karl, T., Flocke, F., Hills, A. J., Madronich, S., et al. (2010) Chemical evolution of volatile organic compounds in the outflow of the Mexico City Metropolitan area, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2353–2375, 2010, <http://www.atmos-chem-phys.net/10/2353/2010/>.

Aquino-Martínez, L. P., Quintanar, A. I., Ochoa-Moya, C. A., López-Espinoza, E. D., Adams, D. K., & Jazcilevich-Diamant, A. (2021) Urban-Induced Changes on Local Circulation in Complex Terrain: Central Mexico Basin. *Atmosphere*, 12, 904. <https://doi.org/10.3390/atmos12070904>.

Arellano, S., Galle, B., Apaza, F., Avard, G., Barrington, C., Bobrowski, N., et al. (2021) Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO<sub>2</sub> emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change. *Earth System Science Data*, 13, 1167–1188, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1167-2021>.

Baklanov, A. and Yang Zhang, Y. (2020) Advances in air quality modeling and forecasting, *Global Transitions*, 2, 261-270. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.11.001>.

Barrett, B. S., Raga, G. B., Retama, A., & Leonard, C. (2019) A multiscale analysis of the tropospheric and stratospheric mechanisms leading to the March 2016 extreme surface ozone event in Mexico City. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 4782–4799. <https://doi.org/10.1029/2018JD029918>

Bon, D. M., Ulbrich, I. M., de Gouw, J. A., Warneke, C., Kuster, W. C., Alexander, M. L., Baker, A., Beyersdorf, A. J., Blake, D., Fall, R., Jimenez, J. L., Herndon, S. C., Huey, L. G., Knighton, W. B., Ortega, J., Springston, S., and Vargas, O. (2011). Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign: measurement comparison, emission ratios, and source attribution, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2399–2421, <https://doi.org/10.5194/acp-11-2399-2011>.

Blanco Jiménez, S., Magaña Reyes, M., Fentanes Arriaga, O. (2022) *Comparación de mediciones de COV en diferentes partes de la ZMVM*. [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Burgos-Cuevas, A., Adams, D. K., García-Franco, J. L., and Ruiz-Angulo, A. (2021) A seasonal climatology of the Mexico City atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 180, 131-154. <https://doi.org/10.1007/s10546-021-00615-3>.

Burgos Cuevas, A., Magaldi Hermosillo, A., Adams, D., Grutter de la Mora, M., Garcia Franco, J. L., and Ruiz Angulo, A. (2022) Comparison between Atmospheric Boundary Layer Height remote sensing-retrievals over a complex topography, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-4735, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-4735>.

Calderón-Garcidueñas, L. and Ayala, A. (2022) Air Pollution, Ultrafine Particles and Your Brain: Are Combustion Nanoparticle Emissions and Engineered Nanoparticles Causing Preventable Fatal Neurodegenerative Diseases and Common Neuropsychiatric Outcomes? *Environmental Science & Technology*, 56, 6847-6856. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04706>.

Calderón-Ezquerro, M.C., Guerrero-Guerra, C., Martínez-López, B., Fuentes-Rojas, F., Téllez-Unzueta, F., López-Espinoza, E. D., Calderón-Segura, M. E., Martínez-Arroyo, A. & Trigo-Pérez, M. M. (2016) First airborne pollen calendar for Mexico City and its relationship with bioclimatic factors. *Aerobiologia*, 32, 225–244. <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9392-4>.

Calderón-Ezquerro, M. C., Serrano-Silva, N., & Brunner-Mendoza, C. (2020) Metagenomic characterisation of bioaerosols during the dry season in Mexico City. *Aerobiologia*, 36 (3), 493-505.

Calderón-Ezquerro, M. D. C., Gómez-Acata, E. S., & Brunner-Mendoza, C. (2022) Airborne bacteria associated with particulate matter from a highly urbanised metropolis: A potential risk to the population's health. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 16(9), 1-16.

Camacho-Rodriguez, P. (2022) *Cambios en la generación de emisiones durante la pandemia por COVID-19* [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

CAME (Comisión Ambiental de la Megalópolis) (2022) Informe de actividades de la CAME 2021, Comisión Ambiental de la Megalópolis, 20 de febrero de 2022. <https://www.gob.mx/comisionambiental/documentos/informe-de-actividades-de-la-came-2021>.

Carabali, G., Estévez, H. R., Valdés-Barrón, M., Bonifaz-Alfonzo, R., Riveros-Rosas, D., Velasco-Herrera, V. M., Vázquez-Gálvez, F. A. (2017). Aerosol climatology over the Mexico City basin: Characterization of optical properties. *Atmospheric Research*, 194, 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.035>.

Carabali, G., Villanueva-Macias, J., Ladino, L. A., Álvarez-Ospina, H., Raga, G. B., Andraca-Ayala, G., Miranda, J., Grutter, M., Riveros-Rosas, D. (2021) Characterization of aerosol particles during a high pollution episode over Mexico City. *Scientific reports*, 11(1), 1-14.

Carrasco-Mijarez, N. I., Torres-Jardón, R., Barrera-Padilla, H. A. (2020) Correlación PAN-O3 en el suroeste de la Ciudad de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 36, 907- 925.

Castelán-Ortega, O. A. (2022). *Estado actual del conocimiento sobre emisiones de gases de efecto invernadero por la ganadería bovina en México*. [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Castelán-Ortega, O.A. and Ku-Vera, J.C. (2019) Capítulo 22: Ganadería, in: *Estado Del Ciclo Del Carbono En México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono (PMC), Texcoco, Estado de México, México. <https://pmcarbono.org/pmc/publicaciones/eccm.php>

Castelán-Ortega, O.A., Ku-Vera, J.C., Ángeles-Hernández, J.C., Hernández-Pineda, G.S., Benaouda, M., Molina, L., Ramírez-Cancino, L., Castelán-Jaime, S.F., González-Ronquillo, M., Vázquez-Carrillo, M.F., Montelongo-Pérez, H.D., Cardoso-Gutiérrez, E., Villegas- Estrada1D. (2019) First Tier 2 enteric methane emissions national inventory for cattle in Mexico and analysis of spatially distributed emissions. A baseline for mitigation. *Proceedings of the 7th GGAA – Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference*, August 4th to 8th, 2019, Iguassu Falls/Brazil. Alexandre Berndt, Luiz Gustavo Pereira Ribeiro, Adibe Luis Abdalla, Editors. Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa), Embrapa Southeast Livestock, Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply, ISSN 1980-6841, pp: 175.

Castelán-Ortega, O.A., Ku-Vera, J.C., Castelán-Jaime, S.V., Hernández-Pineda, G.S., Mohammed, B., Ángeles-Hernández, J.C., Praga-Ayala, A.R., Montelongo-Pérez, H.D. (2018) Inventory of enteric methane emissions by cattle in the dry-land regions of México using the IPCC 2006 Tier 2 main method. *Proceedings of the 10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores*, Clermont-Ferrand, France, 2–6th September 2018. *Advances in Animal Biosciences*, 9 (3), 739. <https://doi.org/10.1017/S2040470018000146>.

Caudillo, L., Salcedo, D., Peralta, O., Castro, T., Alvarez-Ospina, H. (2020) Nanoparticle size distributions in Mexico City. *Atmos. Pollut. Res.*, 11, 78-84, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.017>.

Chakraborty, T. and Lee, X. (2019) A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability, *Int. J. Appl. Earth. Obs. Geoinf.*, 74, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>.

Cui, Y.Y. and de Foy, B. (2012) Seasonal Variations of the Urban Heat Island at the Surface and the Near-Surface and Reductions due to Urban Vegetation in Mexico City. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 51, 855-868. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>

de Gouw, J. A., Welsh-Bon, D., Warneke, C., Kuster, W. C., Alexander, L., Baker, A. K., Beyersdorf, A. J., Blake, D. R., Canagaratna, M., Celada, A. T., Huey, L. G., Junkermann, W., Onasch, T. B., Salcido, A., Sjostedt, S. J., Sullivan, A. P., Tanner, D. J., Vargas, O., Weber, R. J., Worsnop, D. R., Yu, X. Y., and Zaveri, R. (2009) Emission and chemistry of organic carbon in the gas and aerosol phase at a sub-urban site near Mexico City in March 2006 during the MILAGRO study, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3425–3442. <http://www.atmos-chem-phys.net/9/3425/2009/>.

de Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitácuaro, A., Cárdenas, B., Retama, A., Ramos, R., Molina, L.T., Molina, M.J. (2005) Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 2267–2288. <http://www.atmos-chem-phys.net/5/2267/2005/>.

de Foy, B., Clappier, A., Molina, L. T., and Molina, M. J. (2006a) Distinct Wind Convergence Patterns in the Mexico City Basin due to the Interaction of the Gap Winds with the Synoptic Flow. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1249-1265. <https://doi.org/10.5194/acp-6-1249-2006>.

de Foy, B., Varela, J. R., Molina, L. T., and Molina, M. J. (2006b) Rapid ventilation of the Mexico City basin and regional fate of the urban plume. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2321-2335. <https://doi.org/10.5194/acp-6-2321-2006>.

de Foy, B., Fast, J. D., Paech, S. J., Phillips, D., Walters, J. T., Coulter, R. L., Martin, T. J., Pekour, M. S., Shaw, W. J., Kasten-deuch, P. P., Marley, N. A., Retama, A., and Molina, L. T. (2008) Basin-scale wind transport during the MILAGRO field campaign and comparison to climatology using cluster analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1209–1224. <http://www.atmos-chem-phys.net/8/1209/2008/>.

de Foy, B., Krotkov, N. A., Bei, N., Herndon, S. C., Huey, L. G., Martínez, A.-P., Ruiz-Suárez, L. G., Wood, E. C., Zavala, M., and Molina, L. T. (2009) Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO<sub>2</sub> retrievals during the MILAGRO field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 9599–9617, <https://doi.org/10.5194/acp-9-9599-2009>.

Delgado, C., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Cortés, J. L., Quintana, P., Aguilar, D., Cejudo, R. (2019). Identificación de las zonas contaminadas con metales pesados en el polvo urbano de la Ciudad de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 35(1), 81–100. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.01.06>.

Díaz-Esteban, Y., Barrett, B. S., & Raga, G. B. (2022) Circulation patterns influencing the concentration of pollutants in central Mexico. *Atmos. Environ.*, 274, 118976. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118976>.

Doran, J. C., Abbott, S.; Archuleta, J., Bian, X.; Chow, J., Coulter, R. L., de Wekker, S.F.J., Edgerton, S., Elliott, S., Fernandez, A., et al. (1998) The IMADA-AVER Boundary Layer Experiment in the Mexico City Area. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 79, 2497–2508.

Duncan, B. N., Malings, C. A., Knowland, K. E., Anderson, D. C., Prados, A. I., Keller, C. A., et al. (2021) Augmenting the standard operating procedures of health and air quality stakeholders with NASA resources. *GeoHealth*, 5, e2021GH000451. <https://doi.org/10.1029/2021GH000451>

Dzepina, K., Cappa, C. D., Volkamer, R. M., Madronich, S., DeCarlo, P. F., Zaveri, R. A., & Jimenez, J. L. (2011) Modeling the multiday evolution and aging of secondary organic aerosol during MILAGRO 2006. *ES&T*, 45(8), 3496-3503. <https://doi.org/10.1021/es103186f>.

EDOMEX (Gobierno del Estado de Mexico). (2021) Estudio de Mediciones de Emisiones por la quema de pirotecnia en el Estado de México, Mejoramiento de la Composición y Sustitución por Tecnología, Informe final. Diciembre, 2021. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/757319/21.\\_Informe\\_final\\_estudio\\_pirotecnia\\_Edomex\\_vp.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/757319/21._Informe_final_estudio_pirotecnia_Edomex_vp.pdf)

Edgerton, S. A., Bian, X., Doran, J. C., Fast, J.D., Hubbe, J. M., Malone, E. L., Shaw, W. J., Whiteman, C. D., Zhong, S., Arriaga, J. L., et al. (1999) Particulate Air Pollution in Mexico City: A Collaborative Research Project. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 49, 1221–1229.

Estévez-Soto, P. R. (2021). Crime and COVID-19: Effect of changes in routine activities in Mexico City. *Crime Science*, 10(1), 1-17.

Fast, J. D. and Zhong, S. (1998) Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations within the Mexico City basin. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 103(D15), 18927-18946. <https://doi.org/10.1029/98JD01725>.

Fountoukis, C., Nenes, A., Sullivan, A., Weber, R., Van Reken, T., Fischer, M., Matías, E., Moya, M., Farmer, D., and Cohen, R. C. (2009) Thermodynamic characterization of Mexico City aerosol during MILAGRO 2006, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2141–2156, <https://doi.org/10.5194/acp-9-2141-2009>.

Fox, D. G. (1982). Uncertainty in Air Quality Modeling: A Summary of the AMS Workshop on Quantifying and Communicating Model Uncertainty, Woods Hole, Mass., September 1982. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 65, 27–36, JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/26223375> (Consultado el 26 de octubre de 2022).

Fu, T. M. and Tian, H. (2019) Climate Change Penalty to Ozone Air Quality: Review of Current Understandings and Knowledge Gaps. *Curr Pollution Rep* 5, 159–171 <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00115-6>.

Gaffney, J. S., Marley, N. A., Cunningham, M. M., and Doskey, P. V. (1999) Measurements of peroxyacyl nitrates (PANS) in Mexico City: implications for megacity air quality impacts on regional scales, *Atmos. Environ.*, 33, 5003–5012.

García-Franco, J. L., Stremme, W., Bezanilla, A., Ruiz-Angulo, A., & Grutter, M. (2018). Variability of the mixed-layer height over Mexico City. *Boundary-Layer Meteorology*, 167(3), 493-507. <https://doi.org/10.1007/s10546-018-0334-x>.

García-Franco, J. L. (2020) Air quality in Mexico City during the fuel shortage of January 2019. *Atmos. Environ.*, 222, 117131. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117131>.

Garza-Galindo, R., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., Ordoñez-Godínez, S. L., Amador-Muñoz, O., Beramendi-Orosco, L. E., Retama, A., Miranda, J., Rosas-Pérez, I. (2019) Spatial and temporal distribution of metals in PM<sub>2.5</sub> during 2013: Assessment of wind patterns to the impacts of geogenic and anthropogenic sources. *Environ. Monit. Assess.*, 191(3), 1-17.

Gómez-Arroyo, S., Cortés-Eslava, J., Loza-Gómez, P., Arenas-Huertero, F., de la Mora, M. G., & Bermea, O. M. (2018) In situ biomonitoring of air quality in rural and urban environments of Mexico Valley through genotoxicity evaluated in wild plants. *Atmos. Pollut. Res.*, 9(1), 119-125.

González-Cardoso G, Hernández-Contreras J. M., Valle-Hernández B. L., Hernández-Moreno A, Santiago-De la Rosa N, García-Martínez R, Mugica-Álvarez V. (2020) Toxic atmospheric pollutants from crematoria ovens: characterization, emission factors, and modeling. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 43800–43812. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10314-0>

Gonzalez-Abraham, R., Chung, S. H., Avise, J., Lamb, B., Salathé Jr., E. P., Nolte, C. G., Loughlin, D., Guenther, A., Wiedinmyer, C., Duhl, T., Zhang, Y., & Streets, D. G. (2015). The effects of global change upon United States air quality. *Atmos. Chem. Phys.*, 15(21), 12645–12665. <https://doi.org/10.5194/acp-15-12645-2015>.

Gorchakov, G. I., Karpov, A. V., Vasiliev, A. V., & Gorchakova, I. A. (2017). Brown and black carbons in megacity smog. *Atmospheric Ocean. Opt.*, 30(3), 248-254.

Guerrero, F., Alvarez-Ospina, H., Retama, A., López-Medina, A., Castro, T. and Salcedo, D., (2017). Seasonal changes in the PM 1 chemical composition north of Mexico City. *Atmósfera*, 30(3), pp.243-258.

Guevara, M., Tena, C., Soret, A., Serradell, K., Guzmán, D., Retama, A., Camacho, P., Jaimes-Palomera, M., Mediavilla, A. (2017) An emission processing system for air quality modelling in the Mexico City metropolitan area: Evaluation and comparison of the MOBILE6.2-Mexico and MOVES-Mexico traffic emissions, *Sci. Total Environ.*, 584–585, 882–900, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.135>.

Hao, L., Kari, E., Leskinen, A., Worsnop, D. R., and Virtanen, A. (2020) Direct contribution of ammonia to  $\alpha$ -pinene secondary organic aerosol formation, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 14393–14405, <https://doi.org/10.5194/acp-20-14393-2020>.

Hennigan, C. J., Izumi, J., Sullivan, A. P., Weber, R. J., and Nenes, A. (2015) A critical evaluation of proxy methods used to estimate the acidity of atmospheric particles, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 2775–2790, <https://doi.org/10.5194/acp-15-2775-2015>.

Hernández-López, A. E., Miranda Martín del Campo, J., Mugica Álvarez, V., Valle-Hernández, B. L., Mejía-Ponce, L. V., Pineda-Santamaría, J. C., Reynoso-Cruces, S., Pineda-Santamaría J. C., Rozanes-Valenzuela, D. (2021) A study of PM<sub>2.5</sub> elemental composition in southwest Mexico City and development of receptor models with positive matrix factorization. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 37. <https://doi.org/10.20937/RICA.54066>.

Hernández-Paniagua, I. Y., Valdez, S. I., Almanza, V., Rivera-Cárdenas, C., Grutter, M., Stremme, W., García-Reynoso, A., Ruiz-Suárez, L. G. (2021) Impact of the COVID-19 Lockdown on Air Quality and Resulting Public Health Benefits in the Mexico City Metropolitan Area. *Front. Public Health* 9:642630. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.642630>.

Hernández-Pineda, G.S., Beltrán, P.E.P., Benaouda, M., García, J.M.P., Nova, F.A., Molina, L., Ortega, O.A.C. (2018) *Pithecellobium dulce*, *Tagetes erecta* and *Cosmos bipinnatus* on reducing enteric methane emission by dairy cows. *Ciênc. Rural* 48. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170484>.

Herrera, B., Bezanilla, A., Blumenstock, T., Dammers, E., Hase, F., Clarisse, L., Magaldi, A., Rivera, C., Stremme, W., Strong, K., Viatte, C., Van Damme, M., and Grutter, M. (2022) Measurement report:



Evolution and distribution of NH<sub>3</sub> over Mexico City from ground-based and satellite infrared spectroscopic measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 14119–14132, <https://doi.org/10.5194/acp-22-14119-2022>.

Huerta, C. M. (2022) Rethinking the distribution of urban green spaces in Mexico City: Lessons from the COVID-19 outbreak. *Urban Forestry & Urban Greening*, 70, 127525. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127525>.

ICM (Iniciativa Climática de México) (2021) Estudio sobre la Influencia de la Central Termoeléctrica de Tula, Hidalgo, en la calidad del aire regional. Ciudad de México, febrero 2021, pp. [https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/05/Termoeléctrica-Tula\\_190521-3-1.pdf](https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/05/Termoeléctrica-Tula_190521-3-1.pdf).

IEA (International Energy Agency) (2023), *Global Methane Tracker 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023>, License: CC BY 4.0 (Consultado 14 de abril de 2023).

GMI (Global Methane Initiative) (s. f.) *Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities*. <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf> (Consultado 19 de abril de 2023).

INE-MCE2-UNAM (Instituto Nacional de Ecología, Molina Center for Energy and the Environment, Universidad Nacional Autónoma de México). (2011) *Temas emergentes en el cambio climático: el metano y el carbono negro, posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación*. (preparado por L. T. Molina y L. G. Ruiz Suarez). [https://www.researchgate.net/publication/262915533\\_Temas\\_emergentes\\_en\\_cambio\\_climatico\\_metano\\_y\\_carbono\\_negro\\_sus\\_posibles\\_co-beneficios\\_y\\_desarrollo\\_de\\_planes\\_de\\_investigacion](https://www.researchgate.net/publication/262915533_Temas_emergentes_en_cambio_climatico_metano_y_carbono_negro_sus_posibles_co-beneficios_y_desarrollo_de_planes_de_investigacion).

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2017) *Preparación de un inventario de emisiones para modelación, informe final*. Ciudad de México.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2020) *Evaluación de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante la contingencia por COVID-019.*, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 22 pp. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/618028/91\\_2020\\_Reporte\\_Toluca\\_COVID.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/618028/91_2020_Reporte_Toluca_COVID.pdf).

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2021) *Evaluación de la calidad del aire en dos cuencas atmosféricas del Estado de Hidalgo (Tula y Pachuca) durante la contingencia por COVID-019.*, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 45 pp. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/712997/136\\_2021\\_Reporte\\_Hidalgo\\_COVID\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/712997/136_2021_Reporte_Hidalgo_COVID_.pdf)

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2021) INECC; CGMCC, (2021), *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI), 1990-2019*. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei/resource/ced2f504-6cc0-4e89-bbf8-b49d460e96b0> (Consultado el abril de 2023).

IPCC (International Panel on Climate Change). (2006) *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan. [www.ipccngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_volume5/v5\\_6\\_Ch6\\_wastewater.pdf](http://www.ipccngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_volume5/v5_6_Ch6_wastewater.pdf).

IPCC (International Panel on Climate Change). (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC (International Panel on Climate Change). (2019) *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme*, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan.

Ipiña, A., López-Padilla, G., Retama, A., Piacentini, R. D., and Madronich, S. (2021) Ultraviolet radiation environment of a tropical megacity in transition: Mexico City 2000–2019. *Environmental Science & Technology*, 55(16), 10946-10956. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08515>.

Jaimes-Palomera, M., Retama, A., Elias-Castro, G., Neria-Hernández, A., Rivera-Hernández, O., Velasco, E. (2016) Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Mexico City: Results of the 2012 ozone-season campaign. *Atmos. Environ.*, 132, 258-275. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.047>.

Jauregui, E. (1997) Heat Island development in Mexico City. *Atmos. Environ.*, 31(22), 3821-3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2).

Jobson, B. T., Volkamer, R. A., Velasco, E., Allwine, G., Westberg, H., Lamb, B. K., Alexander, M. L., Berkowitz, C. M., and Molina, L. T. (2010) Comparison of aromatic hydrocarbon measurements made by PTR-MS, DOAS and GC-FID during the MCMA 2003 Field Experiment, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1989–2005, <http://www.atmos-chem-phys.net/10/1989/2010/>.

Keller, C. A., Evans, M. J., Knowland, K. E., Hasenkopf, C. A., Modekurty, S., Lucchesi, R. A., Oda, T., Franca, B. B., Mandarino, F. C., Díaz Suárez, M. V., Ryan, R. G., Fakes, L. H., Pawson, S. (2021) Global impact of COVID-19 restrictions on the surface concentrations of nitrogen dioxide and ozone, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 3555–3592, <https://doi.org/10.5194/acp-21-3555-2021>.

Kephart, J. L., Avila-Palencia, I., Bilal, U., Gouveia, N., Caiaffa, W. T., & Diez Roux, A. V. (2021) COVID-19, ambient air pollution, and environmental health inequities in Latin American cities. *Journal of Urban Health*, 98(3), 428-432. <https://doi.org/10.1007/s11524-020-00509-8>.

Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2021) Impacts of the COVID-19 lockdown on air quality and its association with human mortality trends in megapolis Mexico City. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14(4), 553-562. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00960-1>.

LANL and IMP (Los Alamos National Laboratory and Instituto Mexicano del Petróleo). (1994) *Mexico City Air Quality Research Initiative (MARI) Los Alamos Rep. LA-12699*, 1994. Los Alamos, USA.

Lehtipalo, K., Yan, C., Dada, L., Bianchi, F., Xiao, M., Wagner, R., et al. (2018). Multicomponent new particle formation from sulfuric acid, ammonia, and biogenic vapors. *Science advances*, 4(12), eaau5363.

Liu, Y., Liggió, J., Staebler, R., and Li, S.-M. (2015) Reactive uptake of ammonia to secondary organic aerosols: kinetics of organonitrogen formation, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 13569–13584, <https://doi.org/10.5194/acp-15-13569-2015>.

Lei, W., de Foy, B., Zavala, M., Volkamer, R., and Molina, L. T. (2007) Characterizing ozone production in the Mexico City Metropolitan Area: a case study using a chemical transport model, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1347–1366, <https://doi.org/10.5194/acp-7-1347-2007>.

Lei, W., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., and Molina, L. T. (2008) Characterizing ozone production and response under different meteorological conditions in Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7571–7581, <https://doi.org/10.5194/acp-8-7571-2008>.

Liñán-Abanto, R. N., Peralta, O., Salcedo, D., Ruiz-Suárez, L. G., Arnott, P., Paredes-Miranda, G., Álvarez-Ospina, H., Castro, T. (2019) Optical properties of atmospheric particles over an urban site in Mexico City and a peri-urban site in Queretaro. *J. Atmos. Chem.*, 76(3), 201-228.

López-Espinoza, E. D. (2022) Expansión urbana y sus implicaciones en las variables atmosféricas. [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 21 de abril de 2022.

López-Feldman, A., Heres, D., Marquez-Padilla, F. (2021) Air pollution exposure and COVID-19: A look at mortality in Mexico City using individual-level data. *Sci Total Environ.*;756:143929. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143929.

Manrique Guevara, B. (2022) *Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire la región de la megalópolis, Estado de Puebla* [Presentación] Taller Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire la región de la megalópolis, 22 abril 2022.

Marley, N. A., Gaffney, J. S., Ramos-Villegas, R., and Cardenas, Gonzalez, B. (2007) Comparison of measurements of peroxyacyl nitrates and primary carbonaceous aerosol concentrations in Mexico City determined in 1997 and 2003, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2277–2285, doi:10.5194/acp-7-2277-2007, 2007.

MCE2-INE (Molina Center for Energy and the Environment - Instituto Nacional de Ecología) (2009) “Estudio sobre los Impactos de las Emisiones de SO<sub>2</sub> Provenientes de la Región de Tula en la Calidad del Aire de la ZMVM” in “Análisis y síntesis de los resultados de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 para su uso en la formulación de estrategias en materia de cambio climático y contaminación local en la ZMVM.” Informe Final, Convenio No. INE/ADE-051/2009, October 12, 2009.

MCE2-INECC (Molina Center for Energy and the Environment, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2013) Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta en México, informe final, 2013. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191436/2013\\_Plan\\_Nacional\\_de\\_Contaminantes.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191436/2013_Plan_Nacional_de_Contaminantes.pdf).

Mena-Carrasco, M., Carmichael, G. R., Campbell, J. E., Zimmerman, D., Tang, Y., Adhikary, B., D'allura, A., Molina, L. T., Zavala, M., García, A., Flocke, F., Campos, T., Weinheimer, A. J., Shetter, R., Apel, E., Montzka, D. D., Knapp, D. J., and Zheng, W. (2009) Assessing the regional impacts of Mexico City emissions on air quality and chemistry, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3731–3743, <https://doi.org/10.5194/acp-9-3731-2009>.

Molina, L. T. and Molina, M. J. (2002) *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 384 pp. ISBN: 1-4020-050-5

Molina, L. T. (2021) Introductory lecture: air quality in megacities. *Faraday discussions*, 226, 9-52. <https://doi.org/10.1039/D0FD00123F>.

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

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

Molina, L. T., Velasco, E., Retama, A., & Zavala, M. (2019) Experience from integrated air quality management in the Mexico City Metropolitan Area and Singapore. *Atmosphere*, 10(9), 512. <https://doi.org/10.3390/atmos10090512>.

Montiel-Lopez, F., Rodríguez-Ramírez, D., Cassou-Martínez, M., Miranda-Márquez, M. C., González-González, C., et al. (2022) Air quality in Mexico City during the COVID-19 lockdown possibly decreased COPD exacerbations. *ERJ Open Research*, 8(4). <https://doi.org/10.1183/23120541.00183-2022>.

Mora, M., Braun, R. A., Shingler, T., Sorooshian, A. (2017) Analysis of remotely sensed and surface data of aerosols and meteorology for the Mexico Megalopolis Area between 2003 and 2015, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 8705–8723, <https://doi.org/10.1002/2017JD026739>.

Mora-Ramírez, M. A. (2022) Resultados y avances de proyectos sobre Calidad del aire en la Megalópolis central de México y en Puebla. Presentado en el Conversatorio sobre el Conocimiento Actual de las Bases Científicas para la gestión de la Calidad del Aire en la Región de la Megalópolis, Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Morton-Bermea, O., Amador-Muñoz, O., Martínez-Trejo, L., Hernández-Álvarez, E., Beramendi-Orosco, L., & García-Arreola, M. E. (2014) Platinum in PM<sub>2.5</sub> of the metropolitan area of Mexico City. *Environmental geochemistry and health*, 36(5), 987-994. <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9613-8>.

Moya, M., Ansari, A. S., & Pandis, S. N. (2001) Partitioning of nitrate and ammonium between the gas and particulate phases during the 1997 IMADA-AVER study in Mexico City. *Atmos. Environ.*, 35(10), 1791-1804. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00292-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00292-2).

Moya, M., Grutter, M., and Báez, A. (2004) Diurnal variability of size-differentiated inorganic aerosols and their gas-phase precursors during January and February of 2003 near downtown Mexico City, *Atmos. Environ.*, 38, 5651–5661, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.05.045>.

Mugica-Álvarez, V., Magaña-Reyes, M., Martínez-Reyes, A., Figueroa-Lara, J., Blanco-Jiménez, S., Goytia-Leal, V., Páramo-Figueroa, V.H., García-Martínez, R. (2020a) Updating Real-World Profiles of Volatile Organic Compounds and Their Reactivity Estimation in Tunnels of Mexico City. *Atmosphere*, 11, 1339. <https://doi.org/10.3390/atmos11121339>.

Mugica-Álvarez, V.; Martínez-Reyes, C.A.; Santiago-Tello, N. M.; Martínez-Rodríguez, I.; Gutiérrez-Arzaluz, M.; Figueroa-Lara, J. J. (2020b) Evaporative volatile organic compounds from gasoline in Mexico City. Characterization and atmospheric reactivity. *Energy Rep.* 2020a, 6, 825–830. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.010>

Nolte, C. G., Spero, T. L., Bowden, J. H., Mallard, M. S., Dolwick, P. D. (2018) The potential effects of climate change on air quality across the conterminous US at 2030 under three Representative Concentration Pathways, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 15471–15489, <https://doi.org/10.5194/acp-18-15471-2018>.

Noyola A., Paredes M.G., Güereca L.P., Molina L.T., Zavala M. (2018) Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review., *Sci. Total Environ*, 639, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.111>, 2018.

Noyola, A. (2022) *Evaluación de las emisiones de metano de plantas de tratamiento de aguas residuales y estrategias de mitigación*. [Presentación] Taller virtual, Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Ochoa, C. A., Quintanar, A. I., Raga, G. B., & Baumgardner, D. (2015). Changes in intense precipitation events in Mexico City. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1804-1820. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0081.1>

Olivares-Salazar, S. E., Alvarez-Ospina, H., Aguillon-Vazquez, C., Salcedo, D. (2021) Source Apportionment of Particulate Matter in the Metropolitan Area of Querétaro (Central Mexico): First Case Study. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(9), 2347-2355. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00122>.

Osibanjo, O. O., Rappenglück, B., & Retama, A. (2021). Anatomy of the March 2016 severe ozone smog episode in Mexico-City. *Atmos. Environ.*, 244, 117945. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117945>.

Osibanjo, O. O., Rappenglück, B., Ahmad, M., Jaimes-Palomera, M., Rivera-Hernández, O., Prieto-González, R., & Retama, A. (2022) Intercomparison of planetary boundary-layer height in Mexico City as retrieved by microwave radiometer, micro-pulse lidar and radiosondes. *Atmospheric Research*, 271, 106088. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106088>.

Paredes M.G., Güereca L.P., Molina L.T., Noyola A. (2015) Methane emissions from stabilization ponds for municipal wastewater treatment in Mexico, *J. Integr. Environ. Sci.*, 12:sup1, 139-153, DOI: 10.1080/1943815X.2015.1110185

Peralta, O., Ortíz-Alvarez, A., Torres-Jardón, R., Suárez-Lastra, M., Castro, T., & Ruíz-Suárez, L. G. (2021) Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. *Sci. Total Environ.*, 761, 143183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143183>.

Raga, G. B., Kok, G. L., Baumgardner, D., Baez, A., Rosas, I. (1999) Evidence for volcanic influence on Mexico City aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1149–1152. <https://doi.org/10.1029/1999GL900154>.

Ramos-H, D., Medellín, R. A., & Morton-Bermea, O. (2020). Insectivorous bats as biomonitor of metal exposure in the megalopolis of Mexico and rural environments in Central Mexico. *Environmental research*, 185, 109293. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109293>.

Retama, A., Neria-Hernández, A., Jaimes-Palomera, M., Rivera-Hernández, O., Sánchez-Rodríguez, M., López-Medina, A., Velasco, E. (2019) Fireworks: a major source of inorganic and organic aerosols during Christmas and New Year in Mexico City. *Atmos. Environ: X*, 2, 100013.

Retama, A. and Velasco, E. (2022) Chemical characterization of winter PM<sub>1</sub> pollution in Mexico City. (*In review*)

Retama, A., Baumgardner, D., Raga, G. B., McMeeking, G. R., and Walker, J. W. (2015) Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9693–9709, <https://doi.org/10.5194/acp-15-9693-2015>.

Retama, A., Ramos-Cerón, M., Rivera-Hernández, O., Allen, G., & Velasco, E. (2022) Aerosol optical properties and brown carbon in Mexico City. *Environ. Sci.: Atmos.*, 2, 315-334. <https://doi.org/10.1039/D2EA00006G>.

Rivera, C., Sosa, G., Wöhrnschimmel, H., de Foy, B., Johansson, M., and Galle, B. (2009) Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6351–6361, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6351-2009>.

Rivera, C., Johansson, M., Galle, B., Barrera, H., Molina, L. T., Arellano, T. (2022) *Evolución de emisiones de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> de la Refinería y Central Térmica en Tula Hidalgo, 2006-2017* [Presentación] Taller virtual, Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Rodríguez Zas, J. A., & García Reynoso, J. A. (2021). Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de 2013 para la Modelación de la Calidad del Aire en el Centro de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 463–487. <https://doi.org/10.20937/RICA.53865>

Rozanes-Valenzuela, D. A., Magaldi, A. V., Salcedo, D. (2021) Regional flow climatology for central Mexico (Querétaro): a first case study. *Atmósfera*, 36(2), 239-252.

San Martini, F. M., West, J. J., de Foy, B., Molina, L. T., Molina, M. J., Sosa, G., McRae, G. J. (2005) Modeling Inorganic Aerosols and Their Response to Changes in Precursor Concentration in Mexico City, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 55:6, 803-815, DOI: 10.1080/10473289.2005.10464674.

Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.

Salcedo, D., Álvarez-Ospina, H., Peralta, O. and Castro, T. (2018) PM<sub>1</sub> chemical characterization during the ACU15 campaign, south of Mexico City. *Atmosphere*, 9(6), p.232.

Salcido, A., Carreón-Sierra, S., Celada-Murillo, A.-T. (2019). Air Pollution Flow Patterns in the Mexico City Region. *Climate*, 7, 128. <https://doi.org/10.3390/cli7110128>.

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

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2020) *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2021a) *Estrategia Local de Acción Climática 2021-2050, Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2021-2030*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD007019.pdf>.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2021b) Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2017) Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Noviembre, 2017.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2018) Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Noviembre, 2018.

SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH, SEMARNAT (2021) Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021-2030). Ciudad de México. Diciembre, 2021.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2017) Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la Megalópolis, PROAIRE de la Megalópolis 2017-2030. Ciudad de México. [https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa\\_de\\_Gesti%C3%B3n\\_Federal\\_2017-2030\\_final.pdf](https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa_de_Gesti%C3%B3n_Federal_2017-2030_final.pdf).

SEMARNAT-INECC. (2018) México, Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Mexico City. Mexico.

Schiavo, B., Morton-Bermea, O., Salgado-Martinez, E., & Hernández-Álvarez, E. (2020). Evaluation of possible impact on human health of atmospheric mercury emanations from the Popocatepetl volcano. *Environ. Geochem. Health*, 42(11), 3717-3729.

Shen, L, Zavala-Araiza, D., Gautam, R., Omara, M., Scarpelli, T., Sheng, J., Sulprizio, M.P., Zhuang, J., Zhang, Y., Qu, Z., Lu, X., Hamburg, S.P., Jacob, D.J., 2021. Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations. *Remote Sens. Environ.* 260: 112461. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112461>.

Silva-Quiroz, R., Rivera, A. L., Ordoñez, P., Gay-Garcia, C., Frank, A. (2019). Atmospheric blockages as trigger of environmental contingencies in Mexico City. *Heliyon*. 5, e02099. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02099.

Sokhi, R. S., Singh, V., Querol, X., Finardi, S., Targino, A. C., et al. (2021). A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions. *Environment International*, 157, 106818. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>.

Song, J., Lei, W., Bei, N., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Cardenas, B., Zheng, J., Zhang, R., Molina, L. T. (2010) Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3827–3846, <https://doi.org/10.5194/acp-10-3827-2010>.

Raga, G. B., Kok, G. L., Baumgardner, D., Baez, A., Rosas, I. (1999) Evidence for volcanic influence on Mexico City aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1149–1152. <https://doi.org/10.1029/1999GL900154>.

UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). (2021) Boletín UNAM-DGCS-080. Ciudad Universitaria. 2021. [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021\\_080.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021_080.html).

UNEP-WMO (United Nations Environment Programme and World Meteorological Organization) (2011) Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone. Nairobi, Kenya, 303 pp.,

UNEP (United Nations Environment Programme) (2011a) Near-term climate protection and clean air benefits: Actions for controlling short-lived climate forcers, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 78 pp.

UNEP (United Nations Environment Programme). (2011b) HFCs: A critical link in protecting climate and the ozone layer, 40 pp.

UNEP (United Nations Environment Programme). (2021) COP26 ends with agreement but falls short on climate action, 15 November 2021. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>.

US EPA (United States Environmental Protection Agency). (2022) Learn about heat island. <https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-islands#heat-islands> (Consultado el octubre de 2022).

Valencia Salazar, S. S., Piñeiro Vázquez, A. T., Molina Botero, I. C., Lazos Balbuena, F. J., Uuh Narváez, J. J., Segura Campos, M. R., Ramírez Avilés, L., Solorio Sánchez, F. J. and Ku Vera, J. C. (2018) Potential of Samanea saman pod meal for enteric methane mitigation in crossbred heifers fed low-quality tropical grass. *Agricultural and Forest Meteorology* 258, 108–116.

Vázquez-Carrillo, M.F., Montelongo-Pérez, H.D., González-Ronquillo, M., Castillo-Gallegos, E., Castelán-Ortega, O.A. (2020) Effects of Three Herbs on Methane Emissions from Beef Cattle. *Animals*, 10, 1671. <https://doi.org/10.3390/ani10091671>.

Vázquez-Carrillo, M.F.; Zaragoza-Guerrero, R.; Corona-Gochi, L.; González-Ronquillo, M.; Castillo-Gallegos, E.; Castelán-Ortega, O.A. (2023) Effect of *Cymbopogon citratus* on Enteric Methane Emission, Nutrients Digestibility, and Energy Partition in Growing Beef Cattle. *Agriculture*, 13, 745. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040745>.

Vega, E., Namdeo, A., Bramwell, L., Miquelajauregui, Y., Resendiz-Martinez, C. G., Jaimes-Palomera, M., Luna-Falfan, F., Terrazas-Ahumada, A., Maji, K. J., Entwistle, J., Núñez Enríquez, J.C., Mejia, J. M., Portas, A., Hayes, L., & McNally, R. (2021). Changes in air quality in Mexico City, London and Delhi in response to various stages and levels of lockdowns and easing of restrictions during COVID-19 pandemic. *Environmental Pollution*, 285, 117664. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117664>.

Velasco, E. and Retama, A. (2017) Ozone's threat hits back Mexico City. *Sustain. Cities Soc.*, 31, 260–263. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.015>.

Velasco, E., Lamb, B., Pressley, S., Allwine, E., Westberg, H., Jobson, B. T., Alexander, M., Prazeller, P., Molina, L. and Molina, M. (2005) Flux measurements of volatile organic compounds from an urban landscape. *Geophys. Res. Lett.*, 32(20), L20802, doi: 10.1029/2005GL023356.

Velasco, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina, J. L., Jobson, B. T., Alexander, M. L., Prazeller, P., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Grutter, M., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., and Molina, M. J. (2007) Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002



and 2003 field campaigns, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 329–353. <http://www.atmos-chem-phys.net/7/329/2007/>.

Velasco, E., Pressley, S., Grivicke, R., Allwine, E., Coons, T., Foster, W., Jobson, B. T., Westberg, H., Ramos, R., Hernandez, F., Molina, L. T., and Lamb, B. (2009). Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 7325–7342, <http://www.atmos-chem-phys.net/9/7325/2009/>.

Velasco, E., Retama, A., Segovia, E., Ramos, R. (2019). Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City. *Atmos. Environ.*, 219, 117044.

Velasco, E., Retama, A., Zavala, M., Guevara, M., Rappenglück, B., & Molina, L. T. (2021). Intensive field campaigns as a means for improving scientific knowledge to address urban air pollution. *Atmos. Environ.*, 246, 118094. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118094>.

Vera-Valdés, J. E. and Rodríguez-Caballero, C. V. (2022) Air pollution and mobility in the Mexico City Metropolitan Area in times of COVID-19. *Atmósfera*, 36(2), 343–354. <https://doi.org/10.20937/ATM.53052>.

Volkamer, R., Sheehy, P., Molina, L. T., Molina, M. J. (2010) Oxidative capacity of the Mexico City atmosphere – Part 1: a radical source perspective. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6969–6991. <https://doi.org/10.5194/acp-10-6969-2010>.

Young, A. T., Betterton, E. A., De Rueda, L. S. (1997) Photochemical box model for Mexico City. *Atmósfera*, 10(4), 161-178.

Wang, Q. and Li, S. (2021). Nonlinear impact of COVID-19 on pollutions—Evidence from Wuhan, New York, Milan, Madrid, Bandra, London, Tokyo and Mexico City. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102629. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102629>.

WHO (World Health Organization). (2020a) Director General’s opening remarks at the media briefing. <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020>. (Consultado el septiembre de 2020).

WHO (World Health Organization). (2020b) Strengthening preparedness for COVID-19 in cities and urban settings: interim guidance for local authorities. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/331896>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. (Consultado el septiembre de 2020).

Wu, S., Mickley, L. J., Leibensperger, E. M., Jacob, D. J., Rind, D. and Streets, D. G. (2008) Effects of 2000–2050 global change on ozone air quality in the United States. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 113(D6). <https://doi.org/10.1029/2007JD008917>.

Wu, X., Nethery, R. C., Sabath, M. B., Braun, D., and Dominici, F. (2020) Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis, *Science Advances*, 6, eabd4049. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd4049>.

Yao, M. (2018). Reprint of bioaerosol: A bridge and opportunity for many scientific research fields. *J. Aerosol Science*, 119, 91-96.

Zavala, M., Molina, L. T., Yacovitch, T. I., Fortner, E. C., Roscioli, J. R., Floerchinger, C., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Knighton, W. B., Paramo, V. H., Zirath, S., Mejía, J. A., and Jazcilevich, A. (2017a) Emission factors of black carbon and co-pollutants from diesel vehicles in Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 15293-15305, <https://doi.org/10.5194/acp-17-15293-2017>.

Zavala, M., Huertas, J. I., Prato, D., Jazcilevich, A., Aguilar, A., Balam, M., Misra, C., and Molina, L. T. (2017b) Real world emissions of in-use off-road vehicles in Mexico. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, Sep; 67 (9): 958-972. doi: 10.1080/10962247.2017.1310677.

Zavala, M., Brune, W. H., Velasco, E., Retama, A., Cruz-Alavez, L. A., Molina, L. T. (2020) Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmos. Environ.*, 238, 117747. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117747>.

Zhang, Y., Dubey, M. K., Olsen, S. C., Zheng, J., and Zhang, R. (2009) Comparisons of WRF/Chem simulations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the 2006-MILAGRO, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3777–3798, <https://doi.org/10.5194/acp-9-3777-2009>.

## CAPÍTULO 5

Amador-Muñoz, O., Martínez-Domínguez, Y.M., Gómez-Arroyo, S., Peralta, O. (2020) Current situation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in PM<sub>2.5</sub> in a receptor site in Mexico City and estimation of carcinogenic PAH by combining non-real-time and real-time measurement techniques. *Sci. Total Environ.*, 703, 10.1016/j.scitotenv.2019.134526

Aztatzi-Aguilar, O., Marisela Uribe-Ramírez, José Antonio Arias-Montañón, Olivier Barbier, Andrea De Vizcaya-Ruiz. (2015) Acute and subchronic exposure to air particulate matter induces expression of angiotensin and bradykinin-related genes in the lungs and heart: angiotensin-II type-I receptor as a molecular target of particulate matter exposure. *Particle and Fibre Toxicology* 12:17. Doi: 10.1186/s12989-015-0094-4.

Aztatzi-Aguilar, O.G., M. Uribe-Ramírez, J. Narváez-Morales, A. De Vizcaya-Ruiz and O. Barbier. (2016) Early kidney damage induced by subchronic exposure to PM<sub>2.5</sub> in rats. *Particle and Fibre Toxicology* 13:68. Doi: 10.1186/s12989-016-0179-8.

Aztatzi-Aguilar, O.G., Valdés-Arzate A., Debray-García Y., Uribe-Ramirez M., Calderón-Aranda E., Acosta-Saavedra L., et al. (2018) Exposure to ambient particulate matter induces oxidative stress in lung and aorta in a size- and time- dependent manner in rats. *Toxicology and Research Applications*. Vol 2, pp:1–15. Doi.org/10.1177/2397847318794859.

Barraza-Villarreal, A., Sunyer, J., Hernandez-Cadena, L., Escamilla-Nuñez, M. C., Sienra-Monge, J. J., Ramírez-Aguilar, M., Cortez-Lugo, M., Holguin, F., Diaz-Sánchez, D., Olin, A. C., Romieu, I. (2008) Air pollution, airway inflammation, and lung function in a cohort study of Mexico City schoolchildren. *Environ. Health Perspectives*, 116(6), 832-838. <https://doi.org/10.1289/ehp.10926>.

Calderón-Garcidueñas, L., & Ayala, A. (2022) Air Pollution, Ultrafine Particles, and Your Brain: Are Combustion Nanoparticle Emissions and Engineered Nanoparticles Causing Preventable Fatal Neurodegenerative Diseases and Common Neuropsychiatric Outcomes? *ES&T*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04706>.

Calderón-Garcidueñas, L., González-Maciél, A., Mukherjee, P. S., Reynoso-Robles, R., Pérez-Guillé, B., Gayosso-Chávez, C., Torres-Jardón, R., Cross, J. V., Ahmed, I. A. M., Karloukovski V. V. & Maher, B. A. (2019) Combustion-and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts. *Environ. Research*, 176, 108567. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108567>.

Calderón-Garcidueñas, L., Torres-Solorio, A. K., Kulesza, R. J., Torres-Jardón, R., González-González, L. O., García-Arreola, B., et al. (2020) Gait and balance disturbances are common in young urbanites and associated with cognitive impairment. Air pollution and the historical development of Alzheimer's disease in the young. *Environ. Research*, 191, 110087. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110087>.

Calderón-Garcidueñas, L.; Stommel, E.W.; Rajkumar, R.P.; Mukherjee, P.S.; Ayala, A. (2021) Particulate Air Pollution and Risk of Neuropsychiatric Outcomes. What We Breathe, Swallow, and Put on Our Skin Matters. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18, 11568. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111568>.

Ceja, Esparza P., Barraza Villarreal, A., Hernández Cadena, L. (2021) Prenatal NO<sub>x</sub> exposure and Waist-to Height Ratio as a cardiovascular risk factor in school aged children in the POSGRAD Cohort. Tesis de Maestría en Ciencias en Salud Ambiental, INSP 2021 (Datos en vías de publicación).

Cervantes-Martínez, K., Stern, D., Zamora-Muñoz, J. S., López-Ridaura, R., Texcalac-Sangrador, J. L., Cortés-Valencia, A., Acosta-Montes, J. O., Lajous, M., Riojas-Rodríguez, H. (2022) Air pollution exposure and incidence of type 2 diabetes in women: A prospective analysis from the Mexican Teachers' Cohort. *Sci. Total Environ*, Volume 818, 151833, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151833>.

Chirino, Y. I., Sánchez-Pérez, Y., Osornio-Vargas, Á. R., Morales-Bárceñas, R., Gutiérrez-Ruíz, M. C., Segura-García, Y., Rosas, I., Pedraza-Chaverri, J., García-Cuellar, C. M. (2010). PM10 impairs the antioxidant defense system and exacerbates oxidative stress driven cell death. *Toxicology letters*, 193(3), 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2010.01.009>.

Corona-Vázquez, T., Rivera, J. D. J. F., RodríguezViolante, M., & Cervantes-Arriaga, A. (2019) Air pollution, multiple sclerosis and its relevance to Mexico City. *Archives of Medical Research*, 50(3), 111-112. <https://doi.org/10.1016/j.arcmed.2019.07.003>.

De Vizcaya-Ruiz (2022) Partículas respirables: Estudios toxicológicos actuales. [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

De Vizcaya-Ruiz, A., Gutiérrez-Castillo, M. E., Uribe-Ramírez, M., Cebrián, M. E., Mugica-Alvarez, V., Sepúlveda, J., Rosas, I. et al. (2006). Characterization and in vitro biological effects of concentrated particulate matter from Mexico City. *Atmos. Environ.*, 40, 583–592. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.12.073.

Déciga-Alcaraz, A. (2022) Alteraciones de la materia orgánica extraída de las PM<sub>2.5</sub> en biomoléculas y producción de surfactante pulmonar [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Dockery, D., Rojas-Bracho, L., Evans, J. (2019) Benefits of air pollution control on life expectancy in Mexico City 1990 to 2015. *Environ. Epidemiology*, 3, 100. <https://doi.org/10.1097/01.EE9.0000606796.38349.08>.

Doherty, R. M., Heal, M. R., O'Connor, F. M. (2017) Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality. *Environ Health*.16 (Suppl 1), 118. doi.org/10.1186/s12940-017-0325-22.

Gouveia, N., Junger, W., L., Romieu, I., Cifuentes, L. A., Ponce de Leon, A., Vera, J., Strappa, V., Hurtado-Díaz, M., Miranda-Soberanis, V., Rojas-Bracho, L., Carbajal-Arroyo, L., Tzintzun-Cervantes, G. (2018) Effects of air pollution on infant and children respiratory mortality in four large Latin-American cities, *Environ. Pollut.*, 232, 385-391. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.125>.

Gutiérrez-Castillo, M. E., Roubicek, D. A., Cebrián-García, M. E., De Vizcaya-Ruiz, A., Sordo-Cedeño, M., & Ostrosky-Wegman, P. (2006) Effect of chemical composition on the induction of DNA damage by urban airborne particulate matter. *Environ. Mol. Mutagen*, 47, 199-211. <https://doi.org/10.1002/em.20186>.

Falcon-Rodríguez, C. I., De Vizcaya-Ruiz, A., Rosas-Pérez, I. A., Osornio-Vargas, Á. R., & Segura-Medina, P. (2017) Inhalation of concentrated PM<sub>2.5</sub> from Mexico City acts as an adjuvant in a guinea pig model of allergic asthma. *Environ. Pollut.*, 228, 474-483. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.05.050>.

Hurtado-Díaz M., Riojas-Rodríguez, H., Rothenberg, S. J., Schnaas-Arrieta, L., Kloog, I., Just A., Hernández-Bonilla, D., Wright, R. O., Téllez-Rojo, M. M. (2021) Prenatal PM<sub>2.5</sub> exposure and neurodevelopment at 2 years of age in a birth cohort from Mexico City. *Int J Hyg Environ Health*. 2021 Apr;233:113695. Doi: 10.1016/j.ijheh.2021.113695.

Kinney P. L. (2018) Interactions of Climate Change, Air Pollution, and Human Health. *Curr Environ Health Report*, 5, 179-186. doi: 10.1007/s40572-018-0188-x.

Maher, B. A., González-Maciel, A., Reynoso-Robles, R., Torres-Jardón, R., & Calderón-Garcidueñas, L. (2020) Iron-rich air pollution nanoparticles: An analyzed environmental risk factor for myocardial mitochondrial dysfunction and cardiac oxidative stress. *Environ. Research*, 188, 109816.

Mendoza-Ramirez, J., Barraza-Villarreal, A., Hernandez-Cadena, L., Hinojosa de la Garza, O., Luis Texcalac Sangrador, J., Elvira Torres-Sanchez, L., Cortez-Lugo, M., Escamilla-Nuñez, C., Helena Sanin-Aguirre, L. and Romieu, I. (2018) Prenatal Exposure to Nitrogen Oxides and its Association with Birth Weight in a Cohort of Mexican Newborns from Morelos, Mexico. *Annals of Global Health*, 84(2), pp.274–280. DOI: <http://doi.org/10.29024/aogh.914>

Morales-Rubio, R., Isabel Alvarado-Cruz, Natalia Manzano-León, Maria-de-los-Angeles Andrade-Oliva, Marisela Uribe-Ramirez, Betzabet Quintanilla-Vega, Álvaro Osornio-Vargas, Andrea De Vizcaya-Ruiz (2019) In utero exposure to ultrafine particles promotes placental stress-induced programming of renin-angiotensin system-related elements in the offspring results in altered blood pressure in adult mice. *Particle and Fibre Toxicology* 16:7, 1-16. Doi: 10.1186/s12989-019-0289-1.

Morales-Rubio, R., Omar Amador-Muñoz, Irma Rosas-Pérez, Yesennia Sánchez-Pérez, Claudia García-Cuéllar, Patricia Segura-Medina, Álvaro Osornio-Vargas, Andrea De Vizcaya- Ruiz. (2022) PM 2.5 induces airway hyperresponsiveness and inflammation via the AhR pathway in a sensitized Guinea pig asthma-like model. *Toxicology* 465:153026. Doi: 10.1016/j.tox.2021.153026.

Perez-Humara, M. L., Hernández-Cadena, L., Escamilla-Nunez, M. C., Barraza-Villarreal, A. (2020) Ambient ozone exposure and amino acids metabolome in adolescents with overweight and obesity. In *ISEE Conference Abstracts* (Vol. 2020, No. 1).

Quezada-Maldonado, E. M., Sánchez-Pérez, Y., Chirino, Y. I., & García-Cuellar, C. M. (2021) Airborne particulate matter induces oxidative damage, DNA adduct formation and alterations in DNA repair pathways. *Environmental Pollution*, 287, 117313. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117313>.

Quezada-Maldonado, E. M., Sánchez-Pérez, Y., Chirino, Y. I., Vaca-Paniagua, F., & García-Cuellar, C. M. (2018) miRNAs deregulation in lung cells exposed to airborne particulate matter (PM10) is associated with pathways deregulated in lung tumors. *Environmental Pollution*, 241, 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.073>.

Riojas-Rodríguez, H. (2022) *Introducción a la sección 2* [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 22 de abril de 2022.

Santibáñez-Andrade, M., Chirino, Y. I., González-Ramírez, I., Sánchez-Pérez, Y., & García-Cuellar, C. M. (2019) Deciphering the code between air pollution and disease: The effect of particulate matter on cancer hallmarks. *Int. J. Mol.Sci.* 21(1), 136.

Sánchez-Pérez, Y., Chirino, Y. I., Osornio-Vargas, Á. R., Morales-Bárceñas, R., Gutiérrez-Ruiz, C., Vázquez-López, I., & García-Cuellar, C. M. (2009) DNA damage response of A549 cells treated with particulate matter (PM10) of urban air pollutants. *Cancer letters*, 278(2), 192-200.

SPH-Harvard (School of Public Health Harvard). (2016) Análisis histórico de los beneficios para la salud asociados a una mejor calidad del aire en la Ciudad de México (CDMX) entre 1990 y 2015. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal: CDMX. <http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/beneficios-en-salud-por-la-mejora-de-la-calidad-del-aire/descargas/analisis-espanol.pdf>

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. 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? *Int J Environ Res Public Health*. 2022 Jun 30;19(13):8040. Doi: 10.3390/ijerph19138040. PMID: 35805702; PMCID: PMC9265398.

Tamayo-Ortiz, M., Téllez-Rojo, M., Rothenberg, S. J., Gutiérrez-Avila, I., Just, A. C., Kloog, I., Texcalac-Sangrador, J. L., Romero-Martinez, M., Bautista-Arredondo, L. F., Schwartz, J., R. O. Wright, R. O., Riojas-Rodriguez, H. (2021) Exposure to PM<sub>2.5</sub> and obesity prevalence in the greater Mexico City area *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18, p. 2301, 10.3390/ijerph18052301.

Téllez-Rojo, M. M., Rothenberg, S. J., Texcalac-Sangrador, J. L., Just, A. C., Kloog, I., Rojas-Saunero, L. P., Gutiérrez-Avila, I., Bautista-Arredondo, L. F., Tamayo-Ortiz, M., Romero, M., Hurtado-Díaz, M., Schwartz, J. D., Wright, R., Riojas-Rodríguez, H. (2020) Children's acute respiratory symptoms associated with PM<sub>2.5</sub> estimates in two sequential representative surveys from the Mexico City Metropolitan Area. *Environ. Research*, 180, 108868. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108868>.

Ugalde-Resano, R., Riojas-Rodríguez, H., Texcalac-Sangrador, J. L., Cruz, J. C., Hurtado-Díaz, M. (2022) Short term exposure to ambient air pollutants and cardiovascular emergency department visits in Mexico City, *Environ. Research*, 207, 112600, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112600>.

Velasco, E., Retama, A., Segovia, E., Ramos, R. (2019) Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City. *Atmos. Environ.* 219, 117044, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117044>.

Villalobos-Pietrini, R., Hernández-Mena, L., Amador-Muñoz, O., Munive-Colín, Z., Bravo-Cabrera, J. L., Gómez-Arroyo, S., Frías-Villegas, A., S. Waliszewski, Ramírez-Pulido, J., Ortiz-Muñiz, R. (2007) Biodirected mutagenic chemical assay of PM<sub>10</sub> extractable organic matter in Southwest Mexico City *Mutat. Res.*, 634, 192-204, 10.1016/j.mrgentox.2007.07.004.

WHO (World Health Organization). (2022) WHO fact sheets: Household air pollution (July 27, 2022), <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>; Ambient (Outdoor) air pollution (September 22, 2021), [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). (Consultado el 18 de septiembre de 2022).

WHO (World Health Organization). (2021a) WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

WHO (World Health Organization). (2021b) New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution, 22 September 2021 News release, Copenhagen and Geneva. <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution> (Consultado el 22 de septiembre de 2021).

Yazdi, M. D., Wang, Y., Di, Q., Requia, W .J., Wei, Y., Shi, L., Sabath, M. B., Dominici, F., Coull, B., Evans, J. S., Koutrakis, P., and Schwartz, J. D. (2021) Long-term Effect of Exposure to Lower Concentrations of Air Pollution on Mortality Among US Medicare Participants and Vulnerable Subgroups: A Doubly-Robust Approach, *The Lancet Planetary Health*, 5(10), e689-e697, doi:10.1016/S2542-5196(21)00204-7.

## CAPÍTULO 6

Bachmann, J. (2007). Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57:6, 652-697, DOI: 10.3155/1047-3289.57.6.652

CAA (Clean Air Act). Clean Air Act Extension of 1970. (1970) <https://www.govinfo.gov/content/pkg/STATUTE-84/pdf/STATUTE-84-Pg1676.pdf> (Consultado el 10 de octubre de 2022).

CAM (Comisión Ambiental Metropolitana). (2002) Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002–2010; DF, GEMEX, SEMARNAT, SS: CDMX. 2002. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/> (Consultado el 27 de junio de 2019)

CAM (Comisión Ambiental Metropolitana) (2011) Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011–2020. CDMX. 2011. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/> (Consultado el 27 de junio de 2019).

CAME (Comisión Ambiental de la Megalópolis). (2019) *Medidas Inmediatas para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*. CDMX. 2019. [http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2019/Medidas\\_prioritarias\\_ZMVM.pdf](http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2019/Medidas_prioritarias_ZMVM.pdf) (Consultado el 7 de julio de 2019).

CAME (Comisión Ambiental de la Megalópolis). (2022a) Informe de actividades de la CAME 2021, Comisión Ambiental de la Megalópolis, 20 de febrero de 2022. <https://www.gob.mx/comisionambiental/documentos/informe-de-actividades-de-la-came-2021>.

CAME (Comisión Ambiental de la Megalópolis) (2022b). México cuenta con un gran potencial para impulsar la movilidad eléctrica en las grandes ciudades, Comunicado, 12 de agosto de 2022. <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/mexico-cuenta-con-un-gran-potencial-para-impulsar-la-movilidad-electrica-en-las-grandes-ciudades> (Consultado el 8 de noviembre de 2022).

CAME (Comisión Ambiental de la Megalópolis). (2022c) Coinciden especialistas en que la movilidad sustentable en el trabajo y la escuela promueve beneficios ambientales, económicos y a la salud, Comunicado, 10 de noviembre de 2022. <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/coinciden-especialistas-en-que-la-movilidad-sustentable-en-trabajo-y-escuela-promueve-beneficios-ambientales-economicos-y-a-la-salud-de-la-poblacion?tab=> (Consultado el 8 de noviembre de 2022)

CAME, (Comisión Ambiental de la Megalópolis). (2023). *Comunicado “El Índice AIRE Y SALUD, herramienta para informar sobre la calidad del aire y las recomendaciones para proteger la salud”, referente a la conferencia Difusión del Índice AIRE y SALUD (CAME, 3-31-23)*. <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/el-indice-aire-y-salud-herramienta-para-informar-sobre-la-calidad-del-aire-y-las-recomendaciones-para-la-proteccion-de-la-salud> (Consultado el 31 de marzo de 2023)

CAME, (Comisión Ambiental de la Megalópolis). Índice AIRE Y SALUD: Características y aplicación. Documento Informativo. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554425/comunicado\\_indice\\_calidad\\_aire\\_05\\_2020\\_FINAL\\_v3.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554425/comunicado_indice_calidad_aire_05_2020_FINAL_v3.pdf) (Consultado el 31 de marzo de 2023).

CDMX (Ciudad de México) (2019) Aviso por el que se da a Conocer el Programa de Verificación Vehicular Obligatoria para el Segundo Semestre del año 2019. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/comunicación-social/PVVO%20SEM%202019.pdf> (Consultado el 7 de julio de 2019).



CDMX (Ciudad de México). (2023) [http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/descargas/final\\_report\\_\\_indicator\\_ingles.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/conoce-tu-numero-iner/descargas/final_report__indicator_ingles.pdf) (consultado el 31 de marzo de 2023)

Cromar, K.; Gladson, L.; Jaimes Palomera, M.; Perlmutter, L. Development of a Health-Based Index to Identify the Association between Air Pollution and Health Effects in Mexico City. *Atmosphere* 2021, 12, 372. <https://doi.org/10.3390/atmos12030372>

DDF (Departamento del Distrito Federal) (1990) Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica: Un Compromiso Común (PICCA). Departamento del Distrito Federal: Mexico City, Mexico, 1990; pp. 1–77. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/programa\\_integral\\_contra\\_la\\_contaminacion\\_atmosferica.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/programa_integral_contra_la_contaminacion_atmosferica.pdf) (Consultado el 8 de julio de 2019).

DDF (Departamento del Distrito Federal) (1996) Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, 1995–2000 (PROAIRE); Mexico City, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Secretaría de Salud: CDMX. 1996. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire\\_2002-2010.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf) (Consultado el 8 de julio de 2019).

de Lima, M. (2019): The value of a statistical life in Mexico, *Journal of Environmental Economics and Policy*, DOI: 10.1080/21606544.2019.1617196.

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994a) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. 1994. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-023-SSA1-1993.pdf> (Consultado el 2 de mayo de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994b) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993. 1994. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-021-SSA1-1993.pdf> (Consultado el 2 de mayo de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994c) Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. 1994. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-026-SSA1-1993.pdf> (Consultado el 2 de mayo de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2013) Convenio de coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental de la Megalópolis, que celebran la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Gobierno del Distrito Federal y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Puebla y Tlaxcala 2013. <http://www.dof.gob.mx/> (Consultado el 16 de abril de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación) (2016) Especificaciones de Calidad de Los petrolíferos. Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016) (Consultado el 12 de julio de 2019).

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2017) Norma Oficial Mexicana NOM-167-SEMARNAT-2017, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para los vehículos automotores

que circulan en las entidades federativas Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala; los métodos de prueba para la evaluación de dichos límites y las especificaciones de tecnologías de información y hologramas. 5 de septiembre de 2017 (Consultado el noviembre de 2022).

E-BUS RADAR (n.d.) Buses eléctricos en América Latina (<https://www.ebusradar.org/es/>). Last update Aug, 2022. (Consultado el 16 de noviembre de 2022).

Excélsior Digital. (2022) Contingencia ambiental en Valle de México, por sistema de alta presión y alta temperatura, Excélsior Digital | Ciudad de México - 6 may, 2022, <https://noticias/mexico/contingencia-ambiental-en-valle-de-mexico-por-sistema-de-alta-presion-y-alta-temperatura/ar-AAX03mz> (Consultado el octubre de 2022).

Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2019). Aviso por el que se da a conocer el Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México. Número 100 Bis, 28 de mayo de 2019.

Gakenheimer, R., Molina, L.,T., Sussman, J., Zegras, C., Howitt, A., Makler, J., Lacy, R., Slott, R., Villegas, A. et al. (2002) The MCMA transportation system: Mobility and air pollution. In *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2002; ISBN 978-1-4020-0507-7.

Haagen-Smit, A.J. (1952) Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog. *Ind. Eng. Chem.* 44, 1342–1346.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2015) Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la Región Centro de México. Informe Final, Tomo II. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, 2015.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2016) Estimación de impactos en la salud por contaminación atmosférica en la región centro del país y alternativas de gestión. Instituto Nacional de Salud Pública. Documento final. Diciembre de 2016. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208105/INECC\\_CAME\\_Final\\_14022017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208105/INECC_CAME_Final_14022017.pdf).

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2019) Impacto ambiental del contenido de azufre en el diésel vehicular comercializado en México. Informe Final. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/457768/Azufre\\_en\\_diesel\\_y\\_emisiones.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/457768/Azufre_en_diesel_y_emisiones.pdf) (Consultado el noviembre de 2022).

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2021) Evaluación de la calidad del aire en dos cuencas atmosféricas del Estado de Hidalgo (Tula y Pachuca) durante la contingencia por COVID-19., México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climático. Ciudad de México. 45 pp. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/712997/136\\_2021\\_Reporte\\_Hidalgo\\_COVID\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/712997/136_2021_Reporte_Hidalgo_COVID_.pdf)

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2023) Definición de umbrales y diseño del protocolo general de actuación de contingencias ambientales atmosféricas para la megalópolis y evaluación del costo – beneficio de su aplicación en la zona metropolitana del valle de México (ZMVM). Ciudad de México, marzo de 2023.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017), INEGI. Encuesta Origen -Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2017 (Consultado el octubre de 2022).

INSP (Instituto Nacional de Salud Pública). (2022) Propuesta de niveles de activación de contingencias atmosféricas con base al análisis de efectos en salud, para la Zona Metropolitana del Valle de México. Informe Final. Contrato: INECC/RPA1-001/2021.

INSP & SEDEMA. (2020) Estimación de impactos en salud y económicos por contaminación atmosférica y estimación de beneficios por mejoras en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Kochi, I., B. Hubbell, and R. Kramer. (2006) An Empirical Bayes Approach to Combining and Comparing Estimates of the Value of a Statistical Life for Environmental Policy Analysis. *Environmental & Resource Economics* 34 (3): 385–406. <https://doi.org/10.1080/21606544.2019.1617196>.

Jaimés-Palomera, M., Retama, A., Elias-Castro, G., Neria-Hernández, A., Rivera-Hernández, O., Velasco, E. (2016) Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Mexico City: Results of the 2012 ozone-season campaign. *Atmos. Environ.*, 132, 258-275. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.047>.

La Jornada (2022) Comisión científica indagará causas del incremento de la contaminación (7 de mayo de 2022) <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/05/07/capital/comision-cientifica-indagara-causas-del-incremento-de-la-contaminacion/>

Lanigan, S. (1993) *Valuing the Unknown: Cost-benefit analysis and Air Pollution*. Oxford Institute of Energy Studies. EV16.

Lomeli Covarrubias, A. (2022) *Expansión urbana y transporte*. [Presentación]. Taller virtual, diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis. Ciudad de México, 21 de abril de 2022.

LTMCE2 (LTM Center for Energy and the Environment). (2017) Informe Final. Evaluación de los impactos en la concentración de ozono por la aplicación de estrategias integradas de control de emisiones en la Megalópolis” (INECC/LPN-009/2017). Diciembre de 2017.

MCE2-INECC (Molina Center for Energy and the Environment, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2013). Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta en México, informe final, 2013. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191436/2013\\_Plan\\_Nacional\\_de\\_Contaminantes.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191436/2013_Plan_Nacional_de_Contaminantes.pdf).

Molina, L. T. (2021) Introductory lecture: air quality in megacities. *Faraday Discussions*, 226, 9-52. <https://doi.org/10.1039/D0FD00123F>.

Molina, L. T., Velasco, E., Retama, A., & Zavala, M. (2019). Experience from integrated air quality management in the Mexico City Metropolitan Area and Singapore. *Atmosphere*, 10(9), 512. <https://doi.org/10.3390/atmos10090512>.

Molina, L. T.; Molina, M. J. (2002) *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2002; 384 pp, ISBN 978-1-4020-0507-7.

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

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

Muñoz-Pizza, D. M., Villada-Canela, M., Rivera-Castañeda, P., Osornio-Vargas, A., Martínez-Cruz, A. L., Texcalac-Sangrador, J. L. (2022) Barriers and opportunities to incorporate scientific evidence into air quality management in Mexico: A stakeholders' perspective. *Environ. Sci. Policy*, 129, 2022, 87-95, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.022>.

NRC (National Research Council). (2004) *Air Quality Management in the United States*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10728>.

Oliva, P. (2015). Environmental regulations and corruption: Automobile emissions in Mexico City. *Journal of Political Economy*, 123(3), 686- 724. <https://doi.org/10.1086/680936>.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2022a) Programa Verificación Vehicular. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/verificacion-vehicular> (Consultado el noviembre de 2022).

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2018a) Taller para la Evaluación del PROARIE 2011–2020, Identificación de Estrategias para Mejorar la Calidad del Aire de la CDMX. Ciudad de México. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/> (Consultado el 28 de junio de 2019).

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2018b) Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2017. Ciudad de México. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6BhnmI=>

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2021). Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire. Ciudad de México, agosto 2021. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf>.

SEDEMA, SMAGEM, SEMARNATH, SEMARNAT (2021) Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ProAire ZMVM 2021-2030). Ciudad de México. Diciembre, 2021.

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2022a) Programa Verificación Vehicular. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/verificacion-vehicular> (Consultado el noviembre de 2022).

SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). (2022b) Estrategia Local de Acción Climática (Estrategia) 2021-2050 y Programa de Acción Climática (Programa) 2021-2030. <http://www.data.sedema.cdmx.gob.mx/cambioclimaticocdmx/disenio-accion-climatica-2021-2030.html> (Consultado el noviembre de 2022).

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2017a) Estrategia Nacional de la calidad del aire visión 2017-2030. Ciudad de México. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia\\_Nacional\\_Calidad\\_del\\_Aire.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf).

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2017b) Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la Megalópolis, PROAIRE de la Megalópolis 2017-2030. Ciudad de México. [https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa\\_de\\_Gesti%C3%B3n\\_Federal\\_2017-2030\\_final.pdf](https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa_de_Gesti%C3%B3n_Federal_2017-2030_final.pdf).

SEMARNAT. (2018) Comunicado CAME 015/2018: Presenta CAME Avances en el Cumplimiento del ProAire de la Megalópolis. <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/presenta-came-avances-en-el-cumplimiento-del-proaire-de-la-megalopolis> (Consultado el 26 de septiembre de 2022).

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2022) Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire ProAire, 17 de octubre de 2022. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire> (Consultado el 6 de noviembre de 2022).

SEMARNAT & INECC. (2014) Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM<sub>2.5</sub> en tres zonas metropolitanas mexicanas. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195224/2014\\_CGCSA\\_Beneficos\\_econ\\_micos\\_al\\_reducir\\_PM2.5.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195224/2014_CGCSA_Beneficos_econ_micos_al_reducir_PM2.5.pdf)

Singh, H. B., Brune, W. H., Crawford, J. H., Flocke, F., Jacob, D. J. (2009) Chemistry and transport of pollution over the Gulf of Mexico and the Pacific: Spring 2006 INTEX-B campaign overview and first results. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2301–2318.

Solazzo, E., Riccio, A., Van Dingenen, R., Valentini, L., & Galmarini, S. (2018). Evaluation and uncertainty estimation of the impact of air quality modelling on crop yields and premature deaths using a multi-model ensemble. *Sci. Total Environ.*, 633, 1437-1452.

Ugalde, V. (2020). La verificación vehicular en la Ciudad de México: una mirada sobre su implementación *Estudios Demográficos y Urbanos*, 35, 3 (105), 573-597. <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v35i3.1914>

UNEP (United Nations Environment Programme) (2021) COP26 ends with agreement but falls short on climate action, 15 November 2021. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>.

UNEP and WHO (United Nations Environment Program and World Health Organization). (1992) *Urban Air Pollution in Megacities of the World: Earthwatch: Global Environment Monitoring System*; World Health Organization, United Nations Environment Programme, Eds.; Blackwell Reference: Oxford, UK, ISBN 978-0-631-18404-1.

US EPA (US Environmental Protection Agency). (2022) Summary of the Clean Air Act. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act> (Consultado el 10 de octubre de 2022).

Velasco, E., Lamb, B., Westberg, H., Allwine, E., Sosa, G., Arriaga-Colina, J. L., Jobson, B. T., Alexander, M. L., Prazeller, P., Knighton, W. B., Rogers, T. M., Grutter, M., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., Molina, L. T., and Molina, M. J. (2007) Distribution, magnitudes, reactivities, ratios and diurnal patterns of volatile organic compounds in the Valley of Mexico during the MCMA 2002 and 2003 field campaigns, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 329–353. <http://www.atmos-chem-phys.net/7/329/2007/>.

Velasco, E., Retama, A., Zavala, M., Guevara, M., Rappenglück, B., & Molina, L. T. (2021) Intensive field campaigns as a means for improving scientific knowledge to address urban air pollution. *Atmos. Environ.*, 246, 118094.

Velasco, E. and Retama, A. (2017) Ozone's threat hits back Mexico City. *Sustain. Cities Soc.*, 31, 260–263. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.015>.

Voorhees, S. S., Sakai, R., Araki, S., Sato, H., Otsu, A. (2001) Cost-benefit analysis methods for assessing air pollution control programs in urban environments—A review. *Environ. Health Prev. Med.* 6, 63-73.

Zavala, M., Herndon, S. C., Wood, E. C., Onasch, T. B., Knighton, W. B., Marr, L. C., Kolb, C. E., and Molina, L. T. (2009) Evaluation of mobile emissions contributions to Mexico City's emissions inventory using on-road and cross-road emission measurements and ambient data. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6305-6317. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6305-2009>, 2009.

Zavala, M., Molina, L. T., Yacovitch, T. I., Fortner, E. C., Roscioli, J. R., Floerchinger, C., Herndon, S. C., Kolb, C. E., Knighton, W. B., Paramo, V. H., Zirath, S., Mejía, J. A., and Jazcilevich, A. (2017a) Emission factors of black carbon and co-pollutants from diesel vehicles in Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 15293-15305, <https://doi.org/10.5194/acp-17-15293-2017>.

Zavala, M., Huertas, J. I., Prato, D., Jazcilevich, A., Aguilar, A., Balam, M., Misra, C., and Molina, L. T. (2017b) Real world emissions of in-use off-road vehicles in Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Sep; 67 (9): 958-972. doi: 10.1080/10962247.2017.1310677.

Zavala, M., Brune, W. H., Velasco, E., Retama, A., Cruz-Alavez, L. A., Molina, L. T. (2020). Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmospheric Environment*, 238, 117747. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117747>.

## **APÉNDICE**

### **AGENDA Y RESÚMENES DEL TALLER VIRTUAL**

#### **DIAGNÓSTICO SOBRE EL CONOCIMIENTO ACTUAL DE LAS BASES CIENTÍFICAS PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA REGIÓN DE LA MEGALÓPOLIS**

**Ciudad de México, 21 y 22 de abril de 2022**

## CONTENIDO

ANTECEDENTES	351
AGENDA DEL TALLER	352
RESUMEN DE LA SESIÓN 1 ESTADO ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE	361
RESUMEN DE LA SESIÓN 2 IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE	366
RESUMEN DE LA SESIÓN 3 FACTORES QUE PROPICIAN LAS EMISIONES CONTAMINANTES	381
RESUMEN DE LA SESIÓN 4 QUÍMICA ATMOSFÉRICA	400
RESUMEN DE LA SESIÓN 5 MEDICIONES	418
RESUMEN DE LA SESIÓN 6 POLÍTICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES Y MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE	441
RESUMEN DE LA SESIÓN 7 REVISIÓN DE LA PRIORIZACIÓN DE ACCIONES CON BASE EN INFORMACIÓN Y CONOCIMIENTO	445



## ANTECEDENTES

El objetivo del Taller virtual fue identificar los avances recientes y las brechas en el conocimiento científico y técnico sobre la calidad del aire, considerando los cambios en la química atmosférica resultantes de cambios en los perfiles de emisiones y la meteorología, las fuentes de emisiones emergentes, la expansión urbana, los impactos del confinamiento por el COVID-19, entre otros. Los hallazgos clave de la reunión se incluyeron en un documento de diagnóstico sobre el estado actual de la calidad del aire y su gestión en la Megalópolis.

El Taller virtual fue organizado conjuntamente por el Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment (MCE2) y la Coordinación Ejecutiva de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME), con la colaboración de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA), la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (SMAGEM), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC-UNAM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Dentro de los participantes del taller se incluyeron investigadores de la contaminación del aire de la academia, agencias gubernamentales y organizaciones no gubernamentales, que presentaron y discutieron los resultados de sus estudios científicos y técnicos, así como autoridades de las agencias federales y locales, que compartieron sus conocimientos y las barreras en la implementación de políticas de mejora de la calidad del aire.

Para facilitar las discusiones, los organizadores prepararon un conjunto de preguntas sobre ciencia/política para cada sesión y tema e invitaron a los panelistas a abordarlas. El formato de la reunión consistió en presentaciones breves (de unos 10 minutos cada una) de parte de los panelistas/presentadores, seguida de un breve debate. Se invitó a los panelistas a proporcionar un resumen de dos páginas de sus presentaciones y cualquier material adicional (publicaciones, informes técnicos) para contribuir al documento.

A partir de las presentaciones y discusiones del Taller virtual se compilaron los resúmenes y el material adicional proporcionado por algunos de los panelistas.

Al finalizar el Taller, todas las presentaciones se publicaron en el repositorio:

[https://drive.google.com/drive/folders/1J8KQcXjJBosYcEbKt04Y1JyLM8DIqYCc?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1J8KQcXjJBosYcEbKt04Y1JyLM8DIqYCc?usp=drive_link)

Los videos están disponibles en el canal de Youtube de la CAME:

### Sesión 1:

[https://www.youtube.com/watch?v=ZRjVsaEVw7I&list=PLLMvBSxuCUg9Jki\\_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=ZRjVsaEVw7I&list=PLLMvBSxuCUg9Jki_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=1)

### Sesiones 2 and 3:

[https://www.youtube.com/watch?v=TJ2hke-E6bw&list=PLLMvBSxuCUg9Jki\\_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=2](https://www.youtube.com/watch?v=TJ2hke-E6bw&list=PLLMvBSxuCUg9Jki_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=2)

Sesión 4:

[https://www.youtube.com/watch?v=0kukq6vlseE&list=PLLMvBSxuCUg9Jki\\_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=3](https://www.youtube.com/watch?v=0kukq6vlseE&list=PLLMvBSxuCUg9Jki_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=3)

Sesión 5:

[https://www.youtube.com/watch?v=5cVLRatcGA8&list=PLLMvBSxuCUg9Jki\\_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=4](https://www.youtube.com/watch?v=5cVLRatcGA8&list=PLLMvBSxuCUg9Jki_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=4)

Sesión 6:

[https://www.youtube.com/watch?v=LY26kqBJ51Q&list=PLLMvBSxuCUg9Jki\\_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=LY26kqBJ51Q&list=PLLMvBSxuCUg9Jki_4HWWA1eCrU-eQwf0D&index=5)

Sesión 7:

<https://www.youtube.com/watch?v=d8iidUjkr5U>

## **AGENDA DEL TALLER VIRTUAL**

A continuación se muestra la agenda del taller.

<b>Hora</b>	<b>Tema</b>	<b>Moderador/Panelista</b>	<b>Afiliación</b>	<b>Tema de la presentación</b>
<b>21 de abril 08:00-08:20</b>	<b>Bienvenida, Propósitos y dinámica de la reunión</b>	Mtra. Gloria Julissa Calva Cruz (Moderadora)	Directora, Prevención y Control de la Contaminación Urbana en Zonas Metropolitanas (CEVI-CAMe)	
		Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa	Coordinador Ejecutivo de la CAMe	Bienvenida
		Dr. Jorge Zavala Hidalgo	Director del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático-UNAM	Bienvenida
		Dr. Agustín Ávila Romero	Director General, Políticas para el Cambio Climático y Encargado de la Dirección General del INECC	Bienvenida
		Mtro. Daniel López Vicuña	Director, Calidad del Aire, DGGCARETC, SEMARNAT	Bienvenida
		Dra. Luisa Tan Molina	Directora, Molina Center for Energy and the Environment (MCE2)	Propósitos y dinámica de la reunión
<b>08:20-09:45</b>	<b>Sesión 1. Estado Actual de la Calidad del Aire</b>			
<b>08:20</b>	<b>1.1 Monitoreo ambiental</b>	Mtro. Ramiro Barrios Castrejón (Moderador)	Director de Gestión de Calidad del Aire en Zonas Metropolitanas (CEVI-CAMe)	
		Mtra. Olivia Rivera Hernández	Directora de Monitoreo de Calidad del Aire, SEDEMA, CDMX	Monitoreo de contaminantes con red regulada
		Dr. Rodolfo Sosa Echeverría	ICAYCC, UNAM	Depósito de contaminantes
		Dr. José Abraham Ortíz Álvarez	Director de Transporte e Impacto de Contaminantes Atmosféricos del INECC	Monitoreo de contaminantes con satélites
		Dr. Jorge Zavala Hidalgo	Director del ICAYCC, UNAM	Climatología urbana
<b>08:45</b>	<b>1.2 Emisiones</b>	Mtro. Daniel López Vicuña	Director, Calidad del Aire, DGGCARETC , SEMARNAT	Últimos inventarios de emisiones
		Ing. Hugo Landa Fonseca	Subdirector de Gestión y Regulación, SEMARNAT	
		Mtra. Patricia Camacho Rodríguez	Directora de Proyectos de Calidad del Aire, SEDEMA CDMX	
<b>09:00</b>	<b>1.3 Modelación y pronóstico de la calidad del aire</b>	Dra. Mónica del Carmen Jaimes Palomera	Subdirectora de Análisis y Modelación, SEDEMA, CDMX	Modelación y pronóstico de la calidad del aire
		Dr. José Agustín García Reynoso	ICAYCC, UNAM	
		Mtro. Francisco Hernandez Ortega	Subdirector de Modelación y Salud del INECC	
<b>09:15</b>	<b>1.4. Políticas de calidad del aire</b>	Mtro. Daniel López Vicuña (Moderador)	Director, Calidad del Aire, DGGCARETC, SEMARNAT	
		Ing Sergio Zirath Hernández Villaseñor	Director General de Gestión de la Calidad del Aire, SEDEMA, CDMX	Políticas de calidad del aire
		Mtro. Sergio Israel Mendoza	Director General de Fomento Ambiental Urbano y Turístico, SEMARNAT	
		Lic. Stephan Brodziak de los Reyes	El Poder del Consumidor (EPC) - OCCA	
		Mtra. Kate Bloomberg	Consultora Independiente	

<b>Hora</b>	<b>Tema</b>	<b>Moderador/Panelista</b>	<b>Afiliación</b>	<b>Tema de la presentación</b>
<b>09:55-10:20</b>	<b>Sesión 2. Impactos de la contaminación del aire</b>			
<b>09:55</b>	<b>2.1 Salud pública</b>	Dr. Horacio Riojas Rodríguez (Moderador)	Director de Salud Ambiental Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) Morelos	<b>Introducción</b>
		Dra. Magali Hurtado Díaz	Instituto Nacional de Salud Pública (INSP)	Información reciente sobre efectos neurológicos
		Dra. Karla Cervantes Martínez	Instituto Nacional de Salud Pública (INSP)	Exposición a la contaminación del aire e incidencia de la diabetes
		Dra. Leticia Hernandez Cadena	Instituto Nacional de Salud Pública (INSP)	Estudios recientes sobre la contaminación del aire y las enfermedades metabólicas en los niños.
		Dra. Andrea de Vizcaya Ruíz	CINVESTAV, Instituto Politécnico Nacional; University of California at Irvine	Partículas respirables Estudios toxicológicos actuales
		Dra. Karen Elizabeth Nava Castro	ICAyCC, UNAM	Exposición crónica a contaminantes no regulados
		Dr. Alejandro Déciga Alcaráz	FES-I-ICAyCC, UNAM	Alteraciones de la materia orgánica extraída de las PM2.5 en biomoléculas y producción de surfactante pulmonar
		Dr. Erik Velasco	Investigador Independiente	Exposición personal a la contaminación por partículas en el transporte público
		Dr. Iván Yasmani Hernández Paniagua	ICAyCC, UNAM	Comentarios
<b>10:50</b>	<b>2.2 Costo-beneficio</b>	Dra. María Eugenia Ibararán Viniegra	Universidad Iberoamericana (UIA), Puebla	Costo-beneficio de programas de contingencias ambientales atmosféricas
		Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez	Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC	Impacto en la vegetación
<b>11:05</b>	<b>2.3 Gestión de la calidad del aire y salud: normas y programas</b>	Dr. Horacio Riojas Rodríguez (Moderador)	Director de Salud Ambiental Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) Morelos	
		M.C. Stephanie Montero Bending	Líder Coordinador de Proyectos de Calidad del Aire y Salud, SEDEMA, CDMX	Comentarios
		Dr. Victor Torres Meza	Director General del Centro Estatal de Vigilancia Epidemiológica en la Secretaría de Salud, Estado de México	Comentarios

Hora	Tema	Moderador/Panelista	Afiliación	Tema de la presentación
<b>11:30-12:50</b>	<b>Sesión 3. Factores que propician las emisiones contaminantes</b>			
<b>11:30</b>	<b>3.1 Emisiones</b>	Ing. Hugo Landa Fonseca	SEMARNAT	<b>Introducción</b>
		Ing. Alejandro Villegas López	CEVI-CAMe	
		Dra. Dzoara Damaris Tejeda Honstein	LT Consulting - Ingeniería ambiental	Inventario de fuentes móviles, emisiones del Sector Transporte
		Dr. Mauro Alvarado Castillo	LT Consulting - Ingeniería ambiental	
		Mtra. Angélica Guadarrama Chávez	Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)	Emisiones de COV de fuentes de área
		Mtra. Olivia Rivera Hernández	SEDEMA, CDMX	Impacto del bloqueo de COVID-19 en las concentraciones de contaminantes criterio en CDMX
		Dra. Zuhelen Verónica Padilla Barrera	INECC	Impacto del bloqueo de COVID-19 en las concentraciones de contaminantes criterio en Hidalgo y Toluca
		Dr. Omar Amador Muñoz	ICAYCC, UNAM	Efecto de la pandemia por COVID-19 en la concentración de Compuestos Orgánicos Tóxicos no Regulados
		Dra. Graciela Velasco Herrera	ICAT, UNAM	Emisiones e Incendios forestales en México
		Mtra. Patricia Camacho Rodríguez	SEDEMA, CDMX	Comentarios
<b>12:05</b>	<b>3.2 Expansión urbana y transportación</b>	Mtro. Alvaro Lomelí Covarrubias	SEDATU	Expansión urbana y transportación
		Dr. Manuel Suárez Lastra	Instituto de Geografía, UNAM	Comentarios
		Dra. Erika Danaé López Espinoza	ICAYCC, UNAM	Comentarios
<b>12:20</b>	<b>3.3 Transporte regional de contaminantes</b>	Dr. Miguel Zavala	MCE2	Comentarios
		Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez	INECC	Comentarios
		Quím. Armando Retama	Investigador Independiente	Comentarios
<b>12:30</b>	<b>3.4 Climatología urbana, meteorología de la capa límite, transferencia radiativa</b>	Dr. Jorge Zavala Hidalgo (Moderador)	ICAYCC, UNAM	<b>Introducción</b>
		Jorge Luis Garcia Franco	University of Oxford, UK	Climatología de la capa de mezcla sobre la Ciudad de México y su papel en la calidad del aire
		Dra. Andrea Burgos - Cuevas	Institute for Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Germany	La complejidad de la capa límite atmosférica sobre la Ciudad de México: un estudio mediante percepción remota
		Dra. Adriana Ipiña	CONICET, Argentina	Impacto de la contaminación del aire en la transferencia radiativa
		Dr. Benjamin de Foy	Saint Louis University, USA	Comentarios
		Dr. Erik Velasco	Investigador Independiente	Comentarios

<b>Hora</b>	<b>Tema</b>	<b>Moderador/Panelista</b>	<b>Afiliación</b>	<b>Tema de la presentación</b>
<b>13:00-14:30</b>	<b>Sesión 4. Química Atmosférica</b>			
<b>13:00</b>	<b>4.1 Fotoquímica urbana y regional</b>	Dr. Erik Velasco (Moderador)	Investigador Independiente	Introducción
		Dr. Miguel Zavala (Moderador)	Molina Center for Energy and the Environment	
		Dr. Bernhard Rappenglück	University of Houston, USA	Procesos fotoquímicos y sus variaciones en la Ciudad de Mexico
		Quím. Armando Retama	Consultor Independiente	Aerosoles atmosféricos en la Ciudad de México, una actualización sobre su formación y propiedades
		Dr. Ricardo Torres Jardón	ICAyCC, UNAM	Comentarios
<b>13:40</b>	<b>4.2 Modelos de calidad del aire (modelos meteorológicos, fotoquímicos, pronóstico)</b>	Dr. José Agustín García Reynoso (Moderador)	ICAyCC, UNAM	Introducción
		Dr. Alberto Mendoza Domínguez	Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey	Comentarios
		Dr. Jorge Zavala Hidalgo	ICAyCC, UNAM	Comentarios
		Dr. Marco Mora	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	Comentarios
		Dr. Víctor Almanza Veloz	ICAyCC, UNAM	Comentarios
		Mtra. Alejandra Méndez Girón	Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA	Comentarios
<b>14:00</b>	<b>4.3 Impacto de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica</b>	Dr. Víctor Almanza Veloz	ICAyCC, UNAM	Impacto de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica
		Dr. Oscar Peralta Gutiérrez	ICAyCC, UNAM	Impacto de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica
		Dr. Iván Yasmani Hernández Paniagua	ICAyCC, UNAM	Impacto de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica
		Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez	INECC	

Hora	Tema	Moderador/Panelista	Afiliación	Tema de la presentación
22 de abril 08:00-10:20	<b>Sesión 5. Mediciones</b>			
08:00	<b>Introducción</b>	Dr. Omar Amador (Moderador)	ICAYCC, UNAM	<b>Introducción a las secciones 5.1 a 5.4 por los moderadores</b>
		Quím. Armando Retama (Moderador)	Consultor Independiente	
	<b>5.1 Mediciones de factores de emisiones y actividades</b>	Biól. Rodolfo Iniestra Gómez	INECC	Mediciones remotas de emisiones de vehículos diésel
		Mtra. Patricia Camacho Rodríguez	SEDEMA, CDMX	Panelista
08:25	<b>5.2 Mediciones de COVs</b>	Mtro. Salvador Blanco Jiménez	INECC	Comparación de mediciones de COV de diferentes partes de ZMVM
		Dra. Violeta Mugica Álvarez	UAM-Azcapotzalco	Especiación de COV a partir de las mediciones en túneles
08:45	<b>5.3 Mediciones de material particulado</b>	Dr. Marco Mora	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	Investigación de contaminantes atmosféricos en Puebla
		Dra. María del Carmen Calderón Ezquerro	ICAYCC, UNAM	Bioaerosoles en el aire ambiente.
		Dra. Dara Salcedo González	UNAM, Campus Juriquilla	Investigación de contaminantes atmosféricos en Querétaro
09:10	<b>5.4 Mediciones de otros contaminantes</b>	Dr. Adalberto Noyola Robles	Instituto de Ingeniería, UNAM	Evaluación de las emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales y estrategias de mitigación
		Dr. Octavio A. Castelán-Ortega	Universidad Autónoma del Estado de México	Emisiones de metano por fermentación entérica: elaboración de inventarios y estrategias de mitigación
		Dr. Ricardo Torres Jardón	ICAYCC, UNAM	Mediciones de NO <sub>y</sub> , HNO <sub>3</sub> , PAN
		Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas	ICAYCC, UNAM	Emisiones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre a la atmósfera por parte de la Refinería y Central Térmica localizadas en Tula, Hidalgo.
		Dr. José Abraham Ortíz	INECC	Mediciones de amoníaco
		Mtra. Beatriz Herrera Gutierrez	University of Toronto, Canada	Mediciones de amoníaco
09:50	<b>5.5 Mediciones satelitales</b>	Dr. Michel Grutter de la Mora	ICAYCC, UNAM	Introducción
		Dr. José Agustín García Reynoso	ICAYCC, UNAM	Asimilación (datos meteorológicos y concentraciones medidas en superficie y por el satélite)
		Dr. José Luis Texcalac Sangrador	INSP - CISP	Uso de datos satelitales para estudios de salud
		Dr. Benjamin de Foy	Saint Louis University, USA	Aplicación de observaciones satelitales; análisis de grandes bases de datos
		Dr. José Abraham Ortíz	INECC	Uso de información satelital para delimitar cuencas atmosféricas

<b>Hora</b>	<b>Tema</b>	<b>Moderador/Panelista</b>	<b>Afiliación</b>	<b>Tema de la presentación</b>
<b>10:30-12:00</b>	<b>Sesión 6. Políticas para reducir emisiones y mejorar la calidad del aire</b>			
<b>10:30-11:15</b>	<b>6.1 Barreras para aumentar la ambición en fuentes y sectores</b>	Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa (Moderador)	Coordinador Ejecutivo de la Comisión Ambiental de la Megalópolis	Introducción a la Sección 6.1 por el moderador
		Mtra. Beatriz Manrique Guevara	Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno de Puebla	Participación de los panelistas en las respuestas a las preguntas del panel
		Ing. José Luis Galindo Cortez	Secretario de Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Morelos	
		Ing. Sergio Zirath Hernández	Director General de Gestión de la Calidad del Aire de la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México	
<b>11:15-12:00</b>	<b>6.2 Movilidad y transporte sustentables</b>	Ing. Alejandro Villegas López (Moderador)	Director de Planeación, Sostenibilidad Metropolitana y Vinculación Institucional (CEVI-CAMe)	Introducción a la Sección 6.2 por el moderador
		Ing. Marco Antonio del Prete Tercero	Secretario de Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Querétaro	Participación de los panelistas en las respuestas a las preguntas del panel
		Mtro. José Luis Guevara Muñoz	Secretario de Movilidad y Transporte del Estado de Hidalgo	
		Lic. Laura Noemí Muñoz Benitez	DG Autotransporte Federal, Secretaría de Comunicaciones y Transporte México	
		Dr. Salvador Medina Ramírez	Director General de Planeación y Políticas de la SEMOVI de CDMX	



<b>Hora</b>	<b>Tema</b>	<b>Moderador/Panelista</b>	<b>Afiliación</b>	<b>Tema de la presentación*</b>
<b>12:15-14:30</b>	<b>7. Pasos a Seguir</b>			
<b>12:15-13:35</b>	<b>7.1 Resumen de hallazgos de las diferentes sesiones</b>	Dra. Luisa Tan Molina (Moderadora)	Molina Center for Energy and the Environment	
		Mtro. Ramiro Barrios Castrejón	Director de Gestión de Calidad del Aire en Zonas Metropolitanas (CEVI-CAMe)	1.1-1.3
		Mtro. Daniel López Vicuña	Director de Calidad del Aire de la DGGCARETC de la SEMARNAT	1.4
		Dr. Horacio Riojas Rodríguez	Director de Salud Ambiental Instituto Nacional de Salud Pública	2.1-2.3
		Ing. Hugo Landa Fonseca	Subdirector de Gestión y Regulación (SEMARNAT)	3.1-3.3
		Ing. Alejandro Villegas López	Director de Planeación, Sostenibilidad Metropolitana y Vinculación Institucional (CEVI-CAMe)	3.1-3.3
		Dr. Jorge Zavala Hidalgo	ICAyCC, UNAM	3.4
		Dr. Erik Velasco	Investigador Independiente	4.1
		Dr. Miguel Zavala	Molina Center for Energy and the Environment	4.1
		Dr. José Agustín García Reynoso	ICAyCC, UNAM	4.2-4.3
		Dr. Omar Amador Muñoz	ICAyCC, UNAM	5.1-5.4
		Quím. Armando Retama	Consultor Independiente	5.1-5.4
		Dr. Michel Grutter de la Mora	ICAyCC, UNAM	5.5
		Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa	Coordinador Ejecutivo de la CAMe	6.1
Ing. Alejandro Villegas López	Director de Planeación, Sostenibilidad Metropolitana y Vinculación Institucional (CEVI-CAMe)	6.2		
<b>13:35-14:20</b>	<b>7.2 Revisión de la priorización de acciones con base en información y conocimiento</b>	Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa (Moderador)	Coordinador Ejecutivo de la CAMe	
		Mtro. Ramiro Barrios Castrejón	Director de Gestión de Calidad del Aire en Zonas Metropolitanas CAMe	
		Dr. Gustavo Enrique Sosa Iglesias	Investigador Instituto Mexicano del Petróleo	
		Dra. Leonora Rojas Bracho	Investigadora y Consultora Internacional	
		Mtra. Verónica Garibay	Consultora	
		Ing Sergio Zirath Hernández Villaseñor	Director General de Gestión de la Calidad del Aire de la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México	
		Mtro. Daniel López Vicuña	Director de Calidad del Aire de la DGGCARETC de la SEMARNAT	
<b>14:20-14:30</b>	<b>7.3 Conclusiones finales y cierre de la reunión</b>	Dra. Luisa Tan Molina	Molina Center for Energy and the Environment	
		Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa	Coordinador Ejecutivo de la CAMe	



## RESUMEN DE LA SESIÓN 1

### ESTADO ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE

El propósito de esta sesión fue establecer un marco de referencia sobre la situación actual de las herramientas de la gestión ambiental, ofreciendo un panorama de la situación en la que se encuentra el estado actual del monitoreo, los inventarios de emisiones, la modelación y la política pública.

**Tabla S1.1.** Temas y preguntas clave discutidas en la Sesión 1: “Estado actual de la calidad del aire”

Subtema	Preguntas clave
Monitoreo ambiental	<p>¿Qué podemos aprender de las tendencias de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> y CO de mediano y largo plazo para la CAME?</p> <p>¿Cuáles han sido los avances principales de los sistemas de monitoreo en los últimos años?</p> <p>¿Cuáles son los retos principales actuales del SIMAT y los otros sistemas de monitoreo para coadyuvar en el diseño de políticas de control?</p>
Emisiones	<p>¿Qué podemos aprender de las tendencias de las emisiones de fuentes clave en la CAME?</p> <p>¿Qué información (datos de actividad, factores de emisión, modelos) se ha mejorado recientemente para actualizar los inventarios en la CAME?</p> <p>¿Qué retos principales existen para reducir la incertidumbre en las estimaciones de emisión de fuentes clave?</p> <p>¿Qué incertidumbres deben resolverse de las fuentes clave para que los inventarios puedan ser herramientas de diseño de políticas de control?</p> <p>¿Cuáles han sido los avances recientes para mejorar la estimación de las emisiones biogénicas?</p> <p>¿Cuáles son los retos para mejorar un inventario integral de emisiones regional?</p> <p>¿Cuáles han sido los avances para aumentar la capacidad técnica para generar un inventario de emisiones para modelación actualizado?</p>
Modelación	<p>Los modelos numéricos que actualmente se emplean en la Megalópolis ¿reproducen correctamente los niveles de ozono,</p>

Subtema	Preguntas clave
	<p>PM<sub>2.5</sub> y de otros contaminantes secundarios, temporal y espacialmente?</p> <p>¿Qué nuevos resultados se han obtenido de las actividades de modelación de la calidad del aire que coadyuven al desarrollo de estrategias de control en la ZMVM y la CAME?</p> <p>¿Cuáles son los retos principales para reducir las incertidumbres en la modelación y pronóstico de la calidad del aire en la ZMVM y la CAME? ¿Cómo se pueden resolver?</p> <p>¿Cuáles han sido los avances para mejorar las capacidades técnicas de las agencias gubernamentales para modelar la calidad del aire en la ZMVM y la CAME?</p>
Políticas de calidad del aire	<p>¿Cuáles son las novedades del nuevo ProAire de la ZMVM 2021-2030?</p> <p>¿Qué tan actualizada está la normatividad mexicana en control de emisiones? ¿Qué políticas y medidas han funcionado y cuáles no han funcionado?</p> <p>¿Qué factores sociales, políticos y económicos han afectado la implementación de las medidas de control ya recomendadas?</p> <p>¿Qué importancia tiene la calidad del aire para las partes interesadas y la sociedad en general?</p>

A continuación se muestran los resúmenes de las presentaciones y discusiones durante la Sesión 1 del taller.

## 1.1. Monitoreo ambiental

### **Introducción** (Mtro. Ramiro Barrios Castrejón)

La colaboración entre gobierno e investigadores, las organizaciones de la sociedad civil y la iniciativa privada, es fundamental para avanzar en el conocimiento y la mejora de la gestión de la calidad del aire. El monitoreo y la medición son caros, pero resultan más caras las consecuencias de no hacerlos bien.

#### *Resumen de la presentación de la Mtra. Olivia Rivera*

- a) En la última década, en la ZMVM ha habido reducciones significativas de CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e incluso PM<sub>10</sub>. No así de ozono y PM<sub>2.5</sub>.
- b) Al mismo tiempo, se observa un incremento de la temperatura y la radiación UV.

- c) El monitoreo hiper local es al mismo tiempo una oportunidad y un reto: permitirá la caracterización detallada de micro-ambientes y las variaciones temporales y micro-geográficas de contaminantes. Generarán múltiples cuestionamientos sobre la operación, interpretación y validez de los datos.

*Resumen de la presentación del Dr. Rodolfo Sosa*

- a) Respecto del depósito atmosférico, se ha encontrado la presencia del fenómeno de lluvia ácida en diferentes sitios estudiados en México con el potencial deterioro asociado del suelo, los recursos naturales, los sitios de valor cultural, materiales, etc.
- b) Es necesario mantener la evaluación de indicadores críticos, como nitrógeno, amoníaco, cargas críticas de azufre y nitrógeno, entre otros.
- c) Es necesario reducir emisiones de precursores de lluvia ácida, como SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>.
- d) La afectación del ciclo del N también genera el problema de eutrofización de cuerpos de agua, que finaliza con la desaparición del embalse.

*Resumen de la presentación del Dr. Abraham Ortinez*

- a) El uso de información satelital es al mismo tiempo una oportunidad y un reto: permitirá acceso información y generará cuestionamientos sobre interpretación y validez de los datos.

*Resumen de la presentación del Dr. Jorge Zavala*

- a) Mostró ejemplos de la investigación relevante que desarrolla el ICAyCC-UNAM.
- b) A partir de observaciones de precipitación horaria de 1993 a 2007 sobre la CDMX, Ochoa et al. (2015), determinaron cambios significativos en los eventos de precipitación intensa (>20 mm/h) como una consecuencia de las emisiones de aerosoles contaminantes y el cambio en el uso y cubierta del suelo.
- c) El patrón principal de sequía de medio verano (MSD) a finales de julio y principios de agosto, es más frecuente durante los años secos y tiene una correlación significativa con el Índice ENOS (El Niño Oscilación del Sur) Multivariado (MEI), indicando que la MSD es más fuerte durante años El Niño.

## **1.2. Emisiones a la atmósfera**

*Resumen de las presentaciones del Mtro. Daniel López, Ing. Hugo Landa y Mtra. Patricia Camacho*

- a) Mostró una vista rápida del proceso de desarrollo del INEM y del inventario de la ZMVM desde los años 1990. Hay importantes esfuerzos de mejora, como las evaluaciones y recomendaciones de mejora de NARSTO y la CCA, la inclusión de emisiones de CCVC y la estimación de tendencias.
- b) Los inventarios de fuentes fijas contienen información de utilidad para la generación de políticas públicas.

- c) Las fuentes de áreas son un reto para los inventarios y para la reducción de emisiones. Son necesarios factores de emisión y datos de actividad mejores y actualizados.
- d) Las fuentes móviles continúan como contribuciones prioritarias y existe gran incertidumbre en los datos de actividad, pese a las mejoras en la adaptación del modelo MOVES México.
- e) Alrededor del 30% de los COV emitidos son tóxicos. Es necesario desarrollar perfiles de especiación locales y una mejor descripción de las actividades.
- f) La preparación de comida y el uso de carbón parecen tener un rol significativo en las emisiones.
- g) Las emisiones de corto plazo generan eventos críticos, pero no son significativos en el inventario.
- h) Es necesario mejorar la distribución espacial, temporal y especiación química.

### **1.3. Modelación y pronóstico de la calidad del aire**

#### *Resumen de la presentación de la Dra. Mónica Jaimes*

- a) En la elaboración del ProAire de la ZMVM 2021-2030 se estimaron las reducciones de emisiones de precursores de ozono y se usó modelación para estimar el cambio en la calidad del aire.
- b) Se han obtenido resultados favorables con el uso del modelo HYSPLIT para la modelación de trayectorias y retro trayectorias de emisiones del volcán Popocatepetl y de incendios forestales fuera de la ZMVM.
- c) Para reducir la incertidumbre de los modelos es necesario mejorar la compleción de las emisiones y la distribución temporal y geográfica del inventario, así como mejorar el conocimiento de la química atmosférica.
- d) Retos: mejorar los inventarios regionales y la modelación en otras regiones de la CAME.

#### *Resumen de la presentación del Dr. Javier Zavala*

- a) Presentó muestras del pronóstico de calidad del aire desde 2006, meteorológico desde 2007, ceniza volcánica desde 2015, circulación oceánica desde 2013, calidad del aire con aprendizaje automático desde 2018.
- b) Indicó que el ICAYCC-UNAM posee la capacidad de desarrollo de estos sistemas, así como la capacitación de personal en el área.

### **1.4. Políticas de calidad del aire**

#### *Resumen de la presentación del Ing. Sergio Z. Hernández*

- a) Los estudios muestran un mayor número de muertes asociadas a las PM<sub>2.5</sub> que al ozono (INSP & SEDEMA, 2020, Trejo-González et al., 2019).

- b) Penalización climática en la ZMVM: de 2 a 12 ppb de ozono atribuibles al cambio climático.
- c) El ProAire tiene una propuesta de actualización normativa prioritaria. Es necesaria una revisión y actualización de la normatividad en diversos sectores, en especial de vehículos.
- d) En el ProAire, las acciones con la mejor relación de costo-efectividad para reducir emisiones de partículas y de precursores de ozono y PM secundarias, son la reducción de viajes y la mejora regulatoria.

*(Es necesaria la actualización del marco jurídico completo. La ley actual y su reglamento, que definen atribuciones y obligaciones, fueron escritos sobre estencil y reproducidos con un mimeógrafo en diciembre de 1987).*

*Comentarios de la Mtra. Kate Blomberg y el Lic. Stephan Brodziak*

- a) Nos recordaron la importancia de reducir el contenido de azufre en combustibles y de actualizar las NOM de emisiones de vehículos nuevos (contaminantes locales y CO<sub>2</sub>).
- b) Enfatizaron la necesidad de no centrar la movilidad en el uso del auto particular, sino mover hacia otros modos de transporte, especialmente el transporte activo.

## **Referencias**

Ochoa, C. A., Quintanar, A. I., Raga, G. B., & Baumgardner, D. (2015). Changes in intense precipitation events in Mexico City. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1804-1820. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0081.1>

INSP & SEDEMA. (2020) Estimación de impactos en salud y económicos por contaminación atmosférica y estimación de beneficios por mejoras en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Trejo-González, A.G., Riojas-Rodríguez, H., Texcalac-Sangrador, J.L. et al. (2019) Quantifying health impacts and economic costs of PM<sub>2.5</sub> exposure in Mexican cities of the National Urban System. *Int J Public Health* 64, 561–572. <https://doi.org/10.1007/s00038-019-01216-1>

## RESUMEN DE LA SESIÓN 2

### IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El propósito de esta sesión fue presentar una actualización de lo que conocemos sobre los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud a través de estudios en la Ciudad de México y la Megalópolis. También se buscó discutir cómo se han incorporado los resultados de estos estudios en las políticas y programas en la Megalópolis. Para ello, se presentaron ejemplos de estudios recientes sobresalientes en la investigación epidemiológica y toxicológica. Se identificaron preguntas clave para esta sesión que se muestran en la Tabla S2.1.

**Tabla S2.1.** Temas y preguntas clave discutidas en la Sesión 2: “Impactos de la contaminación del aire en la salud pública”

Subtema	Preguntas clave
Información reciente sobre efectos en salud	<p>En el contexto mexicano, ¿existe nueva información científica sobre los efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire?</p> <p>¿Cuál ha sido la información reciente sobre contaminación del aire y salud?</p> <p>¿Existe evidencia de efectos crónicos y agudos agravados por la exposición a la mala calidad del aire?</p>
Costos y beneficios	<p>¿Cuáles son los costos sociales y económicos asociados con la contaminación del aire?</p> <p>¿Cuáles han sido los avances para estimar mejor cuantitativamente los efectos salud de la calidad del aire?</p>

A continuación se muestran los resúmenes de las presentaciones y discusiones durante la Sesión 2 del taller.

#### 2.1. Salud pública

##### **Introducción** (Dr. Horacio Riojas Rodríguez)

A manera de introducción, se describió cómo desde la década de 1980s México ha avanzado en el conocimiento sobre los impactos de los contaminantes atmosféricos en la salud. En una primera instancia, los estudios sobre los efectos del contenido de plomo en las gasolinas sirvieron para su retiro de los combustibles. A partir de entonces, se comenzaron a realizar estudios sobre los efectos de la calidad del aire y:

- asma,
- mortalidad general y sus causas,



- efectos cardiovasculares,
- desarrollo pulmonar en los niños,
- ausentismo escolar,
- COVID-19

En la base de datos PUB MED se pueden encontrar alrededor de 1195 resultados en estos temas para México y, entre ellos, 585 para la Ciudad de México. Las líneas actuales de investigación incluyen:

- enfermedad pulmonar crónica,
- diferentes tipos de cáncer,
- enfermedades metabólicas,
- efectos neurológicos,
- funciones de concentración-respuesta,
- valor de vida estadística.

A continuación se muestran los resúmenes de las presentaciones y discusiones durante la sesión 2 del taller.

### **Exposición prenatal a PM<sub>2.5</sub> y neuro-desarrollo a los 2 años en niños de la Ciudad de México**

*Resumen de la presentación de la Dra. Magali Hurtado Díaz*

El objetivo de este estudio fue evaluar de forma longitudinal la asociación entre la exposición prenatal a PM<sub>2.5</sub> y el neurodesarrollo infantil hasta los 2 años de edad en niños en la Ciudad de México (Hurtado-Díaz et al., 2021). Se desarrolló dentro de un estudio epidemiológico llamado PROGRESS (*Programming Research in Obesity, Growth, Environment and Social Stressors*) reclutando 1,054 mujeres embarazadas y siguiendo su evolución (de niños y madres) por 2 años. Las pruebas neuronales se enfocaron en tres componentes: el cognitivo, el lenguaje, y el motor al mismo tiempo que se evaluó la exposición a PM<sub>2.5</sub>. Los resultados indicaron que a los 6 meses el incremento de 1 µg/m<sup>3</sup> en la exposición se asoció con una reducción del componente cognitivo, así como en el de lenguaje. La magnitud de la asociación se mantuvo aun después de controlar por la estimulación en el hogar como variable de ajuste. Estos resultados son consistentes con otras poblaciones y grupos de edad.

### **Estimación del riesgo de consultas a urgencias médicas asociado a la exposición a contaminantes criterio en la Ciudad de México**

*Resumen de la presentación de la Dra. Magali Hurtado Díaz*

El objetivo de esta investigación fue estimar la asociación de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, y CO con el número de consultas por urgencia cardiovascular en la Ciudad de México (Ugalde-Resano et al., 2022). Este fue un estudio ecológico, es decir la unidad de análisis fueron los municipios y no los individuos, con análisis retrospectivo de series de tiempo de consultas diarias por urgencia cardiovascular: hipertensión arterial sistémica, cardiopatía isquémica, y enfermedad cerebrovascular de mayo del 2016 a febrero del 2019 en la Ciudad de México.

Los resultados indicaron un incremento porcentual en el número de consultas por urgencia cardiovascular asociado a la exposición en el mismo día a PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y CO, incluso a niveles por debajo de la normatividad nacional o guías de la OMS. Se estimó que alrededor del 10% de las consultas por urgencia cardiovascular son atribuibles a la contaminación del aire ambiente.

## **Exposición a la contaminación del aire e incidencia en diabetes**

*Resumen de la presentación de la Dra. Karla Cervantes-Martínez*

Hasta el 80% de los casos incidentes de diabetes ocurren en países de bajos y medianos ingresos (PBMI). En México en 2020, ocurrieron 151,019 muertes debido a diabetes, lo que representa el 14% del total de muertes y una tasa de 12 muertes por cada 10,000 habitantes. Respecto a la carga de mortalidad, con base en datos de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) de 2018, se sabe que 8.5 millones de personas mayores de 20 años viven con diabetes en México, lo que representa una prevalencia del 10%.

Evidencia científica internacional ha planteado que la contaminación del aire es un factor de riesgo para la diabetes (tipo 1, 2 y gestacional). Estudios epidemiológicos transversales, pero también longitudinales, desarrollados principalmente en poblaciones de países en desarrollo, han confirmado esta asociación. Poco se sabe de lo que ocurre en poblaciones de PBMI, los cuales están históricamente sub-representados en la epidemiología de la contaminación del aire. Tal es el peso de la evidencia respecto a esta asociación, que el Instituto para la Evaluación y Métricas de la Salud (IHME, por sus siglas en inglés) ha incluido a la diabetes en las estimaciones de carga de enfermedad desde el año 2019. La Organización Mundial de la Salud (OMS) se encuentra en discusiones con grupos de trabajo de expertos a nivel internacional para, posiblemente, incluirla en las próximas estimaciones de carga de enfermedad.

Desde el Instituto Nacional de Salud Pública de México (INSP) se desarrolló un estudio epidemiológico que evaluó la asociación entre la exposición a PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>2</sub> en el aire y la diabetes tipo 2 incidente en la cohorte de maestra mexicanas ‘ESMaestras’ (Cervantes-Martínez, et al., 2022). El estudio estuvo conformado por una submuestra de 13,669 participantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), reclutadas en 2008 y con seguimiento activo hasta el año 2020. La edad media de estas mujeres fue de 43 años. Se evaluó la exposición de mediano y largo plazo a contaminantes del aire en casas y trabajos de cada participante, a través de modelos predictivos de alta resolución espacio-temporal que utilizaron datos de monitoreo de contaminantes y meteorológicos a nivel del suelo, así como otras variables geográficas como predictores. La diabetes incidente fue identificada por auto-reporte y en bases administrativas del ISSSTE. Se utilizaron modelos de supervivencia tipo Cox dependientes del tiempo para evaluar la asociación. Cabe resaltar que este es el primer estudio prospectivo que ha evaluado ambos contaminantes PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>2</sub> y el riesgo de diabetes en un PBMI.

Entre los principales resultados se observó que, en una muestra de mujeres mexicanas del Valle de México existe un incremento del riesgo de desarrollo de diabetes tipo 2 debido a la exposición de mediano y de largo plazo a las PM<sub>2.5</sub> y NO<sub>2</sub>, tomando en consideración las fuentes de contaminación intramuros, estatus socioeconómico y actividad física de las participantes. Para el mediano plazo se observó que, por cada incremento de 10 unidades de PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) y NO<sub>2</sub> (ppb), el riesgo de diabetes aumentó en 72% y 52% respectivamente. Mientras que para las exposiciones

anuales y bianuales los incrementos del riesgo fueron del 88% y 70% para PM<sub>2.5</sub> y del 44% y 39% para NO<sub>2</sub>, respectivamente. Cabe resaltar que, estos resultados son consistentes con otros estudios epidemiológicos de cohorte realizados en poblaciones de países desarrollados. Por otro lado, los resultados persistieron en diferentes análisis de sensibilidad, incluyendo la evaluación de la exposición únicamente en el domicilio de las participantes y la evaluación de una definición más estricta del caso incidente de diabetes, entre otros.

## **Estudios recientes sobre la contaminación del aire y las enfermedades metabólicas en los niños**

### *Resumen de la presentación de la Dra. Leticia Hernández Cadena*

Se presentaron los resultados de dos estudios de cohorte para evaluar los efectos de la contaminación del aire sobre las enfermedades metabólicas en niños: (1) la cohorte al nacimiento POSGRAD, Morelos y (2) la cohorte de adolescentes con obesidad y sobrepeso en la CDMX. A partir de la cohorte al nacimiento POSGRAD, en la cual se reclutaron mujeres desde el embarazo y fueron aleatorizadas a recibir DHA o placebo durante el embarazo, fue posible evaluar el efecto de la exposición prenatal a NO<sub>x</sub> y su efecto sobre el peso al nacer en 745 binomios madre-hijo. La exposición se estimó a partir de la generación de un modelo de regresión de uso de suelo (*Land Use Regression* o LUR por sus siglas en inglés) a partir un monitoreo pasivo realizado en 60 sitios estratégicos de acuerdo con el domicilio de los niños en el Estado de Morelos, México, representando la exposición durante la gestación. Los resultados mostraron que el 50% ( $\pm$  diferencia intercuartílica, DI) de los niños estuvieron expuestos de manera pre-gestacional a concentraciones ambientales de 2.01 (DI=3.29), 16.5 (DI=10.16) y 21.04 (DI=6.95) ppb de NO, NO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub> respectivamente. En este estudio se observó una disminución significativa de 39.6 g en promedio (IC del 95% -77.0; -2.21 g;  $p=0.04$ ) en el peso al nacer por exposición a cada incremento DI de NO<sub>x</sub>, y de 42.5 g (IC 95% IC -82,73; -2,18 g;  $p=0.04$ ) por incrementos en la DI de exposición a NO, ambos después de ajustar por la edad de la madre, la altura y tabaquismo pasivo, edad gestacional y género del niño (Mendoza Ramirez et al., 2018).

Considerando el interés de la comunidad científica de conocer cómo la exposición a los contaminantes del aire desde la etapa prenatal afecta el desarrollo del infante, se evaluó el efecto a largo plazo de la exposición a los NO<sub>x</sub> sobre el riesgo cardiovascular a través del índice cintura-altura (el cual se ha evaluado recientemente como un biomarcador de riesgo cardiovascular temprano, no influenciado por la edad), en los niños en desarrollo desde la edad de 7 hasta los 12 años, encontrando que los niños en el segundo y tercer tercil de exposición a NO<sub>x</sub> tuvieron mayor posibilidad de tener un índice cintura-altura por arriba del valor límite para riesgo cardiovascular (0.5) comparado con el tercil más bajo. El efecto más fuerte se observó en el segundo tercil en niños cuyas madres no recibieron suplementación por DHA durante el embarazo (OR=13.74),  $p=0,01$ ) contrastando con un efecto protector en quienes recibieron el DHA (OR= 0.59,  $p = 0.56$ ). En el tercer tercil los OR fueron de riesgo para ambos grupos (OR $\geq$ 2.5), tanto para quienes recibieron DHA como quienes no lo recibieron. En este estudio coincide con resultados de otros estudios, como por ejemplo el realizado por ejemplo Kim y colaboradores en California (Kim et al., 2018) que utilizaron datos de exposición prenatal y de las primeras etapas de la vida encontrando que estas exposiciones a NO<sub>x</sub> se asociaron con un aumento de 0.1 kg/m<sup>2</sup> (IC 95%: 0.03, 0.20) durante el primer año de vida y con un aumento de 0.5 kg/m<sup>2</sup> (IC 95%: 0.02, 0.90) en el IMC alcanzado a los 10 años (Ceja Esparza, 2021).

En la cohorte de obesidad realizada en el área metropolitana de la Ciudad de México, se reclutaron niños-adolescentes con sobrepeso u obesidad entre las edades de 10 a 18 años de edad y fueron seguidos en el tiempo durante 3 a 6 años para evaluar su salud respiratoria y cardiovascular. Se exploró, por un lado, la influencia a corto plazo de la exposición a ozono sobre la presencia de indicadores de síndrome metabólico (SM) a lo largo del tiempo y, por otro, en una submuestra de los participantes y sobre tres momentos en el tiempo, el efecto sobre algunos parámetros metabólicos derivados del metabolismo de los aminoácidos y la gluconeogénesis. Para el primero, se observó asociación estadísticamente significativa entre la exposición a ozono en terciles en diferentes días de retraso y los parámetros asociados a SM, especialmente para triglicéridos (20.2 mg/dl, IC 95%: 9.5, 30.9), colesterol HDL (-2.56 mg/dl (IC 95 %: - 5.06, -0.05.) y presión arterial sistólica (1.10 mm Hg, IC 95%: 0.08, 2.2). Se observó un OR de 2.23 en síndrome metabólico (IC 95%: 1.10, 4.56) y 1.99 (IC 95%: 0.93, 4.25) para la exposición al ozono tercil en el día de retraso 2 y 3, respectivamente. Este estudio respalda la hipótesis de que la exposición breve al ozono en el aire ambiente puede aumentar el riesgo de enfermedad metabólica y algunos parámetros como los triglicéridos, el colesterol y la presión arterial en la población adolescente obesa (Acosta Montes et al.; 2023). En relación al segundo objetivo en esta cohorte de niños-adolescentes obesos, los resultados sugirieron una asociación primordialmente negativa entre las concentraciones de ozono en el aire ambiente y los índices del metaboloma tanto de acilcarnitinas y como de aminoácidos que disminuyeron respecto al retraso en la exposición (desde un día previo hasta 5 días acumulados). A partir de estos resultados sugerimos que el decremento en estos metabolitos bajo la exposición a ozono podría sugerir un exceso en la demanda tanto de la gluconeogénesis como de la  $\beta$ -oxidación de ácidos grasos, los cambios en el metabolismo de las acilcarnitinas se asocian con alteraciones en la  $\beta$ -oxidación mitocondrial y consecuentemente esto podría representar un estado de inflexibilidad e insensibilidad metabólica, la cual se caracteriza por la competencia de sustratos y este estado puede contribuir al desarrollo de síndrome metabólico y diabetes. Aunque los resultados mostrados en este estudio no son concluyentes, sugieren la participación del ozono en las alteraciones metabólicas y requiere mayor estudio para validar los efectos de la contaminación del aire en la salud humana, tanto a corto como a largo plazo (Pérez Humara et al., 2020).

Se encontraron efectos de riesgo metabólico en niños y adolescentes por la exposición a gases contenidos del aire, tanto por exposición concurrente como por exposición prenatal. Se han sugerido diversos mecanismos para tratar de explicar cómo la exposición a estos contaminantes altera el estado metabólico en el humano, destacando la mediación del estrés oxidativo y los procesos inflamatorios. Hacen falta políticas que ayuden a reducir la exposición en exteriores desde edades tempranas. Así como evaluar alternativas que ayuden a reducir los efectos de la contaminación del aire.

### **Diagnóstico sobre el conocimiento actual de las bases científicas para la gestión de la calidad del aire en la región de la Megalópolis**

*Resumen de la presentación de la Dra. Andrea De Vizcaya Ruiz*

La contaminación del aire es un problema de salud pública en ciudades con mala calidad del aire, donde las partículas respirables (o material particulado – PM) son uno de los principales contaminantes responsables. La exposición a PM se ha asociado con enfermedades pulmonares, cardiovasculares, neurológicas y en general con enfermedades crónicas (enfermedades

metabólicas y cáncer). El PM es una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, que se puede subdividir por su tamaño aerodinámico en partículas gruesas o PG (2.5 a 10  $\mu\text{m}$ ) y PM<sub>10</sub> ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ), finas o PF ( $\leq 2.5 \mu\text{m}$ ) y ultrafinas o PUF ( $\leq 0.1 \mu\text{m}$ ) y que está definido por sus fuentes de emisión. Nuestro trabajo se ha centrado en investigar la toxicidad por la exposición a PM utilizando modelos experimentales celulares (cultivos celulares de epitelio pulmonar) y animales (roedores y cobayos), con el objetivo de establecer la influencia de la composición y contenido de especies químicas en la respuesta tóxica para explicar la fisiopatología pulmonar y cardiovascular, centrado en los fenómenos celulares subyacentes de estrés oxidativo (EO) y la respuesta inflamatoria (RInfl).

Estudios toxicológicos utilizando cultivos de células de epitelio alveolar humano expuestos a PG y PF o PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> colectadas en dos temporadas del año (época seca-fría y seca-caliente) en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), en la zona norte (Xalostoc), centro (Merced) y sur (Pedregal), mostraron una toxicidad (muerte celular y daño al DNA) espaciotemporal y dependiente del tamaño y reactividad oxidativa del PM (De Vizcaya-Ruiz et al., 2006; Gutiérrez-Castillo et al., 2006). Un estudio posterior utilizando materia orgánica extraída (MOE) de PM<sub>2.5</sub> con presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), provenientes de la combustión incompleta de diésel y gasolina principalmente, colectadas durante el invierno en el norte de la ZMVM. Al exponerla al cultivo celular se observó la inducción de especies reactivas de oxígeno (ERO) y la activación del sistema de P450, sin afectar la viabilidad celular, indicando la transformación de los HAP a especies más tóxicas e incluso carcinogénicas. Estos estudios indican que los efectos tóxicos *in vitro* inducidos por la exposición a PM de la ZMVM presentan un comportamiento dependiente de la concentración de sus componentes (determinados por sus fuentes de emisión y el clima) y no de la concentración de la masa total de PM. Las especies químicas identificadas en el PM provienen de emisiones de quema incompleta de combustibles de fuentes primarias industriales, emisiones vehiculares y polvo de caminos, y correlacionan con el daño tóxico pulmonar.

La exposición a partículas se ha relacionado con el EO y la RInfl como mecanismos subyacentes del daño pulmonar y las alteraciones cardiovasculares. Estudios toxicológicos utilizando modelos animales experimentales permiten establecer el mecanismo fisiopatológico de una enfermedad con respecto a la concentración y tiempo de exposición al PM. Ratas expuestas a través de la exposición de todo el cuerpo a PG, PF y PUF ambientales concentradas o aire filtrado (aire) durante 5 h por día, 4 días a la semana durante 3 días para la exposición aguda y 8 semanas para la exposición crónica, mostraron la inducción de mediadores inflamatorios de la RInfl y EO (oxidación de proteínas y respuesta antioxidante) en el pulmón (órgano de entrada del PM), en respuesta a la exposición a corto plazo o aguda principalmente por la exposición a PF y UF, y no al PM de mayor tamaño (PG). Por otro lado, la exposición subcrónica (mediano plazo) mostro la formación de aductos de DNA (indicativos de daño genotóxico) en el pulmón por la exposición a PG, PF y PUF, y la inducción de EO e inflamación en el endotelio vascular, indicando así un estado transitorio de la RInflam y el EO por la exposición a PF y PUF (Aztatzi-Aguilar et al., 2018). La exposición a PM causa una lesión pulmonar aguda que trasciende de este órgano de entrada al sistema cardiovascular, estos efectos están modulados por la RInfl y el EO en relación con el tamaño de PM (definido por su composición y fuentes de emisión) y el tiempo de exposición.

Además, observamos la activación del receptor de angiotensina-II tipo-I (AT1R molécula miembro del sistema renina-angiotensina-aldosterona (SRAA) responsable del equilibrio vascular y presión arterial) en los pulmones y el corazón de ratas por la exposición a PF y PUF (Aztatzi-Aguilar et al., 2015). También, la exposición subcrónica a PF que involucró al SRAA provocó un daño renal temprano, que puede causar lesión renal, así como un desequilibrio antioxidante e inmunológico (Aztatzi-Aguilar et al., 2016). Otro estudio que expuso a ratonas gestantes a PUF mostro la inducción del estrés placentario que causa programación génica (daño epigenético) y daño cardiovascular en ratones adultos expuestos durante su vida intrauterina (Morales-Rubio et al., 2019). Nuestros resultados indicaron que la exposición a PM contribuye al desarrollo de enfermedades crónicas en otros aparatos y sistemas del organismo más allá de la vía pulmonar que es la vía de entrada, y que la exposición a PUF en la vida intrauterina promueve el desarrollo de enfermedades crónicas, como las cardiovasculares (hipertensión e infarto al miocardio). Los productos químicos altamente oxidantes, probablemente de la combustión incompleta y los compuestos orgánicos volátiles y PAH en PF inducen la respuesta de AhR y tienen una influencia en los efectos tóxicos relacionados con el asma (hiperreactividad pulmonar y RInflam) en un modelo de cobayo sensibilizado (Morales-Rubio et al., 2022). Se observó la participación del AhR en la hiperreactividad de las vías respiratorias inducida por PF a través de su modulación por la exposición concomitante a resveratrol (un antagonista del receptor de hidrocarburo de arilo (AhR) encargado del metabolismo por P450 de HAP).

Perspectivas – Estos hallazgos deben dilucidarse aún más realizando el monitoreo puntual de PM y la especiación de sus componentes (HAP, metales y carbono negro) junto con la evaluación de la toxicidad, para proporcionar evidencia sobre cómo la agregación química y la formación de aerosoles determinan la activación molecular de procesos fisiopatológicos de enfermedades agudas y crónicas. Así mismo, la evidencia de que el foco de atención no debe quedar sólo en el epitelio pulmonar, sino que otras enfermedades sistémicas o crónicas, como las enfermedades CV y metabólicas (resistencia a la insulina), deberían empezar a entenderse desde el inicio de la perturbación provocada por los tóxicos inhalables. Se requiere realizar estudios de partículas tóxicas emergentes como las partículas ultrafinas, partículas de microplásticos y aquellas que no derivan de combustión como el desgaste de frenos y llantas, identificando sus fuentes de emisión y potencial tóxico. Estos objetivos se explorarían mediante el uso de modelos *in vitro* e *in vivo* de exposición a tóxicos incidentales y artificiales inhalados, expuestos por inhalación, y se explorarían con técnicas moleculares de alto rendimiento (transcriptómica o expresión de proteínas) y parámetros de función fisiológica de enfermedades crónicas, para lo cual se requiere contar con fondos económicos para la investigación integral e interdisciplinaria.

### **Exposición crónica a contaminantes no regulados: cáncer de mama**

*Resumen de la presentación de la Dra. Karen Elizabeth Nava Castro*

Esta investigación se refiere a entender las relaciones de contaminantes disruptores de endocrinos. Existe controversia sobre la relación entre contaminación del aire por compuestos cancerígenos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y el desarrollo del cáncer de mama. Actualmente se conoce que la principal asociación es por la interacción de diversos contaminantes con los receptores a estrógeno y progesterona. Sin embargo, la composición química de las partículas puede llegar a ser muy compleja. En particular, en este estudio se enfocaron en los ftalatos, los cuales son contaminantes asociados a la fabricación de los plásticos, material médico, cosméticos, envases, pinturas de uñas, empaques de alimentos, juguetes de plástico, etc. Debido a

su prevalencia, hay entonces un interés en la exposición a estos compuestos en la población general, así como en los trabajadores de las industrias donde se fabrican estos productos.

Los ftalatos pueden alterar distintas vías metabólicas y estar asociados a efectos en salud reproductivos, en cáncer y respiratorios. Con respecto al cáncer de mama, hay algunos estudios epidemiológicos que asocian niveles de metabolitos en orina de pacientes con cáncer de mama. En este estudio encontraron diferencias en las concentraciones de los ftalatos parentales en pacientes con tumores mamarios. Dependiendo del tipo de tumor, podrían tener mayores niveles de algunos ftalatos. Los resultados indican que la exposición a los ftalatos puede ser parte de las comorbilidades que podrían estar modificando la susceptibilidad e incluso la mortalidad de pacientes con cáncer de mama

### **Alteraciones de la materia orgánica extraída de las PM2.5 en biomoléculas y producción de surfactante pulmonar**

*Resumen de la presentación del Dr. Déciga-Alcaraz Alejandro*

Una de las principales causas de muerte durante el 2019 de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud fueron las enfermedades respiratorias, clasificándola como la cuarta causa de muerte a nivel mundial. Las enfermedades respiratorias pueden desarrollarse y complicarse por múltiples factores siendo uno de ellos la exposición a contaminantes del aire como el material particulado. El material particulado es una mezcla variable de compuestos inorgánicos y orgánicos entre los que destaca la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). El material orgánico extraíble (MOE) es la fracción adsorbida en el material particulado al cual se le atribuyen efectos genotóxicos (Líbalová et al., 2014).

Se ha reportado que un 80% del MOE puede alcanzar regiones alveolares y ser absorbido de manera eficiente alcanzando el torrente sanguíneo (Gerde et al., 2001). Debido a que el principal blanco del MOE son las regiones pulmonares, siendo la más afectada la región alveolar, es de gran importancia conocer los efectos que el MOE pueda tener en poblaciones celulares como los neumocitos tipo II. Los neumocitos tipo II tienen un papel importante en el pulmón ya que tienen la capacidad de regenerarse, proliferar y diferenciarse a neumocitos tipo I para restaurar el daño causado por agentes externos (Mason, 2006). Además, los neumocitos tipo II se caracterizan por producir el surfactante pulmonar el cual está compuesto en un 90% de lípidos surfactantes y un 10% de proteínas surfactantes (Han & Mallampalli., 2015).

Los lípidos surfactantes ayudan a prevenir el colapso alveolar durante el proceso del intercambio gaseoso, siendo el más abundante la fosfatidilcolina (Knudsen & Ochs, 2018) y las proteínas surfactantes como SP-A y SP-D que proporcionan defensa inmune a través de la unión de lipopolisacáridos a los patógenos para mejorar su eliminación del pulmón (Whitsett et al., 2010) aumentando la fagocitosis en macrófagos alveolares (Schagat et al., 2001). Por lo anterior, es importante evaluar si la MOE causa alteraciones en la producción del surfactante pulmonar. Los resultados previos demuestran que los neumocitos tipo II expuestos a una concentración de 10  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  durante 24 h presentan alteraciones morfológicas posteriores a la exposición por MOE. Estas alteraciones pueden estar asociadas al citoesqueleto de la célula afectando la división celular de los neumocitos tipo II. Por otro lado, se observó también que la exposición a MOE genera un aumento en la producción de proteínas totales lo cual puede estar asociado a la activación de

mecanismos de respuesta por la exposición a la MOE. Para analizar la producción del surfactante, se evaluó la expresión del gen que codifica para la proteína SP-A encontrando que dicha expresión disminuye cuando los neumocitos tipo II son expuestos a MOE. También se analizó la cantidad de fosfolípidos intracelulares y fosfolípidos liberados al medio extracelular que componen el surfactante pulmonar, encontrando que la expresión del gen SP-A disminuye cuando los neumocitos son expuestos a MOE al igual que los fosfolípidos extracelulares.

Estos resultados nos indican que la exposición a MOE causa alteraciones en la producción del surfactante de los neumocitos tipo II. Una de las consecuencias de la disminución del surfactante es que, las células pueden ser susceptibles a infecciones por virus, bacterias u hongos. Estos resultados abren una puerta de investigación sobre los efectos toxicológicos causados por exposición a MOE sobre el surfactante pulmonar, ya que dichos efectos no están del todo descritos aún.

### **Exposición personal a la contaminación por partículas en el transporte público**

#### *Resumen de la presentación del Dr. Erik Velasco*

El tiempo que un ciudadano gasta en desplazarse diariamente en la Ciudad de México representa muy posiblemente la mayor exposición a contaminación atmosférica durante el día. Es por ende necesario evaluar los niveles de exposición a aire contaminado en los diferentes medios de transporte para así poder diseñar políticas de movilidad que protejan la salud de los viajeros (Velasco et al., 2019).

En este contexto, el presente estudio investiga qué modo de transporte público expondría a una persona a la menor cantidad de partículas contaminantes a lo largo de una ruta representativa en una zona concurrida de la Ciudad de México (Av. Cuauhtémoc). Se empleó un conjunto de instrumentos portátiles grado científico para medir *in situ* una serie de parámetros de las partículas en los diferentes microambientes relacionados con cada modo de transporte. La ruta seleccionada puede recorrerse usando los sistemas Metro y Metrobús, también es posible abordar un taxi o utilizar un servicio de viaje compartido en tiempo real (por ejemplo Uber), así como recorrerla a pie o en bicicleta. Se colocó un segundo conjunto de instrumentos en un parque cercano para realizar mediciones simultáneas y diferenciar la contribución de las fuentes de emisión a lo largo de la ruta evaluada.

Los automóviles con aire acondicionado del servicio Uber resultaron ser el modo de transporte más limpio, con concentraciones de exposición inclusive por debajo de aquellas registradas en el sitio de referencia (es decir, parque). El sistema Metro registró las mayores concentraciones de partículas, en específico de partículas ultrafinas (< 100 nm). Todos los modos de transporte se vieron afectados por plumas provenientes de estufas, anafres y procesos de cocinado en los múltiples puestos de comida informal a lo largo de la ruta. Estos puestos son omnipresentes en las calles de la ciudad, pero abundan más en las estaciones de Metro y paradas de autobuses concurridas.

Al considerar la actividad física y el tiempo de viaje relacionados con cada modo de transporte (Metrobús, Metro, taxi, servicio tipo Uber, y en bicicleta), se encontró que los ciclistas y peatones son quienes experimentan la mayor inhalación de partículas. Se respira hasta cuatro veces más



partículas caminando y en bicicleta, en comparación con viajar por Uber o auto privado con aire acondicionado en modo de recirculación. De manera similar, las personas que eligen viajar por Metrobús o Metro reducen la inhalación de partículas a la mitad en comparación con aquellas que se desplazan a pie, mientras que las que viajan en taxi en un tercio.

El viajar en auto privado o usar servicios tipo Uber no debería representar un beneficio mayor en términos de salud pública. En reiteradas ocasiones se ha mencionado la necesidad de contar con un sistema de transporte público que sea confiable, cómodo, seguro y limpio. También es conocida la necesidad de construir carriles únicos para ciclistas y caminos peatonales que incentiven el transporte activo. Entre los parámetros evaluados, el número de partículas y el área de superficie activa como proxies de partículas ultrafinas, y la concentración de carbono negro fueron los parámetros más ilustrativos para evaluar la exposición a partículas en el transporte público de la Ciudad de México. El evaluar la exposición a partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) y monóxido de carbono aporta menos información.

Un resultado inquietante fue el tamaño de las partículas a las que los viajeros están expuestos. El 80% de las partículas en los diferentes modos de transporte midieron menos de 70 nm, siendo la media 40 nm. La mayoría de estas partículas caen en el modo de nucleación (< 50 nm), y son el resultado de las reacciones químicas que suceden entre los gases del escape de los vehículos después de haber sido emitidos. Las partículas mayores a 50 nm se encuentran en el modo acumulación y por lo general se producen dentro de los motores de combustión. La abrasión y desgaste de frenos y llantas genera partículas >100 nm, así como también la quema de carbón o leña en estufas. El asar comida en parrillas, en particular aquella que es grasosa, así como cocinar comida frita, y aún más aquella que se sumerge en aceite hirviendo, produce también partículas en el modo de nucleación.

## **2.2. Costo-beneficio**

### **Análisis costo-beneficio de programas de contingencias ambientales atmosféricas**

*Resumen de la presentación de la Dra. Maria Eugenia Ibararán*

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), conformada por la Ciudad de México, un municipio de Hidalgo y 59 del Estado de México, tiene una población de 21 millones de habitantes aproximadamente. Es la ciudad con mayor contaminación atmosférica del país. Esto ha llevado a una reducción en el bienestar de la población, principalmente asociada a problemas de morbilidad y mortalidad. Por ello, se ha hecho necesaria la adopción de medidas más enérgicas para proteger la salud de los habitantes. Sin embargo, aun cuando estas medidas traerían mejor calidad del aire y consecuentes beneficios a la salud reduciendo la mortalidad y morbilidad, también tienen costos tanto económicos como sociales. El objetivo de este proyecto es por tanto hacer un análisis costo-beneficio del conjunto de medidas del Plan de Contingencias Atmosféricas Ambientales (PCAA) propuestas por la CAME y el INECC. Además, se hizo un análisis similar para la política de trabajo en casa. En ambos casos los beneficios netos derivados del análisis son positivos, por lo que se recomienda la adopción del PCAA en general y del trabajo en casa en particular. En el caso PCAA, el impacto social es adverso para las mujeres y los trabajadores del sector informal, por lo que definitivamente se sugiere incluir medidas compensatorias para estos grupos en el Programa de Contingencias.

Este es un trabajo aun en desarrollo y se espera que los resultados incluyan una estimación de los costos y beneficios anuales de la aplicación del PCAA para la ZMVM, así como una metodología de cálculo la cual podrá ser aplicada en otras regiones del país.

### **Impactos del ozono en cultivos**

*Resumen de la presentación del Dr. Luis Gerardo Ruiz Suarez*

Estos son los resultados de un estudio sobre los impactos económicos de la exposición a ozono sobre cuatro cultivos en la corona regional. Los cultivos fueron maíz, avena, frijol y sorgo. Los resultados se estimaron en millones de pesos de pérdidas económicas en cada uno de estos cultivos por la exposición a ozono. De ellos, el cultivo de maíz fue el menos afectado, mientras que el sorgo y la avena fueron más afectados. Este fue un estimado conservador obtenido con una función de la pérdida de rendimiento cuando se excede un umbral de concentración determinado. Por tanto, el método depende de la capacidad para monitorear en las zonas rurales y urbanas para evaluar la capacidad del modelo de calidad del aire para simular las concentraciones de ozono en las zonas agrícolas. Las modelaciones deben apoyarse también en las herramientas satelitales.

### **2.3. Gestión de la calidad del aire y salud: Normas y programas**

Existen diferentes mecanismos que integran a la salud en la gestión de la calidad del aire como:

- la mejora en el vínculo entre el conocimiento científico y la gestión,
- las Normas Oficiales Mexicanas que evalúan la calidad del aire ambiente y establecen los límites máximos permisibles para protección a la salud con respecto a los contaminantes del aire criterio, y
- los Programas de Gestión de Calidad del Aire (ProAire) o los Programas de Contingencias Ambientales Atmosféricas.

*Comentarios de la Mtra. Stephanie Montero Bending*

Las guías de la OMS han sido una referencia para guiar las políticas públicas para mejorar la calidad del aire en los estados miembros de la ONU. Específicamente, para guiar la actualización progresiva de los estándares de calidad del aire en muchos países, incluyendo México, en las normas de salud ambiental. Y estas metas son a su vez de utilidad para orientar las metas y diseñar los programas de control de la contaminación, incluyendo los ProAires. Más allá de los retos que imponen las guías de calidad del aire de la OMS, hay que hacerse la pregunta si las normas actuales sirven su función de proteger la salud de los habitantes, dado que no hay una evidencia científica sobre un umbral seguro para la salud. Aunque es importante continuar trabajando en la actualización de las normas de calidad del aire, es aún más importante trabajar en la reducción de la contaminación atmosférica, particularmente del PM<sub>2.5</sub>.

Por tanto, establecer cada vez niveles más estrictos de calidad del aire no se ha reflejado en la reducción de niveles de contaminantes, particularmente de PM<sub>2.5</sub>. Se deben actualizar también los programas de control como el ProAire, y es necesario establecer mecanismos de rendición de cuentas para que quede claro a que actor le toca cada acción, medida o regulación. Se requiere

además de una vigilancia estricta y de sanciones a los actores que no cumplan con los programas. Todo esto dentro de un buen programa de gestión de la calidad del aire y no solo las normas de calidad del aire.

#### *Comentarios del Dr. Victor Torres Meza*

Es importante que en el nuevo ProAire ya se haya incluido un capítulo sobre salud pública con base en los estudios disponibles. Esto es porque la protección de la salud debe ser la guía para el control de la calidad del aire. Hay que mantener una vigilancia a las enfermedades crónicas en el sistema de salud a partir de reportes técnicos continuos en la Megalópolis. Se debe mantener un repositorio científico de estas bases de datos para ayudar a investigar los efectos de la calidad del aire.

#### **Conclusiones y recomendaciones de la Sesión 2** (Dr. Horacio Riojas Rodríguez)

Existe un avance significativo en el conocimiento sobre contaminación atmosférica y salud en el contexto global y en México, en estudios epidemiológicos y en evaluaciones de impacto en salud

- Es necesario incrementar los recursos para investigación contaminación del aire y salud.
- Temas prioritarios incluyen:
  - enfermedades crónicas
  - epigenética
  - efectos de exposición a mezclas
  - riesgos durante el embarazo
  - avanzar en la regulación de otros contaminantes BTEX
- Mejorar las mediciones y modelos de exposición:
  - mediciones personales
  - modelos satelitales
- Generar normas para tóxicos ambientales como el benceno.
- Más estudios sobre composición de partículas para estimar sus riesgos en salud.
- Incrementar los estudios sobre los impactos en vegetación y cultivos.
- Dar seguimiento a las metas de salud incluidas en los ProAires de CDMX y Estado de México.
- Fortalecer y mejorar los sistemas de vigilancia en contaminación del aire y salud.
- Fortalecer los estudios sobre impactos y beneficios de los programas de gestión de calidad del aire en salud.

#### **Referencias**

Acosta Montes, J.O.; Villarreal, A.B.; Piña, B.G.B.; Martínez, K.C.; Lugo, M.C.; Romieu, I.; Cadena, L.H. Short-Term Ambient Air Ozone Exposure and Components of Metabolic Syndrome in a Cohort of Mexican Obese Adolescents. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 4495. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054495>.

Aztatzi-Aguilar OG, Uribe-Ramírez M, Arias-Montaña JA, Barbier O, De Vizcaya-Ruiz A. Acute and subchronic exposure to air particulate matter induces expression of angiotensin and bradykinin-related genes in the lungs and heart: Angiotensin-II type-I receptor as a molecular target of particulate matter exposure. *Part Fibre Toxicol.* 2015 Jun 26;12:17. doi: 10.1186/s12989-015-0094-4.

Aztatzi-Aguilar, O. G., M. Uribe-Ramírez, J. Narváez-Morales, A. De Vizcaya-Ruiz and O. Barbier.: Early kidney damage induced by subchronic exposure to PM2.5 in rats. *Particle and Fibre Toxicology* (2016) 13:68. doi: 10.1186/s12989-016-0179-8.

Aztatzi-Aguilar, O.G., Valdés-Arzate A., Debray-García Y., Uribe-Ramirez M., Calderón-Aranda E., Acosta-Saavedra L., Gosebatt-Bonaparte M.E., Jorge Maciel, Petrosyan P., Mugica- Alvarez V., Gutiérrez-Ruiz M.C., Gómez-Quiroz L.E., Osornio-Vargas A., Froines J., Kleinman M.T., De Vizcaya-Ruiz. A.: Exposure to ambient particulate matter induces oxidative stress in lung and aorta in a size- and time- dependent manner in rats. (2108) *Toxicology and Research Applications*. Vol 2, pp: 1–15. doi.org/10.1177/2397847318794859.

Ceja Esparza P, Barraza Villarreal A, Hernández Cadena L.: Prentanal NOx exposure and Waist-to Height Ratio as a cardiovascular risk factor in school aged children in the POSGRAD Cohort. Tesis de Maestría en Ciencias en Salud Ambiental, INSP 2021 (Datos en vías de publicación).

Cervantes-Martínez, K., Dalia Stern, José Salvador Zamora-Muñoz, Ruy López-Ridaura, José Luis Texcalac-Sangrador, Adrian Cortés-Valencia, Jorge Octavio Acosta-Montes, Martín Lajous, Horacio Riojas-Rodríguez.: Air pollution exposure and incidence of type 2 diabetes in women: A prospective analysis from the Mexican Teachers' Cohort. *Science of The Total Environment*, Volume 818, 2022, 151833, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151833>.

Cervantes-Martínez, K., Stern, D., Zamora-Muñoz, J.S., López-Ridaura, R., Texcalac-Sangrador, J.L., Cortés-Valencia, A., Acosta-Montes, J.O., Lajous, M., Riojas-Rodríguez, H.: Air pollution exposure and incidence of type 2 diabetes in women: A prospective analysis from the Mexican Teachers' Cohort. *Sci Total Environ.* 2022 Apr 20;818:151833. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151833.

De Vizcaya-Ruiz, A., M.E. Gutiérrez-Castillo, M. Uribe-Ramirez, M.E. Cebrián, V. Mugica-Alvarez, J. Sepúlveda, I. Rosas, E. Salinas, C. Garcia-Cuéllar, F. Martínez, E. Alfaro-Moreno, V. Torres-Flores, A. Osornio-Vargas, C. Sioutas, P.M. Fine, M. Singh, M.D. Geller, T. Kuhn, A.H. Miguel, A. Eiguren-Fernandez, R.H. Schiestl, R. Reliene, J. Froines.: Characterization and in vitro biological effects of concentrated particulate matter from Mexico City. *Atmospheric Environment*, 40: S583–S592, 2006. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.12.073

Gerde, P., Muggenburg, B. A., Lundborg, M., & Dahl, A. R.: The rapid alveolar absorption of diesel soot-adsorbed benzo[a]pyrene: bioavailability, metabolism and dosimetry of an inhaled particle-borne carcinogen. *Carcinogenesis*, 22(5), 741–749, 2001. <https://doi.org/10.1093/carcin/22.5.741>

Gutiérrez-Castillo, M. E., Deborah A Roubicek, Mariano E Cebrián-García, Andrea De Vizcaya-Ruiz, Monserrat Sordo-Cedeño, Patricia Ostrosky-Wegman.: Effect of chemical composition on the induction of DNA damage by urban airborne particulate matter. *Environ Mol Mutagen*, 47(3):199-211, 2006. doi: 10.1002/em.20186.

Han, S., & Mallampalli, R. K.: The Role of Surfactant in Lung Disease and Host Defense against Pulmonary Infections. *Annals of the American Thoracic Society*, 12(5), 765–774, 2015. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201411-507FR>

Hurtado-Díaz, M., Riojas-Rodríguez, H., Rothenberg, S.J., Schnaas-Arrieta, L., Kloog, I., Just, A., Hernández-Bonilla, D., Wright, R.O., Téllez-Rojo, M.M.: Prenatal PM<sub>2.5</sub> exposure and neurodevelopment at 2 years of age in a birth cohort from Mexico City. *Int J Hyg Environ Health*. 2021 Apr; 233:113695. doi: 10.1016/j.ijheh.2021.113695.

Kim, J.S., Alderete, T.L., Chen, Z., Lurmann, F., Rappaport, E., Habre, R., et al.: Longitudinal associations of in utero and early life near-roadway air pollution with trajectories of childhood body mass index. *Environmental Health*. 2018 Dec 14; 17(1):64

Knudsen, L., & Ochs, M.: The micromechanics of lung alveoli: structure and function of surfactant and tissue components. *Histochemistry and cell biology*, 150(6), 661–676, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00418-018-1747-9>

Líbalová, H., Krčková, S., Uhlířová, K., Milcová, A., Schmuczerová, J., Ciganek, M., Kléma, J., Machala, M., Šrám, R. J., & Topinka, J.: Genotoxicity but not the AhR-mediated activity of PAHs is inhibited by other components of complex mixtures of ambient air pollutants. *Toxicology letters*, 225(3), 350–357, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.01.028>

Mason R. J.: Biology of alveolar type II cells. *Respirology (Carlton, Vic.)*, 11 Suppl, S12–S15, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1843.2006.00800.x>

Mendoza-Ramirez J., et al.: Prenatal Exposure to Nitrogen Oxides and its Association with Birth Weight in a Cohort of Mexican Newborns from Morelos, Mexico. *Annals of Global Health*. 84(2), pp. 274–280, 2018. DOI: <https://doi.org/10.29024/aogh.914>

Pérez Humara, M. L., Escamilla Nuñez, M. C., Barraza Villarreal, A., Vadillo Ortega, F., Hernández Cadena, L.: Exposición ambiental a ozono y su asociación con el metaboloma de los aminoácidos en adolescentes con sobrepeso y obesidad de la Zona Metropolitana del Valle de México. Tesis Doctorado en Ciencias en Epidemiología. INSP, 2020

Morales-Rubio RA, Alvarado-Cruz I, Manzano-León N, Andrade-Oliva MD, Uribe-Ramirez M, Quintanilla-Vega B, Osornio-Vargas Á, De Vizcaya-Ruiz A. In utero exposure to ultrafine particles promotes placental stress-induced programming of renin-angiotensin system-related elements in the offspring results in altered blood pressure in adult mice. *Part Fibre Toxicol*. 2019 Jan 28;16(1):7. doi: 10.1186/s12989-019-0289-1.

Morales-Rubio R, Amador-Muñoz O, Rosas-Pérez I, Sánchez-Pérez Y, García-Cuéllar C, Segura-Medina P, Osornio-Vargas Á, De Vizcaya-Ruiz A. PM<sub>2.5</sub> induces airway hyperresponsiveness and inflammation via the AhR pathway in a sensitized Guinea pig asthma-like model. *Toxicology*. 2022 Jan 15;465:153026. doi: 10.1016/j.tox.2021.153026.

Schagat, T. L., Wofford, J. A., & Wright, J. R.: Surfactant protein A enhances alveolar macrophage phagocytosis of apoptotic neutrophils. *Journal of immunology (Baltimore, Md. : 1950)*, 166(4), 2727–2733, 2001. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.166.4.2727>.

Ugalde-Resano R, Riojas-Rodríguez H, Texcalac-Sangrador JL, Cruz JC, Hurtado-Díaz M. Short term exposure to ambient air pollutants and cardiovascular emergency department visits in Mexico city. *Environ Res*. 2022 May 1;207:112600. doi: 10.1016/j.envres.2021.112600.

Velasco, E., Retama, A., Segovia, E., Ramos, R.: Particle exposure and inhaled dose while commuting by public transport in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 219, 117044, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117044>.

Whitsett, J. A., Wert, S. E., & Weaver, T. E.: Alveolar surfactant homeostasis and the pathogenesis of pulmonary disease. *Annual review of medicine*, 61, 105–119, 2010. <https://doi.org/10.1146/annurev.med.60.041807.123500>

## RESUMEN DE LA SESIÓN 3

### FACTORES QUE PROPICIAN LAS EMISIONES CONTAMINANTES

Durante la tercera sesión del taller los participantes discutieron el estado actual del conocimiento sobre los factores que propician las emisiones de contaminantes atmosféricos en la Megalópolis. Para ello se utilizaron como guía tres subtemas y se identificaron preguntas clave en cada uno de ellos como se muestra en la Tabla S3.1.

**Tabla S3.1.** Temas y preguntas clave discutidas en la Sesión 3: “Emisiones de contaminantes en la Megalópolis”

Subtema	Preguntas clave
Emisiones	<p>¿Qué información hay disponible sobre los efectos de la pandemia en los cambios en emisiones en México?</p> <p>¿Qué nueva información existe sobre los impactos de los contaminantes emergentes de México?</p>
Expansión urbana y transporte	<p>¿Cómo afectan la expansión urbana los patrones de transporte?</p> <p>¿Qué hacer para reducir la distancia de los viajes al trabajo y a la escuela?</p>
Transporte regional de contaminantes	<p>¿Cuál es la contribución de los contaminantes regionales transportados a la calidad del aire de la Megalópolis?</p> <p>¿Existen diferencias significativas entre las distribuciones de COVs de la ZMVM y las ciudades en los alrededores?</p>
Climatología urbana, meteorología de la capa límite, transferencia radiativa	<p>¿La expansión urbana experimentada en los últimos años bajo un clima cambiante ha modificado la meteorología y calidad del aire?</p> <p>¿Podría una isla de calor urbano más intensa afectar la ventilación y dispersión de contaminantes, y con ello su distribución espacial y temporal?</p> <p>¿Podríamos esperar contingencias ambientales más frecuentes a consecuencia de fenómenos meteorológicos inusualmente más intensos a nivel de meso escala?</p>

Subtema	Preguntas clave
	<p>¿Cuál es la variación espacial y temporal de la altura de la capa límite diurna convectiva, la capa estable nocturna y las capas residuales, y su impacto en la dispersión de contaminantes y la química atmosférica?</p> <p>¿Qué impactos tienen los aerosoles en el balance radiativo? ¿Cómo modifica la carga de aerosoles la micrometeorología y la evolución de la capa límite?</p> <p>¿Podría la radiación solar UV superficial seguir aumentando en los próximos años debido a la disminución de la contaminación del aire?</p> <p>¿Qué medidas deberían tomarse para proteger a las personas ante el incremento de la radiación solar ultravioleta?</p>

A continuación se muestran los resúmenes de las presentaciones y discusiones durante la Sesión 3 del taller.

### 3.1. Emisiones

#### **Introducción** (Ing. Hugo Landa Fonseca)

Dentro de los factores principales que propician las emisiones antropogénicas en la Megalópolis se identificaron:

- El incremento en el uso de los combustibles fósiles.
- El incremento de la flota vehicular y la baja tasa de remoción de vehículos antiguos y altamente contaminantes.
- Insuficiente infraestructura vial y en mal estado, así como inadecuada planeación.
- Aumento de la población y las zonas urbanas.
- Aumento y malas prácticas en el uso de productos solventes con alto contenido de COV en comercios y servicios.
- Incremento de las actividades industriales altamente contaminantes y energéticamente ineficientes.

Los participantes de SEMARNAT describieron los métodos utilizados para la estimación de emisiones y para la evaluación de los inventarios de emisiones. De manera general, las estimaciones están basadas en dos métodos: 1) muestreos directos, y 2) estimaciones indirectas utilizando una combinación de balance de masa, modelos (p.ej., MOVES-Mexico, Modelo Mexicano de Biogas, Non-Road, EDMS) extrapolación, y la combinación de factores de emisión con datos de actividad.



Los procesos de evaluación de las emisiones estimadas en el inventario nacional están basados en la verificación y análisis de la información utilizada e incluyen: 1) la verificación de las fuentes de información federales y locales mediante el acercamiento con las instituciones que generan, procesan, almacenan y proveen los datos de actividad, 2) análisis de las emisiones industriales monitoreadas utilizando los datos de capacidades y tamaño de equipos reportados, 3) se verifica la coherencia entre la producción, consumos de materias primas y horas trabajadas por equipo, 4) se realizan balances de combustibles, consumos de solventes y de residuos sólido, 5) trenes de control de calidad Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA).

## **MOVES y emisiones vehiculares**

### *Resumen de la presentación de la Dra. Dzoara Tejeda*

En el caso de las emisiones vehiculares, actualmente se están realizando las estimaciones para el año 2018 utilizando el modelo MOVES-Mexico. El modelo está siendo ajustado con datos de sensores remotos, datos de programas de verificación vehicular, pruebas de emisiones a vehículos nuevos y formulación de combustibles, y mediciones obtenidas en campañas de monitoreo en diversas localidades del país. El modelo también se está actualizando, utilizando las condiciones y características regionales. El inventario de fuentes móviles 2018 para las entidades de la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) se está calculando de forma paralela con el modelo actualizado.

Los factores de emisión (FE) son generados de forma interna dentro del MOVES-México en función del tipo de vehículo, año modelo, velocidades de circulación, tipo y formulación de combustibles utilizados, tipo de camino por el que se circula, presión barométrica, temperatura y humedad relativa; por lo anterior, la combinación de parámetros generan cientos de miles de factores de emisión que son aplicados en función de las características propias de cada región, tanto de su flota vehicular como de las condiciones ambientales y de combustibles. Los datos de actividad corresponden a los kilómetros anuales que recorre cada tipo de vehículo, los perfiles de velocidades de circulación (porcentajes de velocidades de circulación dentro de 16 rangos definidos en MOVES-México), perfiles horarios de circulación para días entre semana y de fin de semana con registros por hora, las variaciones ingresadas en este último campo son relacionadas con las variaciones de las condiciones meteorológicas por hora para el cálculo de las emisiones evaporativas. Los análisis preliminares de los datos obtenidos han mostrado diferencias importantes. Una comparación por tipo de vehículo y año modelo muestra que las emisiones se han reducido, sin embargo, si hay diferencias importantes regionales de las emisiones vehiculares. Otro parámetro que se está actualizando son los perfiles de velocidades regionales utilizando telemetría TomTom, aunque aún hay mucho que avanzar.

## **Análisis del control de emisiones en la cadena de distribución de gasolinas en la región de la Megalópolis**

### *Resumen de la presentación de Mtra. Angélica Guadarrama Chávez*

La evaporación de gasolinas durante las operaciones de transferencia es una fuente importante de emisiones de COV en la Megalópolis, además de que representa una pérdida económica. Debido a sus impactos negativos en la calidad del aire, es por tanto necesario controlar las pérdidas por

evaporación durante los procesos de manejo y suministro. Durante la elaboración del taller “Medidas Necesarias para Mejorar la Calidad del Aire en la ZMVM” llevado a cabo el 20 de diciembre de 2020, se identificó como medida de control de emisiones la inspección y vigilancia estratégica para el control de emisiones en gasolineras. Con base en ello se estableció el proyecto “Análisis del control de emisiones en la cadena de distribución de gasolinas en la región de la Megalópolis (Fases 0, I y II)” para realizar un diagnóstico del funcionamiento de la tecnología instalados en la actualidad para el control de evaporaciones, así como para identificar las acciones necesarias y definir un plan para optimizar la operación o modernizar los sistemas de control en las estaciones de servicio.

La evaporación de gasolinas es controlada tecnológicamente mediante Sistemas de Recuperación de Vapores (SRV), los cuales constituyen un conjunto de accesorios, tuberías, conexiones y equipos diseñados para controlar, recuperar, almacenar y/o procesar las emisiones de vapores a la atmósfera, producidos en las operaciones de transferencia de gasolinas. A su vez, la cadena de distribución de gasolina es el conjunto de actividades instalaciones y medios de distribución necesarios para llevar a cabo el proceso de venta de gasolina, se divide en tres fases, como se ve en la Tabla S3.2.

**Tabla S3.2.** Fases durante la emisión de COV por evaporación de gasolinas

Fase	Norma	Retos
<b>Fase 0: En la terminal de almacenamiento y reparto</b>	NOM-006-ASEA-2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar que los SRV operan continuamente y cumplen con la eficiencia indicada en la normatividad aplicable</li> <li>• Asegurar la hermeticidad de los auto-tanques</li> </ul>
<b>Fase I: Del auto-tanque al tanque de almacenamiento de la estación de servicio</b>	NOM-005-ASEA-2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar la hermeticidad de los dispositivos de llenado de los tanques de almacenamiento</li> </ul>
<b>Fase II: Del tanque de almacenamiento de la estación de servicio al tanque del vehículo automotor</b>	NOM-004-ASEA-2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar que los SRV operan continuamente y cumplen con la eficiencia indicada en la normatividad aplicable</li> </ul>

Derivado del análisis de las medidas implementadas para el control de emisiones de COV, se han detectado limitaciones en la normatividad en las tres fases de comercialización de gasolinas, tal como se muestra en la Tabla S3.2.

Durante la Fase 0, la NOM-006-ASEA-2017 establece las especificaciones, criterios técnicos y requisitos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente, que se

deben en las instalaciones terrestres de almacenamiento de Petrolíferos y Petróleo. Las instalaciones deben controlar los vapores de gasolina durante la carga de los auto-tanques con una eficiencia igual o mayor a 95%. Sin embargo, la norma no establece los métodos de prueba, por lo que actualmente no hay evidencia de su funcionamiento y cuantificación del control de las emisiones.

Durante la Fase I la NOM-005-ASEA-2016 indica que las estaciones de servicio deben contar con dispositivos herméticos para controlar los vapores de gasolina durante la descarga de los auto-tanques. Sin embargo, la norma no establece parámetros ni métodos de prueba. Actualmente la hermeticidad de estos dispositivos se evalúa indirectamente en la prueba anual de hermeticidad en tanques. Durante la Fase II la NOM-004-ASEA-2017 establece métodos de prueba para determinar la eficiencia de los SRV y su funcionamiento continuo. Sin embargo, aún falta establecer que los datos del registro continuo de presión en tanques deben ser revisados por los laboratorios que realizan la evaluación de la conformidad.

### **Impactos durante COVID-19**

*Resumen de la presentación de la Mtra. Olivia Rivera Hernández*

La pandemia COVID-19 fue declarada por la Organización Mundial de la Salud el 11 de marzo del 2020. En México, la aparición del primer caso de fue el 27 de febrero del 2020 y en esta fecha se dieron a conocer las fases de contagio y las medidas de control que se implementarían en cada una de estas. El 23 de marzo del 2020 se declaró la fase 2 (dispersión comunitaria) y con ello comenzó la denominada Jornada Nacional de Sana Distancia (JNSD). Las acciones para disminuir las actividades de la población para evitar los contagios propiciaron la reducción del tránsito vehicular y de las actividades de negocios, industrias y escuelas. En la Ciudad de México este periodo coincidió con la temporada de las máximas concentraciones de ozono y PM<sub>2.5</sub> debido a condiciones en la cuenca del Valle de México que favorecen la formación de compuestos secundarios.

En el estudio de Sokhi et al., (2021) se analizó la información de calidad del aire y meteorología de 63 ciudades de 25 países en 7 regiones geográficas diferentes del mundo, entre ellas la Ciudad de México. Los resultados confirmaron la reducción de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10-2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y SO<sub>2</sub> durante la primera fase de la pandemia. Sin embargo, no se observaron cambios significativos en los niveles de ozono, sugiriendo un régimen de producción de ozono limitado por COVs. El ozono mantuvo excedencias a los valores guías de la OMS y a los estándares mexicanos.

En síntesis, el análisis del impacto en la calidad del aire en la Ciudad de México por la restricción de actividades durante el COVID-19 muestra algunos puntos importantes:

- Los contaminantes primarios se redujeron más que PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, y el ozono.
- El máximo promedio de SO<sub>2</sub> se redujo 44%. Durante el 2020 hubo 11 episodios con concentraciones máximas mayores a 51 ppb, mientras los cinco años previos hubo más: 21 (2015), 19 (2016), 21 (2017), 31 (2018) y 27 (2019), para 2021 hay un regreso a la normalidad con 35 episodios.
- El promedio del NO<sub>2</sub> se redujo un 69%. Los episodios de concentraciones máximas mayores a 91 ppb se redujeron a uno en el 2020, mientras los cinco años previos hubo más:

6 (2015), 20 (2016), 8 (2017), 6 (2018) y 4 (2019), para 2021 hay un regreso a la normalidad con 3 episodios.

- El promedio del CO se redujo un 52%. Los episodios de concentraciones máximas mayores a 1.6 ppm se redujeron a 10 en el 2020, mientras los cinco años previos hubo más: 79 (2015), 79 (2016), 57 (2017), 50 (2018) y 45 (2019), para el 2021, hay un regreso a la normalidad con 21 episodios.
- El promedio del PM<sub>10</sub> se redujo un 19%. Los episodios de concentraciones máximas mayores a 200 µg/m<sup>3</sup> fueron: 25 (2015), 28 (2016), 40 (2017), 19 (2018), 32 (2019), 30 (2020) y para 2021 hubo 25 episodios.
- El promedio de PM<sub>2.5</sub> se redujo un 9%. Los episodios de concentraciones máximas mayores a 71 µg/m<sup>3</sup> fueron: 44 (2015), 59 (2016), 46 (2017), 31 (2018), 37 (2019), 25 (2020) y para 2021 hubo 23 episodios.
- El máximo de O<sub>3</sub> se incrementó 17 %. El 2020 solo registró diez episodios de concentraciones mayores a 131 ppb, mientras que en los años previos: 21 (2015), 37 (2016), 21 (2017), 14 (2018), 26 (2019), y 17 en el 2021.

### Evaluación de la calidad del aire durante la contingencia por COVID-19 (Hidalgo y Toluca)

*Resumen de la presentación de la Dra. Zuhelen Verónica Padilla Barrera*

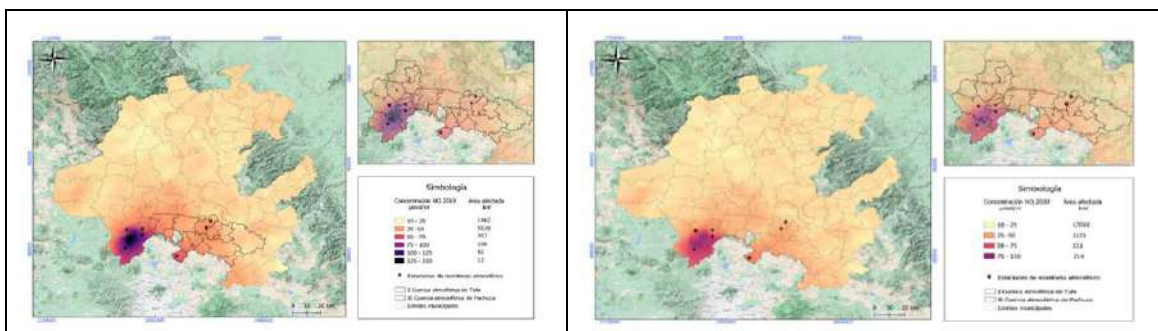
Se estimaron las reducciones de las concentraciones de NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> durante el periodo de contingencia por COVID-19 con datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo y la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Se compararon las concentraciones del 01 de marzo al 30 de junio del 2020 con años previos.

Se obtuvieron tendencias temporales, distribución de contaminantes, comparación con los límites establecido por la OMS y la NOM-020-SSA1-2014, y una estadística descriptiva. Se evaluaron además las columnas de NO<sub>2</sub> y HCHO del instrumento TROPOMI de Sentinel-5P con una resolución de 3.5 km x 5.5 km para las cuencas atmosféricas de Tula (CA-T) y Pachuca (CA-P) como se muestra en la Tabla S3.3. En la CA-T de los años 2017 al 2019 el NO<sub>2</sub> se encuentra en altas concentraciones, mientras que hay un descenso de NO<sub>2</sub> y HCHO para en el 2020 (Fig. S3.1). Sin embargo, la disminución de O<sub>3</sub> no fue proporcional a la de sus precursores (INECC, 2021).

**Tabla S3.3.** Porcentajes de reducción por contaminantes del Estado de Hidalgo

% Reducción	Red de Monitoreo Atmosférico						Datos Satelitales		
	Año	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	PM10	PM2.5	NO <sub>2</sub>	HCHO
	2017-2020	14.17	26.47	4.14	16.45	4.75 <sup>+</sup>	12.79	-	-
	2018-2020	0.80 <sup>+</sup>	17.63	4.19 <sup>+</sup>	23.46	12.97	16.32	-	-
	2019-2020	19.49	23.75	3.77 <sup>+</sup>	15.38	13.84	22.40	27.16	17

<sup>+</sup> Aumento de porcentaje



**Figura S3.1** Distribución espacial de las columnas promedio de NO<sub>2</sub> para el periodo de marzo a junio del 2019 (izquierda), y 2020 (derecha).

Los resultados para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca muestran una reducción en las concentraciones de los contaminantes en superficie durante el 2020 (INECC, 2020). Se observó además una disminución de la densidad de columna de estos contaminantes.

### **Efecto de la pandemia por COVID-19 en la concentración de Compuestos Orgánicos Tóxicos no Regulados (COTnR)**

*Resumen de la presentación del Dr. Omar Amador Muñoz*

En mayo del 2020 se midieron las PM<sub>2.5</sub> al suroeste de la Ciudad de México empleando un equipo de medición horaria llamado termodesorbedor de aerosoles-cromatógrafo de gases-espectrómetro de masas (TAG-GC-MS). Se observó que la distribución de la concentración de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) de masa molecular entre 228 y 252  $\mu\text{g mol}^{-1}$  así como dos de sus oxi-derivados (quinonas): 1-fenalenona y benzantrona, es similar a la distribución de la circulación vehicular, con dos máximos, uno alrededor de las 7 am y el segundo alrededor de la 9 pm. Los análisis de correlación confirmaron su origen primario por la combustión de la gasolina empleada en los automotores. Diferente fue el comportamiento de los HAP < 228  $\mu\text{g mol}^{-1}$ , así como de 9-fluorenona y 9,10-antraquinona. Aparentemente, estos HAP provienen de fuentes evaporativas, mientras que las quinonas sean de formación secundaria. Interesante fue la masa calculada de al menos 5 veces más abundante que las quinonas primarias. Lo que es un indicativo de la gran contribución del aerosol secundario en la masa de las PM<sub>2.5</sub>. El estudio también comparó las medianas de HAP y quinonas entre mayo del 2019 (año sin pandemia) y mayo 2020 (año con pandemia) y aunque el análisis de resultados aún está en proceso (García-Ibarra, 2022), los datos sugieren la reducción de las medianas en  $68 \pm 17\%$  (44-93%, P5-P95) de HAP y del  $77 \pm 20\%$  (52-95, P5-P95) de oxi-HAP en 2020. La reducción provocada por las restricciones a la movilidad durante la pandemia por COVID-19 mejoró la calidad del aire en términos de contaminantes orgánicos tóxicos no regulados. Este estudio es una colaboración interinstitucional entre la SEDEMA y el ICAyCC-UNAM.

## **Emisiones e incendios forestales en México**

*Resumen de la presentación de la Dra. Graciela Velasco Herrera*

El impacto ambiental como resultado de una temporada de incendios forestales pueden llegar a ser devastador y catastrófico. Además de generar repercusiones que pueden llegar a ser irreparables, abrupta e inmediata, los incendios forestales también son una fuente natural de emisiones significativas de gases y partículas (COVs, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) a la atmósfera; emisiones que llegan a afectar grandes extensiones y pueden transportarse a distancias de escala continental, repercutiendo gravemente en los ecosistemas y generando afectaciones en la salud de los seres vivos.

México tiene una superficie total de 195 millones de hectáreas, de las cuales los bosques (templados y tropicales) ocupan 65.7 millones (33.6 % del total), con una alta biodiversidad y especies maderables valiosas. México se encuentra entre los países que posee una biodiversidad y riqueza biológica, que se presentan en bosques templados, tropicales y climas semidesérticos. Este tipo de biodiversidad incluso puede llegar a ser única en el mundo, que presenta en el territorio nacional se debe principalmente por su ubicación geográfica, topografía, los climas y la intersección de dos zonas biogeográficas: la Neártica y la Neotropical. Desafortunadamente México también es uno de los países que han estado perdiendo extensiones forestales importantes, causando impactos ambientales debido a diferentes factores humanos y naturales entre estos los incendios forestales. Alrededor de 8000 incendios en México ocurren anualmente, afectando el 27% de los bosques del país, arbustos y pastizales.

Los incendios forestales se producen por diferentes causas naturales (1%) y antropogénicas (99%). El comportamiento de estos eventos está modulado por diferentes factores y su interacción, por ejemplo, los combustibles, las condiciones climáticas y la topografía. Se menciona que la relación entre factores permite el desencadenamiento de un incendio forestal, que es un evento complejo, pero evidentemente uno de los elementos más importantes es la acumulación de biomasa disponible, que al interactuar con el comburente y energía de activación inicia el fuego y puede propagarse en las zonas forestales según la región: en el centro del país, la causa es la quema de pastos y hogueras, mientras que, en el sureste, la causa principal es el método de tala y quema para preparar áreas naturales de vegetación para el cultivo.

La sequía es un fenómeno que ocasiona largos períodos de falta, escasez o retraso de las precipitaciones. Las variaciones climáticas en las escalas de tiempo decenales, centenarias a milenarias son muy importantes en el análisis de la sequía histórica que pueden relacionarse con los incendios forestales; también se ha observado que las temporadas altas de incendios forestales se asocian con la presencia del fenómeno de El Niño.

En este estudio se presenta la Irradiancia Total Solar (TSI) como un nuevo modulador dominante de los incendios forestales. Se reportan los resultados del análisis espectral multi-cruzado entre los incendios, El Niño y la TSI en el período 1970-2014. El análisis muestra que los incendios forestales de México y el fenómeno de El Niño ocurren principalmente alrededor de los mínimos del ciclo solar. Esto sugiere que los mínimos de la TSI proporcionan las condiciones climatológicas adecuadas para la ocurrencia de estos incendios forestales. A partir de estos estudios se realiza un

primer pronóstico para la próxima temporada alta de incendios forestales que inician en el próximo mínimo solar, que se llevará a cabo entre los años 2017-2020 (Velasco Herrera, 2016).

### **3.2. Reflexiones sobre expansión urbana y transportación**

*Ing. Alejandro Villegas, Mtra. Patricia Camacho, Francisco Javier Aguilar, Mtro. Alvaro Lomelí Covarrubias, Dr. Manuel Suárez Lastra, y Dra. Erika Danaé López Espinoza*

Actualizar tanto los factores de emisión como los datos de actividad todavía es una tarea fundamental que debe realizarse continuamente para mejorar las estimaciones. Especialmente para fuentes clave, como aquellas que son emisoras de COVs, el sector informal, las vialidades, los productos domésticos. Para los productos domésticos no existe una normatividad, lo cual hace que el sector industrial no tenga que reportar el contenido de COVs en estos productos. Todo esto afecta la precisión de las estimaciones.

Hay evidencia suficiente de que, durante el COVID, el sector transporte fue impactado fuertemente, al reducir sustancialmente las congestiones. El sector industrial también disminuyó sus actividades, unas industrias más que otras. Sin embargo, aumentaron las emisiones de los productos de uso personal, productos del hogar, pinturas, impermeabilizantes, basura doméstica, residuos infecciones, desinfectantes, blanqueadores, etc. Esto sugiere que los inventarios del 2020 deberían reportar un aumento de emisiones de COVs.

En una ciudad compacta con densidad media y usos mixtos de suelo, con núcleos múltiples que dependen del transporte público hay mayor rentabilidad del transporte público, eficiencia energética y menores emisiones. Hay beneficios como: menores costos de infraestructura, mejor uso de suelo, menores costos de transporte, se protege los recursos naturales, menor demanda energética y mejor calidad del aire, acceso equitativo a servicios y centros de trabajo, acceso incluyente a la movilidad.

La Megalópolis está conformada por siete entidades. Hay una disparidad en el crecimiento demográfico en los últimos 20 años, la Megalópolis ha crecido 1.3 veces desde el 2000, mientras que la tasa del parque vehicular creció 3.6 veces. Esto quiere decir que en el 2000 había alrededor de 163 vehículos por cada 1000 personas, mientras que en el 2020 este valor aumento a 453 vehículos por cada 1000 personas. La tasa de crecimiento vehicular es de 261%, mientras que la tasa de crecimiento poblacional ha sido del 26%, diez veces menor. Mención especial requiere el crecimiento explosivo del uso de motocicletas (2087% en la Megalópolis), tanto a nivel nacional como en la megalópolis. Los retos de la expansión urbana en la Megalópolis se muestran en la Tabla S3.4.

La expansión urbana implica un aumento en la distancia de los viajes, por lo que es imprescindible una planeación integral entre los usos de suelo y el transporte. Sin embargo, el impacto de la pandemia mostró que el uso de transporte privado (vehículos) regresó mucho más rápido a la normalidad que el transporte público. Esto sugiere un cambio de modo de transporte hacia el transporte privado, motocicletas y bicicletas. Es importante cuantificar estos efectos. Se necesita una nueva encuesta origen destino.

Se prevé que todas las entidades de la Megalópolis aumentaran su población, excepto la Ciudad de México. Esta expansión se traduce en cambios de uso de suelo para dar respuesta las necesidades de vivienda y transporte. Esto genera cambios en el paisaje y alteraciones climáticas.

**Tabla S3.4.** Retos en la Megalópolis con respecto a la expansión territorial

Tema	Retos
Territorio	Desarrollar políticas públicas de localización óptima de infraestructura y equipamiento (ciudades compactas con usos de suelo mixto) Desarrollo de sistemas de transporte masivo (carga y pasajeros) inter e intra-urbano Orientar el desarrollo urbano de la Megalópolis hacia la contención de su expansión (densificación del territorio)
Sociedad	Prevención y mitigación de la contaminación del aire (programa de control de emisiones vehiculares) Reducir la segregación socio espacial o residencial (pasiva) Construir una identidad megalopolitana y un escenario de participación ciudadana democrática
Gobernanza	Construcción del andamiaje Normativo para la coordinación y gobernanza de la zona metropolitana y la Megalópolis Apoyar la creación de Comisiones Megalopolitanas que operen de manera permanente
Riesgo	Gestión integral del riesgo frente a fenómenos relacionados con el cambio climático.

Impactos en las variables atmosféricas por la expansión urbana: disminución de la velocidad del viento (debido a la mayor rugosidad superficial), aumentos de temperatura en superficie y en altura, aumento de la capa límite, disminución de zonas de convergencia.

### 3.3. Reflexiones sobre el transporte regional de contaminantes

*Dr. Miguel Zavala, Dr. Luis Gerardo Ruiz Suarez y Quím. Armando Retama*

Estudiar el transporte regional de contaminantes es muy importante para coordinar medidas de control de la Ciudad de México y dentro de la Megalópolis. Muchas de las políticas públicas solo podrán maximizar su beneficio si hay coordinación entre las agencias gubernamentales de las diferentes entidades. La coordinación debe basarse en la cuantificación de las contribuciones de los contaminantes de las diferentes entidades, incluyendo su contribución (por sectores de emisión) a la formación de contaminantes secundarios. Las principales herramientas continúan siendo la aplicación de modelos de calidad del aire con apoyo de monitoreo y mediciones satelitales. Es necesario impulsar y actualizar estos estudios para la Megalópolis para responder a los nuevos retos emergentes como la expansión urbana a nivel regional y el cambio climático. Esto implica a su vez una actualización y evaluación continua de los inventarios regionales de emisiones.



Reconociendo que cada entidad es a la vez emisora y receptora de contaminantes, es necesario robustecer la coordinación metropolitana de la CAME. Las evidencias sugieren que episodios excepcionales de altos niveles de contaminantes en la región están ligados a condiciones meteorológicas particulares en conjunción con la contribución de fuentes regionales (incendios y tolvaneras). En estos casos, las acciones de gestión de la calidad del aire son ineficientes y no ayudan a reducir los niveles de contaminación. Para controlar la calidad del aire en los eventos excepcionales es necesario modificar los procedimientos en las contingencias ambientales. En este sentido, sigue siendo una necesidad imperante aumentar el monitoreo fuera de las zonas urbanas (y monitoreo de altura) que permitan identificar contribuciones de fuentes regionales.

### **3.4. Climatología urbana, meteorología, capa límite y transferencia radiativa**

#### **Introducción** (Dr. Jorge Zavala)

El objetivo de esta sesión es dar una síntesis de los estudios de modelación y monitoreo que permiten dar un mejor entendimiento a parámetros meteorológicos y su rol en la calidad del aire.

#### **La capa límite sobre la Ciudad de México y su rol en la calidad del aire**

##### *Resumen de la presentación del Dr. Jorge Luis García-Franco*

La capa de mezclado es una característica clave de la meteorología y el clima urbano (Barlow, 2014) porque determina el volumen de dispersión y la mezcla de los contaminantes, especialmente el ozono (Huang et al., 2021), y por lo tanto es un fuerte modulador de la variabilidad de las concentraciones de contaminantes horarias (Zhang et al., 2015) a escalas estacionales (Retama et al., 2015).

Las observaciones continuas a largo plazo de la altura de la capa de mezclado son clave para comprender y predecir la interacción entre la meteorología y los niveles de contaminación de la Megalópolis. García-Franco et al. (2018) describen una climatología de la capa de mezclado diagnosticada a partir del ceilómetro. El ciclo diario de la capa de mezclado es notable y alcanza un mínimo de 800 m las 8-10 am y un máximo de 2,800-3,000 m de 16-18 pm. El ciclo estacional de la capa de mezclado sigue de cerca la cantidad total de radiación de onda corta. El MLH más alto se encuentra en primavera y los valores más bajos se encuentran en invierno. Sin embargo, el ciclo estacional es relativamente pequeño debido a las variaciones relativamente débiles de la radiación de onda corta entrante en comparación con las latitudes extra tropicales.

Se necesitan múltiples técnicas, que combinen sensores remotos con observaciones de radiosondas, porque cada técnica proporciona información diferente sobre los procesos de mezcla, ventilación y dispersión. Por ejemplo, los datos del ceilómetro se pueden utilizar para determinar una estimación indirecta del contenido total de aerosoles en la capa límite (García-Franco, 2020). Quedan preguntas abiertas sobre los diferentes procesos en la capa límite que controlan la mezcla y las concentraciones superficiales de contaminantes, razón por la cual se necesitan diferentes instrumentos para comprender mejor este componente meteorológico de la calidad del aire. Por ejemplo, para entender el transporte horizontal y vertical, se requerirían múltiples ubicaciones con instrumentos operando en el valle de México.

## **La complejidad de la capa límite atmosférica sobre la Ciudad de México: un estudio mediante percepción remota**

*Resumen de la presentación de la Dra. Andrea Burgos-Cuevas*

La capa límite atmosférica (ABL por sus siglas en inglés) juega un papel importante en los procesos de mezcla y dispersión de los contaminantes del aire. La compleja topografía de la Ciudad de México incide en la dinámica de la capa límite (de Wekker et al. 2015, Serafín et al. 2018, Herrera-Mejía et al. 2019). Se ha demostrado que los mecanismos de mezcla diurna sobre terrenos orográficamente complejos se deben a procesos convectivos y a la ventilación de la montaña asociada a la circulación térmicamente desarrollada en la ladera de las montañas. Como consecuencia, los perfiles de temperatura potencial muestran con frecuencia más de una capa térmicamente estable (de Wekker et al. 2015, Burgos-Cuevas et al. 2021) y también se espera que los perfiles de concentración de contaminantes muestren decrementos en más de un nivel (como se muestra en el diagrama de Wekker et al. 2015).

Un estudio reciente identificó las capas térmicamente estables con mediciones de radiosonda y mostró que no sólo son más frecuentes en invierno, sino que también suelen ser más complejas que una sola capa estable en la Ciudad de México (Burgos-Cuevas et al. 2021). Además, se ha demostrado que la concentración superficial de contaminantes (como el PM y el CO) es mayor cuando hay múltiples capas térmicamente estables en comparación con los días en los que sólo hay una capa térmicamente estable. Estos resultados muestran que la compleja estratificación es muy probable que tenga una influencia en la calidad del aire.

Se puede estudiar el ABL *in situ* con datos de radiosondeo. Sin embargo, éstos no tienen la suficiente resolución temporal para dilucidar el ciclo diurno y los procesos en la ABL. La percepción remota ha demostrado ser una herramienta robusta para medir e investigar variables en el ABL con una resolución temporal muy alta. Aunque la percepción remota no proporciona observaciones *in situ*, es posible estimar diferentes variables que dan información complementaria sobre los procesos en el ABL. Por un lado, los ceilómetros son capaces de proporcionar el coeficiente de retrodispersión por aerosoles en altura correspondiente con la altura de la capa de mezcla (Caceido et al. 2017, García-Franco et al. 2018). Por otro lado, los lidars Doppler de viento son sistemas capaces no sólo de detectar aerosoles en la atmósfera, sino también de utilizar el desplazamiento Doppler para estimar la velocidad con la que estos aerosoles se mueven respecto al instrumento, lo cual corresponde prácticamente con la velocidad del viento. Además, los lidars Doppler de viento realizan diferentes barridos con los que es posible obtener velocidades horizontales y verticales con alta resolución temporal y espacial.

La Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) opera actualmente de forma continua un ceilómetro y un lidar Doppler. Ambos instrumentos se encuentran en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, en el gran campus de la UNAM, en el sur de Ciudad de México. Una investigación de García-Franco et al. (2018) ha demostrado que es posible estimar la altura de la capa de mezcla con datos del ceilómetro y dilucidar el ciclo de la ABL mediante esta metodología. Además, Burgos-Cuevas et al. (2022) muestra también datos del lidar Doppler para estimar la altura hasta la que tiene lugar la mezcla convectiva-turbulenta. Esto proporciona una segunda metodología que mide directamente los movimientos de mezcla turbulenta instantáneos en la ABL. Autores anteriores han señalado que las mediciones de la velocidad

vertical de los lidars Doppler pueden proporcionar una estimación más directa de la altura de la capa límite diurna (Schween et al. 2014).

La evolución diurna de la ABL sobre la Ciudad de México se investigó utilizando tanto la retrodispersión del ceilómetro como la varianza de la velocidad vertical, que se estima a partir de las mediciones del lidar Doppler. Se implementó una metodología de umbral utilizando esta varianza, tal como lo hicieron autores anteriores (Barlow et al. 2011, Schween et al. 2014). Se realizaron y compararon los valores promediados mensuales de las alturas ABLH estimadas a través de la retrodispersión y a través del umbral de la velocidad vertical. Se muestra que un ciclo diurno es claramente dilucidado por ambas metodologías, pero existe una diferencia significativa en los resultados de la altura estimada.

En las horas diurnas, la altura máxima de ABL estimada con la retrodispersión del ceilómetro es mucho mayor que la altura de ABL estimada mediante el umbral de los datos del lidar Doppler. Este es un nuevo hallazgo para el caso particular del ABL sobre la Ciudad de México e ilustra la complejidad de esta ABL. Mientras que la altura recuperada utilizando las mediciones del lidar Doppler corresponde a la capa hasta la cual la convección turbulenta es dominante, la altura estimada por retrodispersión del ceilómetro corresponde a la capa en la que los aerosoles son capaces de dispersarse, independientemente del mecanismo de mezcla que haya podido mezclarlos. De esta manera se demuestra que los mecanismos de mezcla en el ABL sobre la Ciudad de México no se restringen a la convección diurna, sino que también están influenciados por otros factores, entre los que pueden estar los vientos térmicamente desarrollados, pero se requiere mayor investigación al respecto. La presente investigación ilustra la importancia de las diferentes estimaciones por percepción remota que son útiles para entender y parametrizar mejor el ABL en una situación orográfica muy compleja.

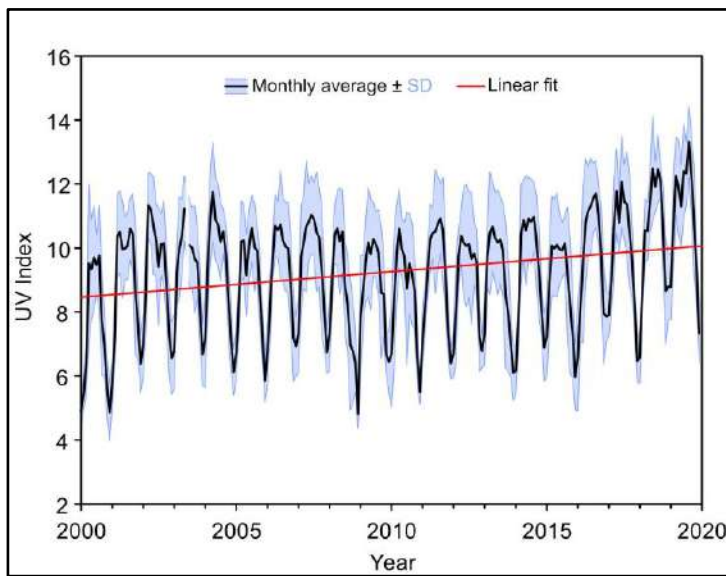
## **Impacto de la contaminación del aire en la transferencia de la radiación solar UV**

*Resumen de la presentación de la Dra. Adriana Ipiña*

La radiación ultravioleta (UV) afecta directamente a la salud humana (por la exposición de la piel y los ojos) e influye en la formación de smog fotoquímico (Taylor et al., 1988, Varotsos y Feretis, 1997; Lucas et al., 2019). Los contaminantes pueden a su vez dispersar y/o absorber la radiación UV, alterando su distribución vertical y por lo tanto, modificar la tasa de fotólisis para su propia formación. La Ciudad de México por su ubicación intertropical y su gran altura sobre el nivel del mar (2240 m snm) puede alcanzar altos niveles UV prácticamente todo el año. El Índice UV (IUV) es una medida de la radiación solar UV cuya ponderación entre 300-320 nm es similar a la fotólisis de ozono a átomos de oxígeno singlete. En el año 2020 durante la pandemia de COVID-19, se redujeron las emisiones de gases contaminantes globalmente (Bauwens et al., 2020; Venter et al., 2020). No obstante, el ozono a nivel del suelo se ha incrementado en algunas regiones debido en parte al incremento de la radiación UV (Shi et al., 2020; Le et al., 2020).

Se analizaron 20 años de mediciones del IUV y de la calidad del aire realizadas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los principales gases que absorben la componente UV, considerados en este análisis son O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Los máximos valores del IUV medidos bajo cielo despejado van desde 8 en otoño/invierno hasta más de 12 en primavera/verano, en correspondencia con los respectivos solsticios de junio y diciembre. Otros estudios han demostrado que la radiación solar UV superficial en la Ciudad de

México es atenuada significativamente por los aerosoles (Palancar et al., 2013; Castro et al., 2001). Las mediciones hechas en la estación Santa Fe (SFE) muestran sistemáticamente valores más altos del 10% en las tardes de otoño, en comparación con las otras estaciones. La estación SFE se encuentra aproximadamente 300 m más arriba que el centro de la Ciudad de México, alejada de la principal pluma de contaminación, tanto horizontal como verticalmente. La tendencia de los promedios mensuales obtenida a partir de las mediciones al mediodía solar en todas las estaciones obtuvo una pendiente de 0.9%/año a lo largo de 2 décadas (Figura S3.2).



**Figura S3.2:** Imagen ilustrativa (superior), Curva de los promedios mensuales del Índice UV (negra), su desviación estándar (área azul) y ajuste lineal (rojo) en el periodo 2000-2019, para Ciudad de México.

Por otro lado, las mediciones satelitales podrían subestimar la absorción del aerosol presente en la capa límite de la Ciudad de México, obteniendo valores de IUUV más altos. La disminución del IUUV debido a contaminantes es más severa cerca de la superficie. Esta reducción con respecto a una atmósfera idealmente limpia fue de casi 40 % en el año 2000 y de un 20 % en el 2019.

La Tabla S3.5 muestra la contribución individual de los contaminantes en el aumento del IUUV. Para este cálculo, los contaminantes se redujeron a su nivel en el año 2019, mientras que los demás se mantuvieron en los valores del 2000. La reducción del aerosol fue el factor de mayor impacto responsable del aumento del IUUV, pero más de la mitad del aumento se debió a reducciones de los gases, de los cuales la eliminación casi completa del SO<sub>2</sub> fue la más importante. El aumento total sumando cada contribución individual (1.8) concuerda con el incremento en el periodo 2000-2019.

La reducción de contaminantes durante las últimas dos décadas ha sido acompañada con un incremento del 20% del IUUV en la superficie. En el contexto de la salud humana, así como en la calidad del aire, este porcentaje es muy significativo. En áreas urbanas donde la producción de ozono aumenta proporcionalmente con la radiación solar UV y con las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), un aumento del 10 % en la tasa de fotólisis promedio en la capa límite, indica que las emisiones de COV deberán reducirse al menos un 10 % para cumplir con los mismos

objetivos, o de lo contrario, las reducciones exitosas en aerosoles conducirían a aumentos no deseados de O<sub>3</sub> impulsados por el incremento de los niveles UV.

**Tabla S3.5.** Cambio del IUV calculado con el Modelo TUV por cada contaminante: (a) agregado desde una atmósfera limpia hasta la condición del año 2000 y (b) reducido desde el año 2000 hasta 2019.

Contaminante	$\Delta$ UVI, 2000 – contaminación cero(a)	$\Delta$ UVI, 2000 - 2019(b)
AOD	-3.7	0.8
O <sub>3</sub>	-1.4	0.3
NO <sub>2</sub>	-0.9	0.3
SO <sub>2</sub>	-0.8	0.4
Total	-6.8	1.8

### Reflexiones sobre el balance radiativo

*Presentado por el Dr. Erik Velasco*

Es necesario entender las interacciones de la superficie urbana con la atmósfera para gestionar la calidad del aire y el cambio climático. Esto implica entender 1) la dinámica de los vientos dentro del cañón urbano, 2) la turbulencia en escala urbana, 3) el balance radiativo, 4) el balance energético, 5) flujos de gases invernadero, 6) evapotranspiración, 7) las emisiones, 8) las transformaciones químicas de los contaminantes. Algunos de estos elementos pueden ser estudiados con torres de flujo, perfiles verticales, y la modelación de climatología urbana. La aplicación de estudios enfocados dará información muy valiosa para entender la partición de la energía en la Ciudad de México. Después de la radiación solar, el segundo componente más importante es la cantidad de energía que se absorbe en la superficie urbana, la cual regresa a la atmósfera durante la noche para sostener la capa de mezclado. Es necesario también actualizar los perfiles verticales de los contaminantes y la interacción de la climatología urbana y el balance energético.

### Conclusiones y Recomendaciones de la Sesión 3

#### Emisiones (Ing. Hugo Landa)

Se identificaron las siguientes necesidades:

- Actualización de factores de emisión a nivel regional.
- Generar estudios periódicos de datos de actividad y de concentraciones de contaminantes por región.
- Mejorar la distribución espacial y temporal de las fuentes de emisión.
- Fortalecer las áreas técnicas de elaboración de inventarios.
- Realizar estudios sobre especiación de productos distribuidos en México.

- Generar inventarios de emisiones para modelación (coordinación con áreas de modelación).
- Mejorar las legislaciones locales.

**Expansión urbana, transporte y movilidad** (Ing. Alejandro Villegas)

- La expansión urbana incrementa las distancias de los viajes y por ende las emisiones de vehículos motorizados.
- La expansión urbana tiene impactos económicos como mayor costo de infraestructura de electricidad, agua, drenaje y vías de comunicación.
- La delimitación territorial, usos mixtos del suelo y densidades habitacionales medias son los instrumentos de planeación urbana que deben utilizarse para tener ciudades compactas y sostenibles.
- Se necesitan políticas públicas de localización óptima de infraestructura y equipamiento.
- Es necesario el desarrollo de sistemas de transporte masivo.
- Se debe fortalecer la gobernanza de las zonas metropolitanas.
- Es necesario realizar la gestión integral del riesgo ante el cambio climático.
- Incrementar la infraestructura ciclista y peatonal.
- Se necesitan estudios de origen-destino más frecuentes para planeación de infraestructura y mejorar la operación.

**Transporte regional de contaminantes** (Ing. Alejandro Villegas)

- La evidencia disponible indica que el transporte de contaminantes a nivel regional contribuye substancialmente al deterioro de la calidad del aire en las entidades de la Megalópolis.
- Mediciones en superficie, satelitales y los resultados de modelación indican que los contaminantes emitidos en las zonas urbanas contribuyen a la formación de gases y aerosoles secundarios durante su transporte a otras entidades.
- Es importante mejorar la coordinación de programas ambientales entre las agencias gubernamentales de las diferentes entidades para gestionar integralmente la calidad del aire regional.

**Climatología urbana, meteorología de la capa límite, transferencia radiativa** (Dr. Jorge Zavala).

- Los resultados de la evolución de la altura de la Capa Límite utilizando diferentes metodologías de teledetección mostraron que la tasa de crecimiento diario de la Capa Límite cambia a lo largo del año, así como las ventajas de combinar diferentes instrumentos y las ventajas de cada uno.
- Se ha identificado una tendencia creciente en la intensidad de la radiación solar ultravioleta en la ZMVM, lo que podría intensificar la producción de contaminantes secundarios, así como aumentar los riesgos para la salud humana (por ejemplo, cataratas, cáncer de piel).
- Los vacíos de investigación en la meteorología del centro de México sugieren la importancia de conocer mejor los flujos de calor latente, calor sensible y evapotranspiración, entre otras variables.

## Referencias

- Barlow, J. F., Dunbar, T. M., Nemitz, E. G., Wood, C. R., Gallagher, M. W., Davies, F., O'Connor, E., and Harrison, R. M.: Boundary layer dynamics over London, UK, as observed using Doppler lidar during REPARTEE-II, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2111–2125, <https://doi.org/10.5194/acp-11-2111-2011>, 2011.
- Barlow, J. F.: Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, 10:216-240. 2014.
- Bauwens, M.; Compornolle, S.; Stavrou, T.; Müller, J.-F.; Gent, J.; Eskes, H.; Levelt, P. F.; A, R.; Veefkind, J. P.; Vlietinck, J.; Yu, H.; Zehner, C. Impact of coronavirus outbreak on NO<sub>2</sub> pollution assessed using TROPOMI and OMI observations. *Geophys. Res. Lett.* 2020, 47, No. e2020GL087978. DOI: 10.1029/2020gl087978
- Burgos-Cuevas, A., Adams, D. K., García-Franco, J. L., & Ruiz-Angulo, A.: A Seasonal Climatology of the Mexico City Atmospheric Boundary Layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 180(1), 131-154. 2021.
- Caicedo, V., Rappenglück, B., Lefer, B., Morris, G., Toledo, D., and Delgado, R.: Comparison of aerosol lidar retrieval methods for boundary layer height detection using ceilometer aerosol backscatter data, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 1609–1622, <https://doi.org/10.5194/amt-10-1609-2017>, 2017.
- Castro, T.; Madronich, S.; Rivale, S.; Muhlia, A.; Mar, B. The influence of aerosols on photochemical smog in Mexico City. *Atmos. Environ.* 2001, 35, 1765–1772. DOI: 10.1016/s1352-2310(00)00449-0.
- De Wekker, Stephan FJ, and Meinolf Kossmann.: Convective boundary layer heights over mountainous terrain—a review of concepts." *Frontiers in Earth Science* 3, 2015: 77.
- García-Franco, J., Stremme, W., Bezanilla, A., Ruiz-Angulo, A., and Grutter, M.: Variability of the mixed-layer height over Mexico City. *Boundary-Layer Meteorology*, 167(3):493-507. 2018.
- García-Franco, J. L.: Air quality in Mexico City during the fuel shortage of January 2019. *Atmospheric Environment*, 222:117131. 2020.
- García-Ibarra (2022). Contaminantes orgánicos atmosféricos detectados con alta resolución temporal durante periodo COVID-19 vs no-COVID-19. Informe de Tesis de Maestría. Posgrado de Ciencias Químicas, UNAM. 29 p.
- Herrera-Mejía, L., & Hoyos, C. D.: Characterization of the atmospheric boundary layer in a narrow tropical valley using remote-sensing and radiosonde observations and the WRF model: the Aburrá Valley case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(723), 2641-2665. 2019.
- Huang, Y., Guo, B., Sun, H., Liu, H., and Chen, S. X.: Relative importance of meteorological variables on air quality and role of boundary layer height. *Atmospheric Environment*, 267:118737. 2021.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: Evaluación de la calidad del aire en dos cuencas atmosféricas del Estado de Hidalgo (Tula y Pachuca) durante la contingencia por COVID-019., México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 45 pp. 2021 [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/712997/136\\_2021\\_Reporte\\_Hidalgo\\_COVID\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/712997/136_2021_Reporte_Hidalgo_COVID_.pdf)

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.: Evaluación de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante la contingencia por COVID-019., México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México. 22 pp. 2020. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/618028/91\\_2020\\_Reporte\\_Toluca\\_COVID.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/618028/91_2020_Reporte_Toluca_COVID.pdf)

Le, T.; Wang, Y.; Liu, L.; Yang, J.; Yung, Y. L.; Li, G.; Seinfeld, J. H.: Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China. *Science* 2020, 369, 702–706. DOI: 10.1126/science.abb7431

Lucas, R. M.; Yazar, S.; Young, A. R.; Norval, M.; de Gruijl, F. R.; Rhodes, L. E.; Sinclair, C. A.; Neale, R. E.; Neale, R. E.: Human health in relation to exposure to solar ultraviolet radiation under changing stratospheric ozone and climate. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2019, 18, 641–680. DOI: 10.1039/c8pp90060d

Norma Oficial Mexicana NOM-005-ASEA-2016, Diseño, construcción, operación y mantenimiento de Estaciones de Servicio para almacenamiento y expendio de diésel y gasolinas.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-ASEA-2017, Sistemas de recuperación de vapores de gasolinas para el control de emisiones en estaciones de servicio para expendio al público de gasolinas-Métodos de prueba para determinar la eficiencia, mantenimiento y los parámetros para la operación.

Norma Oficial Mexicana NOM-006-ASEA-2017, Especificaciones y criterios técnicos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente para el diseño, construcción, pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento de las instalaciones terrestres de almacenamiento de petrolíferos y petróleo, excepto para gas licuado de petróleo.

Palancar, G. G.; Lefer, B. L.; Hall, S. R.; Shaw, W. J.; Corr, C. A.; Herndon, S. C.; Slusser, J. R.; Madronich, S.: Effect of aerosols and NO<sub>2</sub> concentration on ultraviolet actinic flux near Mexico City during MILAGRO: measurements and model calculations. *Atmos. Chem. Phys.* 2013, 13, 1011–1022. DOI: 10.5194/acp-13-1011-2013

Retama, A., Baumgardner, D., Raga, G., McMeeking, G., and Walker, J.: Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(16):9693-9709. 2015.

Sokhi, R. S., Singh, V., Querol, X., Finardi, S., Targino, A. C., et al. (2021). A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions. *Environment International*, 157, 106818. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>.

Schween, J. H., Hirsikko, A., Löhnert, U., and Crewell, S.: Mixing-layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: from case studies to long-term assessment, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 3685–3704, <https://doi.org/10.5194/amt-7-3685-2014>, 2014.

Serafin, S., Adler, B., Cuxart, J., De Wekker, S. F., Gohm, A., Grisogono, B., ... & Zardi, D.: Exchange processes in the atmospheric boundary layer over mountainous terrain. *Atmosphere*, 9(3), 102. 2018.

Shi, X.; Brasseur, G. P. The Response in Air Quality to the Reduction of Chinese Economic Activities During the COVID-19 Outbreak. *Geophys. Res. Lett.* 2020, 47, No. e2020GL088070. DOI: 10.1029/2020gl088070.



Taylor, H. R.; West, S. K.; Rosenthal, F. S.; Muñoz, B.; Newland, H. S.; Abbey, H.; Emmett, E. A. Effect of Ultraviolet Radiation on Cataract Formation. *N. Engl. J. Med.* 1988, 319, 1429–1433. DOI: 10.1056/NEJM198812013192201

Varotsos, C.; Feretis, E. Health effects on human eye resulting from the increased ambient solar ultraviolet radiation. *Toxicol. Environ. Chem.* 1997, 61, 43–68. DOI: 10.1080/02772249709358473

Velasco Herrera, G. (2016). Mexican Forest Fires and their decadal variation. *Advances in Space Research*, 58, 2104-2115. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.030>.

Venter, Z. S.; Aunan, K.; Chowdhury, S.; Lelieveld, J. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2020, 117, 18984–18990. DOI: 10.1073/pnas.2006853117

Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q., and Hu, X.-M.: Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in china. *Environmental research*, 140, :242-254. 2015.

## RESUMEN DE LA SESIÓN 4

### QUÍMICA ATMOSFÉRICA

Durante la cuarta sesión del taller los participantes discutieron el estado actual del conocimiento sobre la química atmosférica a través de los siguientes temas: 1) fotoquímica urbana y regional, 2) modelos de calidad del aire, e 3) impactos de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica. Las preguntas clave que se discutieron se muestran en la Tabla S4.1.

**Tabla S4.1.** Temas y preguntas clave discutidas en la Sesión 4: “Química Atmosférica”

Subtemas	Preguntas clave
Fotoquímica urbana y regional	<p>¿Ha cambiado la producción de ozono en la Megalópolis?</p> <p>¿En qué sectores de la ciudad se produce ozono en regímenes sensibles a COVs o NOx?</p> <p>¿Hay transiciones estacionales, semanales y diurnas entre regímenes químicos?</p> <p>¿Cómo evolucionan los radicales OH (hidroxilo) e hidroperoxilo (HO<sub>2</sub>) a lo largo del curso diurno? ¿Cuál es la reactividad OH actual (el tiempo de vida inverso del radical OH) dentro del núcleo urbano y la región circundante?</p> <p>¿Cómo influye la química nocturna en la calidad del aire del día siguiente?</p> <p>¿Qué mecanismos controlan la formación de aerosoles inorgánicos y orgánicos de origen secundario?</p> <p>¿Cuál es el esquema correcto para simular la evolución de la capa límite durante contingencias ambientales?</p> <p>¿Hay contaminantes emergentes no contabilizados aún en los procesos fotoquímicos?</p> <p>¿Cuál es el rol de las fuentes emergentes de COVs en la formación de compuestos secundarios?</p> <p>¿Cuál es el impacto del aumento observado en la temperatura en la química atmosférica?</p> <p>¿Ha cambiado la producción de ozono en la Megalópolis?</p> <p>¿En qué sectores de la ciudad se produce ozono en regímenes sensibles a COVs o NOx?</p> <p>¿Hay transiciones estacionales, semanales y diurnas entre regímenes químicos?</p>

Subtemas	Preguntas clave
Modelos de calidad del aire	<p>¿Cuál es el esquema correcto para simular la evolución de la capa límite durante contingencias ambientales?</p> <p>¿La parametrización del dosel urbano refleja adecuadamente la heterogeneidad de la ciudad?</p> <p>¿Los mecanismos químicos utilizados por los modelos actuales explican adecuadamente la reactividad atmosférica y la producción de radicales, especies intermedias y secundarias?</p> <p>¿Qué tan bien se representa la conversión de gas a partículas en los modelos de la ZMVM?</p> <p>¿Qué tan bien funciona el modelo de pronóstico actual?</p>
Impacto de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica	<p>¿Se requiere de una parametrización diferente para mejorar el pronóstico durante los episodios de contaminación?</p>

A continuación se muestran los resúmenes de las presentaciones y discusiones durante la Sesión 4 del taller.

#### 4.1. Fotoquímica urbana y regional

##### **Introducción a la química atmosférica** (Dr. Miguel Zavala y Dr. Erik Velasco)

Las reacciones de los compuestos orgánicos volátiles, COVs, con los oxidantes radicales como el hidroxilo, OH, son claves para la remoción de los contaminantes. Las reacciones del OH con gases traza producen radicales hidroperoxilos y peroxilos, HO<sub>2</sub> y RO<sub>2</sub>, los cuales son reciclados a OH cuando reaccionan con NO. La oxidación de los COVs continúa a su vez en ciclos similares produciendo carbonilos, peróxidos y otros compuestos. La formación de ozono y la remoción de contaminantes están íntimamente ligadas a la formación de material particulado (PM) porque los productos de la oxidación de COVs tienden a ser compuestos de baja volatilidad que producen compuestos orgánicos secundarios o SOA.

La formación de PM es compleja porque involucra continuos balances de masa y energía entre bases y ácidos orgánicos e inorgánicos, como el ácido sulfúrico, clorhídrico y el amoníaco que ocurren en las interfaces gaseosas, líquidas y sólidas para formar nitratos, sulfatos, y cloruros. Además de los compuestos orgánicos, son claves el material carbonáceo conocido como carbono negro o elemental, y los compuestos llamados *crustals*. Otra ruta importante para la formación de nitratos es a través de N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y HNO<sub>3</sub> vinculados a los niveles de NO<sub>2</sub>. Los compuestos radicales dirigen las rutas de oxidación en la atmósfera. El OH es el más importante y sus principales rutas de formación son a través de la fotólisis de ozono, del HONO y de algunos COV, como los

aldehídos. Es muy importante conocer los niveles de estos radicales para entender la formación de ozono y PM.

La química nocturna está íntimamente ligada a la química diurna. Por la noche, la radiación solar desaparece y por tanto la fotólisis no es una ruta activa, pero la química es gobernada por el  $\text{NO}_2$ , el  $\text{NO}_3$  y el  $\text{N}_2\text{O}_5$ . El  $\text{NO}_3$  es un radical clave en la química nocturna porque determina los niveles de nitrógeno en la fase gaseosa a través de su rol en la formación de  $\text{N}_2\text{O}_5$  y porque oxida los compuestos orgánicos para la formación de nitratos orgánicos de baja volatilidad que contribuyen a la formación de nitratos en PM. Aunque el OH es más reactivo que el  $\text{NO}_3$ , durante la noche las concentraciones de  $\text{NO}_3$  son mucho más altas que las de OH, por lo cual es substancial la cantidad de COVs que pueden ser oxidados en la noche. Los productos de estas reacciones tienden a ser nitratos orgánicos multifuncionales que contienen grupos de alcohol, carbonilos o peróxidos. La química del HONO es muy importante para entender los balances de radicales debido a su fotólisis rápida por la mañana. Sin embargo, los detalles de la formación de HONO a través de superficies acuosas y  $\text{NO}_2$  todavía no se conocen muy bien.

Una ruta nocturna adicional para la formación de nitratos es a través de la reacción del  $\text{N}_2\text{O}_5$  en partículas inorgánicas acuosas y gotas de agua por medio de una hidrólisis para producir  $\text{HNO}_3$ . El ácido nítrico es típicamente neutralizado con el amoníaco disponible en el ambiente, removiendo así efectivamente  $\text{NO}_x$  de la atmosfera. Hay otros mecanismos relevantes de la química heterogénea del  $\text{N}_2\text{O}_5$  con el  $\text{ClNO}_2$ , porque es muy estable en la noche, pero probablemente no sean importantes en el contexto de la ZMVM.

## **Procesos fotoquímicos y sus variaciones en la Ciudad de México**

### *Resumen de la presentación del Dr. Bernhard Rappenglueck*

Las únicas mediciones de radicales en la ZMVM se realizaron hace 20 años (Lei et al., 2009; Volkamer et al. 2010). Es necesario actualizar la información de radicales en la ZMVM. En particular, la fotólisis de HONO es una fuente importante de OH por la mañana, mientras que la fotólisis de HCHO actúa predominantemente alrededor del mediodía y la fotólisis de  $\text{O}_3$  durante el resto del día. Es necesario actualizar la información de HONO y HCHO en la ZMVM. Los procesos fotoquímicos en la ZMVM son impulsados por las altas emisiones y por la alta radiación ultravioleta (UV) debido a la gran altitud y la baja latitud de la Ciudad de México. Un estudio reciente muestra que la recirculación de masas de aire y los procesos de formación de ozono están restringidos a la capa límite urbana de la ZMVM (Osibanjo et al., 2021, 2022).

Desde 1990 las estrategias de control de la calidad del aire llevaron a una reducción considerable de  $\text{O}_3$  y sus precursores hasta 2006 (Velasco et al., 2021). Si bien los niveles de precursores disminuyeron levemente desde entonces, el  $\text{O}_3$  y los niveles de partículas han permanecido casi sin cambios o al alza (Velasco y Retama, 2017). Los niveles de PAN han disminuido sustancialmente desde valores de dos dígitos a finales de los 90s a menos de 10 ppb en 2003 y 2006 (Marley et al., 2007; Rappenglueck et al., 2007), lo que refleja cambios significativos en las emisiones de COV. Los valores recientes de PAN están cerca de 5 ppb (Carrasco-Mijarez et al., 2020), aproximadamente la misma magnitud que en 2006. Anteriormente Blake y Rowland (1995) encontraron altos niveles de alcanos C3-C4 debido a las emisiones de Gas Licuado de Petróleo (GLP) y la composición de los COV y su capacidad de oxidación cambiaron (Vega et al., 2000;

Mugica et al., 2002). Mientras que Garzón et al. (2015) encontraron que el propileno tenía el mayor potencial de formación de ozono hasta 2011, seguido por el tolueno.

Jaimes Palomera et al. (2016) reveló reducciones de alcanos ligeros y aromáticos en comparación con los datos recopilados una década antes, pero notó un aumento de alquenos por las emisiones del tráfico. Zavala et al. (2020) identificaron cambios temporales y espaciales en la reactividad de COV-OH. Dentro del núcleo urbano de MCMA, la reactividad de COV-OH disminuyó en un 50 % entre 2003 y 2018, mientras que las regiones norte y sur no experimentaron muchos cambios. Los alcanos continúan siendo los principales contribuyentes a la reactividad VOC-OH, aunque las contribuciones de los aromáticos y los alquenos disminuyeron. Un estudio reciente (Akther et al., 2023) de un episodio severo de O<sub>3</sub>, sugiere que el etileno, propileno, m/p-xileno, isopreno, propileno y tolueno son altos formadores de ozono.

Mientras Mao et al. (2010) encontraron un cambio diurno de un régimen de NO<sub>x</sub> a uno de P(O<sub>3</sub>) limitado por VOC, Zavala et al. (2020) dedujeron una dependencia espacial de P(O<sub>3</sub>). De hecho, los datos satelitales (Vazquez-Santiago et al., 2021) revelan una variabilidad espacial y estacional del régimen de COV/NO<sub>x</sub> en 2006 que eventualmente cambió a un régimen limitado en gran medida de COV hasta 2016. Durante aproximadamente el mismo período de tiempo, Ipiña et al. (2021) detectaron un aumento de la radiación UV a partir de 2016, lo que constituye otro cambio crítico.

Las observaciones recientes indican: (i) un aumento en los valores promedio mensuales de O<sub>3</sub> desde 2015, (ii) una disminución en los niveles de precursores de O<sub>3</sub>, (iii) un cambio a un régimen de P(O<sub>3</sub>) limitado por VOC, y (iv) un aumento de la radiación UV. Para comprender los cambios recientes de los procesos fotoquímicos en la ZMVM, se recomienda enfáticamente realizar nuevas mediciones de radicales y el análisis de las emisiones de carbono orgánico reactivo emergentes de productos químicos volátiles, compuestos orgánicos intermedios y semi-volátiles junto con estudios de modelado de estrategias de control de emisiones.

## **Aerosoles atmosféricos en la Ciudad de México, una actualización sobre su formación y propiedades**

*Resumen de la presentación de Quím. Armando Retama y Dr. Erik Velasco*

Los datos disponibles por Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) muestran una sensible disminución en los niveles de PM<sub>2.5</sub> entre 2004 y 2010. Sin embargo, desde 2010 no se ha observado una tendencia clara en donde las concentraciones promedio anuales oscilan entre 13 y 36 µg m<sup>-3</sup>, superando el valor límite de la Norma Oficial Mexicana (NOM) de 10 µg m<sup>-3</sup>. El promedio de 24 horas supera ocasionalmente el valor límite de la NOM de 41 µg m<sup>-3</sup>, con valores horarios que pueden registrar concentraciones máximas que superan los 50 µg m<sup>-3</sup>. Las propiedades químicas y físicas de las partículas en el aire en la Ciudad de México fueron ampliamente investigadas como parte de campañas intensivas de campo realizadas en 1997, 2003 y 2006 (Doran et al., 1998; Molina et al., 2007; Molina et al., 2010). Los programas actuales de calidad del aire se basan en los hallazgos de tales campañas. En los últimos años se han realizado estudios para actualizar la información sobre las características químicas del aerosol mediante espectroscopía de masas (Guerrero et al. 2017; Salcedo et al., 2018).

Con el objetivo de mejorar el conocimiento sobre el origen, la composición química y las propiedades ópticas de los aerosoles, así como para obtener información sobre los patrones estacionales y el comportamiento durante eventos particulares (por ejemplo, quema de pirotécnica, incendios forestales regionales, anomalías meteorológicas), la Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México equipó un laboratorio con un conjunto de instrumentación en línea para monitorear algunas de las propiedades químicas y físicas de los aerosoles, como parte del proyecto AERAS (AERosoles AtmosféricOS). A continuación, se listan algunos de los hallazgos de dos campañas una realizada en noviembre de 2015 y marzo de 2016 sobre la composición de los aerosoles, y otra en junio 2017-junio 2019 enfocada al estudio de las propiedades ópticas (Retama et al., 2022).

- Las partículas con diámetros aerodinámicos menores a  $1 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) contribuyeron con el 76% a la masa de las  $\text{PM}_{2.5}$ .
- La composición de las  $\text{PM}_{10}$  estuvo dominada por material carbonáceo con un aporte de 62%, el restante 38% correspondió a especies inorgánicas.
- En el material carbonáceo, las partículas orgánicas contribuyeron con el 53% a la masa de  $\text{PM}_{10}$ , mientras que el carbono negro (equivalente) con el 14%.
- Dentro de la fracción inorgánica las especies dominantes fueron nitrato (15%), sulfato (14%) y amonio (8%).
- Los aerosoles orgánicos secundarios contribuyeron con alrededor del 67% de la masa de la fracción orgánica, mientras que los aerosoles orgánicos primarios, asociados a las emisiones vehiculares, representaron alrededor del 16%.
- La atmosfera de la Ciudad de México es rica en amoníaco, por lo tanto, en la fracción inorgánica de las partículas, el sulfato y el nitrato se encuentran neutralizados principalmente por el ion amonio.
- Durante la noche más del 70% del nitrato se encuentra en la fase particulada, sin embargo, puede disminuir hasta el 50% durante las horas de mayor temperatura. La abundancia de amoníaco en la atmósfera hace que el 81% del amonio se encuentre en la fase gaseosa. Esta abundancia contribuye a una acidez moderada de los aerosoles con un pH de 3.3.
- Los aerosoles orgánicos contribuyeron con un 68% a la dispersión de la luz, seguidos del sulfato de amonio con 19% y el nitrato de amonio con el 13%.
- El carbono café contribuyó con un 22% a la absorción de luz en 370 nm en la Ciudad de México.
- Los compuestos orgánicos representan casi la mitad de la masa de las  $\text{PM}_{10}$ , existe poca información sobre su composición y origen. La fracción orgánica influye significativamente en las propiedades ópticas y radiativas de las partículas. Se sabe poco sobre los equilibrios entre los componentes (orgánicos e inorgánicos) presentes en las fases particulada y gaseosa del aerosol.

#### *Comentarios del Dr. Ricardo Torres*

Desde el punto de vista de más y mejores estudios de monitoreo, hemos descuidado el estudio de los óxidos de nitrógeno. Todavía seguimos interpretando la química con datos de analizadores

comerciales que muchas veces no tienen la suficiente sensibilidad para interpretar correctamente los procesos químicos alrededor de las especies  $\text{NO}_x$ . Con respecto a las necesidades de monitoreo de COVs, hay que priorizar las especies carbonilos porque son una parte muy importante en la formación de radicales y hay que actualizar esa información. Por ejemplo, el efecto de los aditivos oxigenados en las gasolinas en su contribución a carbonilos en la atmósfera debe ser investigado.

#### **4.2. Modelos de calidad del aire (modelos meteorológicos, fotoquímicos, pronóstico)**

*Comentarios del Dr. Alberto Mendoza*

Con respecto a sobre si los modelos explican adecuadamente la reactividad atmosférica en la ZMVM, esta es en sí misma una pregunta de investigación que debe abordarse con aplicaciones del modelo, pero pasados en observaciones. Podemos considerar que, para propósitos de política pública y estrategias del control de ozono, el entendimiento actual de los mecanismos en la fase gaseosa es suficientemente robusto, principalmente en condiciones en donde los niveles de PM son bajos. Los modelos reducidos de mecanismos de reacciones en fase gaseosa pueden entonces ser muy útiles en esas condiciones. Otro asunto importante es entender las interacciones entre los diferentes módulos que componen un modelo complejo de calidad del aire. Si bien existen módulos de partículas suspendidas y módulos en fase gaseosa, el acoplamiento entre esos módulos no es el adecuado y debe mejorarse. Por ejemplo, en la química del sulfato se utiliza un proceso de nucleación y en la química orgánica se utiliza un proceso de condensación y la interacción y retroalimentación entre estos módulos debe mejorarse. Finalmente, todavía hay retos para representar mejor las complejas interacciones de balances de energía y el dosel urbano en los modelos.

*Comentarios del Dr. Jorge Zavala*

La UNAM ha trabajado junto con otras instituciones en la modelación de las condiciones meteorológicas para hacer investigación, así como para hacer sistemas de pronósticos y de alertas. Entender el desarrollo de los procesos meteorológicos es fundamental para analizar la contaminación del aire. La utilización de modelos acoplados para estudiar la calidad del aire puede hacerse con modelos de tipo lagrangiano para entender la conectividad y realizar pronósticos. Es muy importante continuar estudiando los efectos de las diferentes configuraciones en los modelos sobre la cobertura y uso de suelo, la topografía, turbulencia, capa límite, radiación solar, y la resolución horizontal y vertical en el modelo. El objetivo debe ser mejorar la representación de los procesos en el modelo. Estas mejoras son claves para aumentar la capacidad de pronósticos y alertas en los modelos. En México hay experiencia e infraestructura de modelación que puede ser utilizadas para abordar estos problemas.

*Comentarios del Dr. Marco Mora*

En relación sobre la parametrización del dosel urbano, sabemos que dentro de las ciudades el dosel urbano presenta diferentes características: conglomerados de edificios de alturas bajas, medianas y altas, formación de cañones urbanos, parques. Esta diversidad complica la representación correcta de los efectos energéticos y dinámicos en los modelos de calidad del aire. Además de la geometría urbana, las parametrizaciones deben incluir los efectos radiativos, rugosidad, reflectividad, emisividad, calor latente, calor sensible, evapotranspiración y almacenamiento de aguas, etc. Por tanto, se necesitan esquemas de parametrización avanzados para simular la

retroalimentación entre el dosel y la atmósfera, y con ello obtener resultados que puedan ser útiles como herramientas de apoyo en la planeación urbana y sostenibilidad. Un reto adicional de estas parametrizaciones son las diferentes escalas espaciales a las que deben de aplicarse de acuerdo a la resolución de los modelos.

#### *Comentarios del Dr. Víctor Almanza*

Sobre los mecanismos químicos utilizados en los modelos de calidad del aire, algunos de ellos tienden a sobrestimar el ozono debido a su manejo de la cinética del ácido nítrico. Esto representa la introducción de incertidumbres en la fase gaseosa que afectan también la formación de compuestos orgánicos secundarios. Otra parte importante de los mecanismos de reacción es la manera en que resuelven la química de los compuestos aromáticos. Otro reto adicional es la química heterogénea, la cual todavía no está adecuadamente incluida en los mecanismos químicos. Un ejemplo es la interacción de  $\text{NO}_2$  en superficies para la formación de HONO, lo cual puede afectar los balances de radicales OH. Con respecto a los esquemas de capa límite, muchos de ellos están fijos en su parametrización con respecto a otros módulos que deben utilizarse. Se debe por tanto investigar que esquemas son los más adecuados de acuerdo a la época del año.

#### *Comentarios de la Mtra. Alejandra Margarita Méndez Girón*

El SMN apoya a la CAME con información meteorológica y climatológica para la prevención de contingencias ambientales. La información incluye análisis de parámetros de superficie, de altura, radiosondeos, imágenes de satélite, radar, detección de rayos y productos de modelos numéricos de pronóstico. Además, realiza la vigilancia de sistemas meteorológicos de corto plazo para la Megalópolis. Entre los parámetros que se consideran es el estado del cielo, el pronóstico de lluvia, temperatura máxima y mínima, viento medio y rachas. Los pronósticos a corto plazo ayudan a dar seguimiento a las condiciones atmosféricas, cada hora o cada tres horas. El radiosondeo es la principal herramienta para conocer la estabilidad atmosférica midiendo presión, temperatura, viento y humedad. Mediante estas variables cada doce horas se determinan las condiciones termodinámicas de la atmósfera, lo cual es determinante para los niveles de contaminantes atmosféricos por su influencia en inversiones térmicas y estructura vertical. Con la información satelital, el SMN ayuda a la detección de incendios forestales, identificación de focos de calor y detección de áreas con humo y pronóstico del viento.

### **4.3. Impacto de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica**

#### **Estimación del efecto regional por variación de emisiones en los niveles de ozono y $\text{PM}_{2.5}$ en la Megalópolis durante el confinamiento**

##### *Resumen de la presentación del Dr. Víctor Almanza*

A pesar de los desafíos derivados de la pandemia de COVID19, las actuales medidas de confinamiento a nivel mundial aún representan una oportunidad única para el desarrollo y evaluación de medidas de mitigación destinadas a reducir la contaminación del aire. En México, el confinamiento coincidió con periodos de alta temperatura e intensa radiación solar, lo que puede resultar en episodios de ozono y emisiones de quema de biomasa. Durante el confinamiento, de entre todos los sectores de emisiones, las emisiones móviles mostraron reducciones en todo el mundo, lo que contrastó con aumentos marcados en la movilidad residencial. Sin embargo, algunos



sectores emisores fueron considerados esenciales en México durante todo el confinamiento. Específicamente, la actividad de generación de energía, construcción y parte de la industria petrolera se mantuvieron prácticamente sin cambios. Después de las 3 Fases principales declaradas por las autoridades, se decretó el periodo de la Nueva Normalidad (NN) que comenzó el 1 de junio de 2020 y consistió en una reapertura gradual de las actividades no esenciales.

El objetivo de esta ponencia fue mostrar algunos resultados sobre la contribución regional de la reducción de emisiones sobre los niveles máximos diarios de ozono y partículas finas en el área de la Megalópolis (CAME), en el centro de México, durante el periodo con mayor número de incendios y del inicio de la NN. El trabajo está basado en un artículo que está en preparación.

La Fase 3 de confinamiento coincidió con el mayor número de incendios registrados en toda la región de la Megalópolis. Con base a las observaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la SEDEMA de la Ciudad de México, algunos máximos regionales de ozono y  $PM_{2.5}$  se registraron en los días con mayor número de incendios. En esta presentación se mostraron los resultados para el periodo del 15 al 21 de mayo de 2020. Se utilizó el modelo WRF-Chem con dos dominios anidados. Las emisiones del caso base listas para modelación se construyeron utilizando el Inventario Nacional de Emisiones de México del año 2016. El inventario global FINN (Wiedinmyer et al., 2011) se utilizó para representar las emisiones de incendios. La reducción de emisiones de fuentes móviles para la Ciudad de México se construyó utilizando los datos oficiales de la SEMOVI que se basaron en datos de TomTom (SEMOVI, 2021). Para las otras zonas metropolitanas de la Megalópolis, la reducción para todos los sectores de emisión se basó en los factores de ajuste del inventario global CONFORM (COVID *adjustment Factor for emissions*) (Doubria et al., 2021). Asimismo, se utilizó el método de Separación de Factores (Stein and Alpert, 1993) para aislar el impacto de un factor, en este caso de incendios, de su interacción con los otros factores, principalmente el de la reducción significativa de emisiones por el confinamiento.

Entre los principales resultados se encontró que el efecto conjunto y simultáneo de las emisiones de incendios y de la reducción significativa de emisiones, tuvo un comportamiento heterogéneo en la concentración de ozono y partículas finas en toda la Megalópolis durante la Fase 3. Se observó una tendencia a un ligero incremento en los niveles de ozono y a un incremento más visible en  $PM_{2.5}$  en algunas zonas metropolitanas. En el caso de la ZMVM, se observó que la interacción de los dos efectos propició una ligera disminución en los niveles de ozono y un incremento en los niveles de partículas. Este comportamiento fue más marcado en la región industrial de Tula y sus alrededores y en las zonas metropolitanas de Puebla y Tlaxcala. En cambio, a pesar de que la ZMVM presentó aumentos localizados en los niveles de ozono durante la NN, en general se observó un ligero decremento en los niveles de ozono y una mayor disminución en los niveles de partículas, especialmente en los estados de Puebla, Tlaxcala y el noreste de Hidalgo.

Asimismo, se observó que el efecto conjunto de estos dos factores en los regímenes químicos tendió a disminuir la proporción  $HCHO/NO_y$  en toda la Megalópolis durante la Fase 3 y durante la NN tendió a aumentar este cociente. Para el escenario del confinamiento más incendios, se observó que la zona industrial de Tula y el norte de la ZMVM tuvieron valores muy similares con tendencia a condiciones delimitadas por VOCs. Al estimar la contribución solamente de los incendios, se observó que todas las zonas metropolitanas presentaron un incremento generalizado

en el máximo diario de ozono y partículas finas en la Fase 3, particularmente las zonas metropolitanas de Puebla y Morelos.

Los resultados sugieren que las emisiones de incendios pudieron enmascarar el efecto de las reducciones por el confinamiento. Con base en lo anterior, se sugiere considerar una perspectiva a nivel de Megalópolis para el diseño de políticas encaminadas a mejorar la calidad del aire en la región, en particular el efecto en y de los regímenes químicos (COVs/NO<sub>x</sub>). Algunas medidas pueden tener efectos diferentes en las zonas metropolitanas de la Megalópolis. Asimismo, incluir las emisiones de incendios y posibles medidas para su control, debido a la contribución significativa que tienen en los niveles no solamente de ozono y partículas finas, sino también en los niveles de aerosoles orgánicos secundarios y de COVs. Finalmente, considerar el efecto conjunto de las condiciones meteorológicas y de la química altamente no lineal a nivel regional por su importancia en el desarrollo de la dinámica de formación y remoción de especies químicas.

## **Ozono y COVID-19**

### *Resumen de la presentación del Dr. Oscar Peralta*

Desde el 2018 cada año en el periodo marzo-abril se ha reducido la concentración de óxidos de nitrógeno, mientras que el ozono se ha mantenido prácticamente sin cambios. Con información del satélite TROPOMI y seccionando el área del valle de México, se observa que hay zonas donde la reducción de NO<sub>2</sub> en el 2020 con respecto al 2019 es drástica, mientras que no hay cambios en el CO. El HCHO también mostró cambios substanciales. Los cocientes NO<sub>x</sub>/O<sub>3</sub> en las estaciones de monitoreo también mostraron cambios entre 2018, 2019, y 2020. La Ciudad de México se encuentra en un régimen transitorio, lo cual dificulta controlar la formación de ozono. Se debe pensar en controlar las emisiones de COVs para evitar los escenarios que forman más rápido el ozono. El cociente HCHO/NO<sub>2</sub> cambia con las condiciones del año y las emisiones de la ciudad y tampoco son constantes, lo cual dificulta situar los escenarios.

Para desarrollar estrategias efectivas para reducir el ozono necesitamos comprender la compleja relación entre el O<sub>3</sub>, los COVs y los NO<sub>x</sub>. La falta persistente de datos sobre COVs en la Megalópolis, junto con incertidumbres en los inventarios de emisiones, especialmente para COVs, son barreras importantes para definir acciones de política de calidad del aire. La extensión y la complejidad de la zona metropolitana ahora requieren acciones de mitigación detalladas basadas en evidencia científica. El análisis superficial del Valle de México no llega a explicar completamente el comportamiento de la calidad del aire.

Es necesario ampliar el análisis a toda la región central de México. Los datos disponibles sobre movilidad de aplicaciones o servicios deben transferirse a inventarios de emisiones listos para modelar y reproducir las concentraciones de contaminantes observadas. Lo mismo debe hacerse con el consumo y suministro de energía, así como con los productos de limpieza y saneamiento. Por lo tanto, debemos aprender rápido las lecciones para tener un futuro más sostenible. La mayor parte de la Ciudad de México vive bajo un sistema limitado de COVs donde un aumento de orgánicos provoca un aumento del O<sub>3</sub>, mientras que un aumento de óxidos de nitrógeno provoca una disminución del O<sub>3</sub>. El régimen limitado de compuestos orgánicos se da con frecuencia en ambientes urbanos densamente poblados. Por lo tanto, la concentración generalmente alta de ozono ambiental en la Ciudad de México ya no se puede atribuir solo a los vehículos ni a la

composición de la gasolina. Se necesita un cambio de paradigma para extender las políticas de control de emisiones a otras fuentes o actividades.

## **Calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el confinamiento por la pandemia de COVID-19**

*Resumen de la presentación del Dr. Iván Y. Hernández Paniagua*

Se determinaron cambios en las concentraciones de contaminantes criterio en la ZMVM de febrero 2020 a febrero 2021, durante las diversas fases de confinamiento por COVID-19. Datos de concentraciones de NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub> medidos por la RAMA, en conjunto con indicadores de movilidad (TomTom) y el Indicador Mensual de la Actividad Industrial de la Ciudad de México (IMAI) se usaron para identificar correlaciones entre cambios en los niveles de contaminantes y las políticas/acciones implementadas para reducir la dispersión del COVID-19.

Se realizó un análisis de anomalías de las concentraciones de contaminantes para considerar los efectos de la estacionalidad y tendencia a largo plazo sobre los cambios observados. La tendencia y la estacionalidad fueron modeladas usando una serie de Fourier truncada (Ecuación 1), con una frecuencia de  $K=2$  y promedios diarios de cada contaminante:

$$M(t) = c_0 + c_1t + \sum_{k=1}^K [a_k \cos(2\pi tk) + b_k \sin(2\pi tk)] \quad (1)$$

en donde  $t$  corresponde a la variable tiempo en día del año y,  $c_0$  y  $c_1t$  modelan la tendencia, mientras que los componentes sen/cos capturan la estacionalidad. Las anomalías diarias de cada contaminante se calcularon restando el valor modelado obtenido con la serie de Fourier al valor promedio diario. Los datos de anomalías se dividieron en 2 grupos, de 2016 a 2019 que corresponden a un escenario base que sirve de comparación para los datos del periodo de la pandemia, que corresponden al segundo grupo (2020 y 2021). Los periodos de la pandemia se dividieron: Fase 1, Confinamiento parcial (Fase 2), Confinamiento total (Fase 3), Nueva normalidad, Estabilidad y Segundo brote. Se excluyeron del análisis realizado datos de los días con precipitación y condiciones de estancamiento con la finalidad de reducir la influencia meteorológica sobre los cambios determinados. Se realizaron pruebas estadísticas de Wilcoxon para determinar si los cambios de concentración observados fueron significativos a un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

Además de las observaciones de las estaciones de la RAMA, se utilizaron datos de satélite del instrumento OMI de NO<sub>2</sub> y HCHO (formaldehído) para construir imágenes de los periodos de estudio, utilizando de forma similar los datos de superficie. Para la construcción de las imágenes de satélite, se utilizó el método de *Oversampling*, así las mediciones representan valores de densidad de columna (moléculas/cm<sup>2</sup>) que indican la cantidad de moléculas en una determinada área. Con datos gubernamentales publicados de políticas/acciones implementadas durante el primer año de la pandemia, se construyó una escala ordinal para indicar el nivel de restricción de actividades. Dicha escala sirvió para generar correlaciones de Spearman con el objetivo de indicar el grado de asociación entre las acciones implementadas, los datos de movilidad, económicos y los cambios observados en las anomalías de contaminantes.

Las pendientes determinadas de la modelación realizada indican que NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> decrecen significativamente ( $p < 0.05$ ) a una tasa de 1.5 y 0.4 ppb año<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras que el O<sub>3</sub> no mostró una tendencia significativa. Los datos de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> sugieren una disminución

significativa ( $p < 0.05$ ) de 1.3 y 0.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ , respectivamente y para CO de  $-0.065 \text{ ppm año}^{-1}$ . Tales valores resaltan la necesidad de considerar las tendencias actuales de los contaminantes criterio en la evaluación de acciones implementadas. Los cálculos de anomalías mostraron que durante la Fase 1 de confinamiento ningún contaminante disminuyó significativamente.

Durante el confinamiento parcial (Fase 2), el CO y NO<sub>2</sub> disminuyeron significativamente ( $p < 0.05$ ) aprox. 41.5 % y 19.8 %, respectivamente, mientras que el O<sub>3</sub> aumento 24.4 % ( $p < 0.05$ ). Durante el Confinamiento total (Fase 3), se observaron disminuciones significativas ( $p < 0.05$ ) de CO (47 %), NO<sub>2</sub> (27.6 %), PM<sub>10</sub> (19.6 %) y PM<sub>2.5</sub> (23.2 %). En la etapa de la Nueva normalidad, únicamente el NO<sub>2</sub> disminuyó alrededor de 10.2 % ( $p < 0.05$ ). En contraste con las fases de confinamiento anteriores, durante la etapa de Estabilidad el CO (31.5 %) y PM<sub>2.5</sub> (7.5 %) incrementaron significativamente ( $p < 0.05$ ). Finalmente, durante el segundo brote, solo PM<sub>10</sub> (10.4 %) y PM<sub>2.5</sub> (15.4 %) mostraron disminuciones significativas ( $p < 0.05$ ).

Durante la Fase 1 y Fase 2, las columnas de HCHO mantuvieron niveles alrededor de  $2 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>, pero durante la Fase 3 las columnas se elevaron hasta  $3 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup>. El análisis realizado sugiere un aumento de niveles de compuestos orgánicos volátiles. Sin embargo, se requiere un análisis más detallado para determinar con precisión el origen de estos compuestos, ya en dicho periodo el centro del país registró una cantidad significativa de incendios los cuales pudieron haber contribuido al aumento observado. En las fases de confinamiento, se observó una disminución clara en las columnas de NO<sub>2</sub> de hasta  $2.5 \times 10^{15}$  moléculas/cm<sup>2</sup>, mientras que durante el segundo brote se observó una recuperación de las columnas de NO<sub>2</sub> hasta valores similares a los del periodo de pre-pandemia. Los resultados de datos satelitales deben considerarse con precaución, ya que, si bien muestran cambios en las columnas de contaminantes, las observaciones corresponden a un periodo de tiempo corto (13:00–14:00 tiempo local) de un fenómeno que cambia a lo largo del día.

Los análisis de correlación entre las políticas/acciones implementadas durante el primer año de la pandemia y los datos de anomalías mostraron una asociación significativa ( $p < 0.05$ ) con los cambios de CO (0.66) y NO<sub>2</sub> (0.83), en consistencia con los inventarios de emisión locales existentes. Durante la Fase 3 (20 abril a 31 de mayo de 2020), el congestionamiento vehicular según el índice TomTom disminuyó en ~82%, el flujo de usuarios también disminuyó en el metro ~70% y en los autobuses RTP ~60%, lo que puede confirmar que las disminuciones en CO y NO<sub>2</sub> son debidas a las restricciones vehiculares. Es de resaltar que en ningún otro periodo de confinamiento se observó una disminución de la movilidad similar. En el periodo de Estabilidad, el congestionamiento vehicular se recuperó un 30%, aunque solo se observó incremento en CO (31.5%).

Las correlaciones entre las políticas/acciones y los datos del índice económico IMAI globalmente, tuvieron un resultado de 0.72 ( $p < 0.01$ ) para minería, 0.48 ( $p > 0.05$ ) para Generación-transmisión de energía, 0.85 ( $p < 0.01$ ) para construcción y 0.71 ( $p < 0.01$ ) para manufactura. En la misma Fase 3, se identificó que la construcción disminuyó un 40%, seguida por la industria manufacturera con 30%. Tales restricciones coinciden con la disminución significativa de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Durante el segundo brote se implementaron medidas menos restrictivas respecto a la Fase 3. Por ejemplo, el índice TomTom muestra un nuevo incremento de movilidad que se mantuvo durante todo el mes de diciembre, lo que demuestra que un mayor número de personas circularon por las vías

principales. Esto puede explicar porque no se observaron disminuciones de CO y NO<sub>2</sub>. De hecho, las actividades económicas mantuvieron una tendencia creciente, y solo la construcción tuvo una disminución de 5 %. Lo anterior puede explicar la disminución de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en dicha fase ya que la construcción es una de las fuentes significativas en la ZMVM.

Los datos de concentración muestran que 5 de los 6 contaminantes criterio disminuyeron en al menos una fase del confinamiento exceptuando al O<sub>3</sub>. El CO y NO<sub>2</sub> comenzaron a disminuir durante el confinamiento parcial (Fase 2), mientras que el O<sub>3</sub> se incrementó solo en dicha fase. En particular, durante el confinamiento total (Fase 3) se observó la mayor disminución en las concentraciones de todos los contaminantes a excepción del O<sub>3</sub>. Al inicio de la Nueva normalidad se observó que los contaminantes no incrementaron sino hasta el periodo de Estabilidad que se observó una recuperación de la contaminación con incrementos significativos de CO y PM<sub>2.5</sub>.

Las correlaciones determinadas mostraron que las restricciones implementadas para controlar la pandemia de COVID-19 generaron cambios en los índices utilizados y en los contaminantes criterio en la ZMVM. Se observaron correlaciones positivas entre disminuciones en la movilidad con CO y NO<sub>2</sub>, que confirman a los vehículos como sus fuentes dominantes. También se identificaron cambios en los niveles de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> asociados a disminuciones de la actividad industrial. No obstante, el uso de un modelo que consideré un mayor número de parámetros permitiría identificar con mayor confianza los efectos directos de las acciones implementadas sobre los niveles de contaminantes.

#### *Comentarios del Dr. Luis Gerardo Ruiz Suarez*

Durante el confinamiento por la pandemia, hubo disminución de los contaminantes primarios derivado de la reducción de las actividades antropogénicas. En algunas ciudades también se registraron disminuciones en los niveles de ozono en algunos periodos. Las variaciones no fueron homogéneas en las diferentes ciudades ni consistentes en los diversos periodos estudiados. Aun dentro de la Ciudad de México los efectos variaron dependiendo de la ubicación donde se realizaron las observaciones. Es importante distinguir entre estos efectos los impactos resultantes de la variabilidad intrínseca de los parámetros meteorológicos, así como los efectos de la política pública.

### **Conclusiones y recomendaciones de la Sesión 4**

#### **Química atmosférica, fotoquímica urbana y regional** (Dr. Miguel Zavala y Dr. Erik Velasco)

- La P(O<sub>3</sub>) ha cambiado desde MILAGRO-2006. Para abatir la contaminación por O<sub>3</sub> debemos conocer:
  - La variabilidad espacial y temporal de la relación COV/NO<sub>x</sub>
  - El transporte local y regional de COVs y NO<sub>x</sub>
  - Las concentraciones, especiación química y emisiones de COVs
  - El comportamiento de los radicales hidroxilo (OH) e hidroperóxilo (HO<sub>2</sub>). Desde MCMA-2003 no se han vuelto a medir ambos radicales.
  - Cambios en el balance radiativo debido a la urbanización y cambio climático.

- La gestión de la calidad del aire debe considerar la química nocturna. Para ello se requieren mediciones y modelación de:
  - La formación y acumulación de HONO y carbonilos que actúan como fuentes de radicales al amanecer.
  - La formación de nitratos peroxiacilos (PAN) y otros compuestos  $\text{NO}_z$
- Los niveles y composición de  $\text{PM}_{2.5}$  han cambiado poco en 15 años. La gran mayoría de las partículas son  $<1 \mu\text{m}$  (75%) y tienen un origen secundario.
  - $\text{PM}_1$ : Orgánicos 47%,  $\text{NO}_3$  15%, BC 14%,  $\text{SO}_4$  14%,  $\text{NH}_4$  8%.  
Orgánicos: MO-OOA 21%, HOA 11%, BBOA 10%, LO-OOA 5%
  - La atmósfera es rica en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y por ende los aerosoles son moderadamente ácidos ( $\text{pH} = 3.3$ ). Una reducción (incremento) de  $\text{NH}_3$  ( $\text{SO}_4$ ) podría incrementar su acidez.
  - Extinción de luz: 65-74% dispersión, 26-35% absorción.
  - Es necesario estudiar de manera conjunta ambas fases del aerosol (gas y partícula).

**Modelos de calidad del aire, meteorológicos, fotoquímicos, pronóstico** (Dr. Agustín García)

- Se emplean modelos comunitarios que integran el consenso de la comunidad en el área (reconocer a los modelos como herramientas)
- Un modelo es útil dependiendo de la pregunta a responder:
  - Acoplados – para investigación y evaluación de políticas
  - Offline – rápidos para pronósticos
  - Lagrangianos – Para identificación de fuentes y destinos de contaminantes
  - Redes Neuronales – para pronósticos y como elementos en ensambles
  - Modelos de receptor – para identificar la contribución de fuentes en las concentraciones ambientales
- Preguntas más específicas requieren modelos más elaborados.
  - Interacciones gases-partículas, partículas-radiación, retroalimentación partículas-meteorología
- Se requiere mayor interacción entre módulos química-aerosol-química heterogénea.
  - Información de cierto módulo puede servir para retroalimentar a otros módulos.
- La investigación en el área de modelación meteorológica es fundamental para un buen pronóstico meteorológico y de calidad del aire.
- Las concentraciones ambientales dependen de la dispersión (horizontal y vertical)
- La configuración de los modelos es importante
  - Actualización de cobertura de suelo; topografía; mayor resolución vertical
- Productos de modelos útiles para la población y tomadores de decisiones
  - Generación de alertas basados en el lugar donde se tiene la información de los pronósticos
  - Inclusión de intervalos de confianza
  - Información sobre la evaluación de los pronósticos

- El empleo de conjuntos de modelos (ensambles) se requiere de mayor capacidad de cálculo.
- El uso de parametrizaciones en el dosel urbano
  - Se requiere de actualización de la información de albedo, capacidad térmica, vegetación, geometría urbana
- Influencia de evapotranspiración en la meteorología. (humedad proveniente de la vegetación actualmente no se incluye para zonas urbanas)
- Se requiere desarrollar los módulos de las reacciones heterogéneas para formación de aerosoles
  - Existe interacción entre aerosoles orgánicos y los inorgánicos con gases.
- Esquemas de PBL por época del año
  - Esquemas de desarrollo de la capa límite es diferente en invierno, lluvias o secas.
- Evaluación de la información suministrada a los modelos
  - Emisiones, datos de meteorología global, datos en superficie medidos para asimilación
  - Inclusión de emisiones biogénicas y de incendios considerando especiación local.
  - Uso de información satelital
- Los productos del SMN sirven la toma de decisiones en cuanto a eventos de contingencia ambiental
  - Proporciona información usada en modelos globales.
  - Proporciona productos que se pueden usar en calidad del aire: informes, termodiagramas, imágenes interpretadas de satélite, incendios, dispersión de humos
- Evaluación del desempeño de modelos
  - Identificación de índices estadísticos de evaluación
  - Implementación de sistemas de evaluación automática de pronósticos
- Se requiere del uso de supercómputo
  - Existe una continua actualización en el hardware, el software y los códigos.
  - Apoyarse en infraestructura existente (LNS-BUAP)
  - Financiamiento para mantenimiento de los sistemas de cálculo y almacenamiento de productos
  - Desarrollo del Laboratorio de Modelación Terrestre (meteorología, océano, calidad del aire, dispersión de emisiones volcánicas, de pólenes, capacitación en el uso y aplicaciones de super cómputo)
- Es importante la investigación en la optimización de los códigos para el desarrollo de pronósticos
- Formación de recursos humanos especializados

**Impacto de la pandemia COVID-19 en la química atmosférica (Dr. Agustín García)**

- Durante el periodo de contingencia sanitaria se observó:
  - Disminución en la actividad y con ello en las emisiones a la atmósfera
  - Disminución de NO<sub>x</sub> de forma heterogénea espacialmente en el Valle de México.

- Contribuciones de COV por incendios que incrementa al ozono
- El Valle de México se encuentra en régimen transitorio de formación de ozono por lo que las reducciones deberían enfocarse en los COV
- Reducciones de NOx inducen incremento en el ozono
- Se observó la reducción de partículas cuando se reduce la actividad industrial y manufacturera
- Se requieren de mediciones de COV para comprender mejor la química en el Valle de México y con ello desarrollar políticas de control eficientes
- Considerar las tendencias interanuales cuando se comparan concentraciones entre los diferentes años.
- Las reducciones de concentraciones de contaminantes si se mantienen podrían llegar a disminuir hasta 581 muertes al año
- Las reducciones deben ser regionales para efectos significativos
- Aprovechar los eventos que inciden en las emisiones: reducción de suministro de gasolina, paros de distribuidores de GLP, corte en el suministro de agua por mantenimiento mayor, contingencias sanitarias (COVID-19), etc.

## Referencias

ADIP, Portal de datos abiertos. (2021). Portal de datos abiertos. Gobierno de la Ciudad de México. Available online at: <https://datos.cdmx.gob.mx/> (accessed May 2, 2022).

Akther, T., Rappenglueck, B., Osibanjo, O., Retama, A., Rivera-Hernández, O. (2023) Ozone precursors and boundary layer meteorology before and during a severe ozone episode in Mexico City. *Chemosphere*, 318, 137978. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137978>.

Blake D.R., Rowland F.S. (1995): Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on Mexico City air quality. *Science*, 269 (5226), 953-956, doi: 10.1126/science.269.5226.953

Cadena, A., Child, F., Craven, M., Ferrari, F., Fine, David., Franco, J. and Wilson, M. (2020). How to restart national economies during the coronavirus crisis. McKinsey and Company: Public Sector Practice, 1-10. Available online at: <https://www.mckinsey.com/industries/public-and-social-sector/our-insights/how-to-restart-national-economies-during-the-coronavirus-crisis>

Carrasco-Mijarez N.I., Torres-Jardón R., Barrera-Huertas H.A. (2020): Correlación PAN-O3 en el suroeste de la Ciudad de México, *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 36 (4) 907-925, doi: 10.20937/RICA.53581

Doran, J.C., Abbott, S., Archuleta, J., Bian, X., Chow, J., Coulter, R.L., De Wekker, S.F.J., Edgerton, S., Elliott, S., Fernandez, A. and Fast, J.D. The IMADA-AVER boundary layer experiment in the Mexico City area. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(11), pp.2497-2508, 1998, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2497:TIABLE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2497:TIABLE>2.0.CO;2).

ECLAC (Economic Commission for Latin America and the Caribbean). (2020). Impact of COVID-19 on the United States economy and the policy response (pp. 1–30). Washington, D.C.: Alicia Bárcena and Mario Cimoli. Available online at: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45984/S2000540\\_en.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45984/S2000540_en.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



Garzón J.P., Huertas J.I., Magaña M., Huertas M.E., Cárdenas B., Watanabe T., Maeda T., Wakamatsu S., Blanco S. (2015): Volatile organic compounds in the atmosphere of Mexico City. *Atmos. Environ.*, 119, 415–429, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.014

Guerrero, F., Alvarez-Ospina, H., Retama, A., López-Medina, A., Castro, T. and Salcedo, D., 2017. Seasonal changes in the PM 1 chemical composition north of Mexico City. *Atmósfera*, 30(3), pp.243-258. <https://doi.org/10.20937/atm.2017.30.03.05>.

Hernández-Paniagua IY, Valdez SI, Almanza V, Rivera-Cárdenas C, Grutter M, Stremme W, García-Reynoso A and Ruiz-Suárez LG. (2021). Impact of the COVID-19 Lockdown on Air Quality and Resulting Public Health Benefits in the Mexico City Metropolitan Area. *Frontiers in Public Health* 9:642630. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.642630>

IPCC (International Panel on Climate Change). (2006) Guidelines for national greenhouse gas inventories. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan. [www.ipccngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_volume5/v5\\_6\\_Ch6\\_wastewater.pdf](http://www.ipccngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_volume5/v5_6_Ch6_wastewater.pdf).

IPCC (International Panel on Climate Change). (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC (International Panel on Climate Change). (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. vol. 5 Waste. IPCC National Inventories Programme, Institute for global Environmental Strategies, Hayama, Kanawa, Japan.

Ipiña A., López-Padilla G., Retama A., Piacentini R.D., Madronich S. (2021): Ultraviolet Radiation Environment of a Tropical Megacity in Transition: Mexico City 2000–2019, *Environ. Sci. & Technol.*, 55 (16), 10946-10956, doi: 10.1021/acs.est.0c08515

Jaimes-Palomera M., Retama A., Elias-Castro G., Neria-Hernández A., Rivera-Hernández O., Velasco E. (2016): Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Mexico City: Results of the 2012 ozone-season campaign. *Atmos. Environ.*, 132, 258-275, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.02.047

Lei W., Zavala M., de Foy B., Volkamer R., Molina M.J., Molina L.T. (2009): Impact of primary formaldehyde on air pollution in the Mexico City Metropolitan Area, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2607–2618, doi: 10.5194/acp-9-2607-2009.

Mao J., Ren X., Chen S., Brune W.H., Chen Z., Martinez M., Harder H., Lefer B., Rappenglück B., Flynn J., Leuchner M. (2010): Atmospheric Oxidation Capacity in the Summer of Houston 2006: Comparison with Summer Measurements in other Metropolitan Studies, *Atmos. Environ.*, 44, 4107-4115, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.013

Marley N.A., Gaffney J.S., Ramos-Villegas R., Cárdenas González B. (2007): Comparison of measurements of peroxyacyl nitrates and primary carbonaceous aerosol concentrations in Mexico City determined in 1997 and 2003, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2277–2285, doi: 10.5194/acp-7-2277-2007

Molina, L. T., Kolb, C. E., de Foy, B., Lamb, B. K., Brune, W. H., Jimenez, J. L., Ramos-Villegas, R., Sarmiento, J., Paramo-Figueroa, V. H., Cardenas, B., Gutierrez-Avedoy, V., and Molina, M. J.: Air quality

in North America's most populous city – overview of the MCMA-2003 campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2447–2473, <https://doi.org/10.5194/acp-7-2447-2007>, 2007, <https://doi.org/10.5194/acp-7-2447-2007>.

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

Mugica V., Watson J., Vega E., Reyes E., Ruiz M.E., Chow J. (2002): Receptor Model Source Apportionment of Nonmethane Hydrocarbons in Mexico City, *The Scientific World JOURNAL*, 2, 844-60, doi: 10.1100/tsw.2002.147

Osibanjo O.O., Rappenglück B., Ahmad M., Jaimes-Palomera M., Rivera-Hernández O., Prieto-González R., Retama A. (2022): Intercomparison of planetary boundary layer height in Mexico City as retrieved by microwave radiometer, micro-pulse lidar and radiosondes. *Atmos. Res.*, 271, 106088, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106088

Osibanjo O.O., Rappenglück B., Retama A. (2021): Anatomy of the March 2016 severe ozone smog episode in Mexico-City. *Atmos. Environ.* 244,117945, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117945

Peralta, O., Ortíz-Alvarez, A., Torres-Jardón, R., Suárez-Lastra, M., Castro, T. and Ruíz-Suárez, L. G. (2021). Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, Volume 761,143183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143183>

Rappenglueck B., Steinbrecher R., Forkel R., Allan J., Russell J., Grutter M., Baumgardner D. (2007): Analysis of the Mexico City Urban Plume at Altzomoni Site at 4.000 m a.s.l., American Geophysical Union, Spring Meeting, Acapulco/Mexico, 22.-27.05.2007

Retama, A., Ramos-Cerón, M., Rivera-Hernández, O., Allen, G., & Velasco, E. (2022). Aerosol optical properties and brown carbon in Mexico City. *Environmental Science: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1039/D2EA00006G>

Salcedo, D., Alvarez-Ospina, H., Peralta, O. and Castro, T., 2018. PM1 chemical characterization during the ACU15 campaign, south of Mexico City. *Atmosphere*, 9(6), p.232. <https://doi.org/10.3390/atmos9060232>

SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2021a). Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México. Gobierno de México. Available online at: <http://www.aire.df.gob.mx/default.php> (accessed May 3, 2022).

TomTom. (2021). TomTom Traffic Index. Available online at: [https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/about/](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/about/) (accessed May 2, 2022).

Vazquez-Santiago J., Inoue K., Tonokura K. (2021): Diagnosis of ozone formation sensitivity in the Mexico City Metropolitan Area using HCHO/NO<sub>2</sub> column ratios from the ozone monitoring instrument, *Env. Adv.*, 6, 100138, doi: 10.1016/j.envadv.2021.100138

Vega E., Mugica V., Carmona R., Valencia E. (2000): Hydrocarbon source apportionment in Mexico City using the chemical mass balance receptor model, *Atmos. Environ.*, 34, 4121-4129, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00496-3

Velasco E., Retama A., Zavala M., Guevara M., Rappenglück B., Molina L.T. (2021): Intensive field campaigns as a means for improving scientific knowledge to address urban air pollution, *Atmos. Environ.*, 246, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118094

Velasco, E., Retama, A., 2017. Ozone's threat hits back Mexico city. *Sustain. Cities Soc.* 31, 260-263, doi: 10.1016/j.scs.2016.12.015

Volkamer R., Sheehy P., Molina L.T., Molina M.J. (2010): Oxidative capacity of the Mexico City atmosphere – Part 1: A radical source perspective, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6969–6991, doi:10.5194/acp-10-6969-2010

Zavala M., Brune W. H., Velasco E., Retama A., Cruz-Alavez L. A., Molina L. T. (2020): Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmos. Environ.*, 238, 117747, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117747

## RESUMEN DE LA SESIÓN 5

### MEDICIONES

Durante la quinta sesión en el segundo día del taller los participantes presentaron los resultados de diferentes campañas de medición de contaminantes del aire realizadas en la Ciudad de México y otras entidades que componen la Megalópolis. Las presentaciones se organizaron en cinco temas de importancia en la gestión de la calidad del aire, para cada uno de ellos se identificaron preguntas clave como se muestra en la Tabla S5.1.

**Tabla S5.1.** Temas y preguntas clave discutidas en la Sesión 5: “Mediciones”

<b>Subtema</b>	<b>Preguntas clave</b>
Mediciones de factores de emisiones y actividades	¿Cuál es la situación de los datos de factores de emisiones y actividades de las principales fuentes en base a mediciones?
Mediciones de compuestos orgánicos volátiles	¿Qué podemos aprender de las recientes mediciones de COVs en túnel?  ¿Se observan cambios en las emisiones de COV (p.ej., biogénicos) debido al aumento de la temperatura?
Mediciones de material particulado	¿Qué podemos aprender de las recientes mediciones de PM y su composición?  ¿Cuáles han sido los últimos avances sobre las mediciones de bioaerosoles en México?
Mediciones de otros contaminantes	¿Qué sabemos sobre la medición de otros contaminantes?
Mediciones satelitales	¿Cuáles han sido los últimos avances sobre el uso de información satelital para reducir las incertidumbres en los inventarios de emisiones?  ¿Cómo pueden confluir las informaciones provenientes de observaciones satelitales, de superficie y las herramientas de modelación para generar productos útiles para la gestión de la calidad del aire?

A continuación se muestran los resúmenes de las presentaciones y discusiones durante la Sesión 5 del taller.

## 5.1. Mediciones de factores de emisiones y actividades

**Introducción** (Dr. Omar Amador y Quím. Armando Retama)

### Generalidades

- El Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) continua como la fuente más importante de mediciones en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- La investigación científica provee datos especializados para entender problemas específicos.
- La mayoría de los estudios publicados en los últimos cinco años tienen un importante sesgo geográfico.
- La mayoría de los trabajos se han enfocado en el estudio del material particulado y sus componentes.
- Las mediciones de otras especies de interés atmosférico son casi nulas (p.ej., COVs, oxidantes atmosféricos, ácidos orgánicos e inorgánicos, contaminantes emergentes, etc.)
- La mayoría de los estudios no contemplan la medición simultánea de las fases gaseosa y particulada del aerosol atmosférico.

### Material particulado, composición y propiedades

- Las partículas secundarias tienen una contribución importante en la fracción fina. Las partículas en el sur de la ciudad tienen mayor grado de oxidación que las del norte.
- La presencia de metales en PM<sub>10</sub> tiene origen principalmente geogénico, sin embargo, se han identificado contribuciones de fuentes antropogénicas.
- Las concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos generados por los vehículos a gasolina muestran decrementos en años recientes, lo que coincide con los gases criterio de combustión medidos por el SIMAT.
- Por el contrario, las concentraciones de platino, vanadio y cromo en PM<sub>10</sub> muestran clara tendencia creciente.
- Se deben realizar esfuerzos para controlar emisiones de diésel y motocicletas
- Los incendios agrícolas y forestales son fuentes local y regional de aerosoles, principalmente durante la temporada seca-caliente.
- La quema de pirotecnia es una fuente importante de aerosoles y de sus precursores durante las celebraciones de fin de año.
- La composición de los aerosoles determina sus propiedades ópticas. La fracción orgánica tiene el mayor impacto en el deterioro de la visibilidad.
- El carbono negro representa 15-20% de la fracción fina y tiene su origen en las emisiones.
- Los bioaerosoles tienen impacto directo en la salud de la población, ya que contienen entre otros microorganismos, bacterias y hongos, donde algunos son patógenos.

### Compuestos orgánicos volátiles

- Existen pocos estudios de COVs publicados en los últimos cinco años.

- Se observó el incremento en la concentración de alcanos en años recientes y el decremento en aromáticos y olefinas provenientes de vehículos ligeros a gasolina.
- Existe evidencia de cambios en las emisiones antropogénicas que han afectado la producción de ozono, P(O<sub>3</sub>) en la ZMVM. Se deben aumentar las mediciones de COVs oxigenados.
- El tolueno sigue siendo el más abundante de los BTEX en Ciudad de México y otras ciudades.
- No hay estudios sobre composición de COVs de uso doméstico, de tratamiento de aguas residuales, ni de fuentes biogénicas.

#### Contaminantes criterio

- Los informes anuales de calidad del aire son la fuente más importante sobre el comportamiento y tendencia de los contaminantes criterio.
- Los contaminantes primarios mantienen su tendencia descendente.
- Excluyendo los años de 2020 y 2021, el ozono presenta pocos cambios en sus niveles en la última década.
- Las partículas y el ozono se mantienen como los contaminantes criterio responsables del deterioro de la calidad del aire.

#### Otras mediciones

- No existe información actualizada sobre los niveles de especies oxidantes de relevancia en la química atmosférica (p.ej., OH<sup>•</sup>, HO<sub>2</sub><sup>•</sup>, NO<sub>3</sub><sup>•</sup>).
- Existe información escasa sobre las concentraciones de las especies involucradas en el nitrógeno reactivo.
- No hay información sobre la composición del aerosol orgánico secundario.
- Existe poca información sobre la composición de la emisión de fuentes específicas para su regulación.
- La medición continua de los compuestos forzadores climáticos de corta vida, que además son contaminantes del aire (i.e., carbono negro, metano), requiere de atención especial.

### **Medición de emisiones vehiculares vía sensor remoto**

#### *Resumen de la presentación del Biól. Rodolfo Iniestra*

Desde 2016 se realizan mediciones rutinarias en las entidades de la Megalópolis. La presentación se enfocó en dos aspectos importantes para la gestión: la necesidad de actualizar la NOM-167-SEMARNAT-2017, que establece los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para los vehículos automotores que circulan en las entidades federativas de la CAME, y los beneficios potenciales de vincular el Programa de Verificación Vehicular con el Programa Hoy No Circula.

El INECC considera necesario actualizar la NOM-167-SEMARNAT-2017 para lo cual será fundamental identificar los vehículos “altos emisores”, sin embargo, no existe una definición cuantitativa homologada para su designación. Por lo que el INECC propone clasificar a los altos emisores u ostensiblemente contaminantes, como aquellos vehículos cuyas emisiones se encuentran a una distancia de 1.5 veces el rango intercuartil obtenido de la distribución de los datos uvSmoke derivados de las mediciones realizadas con el sensor remoto a 3700 vehículos pesados a diésel en accesos carreteros al Valle de México, entre 2016 y 2019. Es decir, un vehículo ostensiblemente contaminante es aquel cuyo nivel de emisión medido como uvSmoke es igual o mayor a 0.3598 g de carbono/100 g de combustible. Este valor es un 28% más restrictivo que el valor actual de 0.50 g de carbono/100 g de combustible. En consecuencia, la actualización de la NOM-167-SEMARNAT-2017 tendría un beneficio importante al afectar a un mayor número de vehículos que el nivel actual.

Con respecto a los posibles beneficios de vincular los programas de Verificación Vehicular y el Hoy No Circula, se ha observado que en ciudades en donde no se aplica ambos programas la diferencia en emisiones es significativamente mayor que aquellas en donde se aplican ambos.

#### *Comentarios de la Mtra. Patricia Camacho Rodríguez*

Se sabe que los inventarios pueden estar subestimando las emisiones de diversas fuentes, por lo tanto, se requiere de una actualización constante de los factores de emisión a partir del uso de mejores tecnologías de medición. Se requiere mejorar los perfiles de emisión de fuentes emergentes como los productos de uso doméstico, la preparación de alimentos en el hogar, el uso de cosméticos y las emisiones provenientes de la preparación de alimentos en el comercio informal. Se requiere de datos sobre los perfiles de emisión para diferentes categorías y tipos de vialidades. La identificación de las principales fuentes de amoniaco a través de mediciones. Es importante que desde el gobierno se definan las necesidades de investigación para la mejora de los inventarios.

## **5.2. Mediciones de compuestos orgánicos volátiles**

### **Mediciones en túneles**

#### *Resumen de la presentación de la Dra. Violeta Múgica Álvarez*

Durante 2018 se realizaron mediciones en el túnel de Chapultepec, que corre bajo la Glorieta de Insurgentes, y en el túnel de Mixcoac. Los resultados de las mediciones en el túnel de Chapultepec se compararon con mediciones realizadas en 1998. Las concentraciones de COVs en el túnel de Chapultepec fueron 2.3 veces más altas que las medidas en el túnel de Mixcoac. Las concentraciones de COVs en el túnel de Chapultepec disminuyeron en un 69% con respecto a 1998, esto a pesar de que se observó un incremento de 2.8 en el número de vehículos en circulación dentro del túnel. La composición de alcanos pasó de 50% en 1998 a 67% en 2018. En el mismo periodo las contribuciones de los compuestos aromáticos, olefinas y acetileno se redujeron, pasando de 26% a 17%, de 16% a 12% y de 8% a 4%, respectivamente. La disminución en los compuestos insaturados y aromáticos provenientes de las emisiones vehiculares se observó también en la composición del aire ambiente, donde fue de 77%. Los COVs más abundantes en las emisiones de escape fueron el n-butano, isopentano, tolueno y etileno. Las concentraciones de COVs tóxicos (es decir, benceno, tolueno y xilenos) disminuyeron significativamente. Estos

resultados sugieren que la disminución de COVs proveniente del escape de los vehículos responde a las medidas de control implementadas en las últimas décadas, (es decir, verificación vehicular, cambio de combustibles y las mejoras tecnológicas en los vehículos).

Por otra parte, se analizó la composición y las emisiones evaporativas de 15 marcas de la gasolina (Magna y Premium) distribuida en la Ciudad de México. En términos generales, no se observaron diferencias significativas en la composición y los vapores de las diferentes marcas de gasolina. Se observó que el perfil de las emisiones evaporativas difirió del de las emisiones de escape, por ejemplo, las emisiones evaporativas contienen una tercera parte de los compuestos aromáticos y más del 10% de olefinas. Las emisiones evaporativas no dependen de la circulación de los vehículos, sino de la temperatura ambiente y la composición de los combustibles.

En términos de la reactividad de las emisiones para la formación de ozono, esta disminuyó en 64% en comparación con la estimada en 1998. El etileno, propileno, xilenos y tolueno fueron los compuestos más reactivos en las emisiones de escape, mientras que el 4-metil pentano, isopentano, 2-metilpentano y los xilenos fueron los más reactivos en las emisiones evaporativas.

## **Mediciones en aire ambiente**

*Resumen de la presentación del Mtro. Salvador Blanco Jiménez*

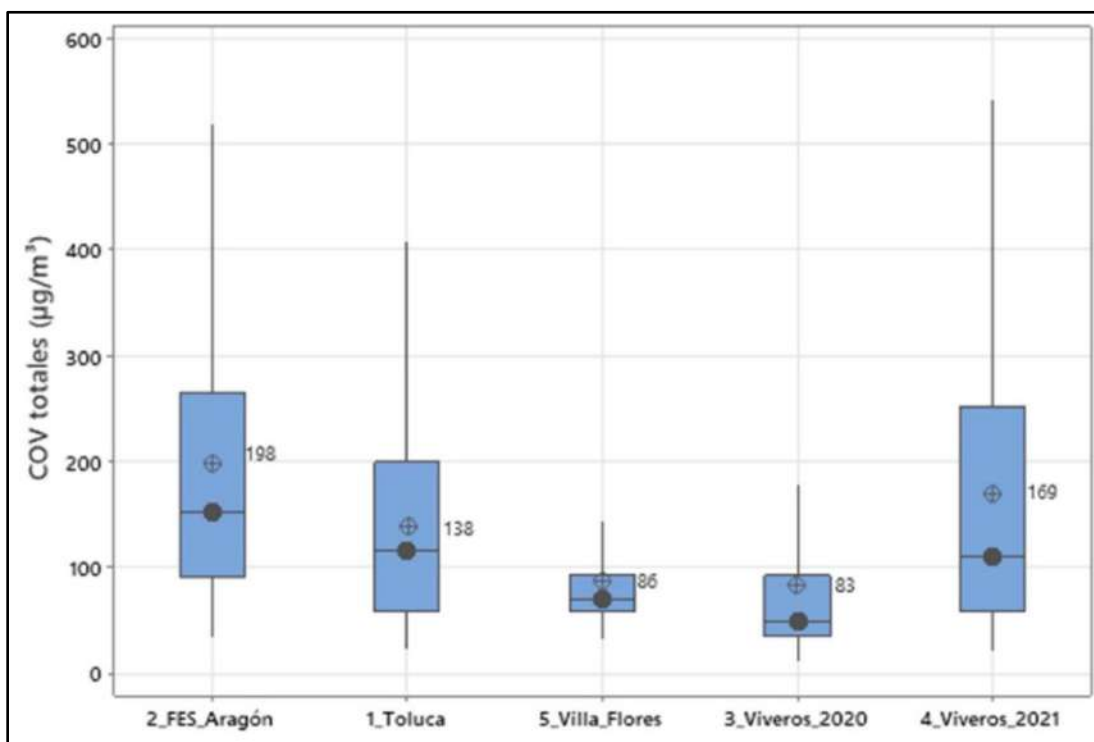
Recientemente el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en conjunto con la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME), implementaron una metodología para la medición continua de especies de hidrocarburos entre C2 a C14 basada en cromatografía de gases con detectores de ionización a la flama. A la fecha se han realizado campañas cortas en varias localidades del Estado de México: el centro de Toluca (3 a 13 diciembre 2019), la estación de monitoreo FES Aragón, en Nezahualcóyotl (20 de diciembre 2019 a 12 enero 2020), y la estación de monitoreo Villa de las Flores, en Coacalco (12 a 23 mayo de 2021). En la Ciudad de México se realizaron dos campañas de monitoreo en la sede del CENICA en los Viveros de Coyoacán (27 abril a 15 junio 2020 y 12 febrero a 12 abril 2021). Las campañas en la Ciudad de México se realizaron, la primera durante el confinamiento por la pandemia de COVID, y la segunda durante la reactivación parcial de actividades.

Los promedios de los COV totales medidos durante las diferentes campañas se encontraron entre 83 y 198  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (estimados a las condiciones estándar de presión y temperatura), como se muestra en la Figura S5.1.

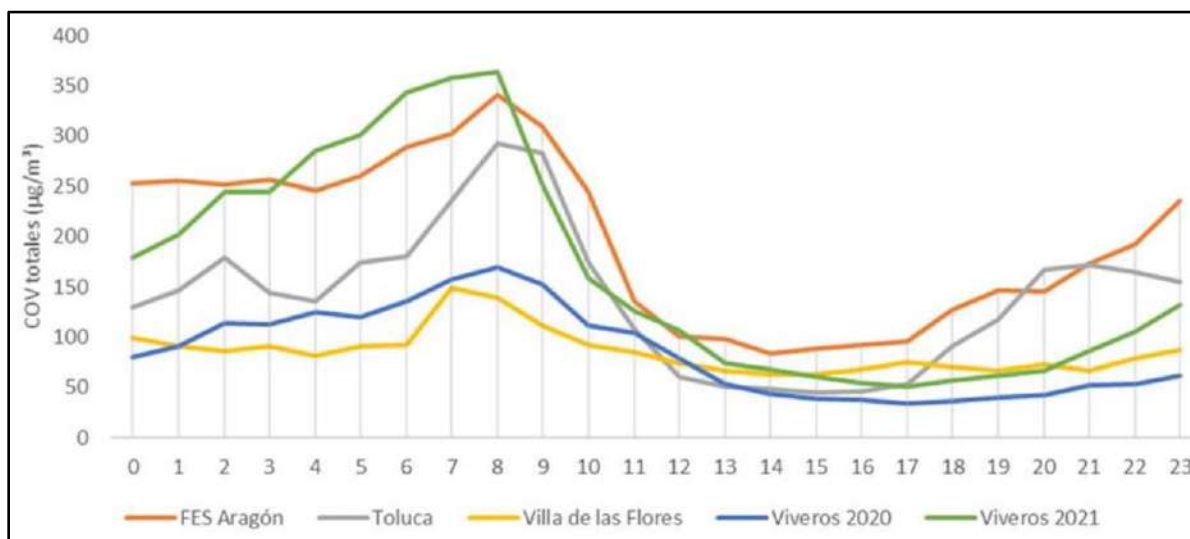
La variación horaria de los COV se caracterizó por máximos entre las 7 y 10 de la mañana, una disminución entre las 12 y 17 horas, y un segundo incremento a partir de las 18 horas al regreso de la actividad laboral y escolar (ver Figura S5.2). En Viveros 2020 las menores concentraciones se explicaron por la reducción de las actividades durante el confinamiento.

Dentro de las especies más abundantes se identificaron: propano, butano, isobutano, etano, etileno, propileno, acetileno, isopentano, pentano, heptano, octano, benceno y tolueno. Los COVs más abundantes en todos los sitios, fueron aquellos relacionados con el gas LP (i.e., propano, butano e isobutano) y el etano, con aportes de 60 al 72%. Los aportes de los otros grupos funcionales identificados (es decir, olefinas, aromáticos) oscilan entre el 4 y el 19%.





**Figura S5.1.** Distribución de las concentraciones totales de COVs medidos durante las diferentes campañas de monitoreo.



**Figura S5.2.** Variación diurna de las concentraciones promedio horario de COVs durante las diferentes campañas de monitoreo.

Se estimó la reactividad total a partir de la reacción con el radical hidroxilo. Las olefinas fueron las más reactivas con contribuciones entre 36 y 46% con excepción de Villa de las Flores donde el aporte fue de 74%. Los compuestos asociados al gas LP tuvieron contribuciones de 29 a 38%,

excepto Villa de las Flores que presentó el menor valor con 15%. En el caso de los compuestos aromáticos, se observaron contribuciones variadas. Durante el confinamiento estricto se observó una disminución en la reactividad de más del 50% con respecto a la campaña de 2021.

El INECC continúa realizando otras campañas de monitoreo en otras entidades de la Megalópolis.

### **5.3. Mediciones de material particulado**

#### **Resultados y avances de proyectos sobre Calidad del aire en la Megalópolis central de México y en Puebla**

*Resumen de la presentación del Dr. Marco A. Mora-Ramírez*

Se presentaron los resultados más importantes sobre un estudio de aerosoles en el periodo 2003 a 2015 para la región de la Megalópolis utilizando datos de aerosoles obtenidos por satélites, mediciones en tierra, modelos de trayectorias de masas de aire, modelos de composición química de aerosoles y datos de reanálisis. Se confirma a través de los datos satelitales un claro efecto antropogénico en los perfiles diurnos y de día de la semana de partículas (PM), con un incremento notable en los niveles de partículas gruesas durante los períodos de horas pico vehiculares entre semana, en comparación con los fines de semana. Se observó un aumento estadísticamente significativo en la velocidad del viento y la temperatura ambiente de 2003 a 2015 en la región de estudio. Entre las especies de deposición húmeda, el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) se correlacionaron mejor con  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  lo que sugiere que estos tres constituyentes son componentes importantes del aerosol que siembra los hidrometeoros, que eventualmente caen como deposición húmeda en la región de estudio.

Entre las diferentes especies modeladas con GOCART, el sulfato representó la mayor parte de la profundidad óptica (más alta en mayo-junio), seguido de los orgánicos. Por otra parte, las emisiones de quema de biomasa más extensas ocurrieron durante la temporada seca-caliente (marzo a mayo, MAM) que coincidieron con mayores valores del espesor óptico (AOD, *aerosol optical depth*), índice de aerosol ultravioleta (UV AI) y valores de materia particulada superficial (PM). El número total de puntos de luz (es decir, incendios) se produjo un mes después del pico de BT. Esto puede explicarse por la mayor cantidad de incendios que perdieron intensidad en mayo después de que los incendios de abril consumieran una cantidad significativa de combustible de biomasa. Las emisiones de la quema de biomasa contribuyeron significativamente a los valores altos de AOD, UV AI y PM superficial en MAM cuando la altura de la capa límite planetaria fue mayor. Se ha demostrado que el polvo del suelo es abundante en las columnas de incendios forestales lo que también puede contribuir al aumento de los parámetros de aerosol antes mencionados y a la reducción del exponente de Ångström en la temporada MAM.

Por otra parte, se requiere un esfuerzo significativo e inmediato para mejorar la red de monitoreo de Puebla y de otras entidades fuera de la Ciudad de México. Como es bien sabido, la calidad del aire de la Ciudad de México está vinculada con las cuencas atmosféricas, en otras palabras, depende de lo que ocurre en los alrededores. Sin embargo, en los alrededores, no hay suficientes sitios de monitoreo o no hay información.

Actualmente la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) evalúa la exposición de los ciclistas y peatones a las partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> empleando sensores de bajo costo en combinación con instrumentos científicos (calibrados). Los sensores de bajo costo se utilizan como una alternativa para determinar los niveles de partículas en la zona centro del municipio de Puebla en conjunto con un proyecto de instalación de estaciones de monitoreo.

## **Bioaerosoles**

### *Resumen de la presentación del Dra. María del Carmen Calderón Ezquerro*

El término bioaerosoles se refiere a los materiales biológicos vivos o inertes en suspensión en el aire ambiente y forman parte de las partículas suspendidas. La microbiota presente en los aerosoles se considera como contaminante si está implicada en la propagación de enfermedades infecciosas y alérgicas o puede transformar los contaminantes del aire en formas más o menos tóxicas.

La operación continua de la Red Mexicana de Aerobiología, desde 2008, ha permitido la elaboración de calendarios polínicos con los tipos de polen más abundantes y alergénicos que se encuentran en el aire a través del año. Los ciclos polínicos de especies aeroalergénicas dependen de las épocas de floración de los árboles (p.ej., *Fraxinus sp.*, *Alnus sp.*, *Cupressaceae* y *Quercus sp.*) y de diversas herbáceas presentes. Algunos pólenes son causantes de rinitis, conjuntivitis, alergias respiratorias o asma (Calderón et al., 2016). Se ha observado también una variación interanual posiblemente asociada a cambios de uso de suelo, cambios en la floración de plantas y la producción de polen asociadas la variación climática, además de los efectos de la contaminación química que afectan la viabilidad e integridad del genoma de los granos de polen.

Menos del 0.1% del microbiota en los aerosoles es cultivable, se requieren otros métodos diferentes al cultivo para su caracterización como la identificación molecular (metagenómicos) y la secuenciación (genómicos). Los avances de las últimas décadas en la biología molecular han mejorado la capacidad para la detección específica (género y especie) de hongos, levaduras, bacterias y arqueas presentes en los bioaerosoles colectados en un medio líquido o sólido, por impactación sobre filtros o arrastre de directo dentro de tubos Eppendorf. El desarrollo de la genómica, que es la obtención de la secuencia de ADN, y la metagenómica, que se refiere a la secuenciación simultánea de muchos organismos, facilita el estudio de las comunidades microbianas colectadas de la atmósfera. Su aplicación ha permitido explorar y ampliar el conocimiento de la microbiota aerovagante en diversos tipos de ambientes extramuros (urbanos, suburbanos, rurales, forestales) e intramuros (ambientes ocupacionales), entre otros.

Los resultados de mediciones realizadas en el sur de la Ciudad de México muestran que la riqueza y diversidad en bacterias y hongos tienen una fuerte influencia estacional, la mayor variedad ocurre durante la temporada lluviosa. Las comunidades bacterianas más comunes en el aire ambiente urbano pertenecen a los filos *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Bacteroides*, *Actinobacteria*, *Cyanobacteria*, *Ascomycota* y *Basidiomycota*; entre los cuales se encuentran numerosos patógenos. Las actinobacterias dominan la composición bacteriana durante la temporada seca. En cuanto a los hongos se identificó una gran diversidad, pero con una menor riqueza en comparación con las bacterias. Las especies fúngicas dominantes incluyeron *Cladosporium*, *Phoma*, *Alternaria* y *Aureobasidium*. Se observó que la diversidad se relaciona con la variedad de especies nativas y exóticas (flora, hongos y líquenes) en los sitios de estudio.

Existe una variación en la diversidad de las comunidades bacterianas, muchas de ellas reconocidas como patógenas, asociada a las temporadas climáticas y el grado de urbanización de la ciudad, con una mayor diversidad durante la época lluviosa y en la zona de mayor urbanización (Calderón et al., 2022).

Durante los días de contingencia ambiental por ozono durante marzo de 2016 se observaron incrementos en las bacterias y hongos presentes en el aire, lo que podría provocar efectos sinérgicos en la salud humana por la exposición simultánea a contaminantes químicos del aire y la microbiota (Calderón et al., 2020).

## **Fuentes de PM y climatología del flujo en la Zona Metropolitana de Querétaro**

### *Resumen de la presentación de la Dra. Dara Salcedo*

A pesar de que existen muchas áreas urbanas en México con una calidad del aire de regular a mala, se sabe poco sobre los procesos que determinan la presencia de contaminantes en la atmósfera más allá de la Ciudad de México. En un estudio realizado en la Zona Metropolitana de Querétaro, en donde se describe la composición de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, se identificaron las fuentes más importantes de partículas suspendidas. La resuspensión mineral o de polvo de construcción, una fuente antropogénica que incluye incineración, industria, y partículas secundarias, y quema de biomasa, fueron las fuentes identificadas para PM<sub>10</sub>. Para PM<sub>2.5</sub>, las fuentes incluyeron la resuspensión, emisiones antropogénicas (incineración y partículas industriales), vehículos, quema de biomasa y transformación secundaria. El cociente entre fuentes industriales y vehiculares fue mayor en Querétaro que en la Ciudad de México.

En otro estudio se estableció una climatología de flujo para el Área Metropolitana de Querétaro (MAQ) mediante el análisis de cuatro años (2014-2017) de retrotrayectorias generadas con el Modelo HYSPLIT. Se encontraron dos regímenes de flujo: uno de junio a septiembre (régimen lluvioso); el otro de diciembre a mayo (régimen seco). Octubre y noviembre se consideraron meses de transición. Los flujos del noreste estuvieron presentes durante todo el año; en contraste, las trayectorias desde el suroeste fueron mucho menos frecuentes y se observaron principalmente durante el régimen seco. Un análisis de los campos de viento de la base de datos NARR durante un período de tiempo más largo (1979-2019), sugirió que estos resultados fueron representativos de las condiciones promedio de la atmósfera en el sitio de estudio. Algunas de las trayectorias observadas hacia el noreste se originaron dentro de una región desértica del estado de Querétaro, donde se ubicaban varias minas de piedra caliza. Durante el régimen seco y los meses de transición, algunos *clusters* se originaron en el área industrial de Guanajuato, que incluyó la refinería de Salamanca. Dado que el transporte aéreo de contaminantes siguió estas trayectorias, el análisis podría ser útil para identificar fuentes regionales que afecten al MAQ y posiblemente aumenten su carga de contaminación del aire. De hecho, la variabilidad en las concentraciones de contaminantes criterio coincidió con los regímenes de flujo descritos anteriormente.

#### 5.4. Mediciones de otros contaminantes

##### **Evaluación de las emisiones de metano de las plantas de tratamiento de aguas residuales y estrategias de mitigación**

*Resumen de la presentación del Dr. Adalberto Noyola Robles*

El manejo de aguas residuales industriales y municipales emite aproximadamente el 13% del metano (CH<sub>4</sub>) antropogénico en México, cantidad a la que se debe adicionar las emisiones de CO<sub>2</sub> indirectas que corresponden al consumo de energía eléctrica necesaria para su operación. Es por lo tanto significativa la aportación al inventario de GEI nacional de esta actividad. Por otro lado, existe muy poca información sobre mediciones directas para el cálculo de emisiones de GEI en drenajes y plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en México.

Durante el tratamiento de aguas residuales domésticas pueden presentarse condiciones anaerobias, con la resultante producción de metano. Además, existe una fracción de CH<sub>4</sub> que ingresa de manera directa a la PTAR en forma disuelta en el agua residual. Este CH<sub>4</sub> puede emitirse a lo largo del proceso en las diferentes unidades que la conforman, en función de las condiciones de turbulencia que favorecen la desorción del gas.

El supuesto del Tier 1 (IPCC, 2006) en el sentido que las plantas aerobias centralizadas bien operadas no emiten CH<sub>4</sub>, no tiene sustento. Esto ha sido reconocido recientemente por el propio IPCC al incorporar un factor de corrección de metano recomendado diferente de cero (0.03) en su actualización más reciente (IPCC, 2019). El CH<sub>4</sub> disuelto en el influente es desorbido en algún grado dentro del proceso de tratamiento.

La metodología actualizada en 2019 para el Tier 1 recomienda un valor de 0.03 para el factor de corrección de metano (MCF) sin distinguir plantas bien operadas y mal operadas. Para el cálculo de la materia orgánica presente en los lodos extraídos (S) se introduce una nueva ecuación que incorpora un factor Krem para convertir la masa de lodo en base seca a masa de DBO. Sin embargo, los valores recomendados para Krem por el IPCC son 0.8 y 1.16 kgDBO/kgST para lodos activados convencionales y aireación extendida respectivamente. Estos representan una importante imprecisión (valores excedidos) y, por ende, conducen a una subestimación de las emisiones de metano. El valor Krem debe situarse entre 0.3 y 0.5.

Paredes et al. (2015) proponen un factor de emisión para “laguna anaerobia profunda” de 0.43 kgCH<sub>4</sub>/kgDBOremovido (0.32 – 0.58), como valor representativo para sistemas lagunares municipales en México “bien operados” (basado en datos de 5 sistemas lagunares en México). Por su parte, Noyola et al. (2018) identifican que no hay PTAR libre de emisiones de CH<sub>4</sub>, ya que el drenaje es una fuente exógena de este gas. Además, la eliminación de nutrientes (nitrógeno) también producirá N<sub>2</sub>O en la etapa anaerobia (o anóxica). Sin embargo, ninguna de estas fuentes se considera en las directrices del IPCC (2006). Por lo anterior, Noyola et al. (2018) proponen un factor de corrección de metano de (MCF) de 0.06 para una PTAR aerobia centralizada bien operada, para regiones intertropicales. Adicionalmente, se sugiere calcular las emisiones de metano del arreglo PTAR aerobia + digestor anaerobio como un proceso integrado, con un MCF de 0.32.

Con base en las aportaciones de Paredes et al. (2015) y Noyola et al. (2018) es posible aplicar el Tier 2 en PTAR aerobias en México (responsables del 55 al 70% del caudal tratado en México) y de sistemas lagunares (10% del caudal tratado). De esta forma, se aplicaría el Tier 2 a las emisiones de entre 65 y 80% de las aguas residuales tratadas en México.

Un estudio realizado en varias PTAR en México indica que las emisiones de metano de dos fuentes dentro del proceso de tratamiento (sedimentador primario y tanque de aireación) son de la misma importancia. Una medida efectiva de mitigación es el evitar la generación de metano en las unidades sedimentadoras, mediante una frecuencia de purga de lodos adecuada. Los resultados muestran que, en casi la totalidad de las plantas visitadas, la concentración de metano disuelto se triplica en promedio en el sedimentador primario en relación con el contenido del influente.

Las emisiones indirectas (asociadas al consumo de energía eléctrica) superan en un amplio margen a los valores de las emisiones directas, por lo que disminuir las emisiones indirectas sería prioritario para una estrategia de reducción de emisiones en las PTAR. Las emisiones indirectas, por consumo de energía eléctrica, representan más del 60% del total de las emisiones totales en los escenarios considerados, con partes prácticamente iguales (alrededor del 20% cada una) de emisiones en las PTAR y por los lodos descargados en el drenaje.

El cálculo de emisiones medidas *in situ* refleja la realidad de la operación de las PTAR, que puede implicar la producción de metano en las unidades sedimentadoras, aspecto que no contempla de ninguna forma la metodología del IPCC. De aquí se desprende que es necesario introducir en la metodología IPCC un factor que corrija este faltante en caso de que las PTAR no operen en forma óptima, en particular la purga frecuente (y efectiva) de los lodos del sedimentador primario.

## **Estado actual del conocimiento sobre emisiones de gases de efecto invernadero por la ganadería bovina en México**

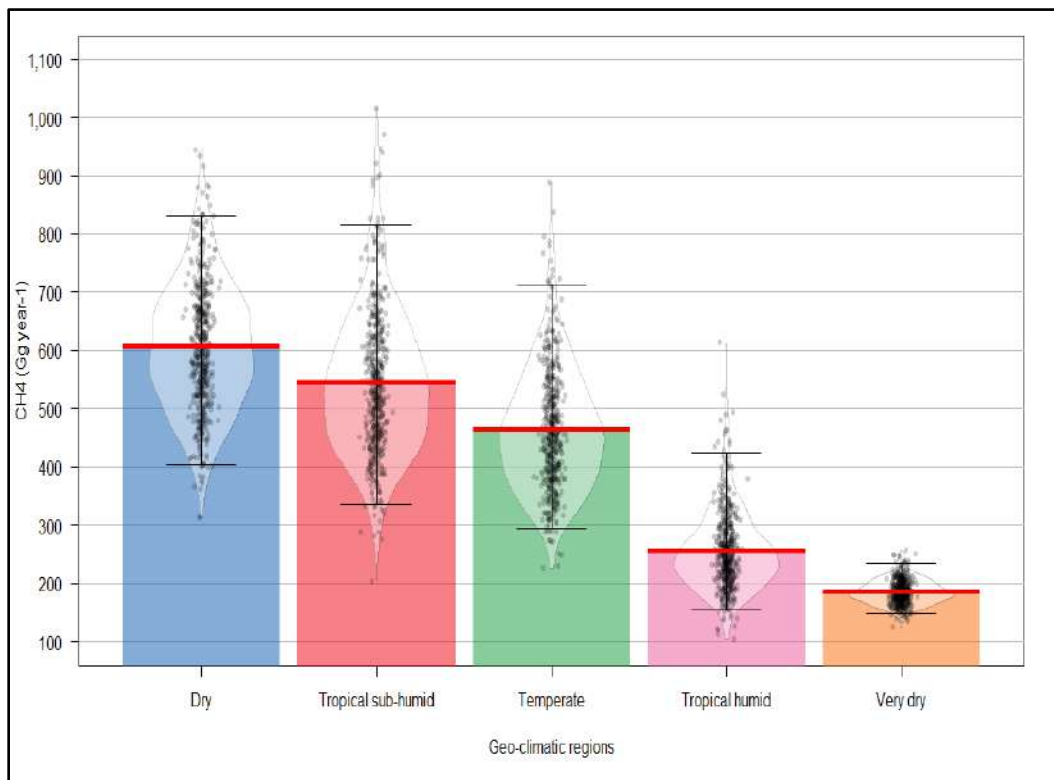
*Resumen de la presentación del Dr. Octavio A. Castelán*

El ganado y la producción de arroz son las fuentes más importantes de gases de efecto invernadero diferentes al CO<sub>2</sub> en el sector Agricultura, Forestería y Otros Usos de la Tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés). A nivel global las emisiones del ganado (todas las especies de ganado doméstico) van de 5.6 a 7.5 Gt CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> (54% de las emisiones del sector agropecuario mundial). El ganado bovino aporta el 80 % de estas emisiones, mientras que cuando se considera a todos los rumiantes, estos emiten ~33% de las emisiones antropogénicas de CH<sub>4</sub> (IPCC, 2014). En el caso de México, el ganado bovino emite más del 80% de las emisiones de CH<sub>4</sub> del sector agropecuario considerando la fermentación entérica y manejo excretas. De esta forma el ganado bovino es el principal emisor de CH<sub>4</sub> en el sector AFOLU.

El metano es un forzador climático de vida corta por tanto reducir las emisiones de este gas puede ayudar a mitigar el cambio climático en el corto y mediano plazo, de tal forma que durante la COP 26 en Glasgow, Escocia, se acordó reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> en 30% para el 2030 (UNEP 2021), como un primer paso para evitar que la temperatura de la tierra aumente por arriba de 1.5°C para el 2030. Por lo tanto, es fundamental reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> por sus potentes efectos de cambio climático y las ganancias prontas que se pueden alcanzar para mitigar el cambio climático en el corto plazo.

El inventario nivel Tier 2 de emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica de bovinos (Figura S5.3) es de 2,039±205 Gg año<sup>-1</sup>. La incertidumbre asociada del inventario es de -18.28 a +21.2. Cabe destacar que este es el primer inventario de nivel Tier 2 que se desarrolla en México utilizando factores de emisión determinados localmente para los diferentes sistemas geo-climáticos del país utilizando la técnica de cámaras de respiración de circuito abierto, la cual es considerada como el estándar de oro. De la misma forma, se utilizaron datos de actividad obtenidos a través de una encuesta nacional y de una extensa recopilación de bibliografía publicada en artículos científicos (principalmente) y otras fuentes como memorias de congresos, libros y tesis. Esta información incluyó datos sobre sistemas de alimentación, tipos y razas de ganado, niveles de producción, orientación productiva (leche, carne, doble propósito), edades y pesos de los animales etc.

Los resultados de este inventario nacional demuestran que la mayor parte de la emisión de CH<sub>4</sub> se registra en la región de clima seco (Castelán et al. 2018), seguida por la región de clima tropical seco, es decir en los estados del norte de la república para el primer caso, y en los estados de la llanura costera tanto de la costa del Océano Pacífico como del Océano Atlántico, para el segundo caso. En cuanto a la región de la Megalópolis, se estimó que los estados que forman parte de esta zona emitieron ~131 Gg de CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>, que fue aproximadamente el 6% del inventario nacional de emisiones de CH<sub>4</sub> entérico (Castelán-Ortega & Ku-Vera 2019).



**Figura S5.3.** Inventario Tier 2 de emisiones de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica por región geo-climática de México. (Fuente: Castelán-Ortega & Ku-Vera, 2019).

Es importante resaltar que contamos con factores de emisión *in vivo* de CH<sub>4</sub> por fermentación entérica para todas las regiones geo-climáticas de México, por tanto, podemos calcular las emisiones de este gas por estado, y categoría, edad, peso, y función productiva de todos los estados de la República Mexicana (Castelán-Ortega et al., 2019).

Adicional al desarrollo de los inventarios de CH<sub>4</sub>, hemos trabajado en la investigación de diferentes estrategias de mitigación de este gas a través del uso de diferentes estrategias de alimentación y el uso de aditivos en la dieta del ganado. Este trabajo ha rendido buenos resultados de tal forma que ya hemos identificado, a través de experimentos *exprofeso*, por lo menos tres aditivos naturales que han demostrado reducir la producción de este gas: 1) La suplementación con *Cosmos bipinnatus* reduce la emisión diaria de CH<sub>4</sub> hasta en 16% en ganado lechero. 2) La suplementación con *Cymbopogon citratus* (2% de la dieta) reduce la emisión diaria de CH<sub>4</sub> hasta en 33% en ganado bovino productor de carne. 3) La inclusión de 30% de la leguminosa tropical *Samanea saman* (árbol de la lluvia, cenízaro etc.) en la dieta de bovinos alimentados con forraje de baja calidad reduce la emisión diaria de metano hasta en 50%.

### ¿Qué información necesitamos generar?

Al momento de redactar este documento no contamos con información de los siguientes aspectos de la emisión de GEI por la ganadería mexicana.

- a) Factores de emisión de CH<sub>4</sub> por manejo de estiércol específicos para México.
- b) Estrategias de mitigación de emisiones de CH<sub>4</sub> aplicables a escala comercial y a gran escala para una parte importante de la población de ganado bovino de México.
- c) Factores de emisión de N<sub>2</sub>O específicos para México. En este tema en particular el avance ha sido mínimo.
- d) Análisis de ciclo de vida de los GEI originados en el sector agropecuario.

## **Mediciones de NO<sub>y</sub>, HNO<sub>3</sub>, PAN y NO<sub>x</sub>**

### *Resumen de la presentación del Dr. Ricardo Torres Jardón*

Se ha observado que los niveles de NO<sub>y</sub> no difieren en magnitud de los niveles reportados en estudios previos. Para 2010 la proporción de los NO<sub>x</sub> medidos con analizadores quimioluminiscentes fue de ~ 9%. Asimismo, la proporción entre NO<sub>2</sub> medido con analizadores comerciales por la RAMA con respecto al NO<sub>2</sub> verdadero medido con luminol, indica que en promedio un 20% del NO<sub>2</sub> correspondió a especies NO<sub>z</sub> (NO<sub>y</sub> – NO<sub>x</sub>). En el caso de HNO<sub>3</sub> no se observaron diferencias importantes en las concentraciones en comparación con las reportadas en la campaña MILAGRO. Con respecto al PAN, los niveles de 2017 fueron unas 2 veces menores a los reportados en 2003. Zavala et al. (2020), encontraron que durante los últimos 15 años se observó un incremento en el cociente NO<sub>2</sub>/NO. Asumiendo que el NO<sub>2</sub> medido por la RAMA incluye especies como HNO<sub>3</sub> y PAN, es probable que al efectuar la corrección resulte en que este cociente se ha mantenido a lo largo de los años, lo que sugiere que, a pesar de que han ocurrido reducciones en los niveles de NO y COVs, las conversiones de NO a NO<sub>2</sub>, tanto por titulación como por reacciones de oxidación del NO con radicales HO<sub>2</sub> y RO<sub>2</sub> se ha sostenido.



**Tabla S5.2.** Resumen de mediciones de especies NOy por el Grupo de Fisicoquímica Atmosférica

<b>Campaña/autores</b>	<b>Especies</b>	<b>Instrumentación</b>	<b>Valores reportados</b>
Sitio forestal elevado. Sierra de las Cruces (ININ) abril 2004 (Rosas et al., 2006)	NOy	Analizador comercial de NO/NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> conectado a un convertidor catalítico de Mo localizado en el exterior.	Promedio 11 ppb con máximos de hasta 40 ppb.
Sitio receptor urbano, estación de monitoreo Santa Úrsula, (RAMA) Sur de la CDMX. Abril 2004 (Torres-Jardón et al., 2009).	NOy	Analizador comercial de NO/NO <sub>2</sub> /NOy conectado a un convertidor catalítico de Mo localizado en el exterior.	Rango de 30-150 ppb con picos de hasta 240 ppb.
Sitio receptor urbano, Ciudad Universitaria, suroeste de la CDMX. Abril-mayo 2010 (Cuevas-Contreras, 2014).	NOy, HNO <sub>3</sub>	Analizador comercial de NOy modificado con dos convertidores para medir en canal NO al NOy y en el canal NO <sub>x</sub> a NOy-HNO <sub>3</sub> (remoción de HNO <sub>3</sub> con filtro de nylon).	Promedio de máximos de NOy en 170 ppb con picos de hasta 325 ppb. Promedio de HNO <sub>3</sub> en 4 ppb con máximos en torno a 10 ppb.
Sitio receptor urbano, Ciudad Universitaria, suroeste de la CDMX. Junio y octubre, 2017 (Carrasco-Mijarez, et al., 2020)	PAN, NO <sub>2</sub> verdadero	Cromatografía capilar rápida con detección de energía luminiscente por reacción con luminol.	Promedio de PAN entre 1.3 y 0.9 ppb (junio y octubre) con máximos en 4.5 y 3.5 ppb, respectivamente. Promedio de NO <sub>2</sub> verdadero entre 15 y 14.2 ppb, y máximos entre 62.2 y 28 ppb (junio y octubre, respectivamente) Promedio de NO <sub>2</sub> por quimioluminiscencia de 19.1 y 17.5 ppb.

### **Evolución de emisiones de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> de la refinería y central térmica en Tula Hidalgo 2006-2017**

*Resumen de la presentación de la Dra. Claudia I. Rivera Cárdenas*

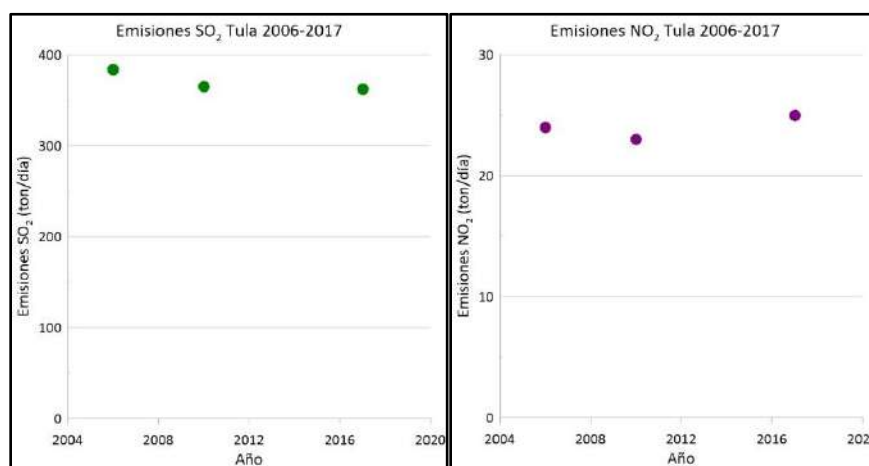
La refinería y central térmica localizadas en Tula, Hidalgo, continúan como una fuente importante de emisiones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), que afecta la calidad del aire en la región central del país. En el período de tiempo del 2006 al 2017 se realizaron tres campañas de medición: 1) en el año 2006, durante la campaña MILAGRO (Rivera et al., 2009), 2) en el año 2010, y 3) en el año 2017. Durante estas campañas se cuantificaron las emisiones de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> del complejo industrial compuesto por ambas fuentes. Los resultados de los flujos calculados durante las campañas de medición se presentan en la Tabla S5.3 y la Figura S5.3.

Por otra parte, las emisiones del volcán Popocatepetl fueron una fuente importante de SO<sub>2</sub> y sulfatos en la región, de acuerdo con una publicación reciente de Arellano et al. (2021), el volcán

Popocatépetl ha emitido a la atmósfera en promedio 2115 toneladas/día de SO<sub>2</sub> entre los años 2007 y 2016.

**Tabla S5.3.** Resultados de flujos de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> calculados para la refinería y central térmica de Tula, Hidalgo, durante diferentes campañas de medición

Año	SO <sub>2</sub> (ton/día)	NO <sub>2</sub> (ton/día)
2006	384 ± 103	24 ± 7
2010	365 ± 141	23 ± 17
2017	362 ± 300	25 ± 13



**Figura S5.3:** Evolución de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> del complejo industrial de Tula del año 2006 al 2017.

### Mediciones de otros contaminantes: Amoniaco

*Resumen de la presentación del Dr. Abraham Ortíz*

El monitoreo en Tula-Tepeji, Hidalgo, con zonas de criadero, agrícolas y cerca de la presa Requena. Los niveles observados superan los valores promedio o máximos observados en zonas urbanas (63.6 ppb) y en zonas de granja (118.7 ppb). Es importante medir lo que está pasando en zonas periféricas de la Megalópolis e identificar las fuentes.

*Resumen de la presentación de la Mtra. Beatriz Herrera*

Los resultados de la medición de amoniaco (NH<sub>3</sub>) por espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en ingles) de absorción solar en dos sitios de monitoreo, uno urbano localizado en la azotea del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio climático (ICAYCC) de la UNAM (19.33°N, 99.18°W, 2280 m.s.n.m) y otro localizado en el Parque Nacional Izta-Popo en la estación de altura Altzomoni (19.12°N, 98.66°W, 3985 m.s.n.m). Los espectros obtenidos fueron procesados con el algoritmo de recuperación PROFFIT9 para la obtención de las columnas totales de NH<sub>3</sub> (moléculas/cm<sup>2</sup>). Estas mediciones se complementaron

con observaciones satelitales del Interferómetro de Sondeo Infrarrojo Atmosférico (IASI, por sus siglas en inglés) y con análisis de trayectorias inversas del modelo HYSPLIT, para calcular las trayectorias de las masas de aire (Herrera et al., 2022).

La columna de  $\text{NH}_3$  promedio en el sitio urbano medida entre 2012 y 2019 fue de  $1.46 \pm 0.64 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup> con un incremento anual promedio de  $92 \pm 3.9 \times 10^{13}$  moléculas/cm<sup>2</sup> año. Mientras que en el sitio remoto de Alzomoni, el promedio fue de  $0.18 \pm 0.24 \times 10^{16}$  moléculas/cm<sup>2</sup> con un incremento anual promedio de  $8.4 \pm 1.4 \times 10^{13}$  moléculas/cm<sup>2</sup> año. El ciclo diurno fue notablemente diferente en ambos sitios, mientras que en la UNAM fue notoria la variabilidad interanual, sugiriendo la presencia de múltiples fuentes urbanas, en Alzomoni el ciclo diurno mostró un incremento en la tarde, muy probablemente debido al transporte de  $\text{NH}_3$  proveniente de las zonas urbanas. Sin embargo, la variabilidad mensual fue muy similar en ambos sitios, mostrando la dependencia del  $\text{NH}_3$  con altas temperaturas presentando los máximos valores de columna entre marzo y mayo.

La comparación con las observaciones satelitales para el periodo 2008 – 2018, mostró una buena concordancia, con una diferencia relativa del 32%. IASI logró reproducir la variabilidad mensual del  $\text{NH}_3$  sobre la Ciudad de México. Por otro lado, la evolución anual sugiere una tendencia creciente en los niveles de  $\text{NH}_3$ , entre 2008 y 2018 se observó un incremento del 62%. Las observaciones de IASI sobre la Ciudad de México permitieron obtener la distribución espacial del  $\text{NH}_3$ , cuyas mayores concentraciones se observaron en el noreste de la Ciudad, cerca de la región de Texcoco. Finalmente, el análisis de las trayectorias inversas mostró que las columnas totales más altas de  $\text{NH}_3$  en la estación UNAM provienen de una gran variedad de fuentes locales. En general, los resultados sugieren que el  $\text{NH}_3$  en la Ciudad de México está incrementando y proviene de una gran variedad de fuentes urbanas locales, como emisiones vehiculares, humanas, animales domésticos, incendios, aguas residuales y manejo de desechos.

Recomendaciones:

- Continuar las mediciones FTIR en ambos sitios para extender las series de tiempo de  $\text{NH}_3$ .
- Complementar con mediciones de superficie usando microsensores y muestreadores pasivos en lugares estratégicos, como el noreste de la Ciudad de México.
- Complementar los resultados con modelos como GEOS-Chem para esclarecer las variedades de fuentes de  $\text{NH}_3$  en la Ciudad de México, así como simular escenarios.
- Tomar en cuenta las mediciones FTIR, satelitales o de superficie para continuar mejorando las fuentes de  $\text{NH}_3$  en el inventario de emisiones de la Ciudad de México.
- Revisar las regulaciones de las emisiones de  $\text{NH}_3$  en México.

## 5.5. Mediciones satelitales

### Introducción (Dr. Michel Grutter)

Aun cuando las mediciones satelitales no son consideradas como una medición de referencia, los satélites pueden proveer datos importantes para complementar las mediciones de calidad del aire que se realizan en superficie. No obstante, tienen limitaciones asociadas con diferentes fuentes de incertidumbre importantes, que incluyen, el efecto del vapor de agua como interferencia en algunas

de las de las recuperaciones de gases de interés, la sensibilidad y resolución vertical del satélite pueden inducir desviaciones de la concentración real, las diferentes estrategias de recuperación de los datos pueden producir resultados distintos por la resolución horizontal y los métodos empleados en la suavización de los datos. Por lo que la validación es importante en el tratamiento de los datos.

Existen diferentes plataformas satelitales orbitales y geoestacionarias que realizan mediciones que pueden ser de interés para la calidad del aire como S5P TROPOMI, MetOp IASI, Suomi NPP CrIS, GOSAT, OCO-2, OCO-3, Aura OMI, Envista SCHIAMACHY, así como las misiones futuras TEMPO y GeoCarb.

Algunos casos en los que se está trabajando incluyen la validación de datos provenientes de los satélites OCO-2, OCO-3 e IASI-A con mediciones enfocadas en regiones específicas del país y la Ciudad de México. Los resultados para CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> se han empleado con propósitos de evaluación de los inventarios de emisiones y su distribución espacial. En otro proyecto, realizado el año pasado y liderado por el Dr. Wolfgang Stremme, para hacer disponible la información satelital del satélite TROPOMI promediada cada mes, se analizó la variabilidad espacial y temporal de los gases CH<sub>4</sub>, HCHO, NO<sub>2</sub>, CO y SO<sub>2</sub>.

Los datos satelitales son una herramienta útil para la detección de fuentes y eventos extraordinarios. Es importante entender cómo se puede utilizar esta información para asimilación de modelos utilizando métodos como la modelación inversa, para la determinación y estimación de emisiones y el mejoramiento de inventarios. Hablando del metano, ha habido esfuerzos para estimar las emisiones de metano e identificar desviaciones de los inventarios. Existe una invitación específica para hacer una combinación de mediciones con métodos de percepción remota desde aviones con datos satelitales, para para estudiar las emisiones en el Valle de México.

### **Asimilación (datos meteorológicos y concentraciones medidas en superficie y por el satélite)**

*Resumen de la presentación del Dr. José Agustín García Reynoso*

En lo que respecta a la asimilación de datos, tanto meteorológicos como de concentraciones medidas obtenidas de satélite, en el trabajo de doctorado de la Dra. Evelyn Martínez Sabari. Se evaluó el impacto de la asimilación de datos satelitales en la mejora del pronóstico (Martínez-Sabari and García-Reynoso, 2021).

La asimilación de datos satelitales se puede aplicar para establecer las condiciones iniciales y de frontera para la modelación de la calidad del aire, introduciendo diferentes tipos de ciclos en el modelo para mejorar la predicción. El objetivo del proyecto fue asimilar datos de variables meteorológicas y de algunas variables químicas utilizando el módulo WRFDA (*WRF Data Assimilation*) del modelo WRF. Para el periodo comprendido entre 1-4 de mayo se utilizaron los datos meteorológicos del modelo regional NARR, se asimilaron 10 sensores de satélite, así como datos de estaciones de barcos, sondeos aerológicos, observaciones de GPS (vapor de agua) y de tráfico aéreo. Se plantearon cuatro escenarios, tres utilizando diferentes métodos: 3DVAR (*Three-Dimensional Variational*), 4DVAR (*Four-Dimensional Variational*), En3DVAR (*Ensemble-3DVAR*), y uno sin asimilación. Para la evaluación del desempeño, que tan bien el modelo reproducía las observaciones, se estimaron el índice de concordancia (IOA), el sesgo, el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación. Para la temperatura a 2 m el 3DVAR y 4DVAR

mejoraron la predicción, mientras que, para ozono el IOA mejoró con asimilación de datos y el 4DVAR ofreció el mejor desempeño, sin embargo, esta técnica requiere de un mayor tiempo de procesamiento que el 3DVAR y el ensamble En3DVAR.

En conclusión, el uso de la asimilación de datos satelitales mejora la predicción con el modelo WRF. Los cambios en la meteorología inducen cambios en las concentraciones y esto amerita una revisión. A pesar del alto costo computacional, la mejor técnica fue la de 4DVAR seguida por el ensamble En3DVAR.

## **Uso de datos satelitales para estudios de salud**

*Resumen de la presentación del Dr. José Luis Texcalac Sangrador*

Desde la epidemiología y la salud ambiental, al final de la última década en el siglo pasado se dio un vistazo hacia la disciplina geográfica iniciando el desarrollo de métodos y modelos para vincular la información geográfica con los estudios de salud, donde el uso de imágenes de satélite no fue la excepción. Iniciando la exploración de distintos métodos y uno de ellos para utilizar la información proveniente de distintos sensores en la estimación de la exposición en aquellos dominios que escapan a las zonas de cobertura de las redes estaciones de monitoreo, y con ello ampliar las zonas de exposición y obtener estimaciones más amplias que llevan a contar con estimaciones que pueden utilizarse para la evaluación de la carga de la enfermedad.

Se han empleado datos de profundidad óptica para la estimación de la concentración de partículas suspendidas, con resoluciones espaciales de  $1^\circ \times 1^\circ$  aunque se ha trabajado también con resoluciones de 1 km. El equipo de la Dra. María Téllez en el INSP evaluó los datos de profundidad óptica en la estimación de  $PM_{2.5}$  para la Zona Metropolitana del Valle de México para su uso en estudios de salud en zonas fuera de la cobertura de las estaciones de monitoreo. El INSP ha desarrollado un método para estimar la concentración de  $PM_{2.5}$ , observaron que las concentraciones provenientes de los datos de satélite generalmente subestiman la exposición, en comparación con los métodos que utilizan los datos de las redes de monitoreo. En los datos del 2006 y 2012, las concentraciones podían ser más elevadas, sobrepasando los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mientras que las estimaciones de los datos satelitales apenas si sobrepasaban los  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Al modelar los efectos en salud el único resultado significativo se obtenía con las estimaciones por monitor y no necesariamente por las estimaciones del satélite. Esto entra en concordancia con lo que se ha observado en otros estudios, donde las estimaciones de mortalidad o de algunos efectos en salud difieren según los modelos, los riesgos generalmente son menores cuando se utilizan datos estimados de satélites. A pesar de esto, la mayor ventaja es que se pueden hacer estimaciones en regiones fuera de la cobertura de las redes de monitoreo, lo que otorga una gran ventaja para realizar estudios de salud en aquellos sitios donde las mediciones son limitadas.

Los modelos a partir de datos satelitales son una alternativa para realizar estudios de carga de enfermedad, estos modelos están en una fase de consolidación desde la salud ambiental, los resultados aún no son concluyentes. La subestimación de las concentraciones obtenidas de los datos de satélite puede reducir la magnitud de los efectos reales asociados a la exposición. Se requiere fortalecer las capacidades locales para explotar los datos satelitales.

## **Aplicación de observaciones satelitales; análisis de grandes bases de datos**

*Resumen de la presentación del Dr. Benjamin de Foy*

Una de las primeras aplicaciones de la técnica de sobre muestreo para los datos satelitales en México fue para identificar y diferenciar las emisiones del volcán y de la refinería y termoeléctrica de Tula, empleando los datos del satélite OMI. Otro ejemplo, es la distinción entre acciones a lo largo plazo y acciones a corto plazo, esto es importante para la observar los efectos del control de la contaminación en el largo plazo, en Estados Unidos, año con años el aire es más limpio sin contradecir el desarrollo económico. No obstante, hay otro tipo de reducción que es motivado por la recesión económica o por el virus del COVID. Es bueno que se perciba públicamente que mejorar la calidad del aire no implica necesariamente problemas económicos.

Con el lanzamiento del satélite TROPOMI, hace 5 años, se tiene una mejor resolución que la reportada por OMI, además puede medir O<sub>3</sub>, HCHO, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO. Un proyecto reciente en Asia del sur, en Bangladesh y India, muestra que las ciudades de Calcuta y Daca tiene más o menos el mismo tamaño, la contaminación es mucho peor en Daca que en Calcuta, los resultados están publicados en *Environmental Research Letters* (de Foy y Schauer, 2022). Otra cosa que se observa en la imagen de satélite es que hay una resolución regional en Daca, un acercamiento a la imagen de Daca muestra que no se trata de un solo lugar de contaminación, hay distintas áreas que tiene más o menos concentraciones. Esto no se podía ver antes con OMI, pero ahora es posible con TROPOMI, esto permite observar mejor las diferencias regionales. Cuando se utiliza la técnica de Steffen Beirle, conocida como *divergencia de flujo*, es posible identificar fuentes individuales y la sorpresa es que Daca no tiene tantas emisiones como la zona industrial de Narayanganj, y la termoeléctrica de Gajipur tiene muchas más emisiones que otras termoeléctricas. La zona de Manoa no existe en los inventarios de emisiones, pero tiene una contribución proveniente de la manufactura ligera.

Resumiendo, TROPOMI puede ver detalles intraurbanos de las emisiones, pueden dar a una estimación cuantitativa de las emisiones, es posible compartir los resultados con inventarios de misiones como EDGAR. Con los nuevos satélites es posible mejorar los inventarios de emisiones con un mayor detalle que antes.

## **Uso de información satelital para delimitar cuencas atmosféricas**

*Resumen de la presentación del Dr. José Abraham Ortíz*

Los datos de TROPOMI se están empleando para evaluar las cuencas atmosféricas en la región central del país. Usando los datos para dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es posible observar una interacción en las concentraciones del contaminante en Salamanca, Irapuato y Celaya. Al observar la Corona Regional fue posible identificar un radio de influencia para las emisiones de las distintas zonas urbanas. En el año 2020 se redujo el alcance de la influencia, desconectando diferentes zonas urbanas, pero aún fue evidente la influencia de la Ciudad de México que se desconectó un poco de Ecatepec y bajó la intensidad en la presencia de NO<sub>2</sub>. Se empezó a observar interconectividad entre las cuencas atmosféricas, situación que no se observó al analizar las cuencas orográficas. En 2021, se observó Santiago de Querétaro con emisiones importantes de NO<sub>2</sub>. Se conectaron Salamanca, Celaya e Irapuato, además se pudo ver una conectividad con Querétaro y que podría extenderse a Tula. Los niveles en Toluca y Morelos que se conectan con la Ciudad de México, a pesar de las barreras orográficas.

Lo anterior sugiere que se requiere de un programa megalopolitano para la gestión de la calidad del aire en la Megalópolis.

### **Conclusiones y recomendaciones de la Sesión 5**

#### **Mediciones** (Dr. Omar Amador y Quim. Armando Retama)

- 1) El estudio de la química y física atmosféricas requiere de más y mejores mediciones que permitan aumentar el conocimiento de los procesos que ocurren en la atmósfera. Este conocimiento es un insumo importante para la gestión de la calidad del aire.
- 2) Existe capacidad limitada para realizar mediciones de nuevas especies involucradas en la química atmosférica, que nos permita:
  - Caracterizar con alta resolución temporal y selectividad de diversos compuestos orgánicos en las fases gas y partícula del aerosol.
  - Caracterizar los bioaerosoles y migrar a su automatización.
  - Identificar la distribución espacial y temporal de COVs.
  - Identificar diversos compuestos nitrogenados en la fase gaseosa.
- 3) Las nuevas mediciones muestran:
  - Disminución significativa de NO<sub>2</sub> y CO, así como de contaminantes poliaromáticos. Comportamiento asintótico de PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>.
  - Una disminución en las concentraciones de COVs reactivos (olefinas y aromáticos) y un aumento en los alcanos. Incremento en los contaminantes provenientes de las motos. Un aumento en las emisiones evaporativas en automóviles.
  - Abundancia de grupos cetónicos provenientes de emisiones vehiculares y emisiones domésticas.
  - La presencia de hongos, bacterias y pólenes en las partículas suspendidas.
  - El corredor Tula-Tepeji y el volcán Popocatepetl continúan como una fuente importante de dióxido de azufre en la región.
  - Una abundancia de amoníaco en la atmósfera de la Ciudad de México.
  - El drenaje y las plantas de tratamiento son una fuente importante de metano y óxido nítrico.
  - El ganado como principal fuente agropecuaria de emisiones de metano.

#### *Recomendaciones*

- 1) Se deben determinar COVs de fuentes diferentes a la vehiculares: por ejemplo, domésticas, cosméticos, plantas de tratamiento de agua.
- 2) Es necesario garantizar la operación de las redes regulatorias de monitoreo e invertir en el fortalecimiento, operación y mantenimiento de la infraestructura para la medición de contaminantes tanto regulados (criterio) como no regulados (SIMAT-SEDEMA-GobCdMx).

- 3) Existe un importante vacío de observaciones fuera de la Ciudad de México y su área metropolitana. A partir de las pocas observaciones se ha observado que Querétaro tiene una influencia importante de emisiones industriales de origen local y provenientes de Guanajuato. En Puebla se ha identificado la influencia de emisiones provenientes del volcán Popocatepetl e incendios forestales.
- 4) Se requiere invertir en la investigación científica para generar la información que necesita la gestión, a través de proyecto de alcance regional.

### **Mediciones satelitales** (Dr. Michel Grutter)

#### *Avances y esfuerzos en el uso de datos satelitales:*

- Resultados positivos mediante la asimilación de datos meteorológicos para el mejoramiento del desempeño de los modelos de calidad del aire.
- Existe una correlación positiva en la estimación de PM<sub>2.5</sub> a partir de la densidad óptica del aerosol (AOD) medida desde el satélite con las concentraciones medidas en superficie, lo cual permite realizar estudios de salud con información amplia temporal y espacialmente.
- Se deben considerar las incertidumbres asociadas en la determinación de concentraciones en superficie, y continuar con actividades de validación tanto en superficie como de columna vertical.
- Ha habido diversos estudios para caracterizar la contaminación atmosférica desde el espacio enfocadas en las diversas contribuciones (áreas urbanas, industriales, del volcán Popocatepetl, confinamiento/COVID, etc.) y su variabilidad en el tiempo, pero se puede hacer mucho más.
- Existen metodologías probadas con resultados interesantes para la detección de fuentes y la estimación de emisiones a partir de metodologías como las que se han aplicado en Asia.

#### *Oportunidades y propuestas:*

- Existe potencial para ampliar la asimilación de datos satelitales con el propósito de continuar mejorando los modelos de calidad del aire y las herramientas que actualmente se usan para la evaluación de escenarios.
- Continuar con la realización de estudios sobre el efecto a la salud usando datos satelitales (AOD) en conjunto con datos en superficie (PM<sub>2.5</sub>), tratando de asegurar la calidad de la información.
- La distribución espacial es de gran utilidad para la identificación de cuencas atmosféricas y el transporte regional, por lo que es necesario contar también con datos en superficie fuera de las zonas urbanas.
- Fortalecer las capacidades en México para la implementación de metodologías en diversas aplicaciones (salud, detección de eventos, identificación de cuencas, estimación de emisiones, mejoramiento de inventarios, etc.).
- Es importante coordinar esfuerzos entre instituciones (academia y gobierno) con áreas dedicadas en el manejo y tratamiento de datos satelitales, para generar productos de utilidad en la gestión de la calidad del aire y en poner a disposición de los usuarios la información disponible de manera eficiente.



## Referencias

Arellano, S., Galle, B., Apaza, F., et al. (2021). Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO<sub>2</sub> emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change. *Earth System Science Data*, 13, 1167–1188, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1167-2021>.

Calderón-Ezquerro MC., Guerrero-Guerra C., Martínez-López B., Fuentes-Rojas F., Téllez-Unzueta F., López-Espinoza, E. D., Calderón-Segura ME., Martínez-Arroyo A. y Trigo-Pérez M.M. 2016. The first airborne pollen calendar and its relationship with bioclimatic factors in Mexico City. *International Journal of Aerobiology*. *Aerobiologia*: 32:225–244.

Calderón-Ezquerro, M. C., Serrano-Silva, N., & Brunner-Mendoza, C. (2020). Metagenomic characterisation of bioaerosols during the dry season in Mexico City. *Aerobiologia*, 36 (3), 493-505.

Calderón-Ezquerro, M. D. C., Gómez-Acata, E. S., & Brunner-Mendoza, C. (2022). Airborne bacteria associated with particulate matter from a highly urbanised metropolis: A potential risk to the population's health. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 16(9), 1-16.

Carrasco-Mijarez, N. I., Torres-Jardón, R., Barrera-Padilla, H. A. (2020) Correlación PAN-O3 en el suroeste de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(4), 907-925.

Castelán-Ortega, O.A., Ku-Vera, J.C., Castelán-Jaime, S.V., Hernández-Pineda, G.S., Mohammed, B., Ángeles-Hernández, J.C., Praga-Ayala, A.R., Montelongo-Pérez, H.D. (2018) Inventory of enteric methane emissions by cattle in the dry-land regions of México using the IPCC 2006 Tier 2 main method. *Proceedings of the 10th International Symposium on the Nutrition of Herbivores*, Clermont-Ferrand, France, 2–6th September 2018. *Advances in Animal Biosciences*, 9 (3), 739. <https://doi.org/10.1017/S2040470018000146>.

Castelán-Ortega, O.A., Ku-Vera, J.C. (2019). Capítulo 22: Ganadería, in: *Estado Del Ciclo Del Carbono En México: Agenda Azul y Verde*. Programa Mexicano del Carbono (PMC), Texcoco, Estado de México, México.

Castelán-Ortega, O.A., Ku-Vera, J.C., Ángeles-Hernández, J.C., Hernández-Pineda, G.S., Benaouda, M., Molina, L., Ramírez-Cancino, L., Castelán-Jaime, S.F., González-Ronquillo, M., Vázquez-Carrillo, M.F., Montelongo-Pérez, H.D., Cardoso-Gutiérrez, E., Villegas- Estrada I.D. (2019) First Tier 2 enteric methane emissions national inventory for cattle in Mexico and analysis of spatially distributed emissions. A baseline for mitigation. *Proceedings of the 7th GGAA – Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference*, August 4th to 8th, 2019, Iguassu Falls/Brazil. A. Berndt, L. G. Pereira Ribeiro, and A. L. Abdalla, Editors. Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa), Embrapa Southeast Livestock, Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply, ISSN 1980-6841, pp: 175.

Cuevas-Contreras, J. A. (2014) Correlación entre ácido nítrico gaseoso y ozono en un sitio receptor de smog fotoquímico de la Ciudad de México. Tesis maestría. UNAM.

de Foy, B., and Schauer, J. J. (2022) An improved understanding of NO<sub>x</sub> emissions in South Asian megacities using TROPOMI NO<sub>2</sub> retrievals. *Environ. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac48b4>

Herrera, B., Bezanilla, A., Blumenstock, T., Dammers, E., Hase, F., Clarisse, L., Magaldi, A., Rivera, C., Stremme, W., Strong, K., Viatte, C., Van Damme, M., and Grutter, M. (2022) Measurement report: Evolution and distribution of NH<sub>3</sub> over Mexico City from ground-based and satellite infrared spectroscopic measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 14119–14132, <https://doi.org/10.5194/acp-22-14119-2022>.

Martínez-Sabari, Evelyn Elisa, & García-Reynoso, José Agustín. (2021). Meteorological data assimilation for air quality modeling with WRF-Chem: Central Mexico case study. *Atmósfera*, 34(3), 311-336. <https://doi.org/10.20937/atm.52804>

Noyola A., Paredes M.G., Güereca L.P., Molina L.T., Zavala M. (2018) Methane correction factors for estimating emissions from aerobic wastewater treatment facilities based on field data in Mexico and on literature review., *Sci. Total Environ*, 639, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.111>, 2018.

Paredes M.G., Güereca L.P., Molina L.T., Noyola A. (2015) Methane emissions from stabilization ponds for municipal wastewater treatment in Mexico, *J. Integr. Environ. Sci.*, 12:sup1, 139-153, DOI: 10.1080/1943815X.2015.1110185.

Rivera, C., Sosa, G., Wöhrnschimmel, H., de Foy, B., Johansson, M., and Galle, B. (2009). Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6351–6361, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6351-2009>.

Rosas Pérez, I., Ruiz Suárez, L.G., Grutter de la Mora, M., García Reynoso, A., Jazcilevich Diamant, A., Torres Jardón, R., et al. (2006) *Calidad del Aire y la Relación Ciudad-Bosque, Informe Final. Proyecto: SEMARNAT-CONACYT C01-0881/A1*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México D.F., 113 pp.

Torres-Jardón, R., Reynoso-García, A., Jazcilevich, A., Ruíz-Suárez, L.G., Keener, T.(2009) Assessment of the O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivity of Mexico City through an indicators-based approach: measurements and numerical simulations comparison. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59, 1155-1172. UNEP (United Nations Environment Programme). (2021) COP26 ends with agreement but falls short on climate action, 15 November 2021. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>.

Zavala, M., Brune, W. H., Velasco, E., Retama, A., Cruz-Alavez, L. A., & Molina, L. T. (2020). Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area. *Atmospheric Environment*, 238, 117747.

## RESUMEN DE LA SESIÓN 6.

### POLÍTICAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES Y MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE

**Tabla S6.1.** Temas y preguntas clave discutidas en la Sesión 6: “Políticas para reducir emisiones y mejorar la calidad del aire”

Subtemas	Preguntas clave
Barreras para aumentar la ambición en fuentes y sectores	<p>¿Cuáles son los retos que enfrentan los tomadores de decisiones en el desarrollo e implementación de políticas para mejorar la calidad del aire?</p> <p>¿Cuáles son las acciones que Usted planea para aumentar la ambición y catalizar el aire limpio?</p> <p>¿Cuál es la base científica para sustentar estas acciones?</p> <p>¿Cuáles son las barreras de política para implementar estas acciones y cómo superarlas?</p>
Movilidad y transporte sustentables	<p>¿Cuáles son las acciones de movilidad y transporte que se están planeando para aumentar la ambición en cuanto a la reducción de emisiones?</p> <p>¿Cuáles son las bases técnicas y científicas que sustentan estas acciones?</p> <p>¿Cuáles son las barreras de política para implementarlas y cómo superarlas?</p>

A continuación se muestran los resúmenes de las presentaciones y discusiones durante la Sesión 6 del taller.

#### 6.1 Barreras para aumentar la ambición en fuentes y sectores

##### Conclusiones (Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa)

- **Primera.** En las entidades es claro el impacto del cambio climático que agravará los problemas de calidad del aire de diversas maneras. Esto genera el reto y la oportunidad de la gestión integral y armonizada de contaminantes climáticos de vida corta y de contaminantes del aire (ProAire-PEACC).
- **Segunda.** Es necesario actualizar y completar el marco jurídico, tanto local como nacional. También fortalecer las acciones de vigilancia de que se cumple con la normatividad, tanto en fuentes móviles, industria, servicios y comercios.

- **Tercera.** La disponibilidad de recursos humanos y económicos son una limitante para la implementación de las acciones planteadas. Los recursos obtenidos de los PVVO pueden generar fondos para estos temas, pero es importante identificar recursos adicionales.
- **Cuarta.** Es necesario también que la agenda de trabajo trascienda los cambios en las administraciones locales. Las políticas de calidad del aire requieren de atención de largo plazo para brindar resultados.
- **Quinta.** En la implementación de acciones para mejorar la calidad del aire y mitigar el cambio climático se requiere de la participación transversal y coordinada de las diferentes Secretarías que atienden diferentes temas (como transporte y movilidad, finanzas públicas, salud pública, gobernanza, etc.) así como la armonización de intervenciones entre los diferentes órdenes de gobierno.
- **Sexta.** La información de calidad del aire es fundamental para la toma de decisiones. Esto hace necesario mantener y mejorar el monitoreo atmosférico, y hacer que la información esté disponible para el público en general y los tomadores de decisiones en el sector público.
- **Séptima.** Migrar la matriz energética a fuentes renovables y controlar emisiones de sectores que aún tienen grandes emisiones, por ejemplo, las ladrilleras. Mejorar también el manejo del fuego y reducir los incendios generados por las personas.
- **Octava.** La información científica ha sido básica para identificar fuentes y contaminantes prioritarios, sobre todo en la ZMVM, es necesario mantenerla actualizada. Debe ampliarse a toda la región de la CAME y a nuevos contaminantes.

## **Sesión 6.2. Movilidad y transporte sustentables**

### **Resúmenes de las presentaciones** (Ing. Alejandro Villegas López)

**Ejes de Hidalgo:** Integración transversal de políticas, profesionalización de administración pública, descentralización y apoyo a municipios y electrificación.

- Transporte eléctrico masivo.
- Los vehículos medianos eléctricos para transporte público son muy caros.
- Hidalgo se propone ser el principal productor de vehículos eléctricos en América Latina en 10 años: cadena de valor.
- En 10 años el transporte público masivo deberá ser sustentable.
- Tren de pasajeros al AIFA.
- Programa del Respeto al Peatón.
- 2do corredor masivo, auto tren. Quedará para la siguiente administración.

### **Reto:**

- Financiero. En estos momentos la mayoría de los Estados no cuenta con recursos, especialmente para altos costos iniciales de vehículos eléctricos.

### **Querétaro:**

- El 70% del transporte público utiliza gas natural como combustible desde 2014.
- Motores certificados con aprobación internacional.
- Autobuses en gas natural desde 2014.
- Red de estaciones de carga de gas natural a lo largo de la zona metropolitana.
- El Estado puso las condiciones, centralizó el sistema a través de empresas por medio de un fideicomiso. Precio del gas es menor que el del diésel.
- Impulso a la bicicleta.
- Se han transformado las paradas del transporte público, así como sus vialidades donde transita.

### **SICT - DG Autotransporte**

- Existencia de la Ley de Movilidad y Seguridad Vial Federal: Se reconoce el derecho a la movilidad. El centro son las personas.

#### **4 objetivos:**

- 1) Determinación de un sistema de seguridad vial, los procesos de movilidad podrán tener seguimiento y priorización del movimiento de las personas y vigilancia del dinamismo de los bienes y mercancías.
- 2) Coordinación con los tres órganos de gobierno y participación de la sociedad.
- 3) Bases para priorizar un menor costo ambiental y social y la intermodalidad, acabar con recorridos largos de un solo vehículo.
- 4) Mecanismos para identificar factores de riesgo para reducir lesiones y muertes por siniestros viales.
  - Nuevas normas mexicanas para contar con transportes eficientes y el control de sus emisiones.
  - Construcción de programa de sustitución de vehículos.
  - Realizar mayores operativos para mantener el estado mecánico de todos los transportes y reducir las emisiones contaminantes.
    - la secretaria de infraestructuras DGAF elabora instrumentos para la movilidad sustentable.
  - Se están estableciendo normas para las verificaciones para las óptimas condiciones de los vehículos automotores.
    - alcance de mecanismos para crear inercias con la industria.

### **Ciudad de México:**

- Mejorar, integrar y proteger.
- El transporte público no está llegando a la mayoría de los que lo necesitan.

- Impulsar los automóviles de no combustión y redistribución del espacio.
- Mejorar el transporte público: 500 trolebuses azules.
- Ecobici para el centro de la ciudad.
- La encuesta Origen-Destino fue de gran relevancia para trazar la infraestructura del Metrobús, Cablebús y ciclista
- La expansión urbana en la periferia aumenta el tráfico en toda la ZMVM.
- Mantener los viajes en transporte público.
- Dar espacio a quien lo más lo requiere y más necesita.
- El modelo de hombre-camión ha mejorado, tienen un mejor parque vehicular y se monitorea.
- Se planean las líneas 3,4 de Cablebús. Actualmente transporta 70 mil pasajeros diarios.
- Mejora de la electromovilidad en la ciudad.
- Se impulsa la electromovilidad por parte del transporte público.
- Promoción de movilidad no motorizada, se han construido 200 km de ciclovías.

## RESUMEN DE LA SESIÓN 7

### REVISIÓN DE LA PRIORIZACIÓN DE ACCIONES CON BASE EN INFORMACIÓN Y CONOCIMIENTO

#### Comentarios del Dr. Gustavo Sosa Iglesias

*Algunas de las medidas de control de la contaminación del aire en la ZMVM están funcionando, pero se requiere incrementar el esfuerzo y ser más eficaces.*

- Tendencia de más de 15 años en la reducción de todos los contaminantes normados, unos más que otros
- Aumento en la radiación de la UV como consecuencia de la reducción en la concentración de aerosoles secundarios
- Los COVs presentan también una reducción en las concentraciones, así como la reactividad de las emisiones de vehículos a gasolina
- El 68% de la masa de las PM<sub>2.5</sub> es menor a 1 µm, esto implica que el aporte de los compuestos orgánicos de baja presión de vapor se está reduciendo en el proceso gas-partícula.

#### *Pendientes*

- Ozono troposférico: se necesita mejorar la caracterización de las fuentes locales y externas.
- Reducir las concentraciones de fondo del O<sub>3</sub>.
- Depositación atmosférica ácida (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>3</sub>, Na<sub>eq</sub>). Se necesita estudiar el balance regional de N y S.
- Se necesita estudiar el impacto de los incendios forestales.
- Se necesita monitorear los compuestos tóxicos.
- Se necesita desarrollar inventarios de emisiones con Tier 2.

#### *Acciones*

- Continuar y reforzar las medidas de control de emisiones de precursores de ozono y aerosoles secundarios y extenderlas a otras ciudades de la Megalópolis.
- Impulsar acciones de ordenamiento de las zonas urbanas para reducir su expansión territorial y así apoyar a reducir la concentración de fondo de los contaminantes.
- Diseñar e impulsar el Transporte Público con enfoque Megalopolitano.
- Fortalecer un sistema de vigilancia temprana de incendios forestales (monitoreo con satélites y en superficie).

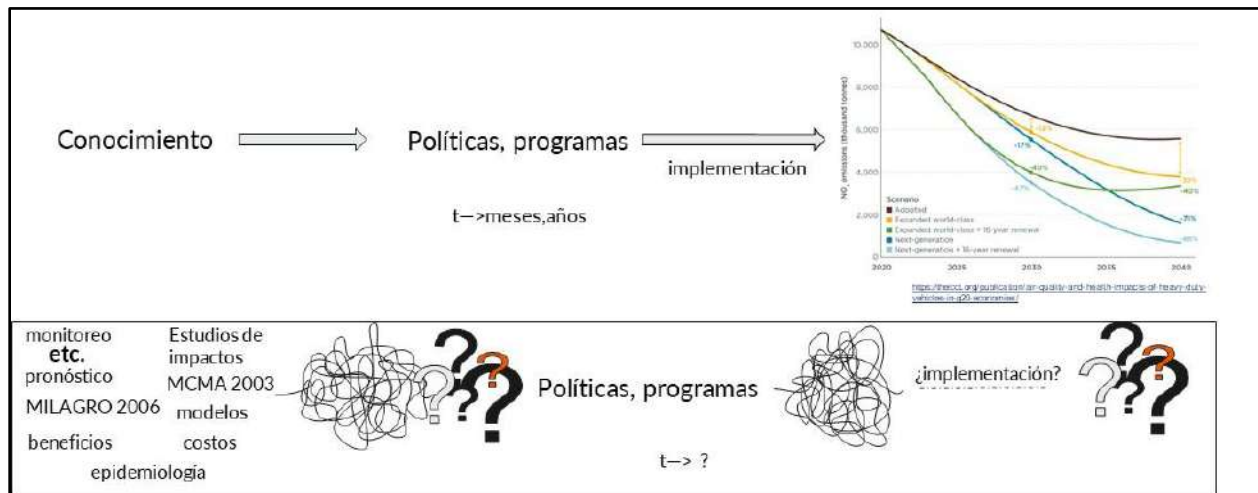
- Coordinar acciones para implementar el Modelo de Pronóstico de Calidad del Aire Megalopolitano, con el apoyo de los distintos grupos de modelación.

### Comentarios de la Dra. Leonora Rojas Bracho y la Mtra. Verónica Garibay:

#### *Año 2045. Una visión para la ZMVM*

- **Se redujeron las emisiones** de las partículas, los precursores de ozono y los compuestos tóxicos debido a la exitosa implementación de normas, programas y políticas aplicados a combustibles y fuentes de emisión, a la cooperación ciudadana y la reconfiguración urbana.
- **Se cumplen las NOM** anuales de calidad del aire en toda la Megalópolis. Son muy raros los días en que se rebasa alguna norma diaria.
- **Se redujo la mortalidad prematura** asociada con enfermedades cardiovasculares y pulmonares. Las enfermedades como el asma, el cáncer de pulmón y otras asociadas con la contaminación van a la baja.
- **La Megalópolis es ejemplo** nacional e internacional de buenas (y exitosas) prácticas para mejorar la calidad del aire.

#### *Lo que sabemos y lo que necesitamos saber*



La figura muestra la manera en que el conocimiento científico obtenido a través de estudios de campo, modelación de la calidad del aire, estudios de salud pública, y evaluación de costos y beneficios puede servir como base para el diseño, implementación y evaluación de políticas y programas de mejora de calidad del aire. La existencia de incertidumbres en los procesos de diseño, implementación y evaluación son inevitables pero no deben resultar en la inacción.

#### *Nuestro objeto de estudio: análisis y evaluación de políticas públicas*

Nuestras preguntas fundamentales:



- 1) ¿Qué hacemos para que lo que hacemos sea más efectivo?
- 2) ¿Qué ha pasado? ¿Qué ha funcionado y qué no ha funcionado?
- 3) ¿Cómo hacemos para mejorar la coordinación, colaboración y comunicación entre actores?

***Nuestras preguntas se relacionan con una evaluación sistemática de lo que hemos (se ha) hecho: ¿qué ha funcionado y qué no ha funcionado?***

- 1) ¿Cuáles son los mecanismos legítimos e institucionales que permiten mejorar la coordinación, comunicación y colaboración entre los actores relevantes para avanzar en la dirección correcta, dada la naturaleza intersectorial, multidisciplinaria e inter-programática de este complejo problema ambiental?
- 2) ¿Qué hacemos para tener una plataforma que permita la implementación efectiva de las regulaciones existentes para reducir las emisiones vehiculares?

→ Las respuestas permitirán establecer las prioridades de investigación y la priorización de las políticas públicas

#### ***Año 2045. Nuestra visión para la ZMVM***

- El cielo es azul y, al acercarnos a la Megalópolis, vemos edificios, árboles, montañas: desapareció la “nata café”.
- Vemos los volcanes: todos sabemos hacia donde voltear para verlos.
- Preferimos usar el transporte público, limpio, seguro y eficiente, al coche particular.
- Disfrutamos caminar y andar en bicicleta en las calles.
- Los pocos vehículos que circulan son de bajas emisiones, eléctricos o de celdas de hidrógeno.
- Las niñas y los niños salen siempre a jugar durante el recreo, sin restricciones.
- No hay contingencias ambientales.
- Hacemos ejercicio al aire libre sin preocupación.