

Diagnóstico del estado del arte de la química atmosférica en México con relación a los gases de efecto invernadero y los contaminantes climáticos

Informe Final



Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por: **Luis Gerardo Ruiz Suárez**. Número de Contrato: IC-2017-049

Para mayor información sobre este estudio, consultar con la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del INECC.

Citar como:

INECC-PNUD México. 2018. *Diagnóstico del estado del arte de la química atmosférica en México con relación a los gases de efecto invernadero y los contaminantes climáticos*. Proyecto 85488 "Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", Luis Gerardo Ruiz Suárez. 94 pp. México

Colaboraron en este informe:

Dra. Patricia Domínguez Taylor

M. en C. Bertha Eugenia Mar Morales

Palabras clave:

Sexta Comunicación Nacional

Calidad del aire

Contaminantes climáticos de vida corta

Inventarios de emisiones

Monitoreo de calidad del aire

Modelación de calidad del aire

Agenda científica

Contenido

Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	7
Acrónimos	8
Glosario	10
Resumen Ejecutivo	11
I. Antecedentes	11
II. Objetivo general.....	11
III. Método	12
IV.- Objetivos y resultados particulares	12
a) Revisar las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para el monitoreo de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico.	12
b) Revisión de las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para la modelación de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico.	13
c) Revisión de las capacidades nacionales (instrumentos de información adecuados en materia de emisión y exposición a contaminantes climáticos de vida corta), adicionales al monitoreo, para estimar los costos de la contaminación atmosférica.	14
d) Revisión de los instrumentos de gestión existentes en México para la protección de cultivos, bosques y patrimonio cultural por exposición a contaminantes y proponer acciones de mejora.....	14
e) Revisar el estado del arte en México sobre el impacto de la expansión urbana en las emisiones de forzantes climáticos	15
f) Revisar las tendencias en las emisiones de forzantes climáticos y comparaciones de inventarios de emisiones de carbono negro.	15
g) Elaborar una propuesta de agenda científica del INECC sobre GEI y CCVC	16
1 Preámbulo	17
2 Introducción.....	18
2.1 Antecedentes internacionales	18
2.1.1 El Convenio de Estocolmo.....	18
2.1.2 El Convenio de Río	19
2.1.3 El Protocolo de Montreal.....	20
2.1.4 Protocolo de Kioto	21
2.2 Antecedentes nacionales	22
2.2.1 Los contaminantes climáticos de vida corta	23
2.2.2 La contaminación atmosférica en México	23
3 Revisión de las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para el monitoreo de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico	26
3.1 Monitoreo.....	26

3.1.1	Antecedentes sobre monitoreo	26
3.1.2	Regulación sobre monitoreo.....	27
3.1.3	Infraestructura para el monitoreo	29
3.1.4	Otros CCVC.....	32
3.1.5	El monitoreo de los nuevos CCVC	32
3.1.6	El monitoreo en la ciencia.....	34
3.2	Propuestas	35
3.2.1	Sobre el monitoreo	35
3.2.2	Sobre los ProAire	35
4	Revisión de las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para la modelación de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico	36
4.1	Antecedentes sobre modelación en México	36
4.2	Capacidades actuales de modelación	37
4.2.1	Métodos estadísticos de modelación	38
4.3	Propuestas	38
5	Revisión de las capacidades nacionales (instrumentos de información adecuados en materia de emisión y exposición a contaminantes climáticos de vida corta), adicionales al monitoreo, para estimar los costos de la contaminación atmosférica utilizando informes de gobierno, ProAires, tesis y artículos científicos más recientes.	40
5.1	Antecedentes	40
5.2	Métodos para estimar los costos de la contaminación atmosférica	41
5.2.1	Mapas de excedencias	41
5.2.2	Sobre los receptores	42
5.2.3	Población:	42
5.2.4	Funciones dosis/respuesta o exposición/respuesta.....	43
5.3	Propuestas	44
5.3.1	Sobre los mapas de excedencias.....	44
5.3.2	Sobre funciones dosis/respuesta o exposición/respuesta	44
6	Revisión de los instrumentos de gestión existentes en México para la protección de cultivos, bosques y patrimonio cultural por exposición a contaminantes y propuesta de acciones de mejora.	45
6.1	Antecedentes en la legislación ambiental nacional	45
6.2	¿Existe el marco legal para el monitoreo rural de la calidad del aire?	45
6.3	¿Quién es responsable del monitoreo rural?	47
6.4	Conclusiones sobre el marco normativo para la gestión de la calidad del aire en medios rurales	49
6.5	Propuestas	49
7	El impacto de la expansión urbana en las emisiones de forzantes climáticos.....	50
7.1	El estado del arte en México	50
7.2	Conclusiones sobre expansión urbana y emisiones	53
7.3	Recomendaciones sobre expansión urbana y emisiones	53

8	Tendencias en las emisiones de forzantes climáticos y comparaciones de inventarios de emisiones de carbono negro.....	54
8.1	Carbono negro en la política pública a nivel estatal	54
8.2	Los inventarios nacionales de carbono negro.....	55
8.2.1	El inventario preliminar de CN	55
8.2.2	El CN en la Quinta Comunicación Nacional.....	55
8.2.3	El CN en el Primer Informe Bienal de Actualización ante la CMNUCC	60
8.3	Análisis comparativo	62
8.4	Conclusiones sobre buenas prácticas en el inventario de CN	64
8.5	Conclusiones sobre mitigación	65
9	Propuesta de agenda científica del INECC sobre GEI y CCVC	66
9.1	Notas previas	66
9.2	Introducción.....	68
9.3	Ciencia básica en química atmosférica.....	68
9.3.1	Profundizar en el conocimiento de la distribución, reacciones, transformaciones y la vida media tanto de gases y como de partículas en la atmósfera baja.....	69
9.3.2	Integración de los estudios sobre química atmosférica con los modelos meteorológicos y climáticos.....	70
9.3.3	Estudio de la química atmosférica de gases y componentes de partículas suspendidas particularmente nocivos para la salud humana	71
9.3.4	Interacción con ecosistemas naturales o manejados	71
9.4	Aspectos sociales.....	72
9.4.1	Urbanización	72
9.4.2	Ordenamiento territorial y cuencas atmosféricas	73
9.4.3	Barreras institucionales	74
9.5	Instrumentos.....	74
9.5.1	El inventario de daños	74
9.5.2	El inventario de emisiones	75
9.5.3	Monitoreo.....	76
9.5.4	Modelación.....	77
9.6	Infraestructura	78
9.6.1	El Laboratorio del INECC.....	78
9.6.2	La Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos	78
9.6.3	Laboratorio Nacional de Contaminación Atmosférica	78
9.6.4	El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra	79
9.6.5	Un repositorio nacional de datos.....	79
9.6.6	Supercómputo para modelación de calidad del aire.	79
10	Referencias	80

Índice de Figuras

Figura 1 Esquema que muestra el carácter dual de los precursores de ozono y del aerosol fotoquímico como contaminantes locales y climáticos.	22
Figura 2 Modelo conceptual del proceso de gestación de las políticas públicas para controlar la contaminación atmosférica y la mitigación del cambio climático asociada	24
Figura 3 Distribución geográfica de las cuencas atmosféricas de la República Mexicana	29
Figura 4 Distribución geográfica de las redes de monitoreo reportadas en el Sinaica. Fuente: Tabla A1-1, en Anexo 1, elaboración propia con datos de Sinaica.	31
Figura 5 Cambio en la distancia promedio para ir al trabajo desde el municipio de residencia, 2000-2010. Fuente (INECC 2015a).	51
Figura 6 Huella de carbono por transporte durante el uso de vivienda de interés social. Fuente (Betancourt Quiroga 2017)	52
Figura 7 Modelo conceptual de los impactos del modelo presente de urbanización difusa en las emisiones de GEI y CCVC. Las líneas punteadas apuntan a otros procesos de deterioro ambiental y de calidad de vida fuera de los alcances del proyecto ECAIM. Fuente (INECC 2015a).	53
Figura 8 Distribución de emisiones por sector en el inventario nacional de CN en la Quinta Comunicación Nacional. La contribución de CN por emisiones fugitivas no fueron estimadas en la Quinta Comunicación por no tener la información necesaria. Para fines de comparación aquí se toman prestadas las emisiones reportadas y se incorporan a las del sector Energía.	56
Figura 9 Distribución de emisiones por subsector en sector energía del inventario nacional de CN en la Quinta Comunicación Nacional. Las emisiones fugitivas no se estimaron por no contar información sobre ello.	57
Figura 10 Distribución relativa sectorial de CN en 1990 y en el 2010.	58
Figura 11 Distribución relativa sectorial de CO ₂ e en 1990 y en el 2010.	58
Figura 12 Tendencias de emisión de CN (panel superior) y CO ₂ e (panel inferior) de 1990 a 2010. Fuente de datos de actividad, INEGI 1990-2010 en la Quinta Comunicación Nacional, [SEMARNAT, 2012].	59
Figura 13 Distribución de las emisiones de CN en 1990 y 2010 (Gg %) del sector energía.	59
Figura 14 Emisiones (Gg %) del sector energía de CO ₂ e de 1990 al 2010	60
Figura 15 Distribución de emisiones por sector en el inventario nacional de CN en el Informe Bial de Actualización ante la CMNUCC.	60
Figura 16 Distribución de emisiones por subsector en sector energía del inventario nacional de CN en el Primer Informe Bial de Actualización ante la CMNUCC.	61

Índice de Tablas

Tabla 1 Emisiones de Gases y compuestos de efecto invernadero, INECC (2012)	33
Tabla 2 Comparación de las emisiones de CN total y sectorial tomado del 5NC, 1st BRP y 6NC para 2010. .	62
Tabla 3 Comparativo total subsectorial de las emisiones de CN del sector energía en la Quinta Comunicación, BUR 2013 y la 6 ^a Comunicación 6NC	63
Tabla 4 Diferencias absolutas y relativas de las emisiones de CN del sector Energía para el 2010 10.	64

Acrónimos

AGEB	Área Geoestadística Básica
ANP	Áreas Nacionales Protegidas
AOS	Aerosol orgánico secundario
CAM	Comisión Ambiental Metropolitana
CAMe	Comisión Ambiental de la Megalópolis
CARB	Junta de Recursos del Aire de California según sus siglas en inglés
CCA-UNAM	Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México
CCAC	Coalición de Clima y Aire Limpio
CCL	Cónica Conforme a Lambert
CCVC	Contaminantes climáticos de vida corta
CE	Comunidad Europea
CFCs	Clorofluorocarbonos
CH ₄	Metano
CLRTAP	Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza de largo alcance
CMNUCC	Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CN	Carbono negro u hollín
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CONACULTA	Consejo Nacional para la Cultura y las Artes
COP	Compuestos orgánicos persistentes
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CO _r	Carbono orgánico
COV	Compuestos orgánicos volátiles
COVS	Compuestos orgánicos semivolátiles
ECAIM	Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la Región Centro de México
ENACC	Estrategia Nacional de Cambio Climático
ENCA	Estrategia Nacional de Calidad del Aire
GEI	Gases con efecto invernadero
GIS	Sistema de Información Geográfica según sus siglas en inglés
HCFC	Hidroclorofluorocarbonos
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
INE	Instituto Nacional de Ecología
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
INEGEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INEM	Inventario Nacional de Emisiones
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático según sus siglas en inglés
ITESM	Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey
LAN	Ley de Aguas Nacionales

LANOT	Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra
LFRA	Ley Federal de Responsabilidad Ambiental
LGCC	Ley General de Cambio Climático
LGDFS	Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable
LGEPAS	Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables
LGEPPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LGVS	Ley General de Vida Silvestre
LH	Ley de Hidrocarburos
MGN	Marco Geoestadístico Nacional
MILAGRO	Iniciativa de una Megaciudad: Observaciones científicas locales y globales, por sus siglas en inglés
NOM	Norma Oficial Mexicana
NOx	Óxidos de nitrógeno
O ₃	Ozono
OMS	Organización Mundial de la Salud
PEACC	Programa Estatal de Acción contra el Cambio Climático
PECC	Programa Especial de Cambio Climático
PIB	Producto Interno Bruto
PM	Material particulado
PM ₁₀	Partículas menores a 10 micrómetros
PM _{2.5}	Partículas menores a 2.5 micrómetros
PNMA	Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ProAire	Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire
PST	Partículas suspendidas totales
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera
SINAI	Sistema Nacional de Información Ambiental
SINAICA	Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire
SMA	Subsecretaría de Mejoramiento Ambiental
SMCA	Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire
SMQA	Sistema de Aseguramiento de Calidad según sus siglas en inglés
SO ₂	Dióxido de azufre
SRE	Secretaría de Relaciones Exteriores
USCUSS	Uso de suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura
ZMPT	Zona Metropolitana de Puebla y Tlaxcala
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Glosario

Aerosol fotoquímico

Sistema heterogéneo formado por aire y partículas suspendidas en este, donde especies químicas a niveles de concentración vestigio se encuentran distribuidas en equilibrio entre la fase gas y la fase sólida o líquida de las partículas suspendidas, y a la vez ocurren reacciones químicas iniciadas por la radiación solar.

AOT40

El valor AOT40, acrónimo de “Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 Parts Per Billion”, se expresa en nmol/mol y es la suma de la diferencia entre las concentraciones horarias superiores a 40 nmol/mol o 40 partes por mil millones en volumen, a lo largo de un período dado definido por el tipo de receptor utilizando únicamente los valores horarios medidos entre 08:00 y 20:00 horas.

Carbono negro (CN)

Material amorfo de carbono, formado durante la combustión incompleta de combustibles de contenido carbónico, presente en las partículas suspendidas en aire, absorbe radiación solar en un amplio rango de frecuencias. Es un potente contaminante climático.

Carbono orgánico (COrg)

En el aerosol fotoquímico es el carbono presente en compuestos orgánicos disueltos o adsorbidos en las partículas suspendidas en aire. Puede absorber radiación o dispersarla, en ese sentido puede contribuir a calentar o enfriar la atmósfera.

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Compuestos orgánicos con presiones de vapor tales que les permiten evaporarse a condiciones normales de uso.

Contaminantes climáticos de vida corta (CCVC)

Otros gases con las mismas propiedades de calentar la atmósfera que los GEI pero con tiempos de residencia en la atmósfera, más cortos como el ozono, los hidroalocarbonos, en esta categoría también se incluye al metano y al carbono negro. Como el ozono no se emite, sino que se forma en la atmósfera, sus precursores también se consideran CCVC.

Gases de efecto invernadero (GEI)

Compuestos presentes en forma gaseosa en la atmósfera capaces de absorber y emitir radiación infrarroja. Una fracción de esa radiación absorbida puede transferirse por colisiones a las moléculas de aire y calentar así la atmósfera. Los principales son CO₂, N₂O, CH₄, Clorofluorocarbonos.

Gases de efecto invernadero indirecto

Otra forma de llamar a los precursores de ozono, pues actúan en el clima a través de su formación.

Resumen Ejecutivo

I. Antecedentes

Las evidentes interrelaciones bidireccionales entre la contaminación atmosférica y el cambio climático son dos problemas transversales que se han abordado como problemas independientes pero los cuales convergen en la raíz de ambos problemas. Los procesos comunes son las fuentes de combustión en todas sus formas donde hay combustión incompleta. Con el objeto de contribuir a la elaboración de la Sexta Comunicación Nacional, en este trabajo se analiza el desarrollo de las capacidades en México para abordar conjuntamente ambos problemas en su común denominador, los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC).

A nivel mundial México ha destacado por los esfuerzos que dedica a enfrentar estos problemas. Sobresale la publicación de la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que coloca a nuestro país como uno de los primeros, junto con el Reino Unido, en contar con una Ley en la materia. Para la instrumentación de esta ley, se publicó la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40 (ENACC), que describe los ejes estratégicos y las líneas de acción (sin definir acciones concretas o responsables particulares) para orientar las políticas de los tres órdenes de gobierno y fomentar la corresponsabilidad con los diversos sectores de la sociedad).

Uno de los mayores compromisos climáticos que ha firmado México es el Acuerdo de París, el cual fue ratificado por México en abril de 2016, nuestro país se compromete a reducir 22 por ciento sus emisiones de gases con efecto invernadero y de contaminantes de vida corta y reducir en un 51 por ciento el carbono negro, con el fin de contribuir a la disminución de los efectos del cambio climático.

Los CCVC son contaminantes atmosféricos que afectan a la salud, contribuyen significativamente al cambio climático y afectan la calidad del aire de las ciudades. Los principales CCVC son el carbono negro u hollín (CN), metano (CH₄), el ozono troposférico (O₃) y sus precursores (monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx)), así como algunos hidrofluorocarbonos (HFCs). Los CCVC permanecen en la atmósfera por periodos relativamente cortos, por lo tanto, también se conocen como forzadores del clima de corta duración. Debido a su naturaleza, las emisiones de estos agentes pueden ser rápidamente controladas y reducidas con la tecnología existente.

II. Objetivo general

El objetivo general de esta consultoría fue evaluar la capacidad de diseño y gestión de política pública sobre especies químicas que actúan como contaminantes criterio y/o como forzantes climáticos de vida corta, y proponer opciones de mejora de esa capacidad.

III. Método

Las revisiones se realizaron consultando la literatura científica, tesis de posgrado, la legislación y la normatividad ambiental, con énfasis en la referente a la calidad del aire y del cambio climático. Se revisaron también ProAires y Planes de Acción Climática de entidades federativas y del Gobierno Federal.

A partir de los resultados de las revisiones, se elaboró una propuesta inicial de agenda científica para abordar las oportunidades prioritarias encontradas. Esta fue puesta a consideración de destacados integrantes de la comunidad científica en las ciencias de la atmósfera. La consulta consistió en enviarles el borrador, recabar sus respuestas y luego se convocó a un taller realizado el 10 de abril de 2018 para discutir las propuestas. De la minuta de la reunión se tomaron elementos para mejorar el borrador y ofrecer la propuesta de agenda científica del INECC sobre química atmosférica y forzantes climáticos.

IV. Objetivos y resultados particulares

- a) Revisar las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para el monitoreo de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico.

México tiene avances considerables en el monitoreo de la calidad del aire, pero todavía existen importantes áreas de oportunidad a nivel nacional para mejorar el monitoreo con objetivos claros de gestión.

Los datos de las redes de monitoreo se han usado en estudios científicos sobre tendencias de niveles de contaminantes, en campañas intensivas y para estudios de exposición potencial de la población, así como para validar inventarios de emisiones. La ZMVM concentra la gran mayoría de estos estudios, para realizar estudios similares en otras partes del país, se requiere garantizar la continuidad y calidad de las series de tiempo que generan las redes de monitoreo de la calidad del aire.

Las oportunidades de mejora de los SMCA están correctamente identificadas en diferentes estudios (INECC 2011, INECC 2014), la ENCA (SEMARNAT 2017), el ProAire de la Megalópolis 2017-2030 (SEMARNAT 2017), y la guía para elaborar ProAires (SEMARNAT 2015). A esas oportunidades de mejora se deben agregar, en la próxima actualización de la NOM-156-SEMARNAT, la definición de varias categorías de estaciones de monitoreo por su función. Se deben incluir los cultivos y los ecosistemas como objetos de protección de esa NOM y de los ProAires. El concepto de cuenca atmosférica debe ser incorporado a la NOM-156.

El control de la contaminación atmosférica, el monitoreo y la gestión de la calidad del aire deben realizarse en términos de cuenca atmosférica.

Para valores críticos en términos de hora, incluir en los informes anuales y los ProAires, el número de días y horas acumuladas en que se excede la norma de 1 hora y el promedio móvil. Si las funciones exposición-respuesta están calculadas de acuerdo a la exposición horaria, incluyendo la exposición horaria a un promedio móvil, el número de horas que se excede la NOM o el nivel crítico es la variable a considerar.

En los informes anuales y en los ProAires reportar las tendencias anuales de excedencias de las NOMs respectivas, relativas a la última actualización de la NOM y la actualización de las series de tiempos a ese valor.

Los criterios de suficiencia de datos deben homologarse en los informes anuales de calidad del aire y en los ProAires. Se propone que el criterio de suficiencia de 75 por ciento debe aplicarse solo para decidir si una municipalidad o zona metropolitana cumple con la norma.

Por otro lado, para decidir si una municipalidad o zona metropolitana no cumple la NOM, es suficiente una sola medición excediendo la NOM, sin importar la suficiencia de datos. El uso del criterio de suficiencia para decidir si un sitio excede la norma beneficia a la autoridad que descuida el monitoreo, pero perjudica el derecho humano a la salud y a la información. Bajo un criterio *pro homine*, la autoridad ambiental incurre en responsabilidad ambiental.

Para análisis de tendencias debe decidirse un criterio de suficiencia con alta tolerancia a la ausencia de datos, pero consistente a lo largo de los años.

El incipiente monitoreo de carbono negro se enfrenta a los mismos retos que el monitoreo de los contaminantes criterio con la complejidad adicional de ausencia normas oficiales sobre niveles máximos y métodos de medición. Aun así se reconoce que los contaminantes criterio son en estricto sentido CCVC; se suman a ellos los COV, CN y CO_r. Por su corto tiempo de residencia, el monitoreo atmosférico de ellos es parte esencial de su sistema MRV. Para reclamar crédito por acciones de mitigación de CCVC es indispensable un sistema MRV sólidamente apoyado en una red de SMCA. Éstos deben ser robustos y confiables; los datos generados por ellos deben permitir observar tendencias y poder asociar los cambios observados en ellas a intervenciones de política pública. A pesar de los esfuerzos realizados, México está todavía lejos de tener una red de SMCA de esas características. Tenerla es una tarea estratégica de primer orden.

- b) Revisión de las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para la modelación de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico.

Se realizó una revisión de las capacidades nacionales en materia de recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera para la modelación de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico, destacándose a la modelación como una herramienta científica que permite comprender y evaluar los procesos químico-atmosféricos más complejos, con varios objetivos múltiples aplicados a la gestión pública y a la investigación aplicada.

Se destaca que la modelación en México se encuentra aún en desarrollo y pocas instituciones a nivel nacional tienen capacidades y por lo tanto se debe establecer una ruta estratégica para fortalecer el desarrollo de capital humano, infraestructura de igual manera en la universidades y centros de investigación, como en los órganos de gobierno de la gestión de la calidad del aire.

Se destaca la importancia de series de tiempo de contaminantes de alta calidad y cobertura espacial para validar modelos de calidad del aire, incluyendo áreas rurales, así como de inventarios de emisiones de alta resolución espacial y temporal para su uso en los modelos de calidad del aire. Estos siempre deben ser sujetos a evaluación contra observaciones.

- c) Revisión de las capacidades nacionales (instrumentos de información adecuados en materia de emisión y exposición a contaminantes climáticos de vida corta), adicionales al monitoreo, para estimar los costos de la contaminación atmosférica.

Cualquier instrumento de gestión en términos climáticos y en la calidad del aire, deberá estar acompañado de un análisis de costos, en este sentido se realizó una revisión de las capacidades nacionales sobre instrumentos de información adecuados en materia de emisión y exposición a contaminantes climáticos de vida corta, adicionales al monitoreo, para estimar los costos de la contaminación atmosférica utilizando informes de gobierno, ProAires, tesis y artículos científicos más recientes.

El análisis establece que se debe fortalecer la capacidad para crear los mapas de excedencias para receptores como son la población, el patrimonio, los ecosistemas y los cultivos agrícolas, de manera similar se deben establecer métricas locales para incluir las funciones dosis-respuesta en salud, cultivos y patrimonio, en particular para aquellos cultivos y materiales de construcción específicos a nuestro país.

- d) Revisión de los instrumentos de gestión existentes en México para la protección de cultivos, bosques y patrimonio cultural por exposición a contaminantes y proponer acciones de mejora.

El fortalecimiento de las acciones y estrategias de mitigación en materia de cambio climático y calidad del aire, deben estar acompañados de instrumentos de gestión acordes a la situación nacional. En este contexto, se realizó una revisión de los instrumentos de gestión existentes en México para la protección de cultivos, bosques y patrimonio cultural por exposición a contaminantes. Resultó evidente que el ozono como no es considerado en el monitoreo rural y por lo tanto existe una evidente ambigüedad en las responsabilidades para la vigilancia en el monitoreo rural.

Se concluye que en general, el marco normativo ya existe y hay claras áreas de oportunidad para establecer con mayor claridad las competencias de vigilancia para hacer cumplimiento del marco normativo, se considera importante definir el impacto del ozono en cultivos, bosques y ecosistemas, siendo la NOM156-SEMARNAT el instrumento que debe incluir el monitoreo atmosférico y el depósito atmosférico en áreas rurales.

e) Revisar el estado del arte en México sobre el impacto de la expansión urbana en las emisiones de forzantes climáticos

Los forzantes climáticos son generados por fuentes antropogénicas y en su gran mayoría se encuentran en zonas urbanas, en este sentido es importante establecer el impacto de la expansión urbana en las emisiones de forzantes climáticos, para definir estrategias apropiadas de mitigación de sus efectos, tanto a nivel local como contaminantes criterio como su efecto global como forzantes climáticos.

Comprender los procesos que dan lugar a la expansión urbana en la forma en que se da en México están bien documentados, pero es más difícil cuantificar el impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de CCVC que se derivan de ello.

El análisis de las opciones de mitigación de emisiones asociadas a la expansión urbana como realmente ocurre en México debe realizarse de forma integral incluyendo, CN, carbón orgánico (CO_r), COV, CO, NO_x y O₃, ya que los procesos asociados con la expansión urbana incluyen condiciones que favorecen la combustión incompleta de gasolina y diésel, siendo mayor la presencia de súper emisores.

Las mayores distancias recorridas, el uso de modos de transporte poco eficientes, el uso de vehículos en las periferias de las zonas metropolitanas, en las que no cumplirían con las normas de emisiones y la saturación de las vías de acceso a las ciudades deben evaluarse correctamente en los inventarios de emisiones. Para la toma de decisiones sobre desarrollos urbanos, las manifestaciones de impacto ambiental deben incorporar un análisis de emisiones en el ciclo de vida de tales desarrollos.

f) Revisar las tendencias en las emisiones de forzantes climáticos y comparaciones de inventarios de emisiones de carbono negro.

Un importante instrumento de gestión son los inventarios de emisiones de forzantes climáticos, los cuales permiten establecer las tendencias sectoriales de los principales emisores. En México, estos instrumentos de contabilidad permitieron realizar esfuerzos importantes para definir las contribuciones nacionales determinadas (NDC's) de México. México incluyó al carbono negro en sus compromisos de mitigación y desde esa perspectiva se realizó un análisis del inventario de carbono negro reportado desde el 2006 hasta el 2015.

México ha reportado dos inventarios nacionales de emisiones, El primero en la Quinta Comunicación Nacional y el segundo en el Primer Reporte Bienal de México, se prepara a reportar su tercer inventario en la Sexta Comunicación Nacional.

Un análisis comparativo sectorial de los inventarios realizados muestra las diferencias que son menores del 6%, entre Quinta Comunicación Nacional y el Primer Reporte Bienal de México. En contraste las diferencias más importantes entre ambos se observaron en el inventario de la Sexta Comunicación Nacional y la Quinta Comunicación Nacional y se encuentran en las estimaciones para los subsectores: industria y construcción, transporte y residencial.

Se recomienda una revisión comparativa exhaustiva de los factores de emisión y/o cocientes de partición usados en los tres inventarios pues las opciones de mitigación que se derivan del análisis de los tres inventarios de emisiones son muy diferentes.

g) Elaborar una propuesta de agenda científica del INECC sobre GEI y CCVC

El objetivo principal es definir una agenda científica en el corto y mediano plazo a nivel nacional sobre la vinculación entre la contaminación atmosférica y el cambio climático identificando los puntos de convergencia entre estos dos grandes problemas nacionales que permitan focalizar y optimizar los siempre escasos recursos dedicados a la investigación científica.

De igual manera se analizó cuáles pueden ser las acciones de mitigación efectivas y con impacto en ambos problemas nacionales. lo que puede incrementar el cociente beneficio/costo de esas acciones. En este sentido se establecieron cuatro categorías de discusión y análisis: ciencia básica en química atmosférica, aspectos sociales, instrumentos de gestión e infraestructura nacional.

1 Preámbulo

A pesar de las evidentes interrelaciones bidireccionales entre la contaminación atmosférica y el cambio climático, estos dos problemas transversales a casi todo el quehacer humano contemporáneo se han abordado como problemas independientes. El sentido común y la evidencia científica los hacen converger en la raíz de ambos problemas. Los procesos comunes que dan lugar a ellos, la combustión en todas sus formas y en procesos industriales son ejemplos de esto. De hecho, la mayoría de los contaminantes atmosféricos a escala local también tienen un efecto indirecto en el clima a través de su contribución a la formación de ozono y del carbón orgánico en el aerosol atmosférico.

En este trabajo se analiza el desarrollo de las capacidades en México para abordar conjuntamente ambos problemas.

En este informe se describe el desarrollo de las capacidades nacionales para el monitoreo y la modelación de contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), la evaluación de sus impactos en la salud y bienestar de la población, así como en la sostenibilidad del desarrollo. Se analiza el marco normativo sobre monitoreo de contaminantes en términos de salud pública pero también en términos de bienestar y derechos humanos, lo que permite y obliga al monitoreo de contaminantes en sitios rurales.

Se propone también una agenda científica sobre forzantes climáticos poniendo énfasis en los procesos comunes y cobeneficios en el problema de la contaminación atmosférica.

2 Introducción

2.1 Antecedentes internacionales

En la mayoría de los países, y México no es la excepción, la legislación ambiental surge a partir de los acuerdos internacionales sobre materia ambiental. En el informe de la cuenta pública del 2009 de la Auditoría Superior de la Federación (ASF 2009), referente a los *Tratados internacionales en materia de medio ambiente*, se hace referencia a que en 2009, México tenía mil 320 instrumentos de cooperación internacional firmados, entre tratados, convenios y protocolos; de éstos, 62 se refieren al tema de medio ambiente, 49 multilaterales y 13 bilaterales, los cuales, de acuerdo con el reporte de la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), por su contenido y tema específico, se clasifican en cuatro grandes temas:

- Contaminación atmosférica
- Contaminación marina
- Biodiversidad
- Residuos peligrosos

De manera específica, para este análisis solo se consideró el tema de la contaminación atmosférica y residuos, por estar vinculados de manera directa con los CCVC. El reporte indica que, en materia de contaminación atmosférica, al 2009 México suscribió nueve tratados, de los cuales, ocho son multilaterales y uno bilateral, firmado con Francia. Por lo que se refiere al tema de residuos peligrosos, México ha suscrito tres tratados multilaterales, siendo solo el 5 por ciento de los 62 totales. Este análisis de antecedentes se enfoca a los convenios internacionales y el surgimiento de la legislación ambiental relacionada con la contaminación atmosférica y el cambio climático.

2.1.1 El Convenio de Estocolmo

El primer acuerdo se firma en Estocolmo en 1972 y es conocido como la *Declaración de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano*. En él se buscan mejores condiciones de vida de los seres humanos, estableciendo normas y medidas que eviten el daño al medio ambiente.

El Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza de largo alcance, es uno de los medios principales para proteger nuestro medio ambiente. A lo largo de los años ha servido como un puente entre diferentes sistemas políticos y como un factor de estabilidad frente a los cambios políticos. Ha contribuido sustancialmente al desarrollo del derecho ambiental internacional y creado el marco esencial para controlar y reducir el daño a la salud humana y al medio ambiente causado por la contaminación atmosférica transfronteriza, siendo un ejemplo exitoso de lo que se puede lograr a través de la cooperación intergubernamental.

La historia de la Convención se remonta a la década de 1960, cuando los científicos demostraron la interrelación entre las emisiones de azufre en Europa continental y la acidificación de los lagos escandinavos. La conferencia de 1972 de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano en Estocolmo, marcó el comienzo de una activa cooperación internacional para combatir la

acidificación. Entre 1972 y 1977 varios estudios confirmaron la hipótesis de que los contaminantes del aire podían viajar varios miles de kilómetros antes de que ocurriera el depósito atmosférico y por consecuencia, el daño. Esto también indicaba que la cooperación internacional era necesaria para resolver problemas como la acidificación.

Como respuesta a estos graves problemas, se celebró en noviembre de 1979 en Ginebra, Suiza, una reunión con carácter ministerial sobre la protección del medio ambiente en la comunidad europea, estableciendo como resultado la firma del Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza de largo alcance (CLRTAP por sus siglas en inglés), conformado por 34 gobiernos de la Comunidad Europea (CE). La Convención fue el primer instrumento internacional jurídicamente vinculante para tratar los problemas de la contaminación atmosférica de nivel regional. Además, se establecieron los principios generales de la cooperación internacional para la reducción de la contaminación del aire; la convención establece un marco institucional que reúne la investigación y la política.

2.1.2 El Convenio de Río

En 1992 se firma el Convenio Marco de las Naciones sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en donde se establece buscar un equilibrio entre las necesidades económicas, sociales y ambientales de las generaciones presentes y futuras; y establecer una alianza mundial entre los Estados, los sectores claves de las sociedades y las personas, para proteger la integridad del sistema ambiental y de desarrollo mundial (1992)

El ingreso de México a la Convención Marco fue firmado por el gobierno mexicano el 13 de junio de 1992 y aprobado unánimemente por la Cámara de Senadores del H. Congreso de la Unión el 3 de diciembre del mismo año. Tras la aprobación del Senado, la Convención fue ratificada ante la Organización de las Naciones Unidas el 11 de marzo de 1993. A través de este acto de ratificación, el Gobierno de México hizo constar en el ámbito internacional su consentimiento en obligarse a cumplir con los lineamientos establecidos en este instrumento.

Para alcanzar el objetivo último de la Convención se definieron compromisos para las partes firmantes, con base en el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas, bajo el cual los países desarrollados, conocidos como países del Anexo I, adoptaron el compromiso cuantitativo de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para regresar, en el año 2000, a los volúmenes de emisión que tenían en 1990 y mantenerse en esos niveles.

Los países en desarrollo se conocen como países no Anexo I y no tienen compromisos cuantitativos de reducción de emisiones; no obstante, comparten los compromisos aplicables a todas las partes de la convención, entre los que figuran actividades de planeación, implementación de acciones y educación y difusión del conocimiento. México realiza diversas actividades para dar cumplimiento a sus compromisos ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, entre las que se encuentran la elaboración de documentos de planeación nacionales y estatales, y la elaboración de informes nacionales ante la Convención con sus respectivos inventarios de emisiones.

2.1.3 El Protocolo de Montreal

El Protocolo de Montreal, fue diseñado para reducir la producción y consumo de sustancias que agotan la capa de ozono, reduciendo su abundancia en la atmosfera protegiendo así la frágil capa de ese gas en nuestro planeta. El Protocolo de Montreal original se concertó el 16 de septiembre de 1987 y entró en vigor el 1° de enero de 1989.

Este Protocolo incluye una provisión de ajuste única que permite a los firmantes responder rápidamente a toda nueva información científica y llegar a acuerdos para acelerar las reducciones requeridas de productos químicos según el Protocolo. Los ajustes son automáticamente aplicables a todos los países que ratificaron el documento.

Desde su adopción inicial, el Protocolo de Montreal ha sido ajustado seis veces. Específicamente la Segunda, Cuarta, Séptima, Novena, Undécima y Decimonovena reuniones de las Partes en el Protocolo aprobaron, de conformidad con el procedimiento establecido en el párrafo 9 del artículo 2 ciertos ajustes y reducciones de la producción y consumo de las sustancias controladas enumeradas en sus anexos. Esos ajustes entraron en vigor, para todas las Partes, el 7 de marzo de 1991, el 23 de septiembre de 1993, el 5 de agosto de 1996, el 4 de junio de 1998, el 28 de julio del 2000 y el 14 de mayo del 2008, respectivamente.

Además de ajustar el Protocolo, las partes han introducido enmiendas para facilitar, entre otras cosas, el control de nuevos químicos y la creación de un mecanismo financiero que facilite el cumplimiento de países en desarrollo. Específicamente, la Segunda, Cuarta, Novena y Undécima reuniones de las partes en el Protocolo, aprobaron, de conformidad con el procedimiento establecido en el párrafo 4 del artículo 9 del Convenio de Viena, cuatro enmiendas: la "Enmienda de Londres" (1990), la "Enmienda de Copenhague" (1992), la "Enmienda de Montreal" (1997), y la "Enmienda de Beijing" (1999). En contraste con los ajustes al Protocolo, las enmiendas deben ser ratificadas por los países antes de que los respectivos requisitos sean aplicables a los países. Las Enmiendas de Londres, de Copenhague, de Montreal y de Beijing entraron en vigor, únicamente para las Partes que las ratificaron, el 10 de agosto de 1992, el 14 de junio de 1994, el 10 de noviembre de 1999 y el 25 de febrero del 2002, respectivamente (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente,(PNUMA 2017).

Las negociaciones intergubernamentales de un acuerdo internacional para eliminar gradualmente las sustancias que agotan la capa de ozono comenzaron en 1981 y concluyeron con la adopción del Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono en marzo de 1985, el cual fue ratificado por México el 14 de septiembre de 1987. Este instrumento alienta la cooperación intergubernamental para la investigación, la observación sistemática de la capa de ozono, el intercambio de información y el control y la eventual eliminación del empleo de las sustancias agotadoras de la capa de ozono, en primera instancia, los clorofluorocarbonos (CFCs). Para este fin, se adoptó el Protocolo de Montreal el 16 de septiembre de 1987 y entró en vigor el 1° de enero de 1989. México fue de los primeros países en ratificar el Protocolo de Montreal, el 31 de marzo de 1988.

Este instrumento divide a los países en dos grandes grupos: los desarrollados (Art. 2°) y en desarrollo (Art. 5). México fue el primer país (IV Reunión del Protocolo de Montreal en 1995) en presentar un calendario de reducción acelerada del uso de estas sustancias hasta dejarlo en 10 por

ciento para el año 2000, 10 años antes que el resto de los países en desarrollo. México se ha distinguido por cumplir cabalmente los compromisos asumidos y se ha beneficiado al recibir asignaciones sustantivas de recursos económicos para apoyar al sector industrial en la transformación que se requiere para reducir la producción y uso de sustancias agotadoras de la capa de ozono. Desde 1991 a la fecha, México con el apoyo del Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal, ha implementado más de 100 proyectos demostrativos, de transferencia tecnológica, capacitación y asistencia técnica por un monto superior a los 77 millones de dólares. A nivel mundial, México se distingue como uno de los países con mejor desempeño en el cumplimiento de los compromisos en el marco del Protocolo (SEMARNAT 2013).

2.1.4 Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto fue adoptado durante la Tercera Conferencia de las Partes (COP 3) celebrada en la ciudad de Kioto, Japón, en 1997, que estableció como obligación para los países desarrollados y las economías en transición (países Anexo I) la reducción del 5 por ciento de sus emisiones para el periodo 2008-2012 tomando como base sus emisiones de 1990. Para los países en desarrollo (países No Anexo I), el Protocolo no estableció metas cuantificables de reducción de emisiones, pero sí compromisos como la elaboración de inventarios nacionales de emisiones, comunicaciones nacionales, así como estudios de mitigación y adaptación al cambio climático. México firmó este Protocolo en 1997 y lo ratificó en 2000 como país No Anexo I (CICC, 2007). Hasta junio de 2014, 192 países habían ratificado, aprobado o aceptado el Protocolo¹ (UNFCCC 2014).

El Protocolo de Kioto entró en vigor el 16 de febrero de 2005 para las naciones que depositaron su instrumento de ratificación, entre ellas México, que lo hizo en 2000 y que como país no-Anexo I no tiene obligaciones cuantitativas de reducción de emisiones de GEI.

El Protocolo establece, entre otras cosas, una serie de mecanismos de mercado para facilitar el cumplimiento de los compromisos de mitigación de los países desarrollados y promover el desarrollo sustentable en los países en desarrollo: Comercio de Derechos de Emisiones; Implementación Conjunta, y Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), siendo éste el único instrumento que permite la realización de proyectos de reducción de emisiones entre países desarrollados y países en desarrollo.

México tiene el quinto lugar en el nivel mundial en desarrollo de proyectos MDL, mismos que se han puesto en marcha en las áreas de recuperación de metano, energías renovables, eficiencia energética, procesos industriales y manejo de desechos, entre otros.

En la Conferencia de las Partes (COP) celebrada en el año 2010 en Cancún, México, se formalizaron nuevos compromisos de mitigación más ambiciosos que los establecidos en el Protocolo de Kyoto. Para el caso de los países desarrollados, las reducciones esperadas para 2020 se establecieron entre el 17 y 25 por ciento de sus emisiones de 1990 (SEMARNAT 2011). Dado que el Protocolo de Kioto contemplaba compromisos para el periodo que concluía en 2012, en la Conferencia de las Partes de Durban, en Sudáfrica, en 2011 (COP 17), se abrió un nuevo proceso de negociación para que a partir de 2012 los países Partes comenzaran a elaborar un nuevo protocolo o acuerdo con fuerza legal que incluyera a todos los países miembro.

En la COP18 celebrada en Doha, Qatar, en 2012, se aprobó una enmienda al Protocolo de Kioto, que formaliza la entrada en vigor del segundo periodo de compromisos desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2020.

2.2 Antecedentes nacionales

México ha destacado en el mundo como una de las naciones que más esfuerzos dedica a enfrentar este problema. Sobresale la publicación de la Ley General de Cambio Climático (LGCC), que coloca a nuestro país como uno de los primeros, junto con el Reino Unido, en contar con una Ley en la materia. La LGCC tiene como objetivo establecer un marco jurídico que regule las políticas públicas de adaptación y mitigación al cambio climático, así como impulsar la transición hacia una economía competitiva de bajas emisiones de carbono (H. Congreso de la Unión 2012).

Para la instrumentación de esta ley, se publicó la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40 (ENACC), que describe los ejes estratégicos y las líneas de acción (sin definir acciones concretas o responsables particulares) para orientar las políticas de los tres órdenes de gobierno y fomentar la corresponsabilidad con los diversos sectores de la sociedad). En la ENACC se plantea como reto para el país reducir 30 por ciento las emisiones en 2020 y 50 por ciento en 2050 con respecto a las emisiones del año 2000.

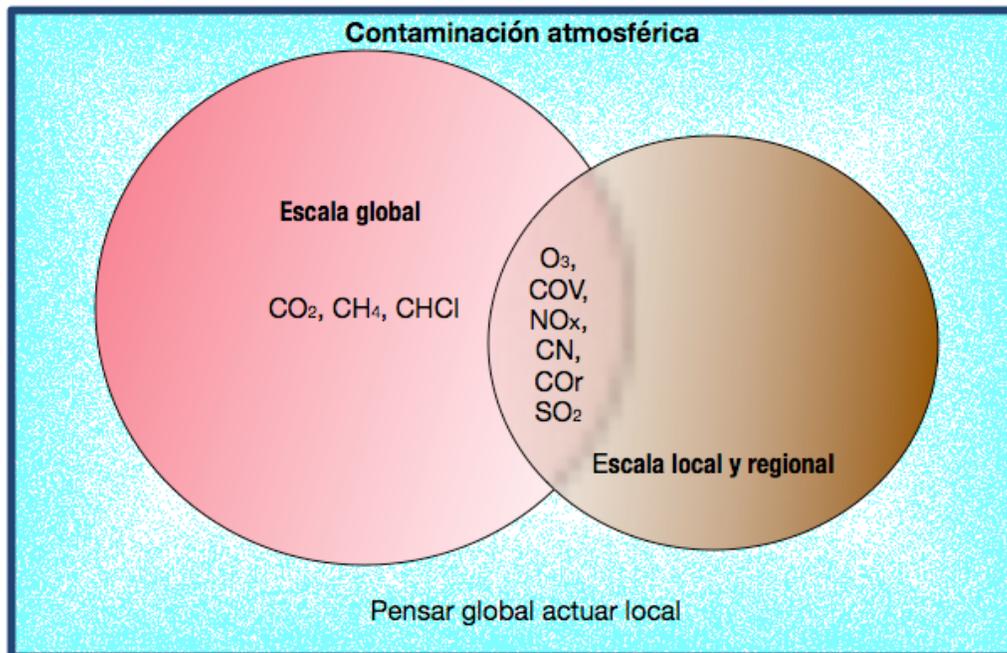


Figura 1 Esquema que muestra el carácter dual de los precursores de ozono y del aerosol fotoquímico como contaminantes locales y climáticos.

Las estrategias, líneas de acción y reducciones de emisiones específicas por sector, así como las acciones de adaptación que deberá realizar la administración pública federal están incluidas dentro del Programa Especial de Cambio Climático (PECC), cuya elaboración emana directamente del mandato de la LGCC. A la fecha se han elaborado dos ediciones del PECC, la más reciente para

el periodo 2014-2018. En el PECC vigente se planteó como meta al 2018 la reducción de 83.2 megatoneladas de CO₂ equivalente (SEMARNAT 2015).

En el Acuerdo de París, el cual fue ratificado por México en abril de 2016, nuestro país se compromete a reducir 22 por ciento sus emisiones de gases con efecto invernadero y de contaminantes de vida corta y reducir en un 51 por ciento el carbono negro, con el fin de contribuir a la disminución de los efectos del cambio climático (INECC 2016).

2.2.1 Los contaminantes climáticos de vida corta

Los CCVC son contaminantes atmosféricos que afectan a la salud, contribuyen significativamente al cambio climático y afectan la calidad del aire de las ciudades (Shindell et al. 2012). Los principales CCVC son el CN, el CH₄, el O₃ troposférico y sus precursores: CO, COV) y NO_x, así como algunos hidrofluorocarbonos (HFCs). Los CCVC permanecen en la atmosfera por periodos relativamente cortos, por lo tanto, también se conocen como forzadores del clima de corta duración. Debido a su naturaleza, las emisiones de estos agentes pueden ser rápidamente controladas y reducidas con la tecnología existente (Bond et al. 2013).

Los CCVC se han convertido en un tema relevante en la política pública de mitigación a corto plazo del cambio climático; en el ámbito internacional ya forman parte de las estrategias climáticas (CARB 2017). Recientemente fueron incorporados en la ENCA. Por lo anterior, en este informe parcial se analizan las capacidades nacionales para la gestión integral de la calidad del aire. La generación de políticas públicas para reducir la contaminación atmosférica y contribuir a la mitigación del cambio climático a través de reducir emisiones de CCVC descansa en tres pilares: observaciones, inventarios de emisiones y modelos (Figura 2).

2.2.2 La contaminación atmosférica en México

El primer artículo científico sobre la contaminación atmosférica que logramos recuperar fue gracias a Humberto Bravo (Bravo A 1960). En los 60 las políticas de medio ambiente aún no existían en los planes nacionales y mucho menos en los estatales. Fue a partir de que se instalaron las primeras estaciones de monitoreo atmosférico en la Ciudad de México, y se midieron algunos contaminantes como el SO₂ y PM que el problema empezó a tener relevancia en la agenda pública (INE 2010).

Un cambio fundamental en el tema de la contaminación atmosférica, considerando como base los primeros estudios científicos, se dio en los 1971 con la publicación de la primera *Ley federal para la prevención y control de la contaminación ambiental*, solo un año después de la promulgación del “Acta de Aire Limpio de los Estados Unidos”. En esa década se creó la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, (SMA) como parte de la Secretaría de Salud del Gobierno Federal. La importancia de la contaminación atmosférica fue en términos del impacto del “humo” y el “polvo”, abordando la problemática en el mismo sentido que Estados Unidos lo estaba realizando en los 60. Para dar continuidad a la nueva ley y asegurar su implementación y vigilancia en 1971 se crea la Comisión Intersecretarial para el Medio Ambiente.

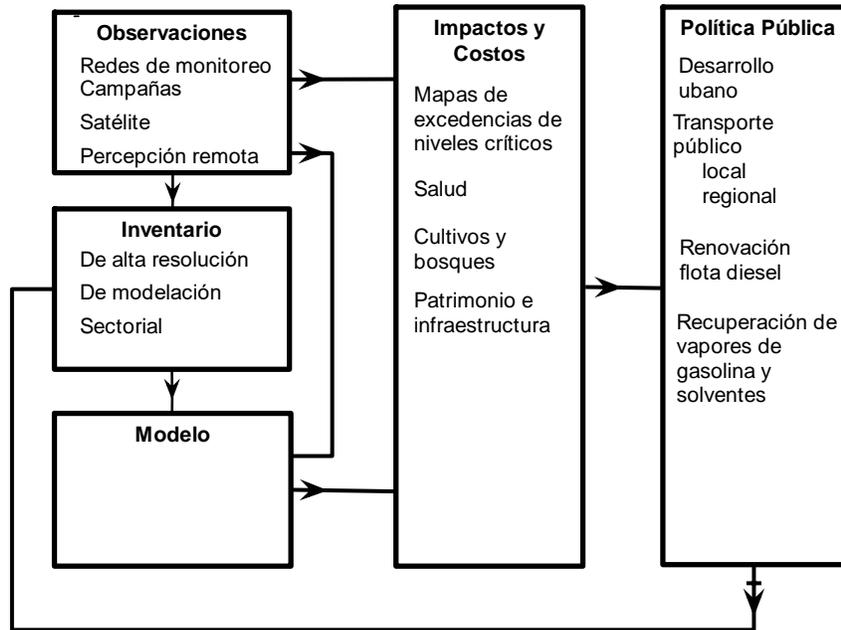


Figura 2 Modelo conceptual del proceso de gestación de las políticas públicas para controlar la contaminación atmosférica y la mitigación del cambio climático asociada

Otro cambio importante se dio con la promulgación de la *Ley federal para la protección del ambiente* (H. Congreso de la Unión 1982), a cual fue creada junto con la nueva Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), en la cual por primera vez se incluye al monitoreo atmosférico como parte del cuerpo de la norma. Sin embargo, por varias situaciones relacionadas con la crisis y el terremoto de 1985, fue difícil implementarse adecuadamente (Molina and Molina 2002).

En 1988 el marco regulatorio se fortalece con la promulgación de la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (LGEEPA), la cual por primera vez define responsabilidades en los niveles federal, estatal y municipal. Esta nueva ley permite el desarrollo de nuevos instrumentos de política como los esquemas de pagos por contaminar, así como otros esquemas de mercado, donde se incluyen los análisis costo beneficio para la implementación de políticas públicas (H. Congreso de la Unión 2013).

Para principios de los 90, el tema de contaminación atmosférica se centralizó en reducir los niveles de concentración de ozono y partículas suspendidas, tomando como base la información generada por las redes de monitoreo atmosférico y mostrando un aumento progresivo en estos contaminantes. Es así como se necesitaba comprender de manera cuantitativa los principales mecanismos de formación de ozono y de los aerosoles, siendo una tarea principal de los investigadores especializados en el tema. Sin embargo, un primer análisis mostró que aún se

tenían deficiencias en capacidad financiera, institucional y recursos humanos para abordar el problema (Krebs 1999).

Como ya se mencionó, la red de monitoreo atmosférico fomentó las primeras evaluaciones de contaminación atmosférica en México. La comunidad científica tanto nacional como internacional se interesó en comprender los efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud humana (Romieu et al. 1992), en los ecosistemas (de Bauer 1990, Miller et al. 1994) así como su transporte, transformación y destino de los mismos. Así, se iniciaron en la Ciudad de México algunas campañas de mediciones: entre 1991-1994, los proyectos MARI e IMADA por sus siglas en inglés (Streit and Guzmán 1996, Doran et al. 1998) . Les siguieron tres importantes estudios con participación internacional; La *Evaluación integral de la calidad del aire en la megaciudad de México* (Molina and Molina 2002), el proyecto MCMA 2003 (Molina et al. 2007) y la campaña *MILAGRO* (Molina et al. 2010)

3 Revisión de las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para el monitoreo de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico

3.1 Monitoreo

El monitoreo atmosférico se ha convertido en un instrumento de gran valor para la gestión de la contaminación atmosférica, la investigación y es la fuente más importante de información para la climatología química de una región. Aquí se presenta una evaluación de las capacidades nacionales para monitorear los diferentes contaminantes atmosféricos desde una perspectiva integral, con énfasis en el desarrollo de recursos humanos, la infraestructura existente y su cobertura temática y geográfica en función de su importancia en la protección de la salud y el bienestar de la población y del rol asignado a los CCVC en la mitigación del cambio climático.

3.1.1 Antecedentes sobre monitoreo

Durante los años 50 y 60, la Secretaría de Salud del gobierno mexicano realizó estudios en poblaciones vulnerables de la Ciudad de México, indicando que la contaminación atmosférica estaba ocasionando daños en la salud. Estos estudios establecieron las bases de la medición de la calidad del aire en México iniciando el muestreo de partículas suspendidas y posteriormente los contaminantes gaseosos.

En la década de los 50 se instalaron los primeros cuatro puntos de muestreo: Centro, Aeropuerto, Tacuba y Tlalnepantla. Posteriormente, en 1966, se instalaron 14 estaciones de monitoreo adicionales para medir humos, PM y SO₂, con el apoyo de la Organización Panamericana de la Salud (SEMARNAT 2017). En los años 70, surge una preocupación por los efectos de las partículas suspendidas y el SO₂ en la salud (Soto Colobaltes 2017). Es así como el gobierno mexicano y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), desarrollaron un programa para medir la calidad del aire en diversas ciudades. En la Ciudad de México se instaló un sistema de 22 estaciones de monitoreo, denominada *Red Computarizada Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de México*, también conocida como *Red Philips*, conformada por 20 estaciones fijas y dos unidades móviles (SEMARNAT 2017).

Los estudios realizados fomentaron la creación de grupos de investigación nacionales, iniciando en la Universidad Nacional Autónoma de México, en el Instituto de Ciencia Aplicada, y luego en el Centro de Ciencias de la Atmosfera, donde se desarrollaron los primeros muestreos y análisis de

contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México, dirigidos por el Dr. Humberto Bravo, uno de los principales pioneros del monitoreo y análisis químico de contaminantes en México (INE 2010).

Los primeros resultados de las investigaciones revelaron que la contaminación atmosférica es un tema relevante para la salud pública. Ante este escenario se planteó la necesidad de monitorear la calidad del aire para evaluar las estrategias de control y observar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. Entre los años 1970 y 1972 se iniciaron las actividades de monitoreo en las ciudades de Monterrey, Ciudad Juárez, Chihuahua y Guadalajara, con la instalación de equipo manual para el monitoreo de PST. Toluca, Cuernavaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Hermosillo y la Red Regional Villahermosa Cárdenas en Tabasco, se incorporaron a finales de los 80 (SEMARNAT 2010).

Es así que en los años subsecuentes se dio una expansión de los sistemas de monitoreo en varias ciudades; las diferencias en la disponibilidad de los recursos financieros, técnicos, humanos y de la propia infraestructura, provocaron que en cada sistema de monitoreo se operara de manera distinta, resultando una información heterogénea sin puntos de referencia.

En respuesta a esta situación, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) por medio del Instituto Nacional de Ecología (ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC), implementó el Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico (PNMA), el cual incluye medidas para estandarizar procedimientos y actividades para garantizar la calidad y comparabilidad de la información generada en cada Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire, SMCA1 (INECC 2012).

El monitoreo de la contaminación atmosférica se define como aquellas metodologías que permiten muestrear, analizar y procesar de manera continua las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire, de un lugar establecido y durante un tiempo determinado (Martínez and Romieu Isabelle 1997). Algunos objetivos principales de los sistemas de monitoreo se definen entonces como: a) la formulación de estándares de calidad; b) estudios de salud; c) fuentes de emisión; d) estrategias de control; e) desarrollo, verificación y vigilancia de programas para mejorar la calidad del aire. Todavía están ausentes los cultivos, bosques, ecosistemas y el patrimonio cultural y la infraestructura pública y privada.

3.1.2 Regulación sobre monitoreo

El monitoreo de la calidad del aire en México está regulado por la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA). En ella se establece que corresponde a los gobiernos de los estados, el Distrito Federal —hoy Ciudad de México— y los municipios, establecer y operar sistemas de monitoreo de la calidad del aire con el apoyo técnico, en su caso, de la SEMARNAT (H. Congreso de la Unión 2013). Los gobiernos locales deben remitir a la SEMARNAT los reportes locales de monitoreo atmosférico con el fin de que ésta los integre al Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). Corresponde a la SEMARNAT la creación y operación de ese sistema, la expedición de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) sobre niveles máximos permisibles de emisiones. También le corresponde expedir las normas oficiales mexicanas sobre monitoreo de contaminantes atmosféricos (Art 111. VII).

Esa última responsabilidad se plasma en la NOM-156- SEMARNAT (SEMARNAT 2012) que define como su campo de aplicación los asentamientos humanos donde se cumpla alguna de las siguientes condiciones: asentamientos humanos con más de 500 mil habitantes; zonas metropolitanas; asentamientos humanos con emisiones superiores a 20 mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera; conurbaciones; y actividad industrial que por sus características lo requiera.

El campo de aplicación de la NOM-156 define claramente que está esencialmente enfocada a la protección de la salud humana y no hay mención en ella a la protección del bienestar de la población. Por ello entendemos, evitar que la contaminación atmosférica afecte la seguridad alimentaria, el desarrollo sostenible, la conservación del patrimonio cultural, y la infraestructura pública y privada. Para ello sería necesario extender el monitoreo a áreas rurales (agrícolas, forestales y ecosistemas) o bien, el monitoreo sobre el patrimonio público o privado o cultural.

Por otro lado, la LGEEPA, en su Artículo 13 (H. Congreso de la Unión 2013), establece que las entidades que comparten problemas ambientales comunes podrán establecer convenios de coordinación. Por ello, en 1992 se formó la Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México (Presidencia 1992), que incluía las 16 delegaciones del DF —hoy Ciudad de México— y 18 municipios conurbados del Estado de México. El 13 de septiembre de 1996 esta Comisión cambia su nombre a Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) incluyéndose 41 municipios más del Estado de México y uno del Estado de Hidalgo (DF 1996). Ante la creciente evidencia científica de que el problema de la contaminación atmosférica en la Cuenca del Valle de México se extiende a las cuencas atmosféricas vecinas del Valle de Toluca en el Estado de México, y los Estados de Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala, se forma la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME), que incluye las 16 delegaciones de la Ciudad de México, 88 de los 125 municipios del Estado de México, 33 municipios del Estado de Morelos, 29 de los 84 municipios del Estado de Hidalgo, 22 de los 217 municipios del Estado de Puebla y los 60 municipios del Estado de Tlaxcala (SEMARNAT et al. 2013).

A su vez, el artículo 111.X de la LGEEPA es clave para definir los alcances geográficos y normativos de la gestión de la calidad del aire y el control de la contaminación atmosférica. En términos territoriales, la gestión debe realizarse bajo el concepto de *cuenca atmosférica*. Sumando a esto, los artículos 1.I, 15.XII, discuten de la mano, salud y bienestar de la población y los artículos 36.II y 110.II vinculan el bienestar de la población con garantizar el equilibrio ecológico y la sostenibilidad de desarrollo económico. De ello se deriva que también el monitoreo, como pilar del control de la contaminación atmosférica, debe realizarse a escala de *cuenca atmosférica* y documentar también la exposición de cultivos, bosques y ecosistemas a ésta. La NOM-156-SEMARNAT es deficiente en este aspecto.

Históricamente, solo la gestión de la calidad del aire en la ZMVM se acerca una gestión centrada en la cuenca que la contempla. El ProAire de la ZMVM 2011-2020 (SEDEMA et al. 2011), incluye el concepto de *cuenca atmosférica* en su diagnóstico, pero todavía no en sus propuestas. La creación de la Comisión Ambiental de la Megalópolis de México (SEMARNAT et al. 2013) es la primera acción de política pública que asume como punto de partida, no solo la existencia un conjunto de zonas metropolitanas en estrecha interacción económica y demográfica, sino que estas zonas metropolitanas se encuentran en cuencas atmosféricas interconectadas. El ProAire de la

Megalópolis (SEMARNAT 2017) analiza el problema de la calidad del aire usando el concepto de *cuenca atmosférica* de manera explícita. Las propuestas para el monitoreo en sitios rurales y en sitios de intercambio entre cuencas apuntan a una gestión también en términos de *cuenca atmosférica*. Las nuevas estaciones de la RAMA en sitios de esas características (SEDEMA 2016) pronto aportarán información muy valiosa sobre el transporte entre las cuencas atmosféricas que contiene la Megalópolis, así como el observatorio de altura de la UNAM en Altzomoni (Baylon et al. 2017). Por su parte, la ENCA contempla la posibilidad de cuencas atmosféricas saturadas y así introduce también el concepto de carga crítica, hasta ahora descuidado en la gestión ambiental.



Fuente: Estrategia Nacional de Calidad del Aire.

Figura 3 Distribución geográfica de las cuencas atmosféricas de la República Mexicana

3.1.3 Infraestructura para el monitoreo

De acuerdo con el censo de 2010 y la NOM-156-SEMARNAT, en México debiera haber 59 sistemas de monitoreo de calidad del aire (SMCA). Pero en el país solo hay 34 SMCA a cargo de 241 estaciones de medición de calidad del aire, de las cuales 134 son automáticas, 73 manuales y 34 mixtas. Estas se distribuyen en 30 entidades federativas (Figura 2). Solo Baja California Sur y Quintana Roo no están equipados con estos instrumentos. En las 187 estaciones de monitoreo (20 SMCA, distribuidas en 75 ciudades y zonas metropolitanas) analizadas en el Informe de Calidad del Aire 2015 (INECC 2016) se reportan 129 monitores automáticos de ozono, 162 monitores de PM_{10} y 99 monitores de $PM_{2.5}$.

Del total de las 59 zonas metropolitanas que hay en el país, 35 cuentan con equipos automáticos o mixtos, 7 con equipos manuales y 17 no cuentan con medición de calidad del aire (INECC 2016, SEMARNAT 2017). En todo el país solo se han instalado tres estaciones de monitoreo en sitios rurales o tal vez se puedan definir mejor como periurbanos, en la vecindad de la ZMVM (SEDEMA 2016).

El sistema de monitoreo con la serie de tiempos más larga y completa, los mejores sistemas de control y aseguramiento de la calidad de sus datos es el de la ZMVM. Incluye 21 estaciones en la Ciudad de México y 15 en los municipios conurbados. (SEDEMA 2016). A las 36 estaciones de monitoreo de la ZMVM se suman entonces 7 estaciones en el Valle de Toluca, 21 en Hidalgo, 4 en Morelos, 5 en Puebla y 3 en Tlaxcala (SEMARNAT 2017).

En general, se observa que las Partículas Suspensas PM₁₀ es el contaminante que más se mide en la región con 64 estaciones, seguido del O₃ con 62 estaciones, SO₂ con 69 y CO con 57 estaciones, NO₂ con 60, y Partículas Suspensas PM_{2.5} con 55 estaciones.

Aunque el número de estaciones de monitoreo puede parecer adecuado, en promedio una cada 32 km, una revisión de la distribución de estaciones, los instrumentos instalados, la suficiencia de datos y el cumplimiento de la obligación de reportar al Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA) no es uniforme en la región (Tablas A1-1 y A1-2). Esta situación se reproduce a lo largo y ancho del país.

“Una evaluación reciente de los SMCA en la Megalópolis (SEMARNAT 2017) muestra los siguientes problemas:

- a) Estaciones con problemas de ubicación, lo que afecta la representatividad de la calidad del aire monitoreada, ya sea porque existen obstáculos en sus alrededores que perturban el paso del aire en alguna(s) dirección(es) o porque existe alguna fuente de emisión que impacta la medición de calidad del aire. [SEP]
- b) Equipos con problemas de mantenimiento y, en algunos casos, existencia de instrumentos de monitoreo y/o de adquisición de datos ya obsoletos. [SEP]
- c) Inexistencia de programas de calibración o verificación. [SEP]
- d) Personal limitado en número y/o con diversas actividades adicionales a la operación del monitoreo de calidad del aire. [SEP]
- e) Capacidades técnicas – operativas heterogéneas entre el personal de los distintos sistemas de monitoreo.”

corto, mediano y largo plazo, para reducir las emisiones de contaminantes (SEMARNAT 2015). A partir de 2015, la guía para elaborar los ProAire (SEMARNAT 2015) ya incluye instrucciones para presentar el diagnóstico de los SMCA, incluyendo el cumplimiento de la NOM-156-SEMARNAT, reportes de auditorías y medidas para mejorar el sistema de monitoreo. La Tabla A1-2 del Anexo 1, muestra que de los 20 ProAire vigentes, 14 fallan en por lo menos alguna de las siguientes categorías: sistema de control y aseguramiento de la calidad de los datos, reportar al SINAICA y difusión en línea a la población.

3.1.4 Otros CCVC

Los CCVC aparecen en la agenda climática del Gobierno Federal con el reporte de Molina y Ruiz-Suárez (2010) para el INECC. Ahí se pasa revista a las capacidades nacionales para abordar la investigación sobre emisiones y mitigación de los CCVC, en particular carbono negro y metano y se realiza un inventario nacional de emisiones preliminar de carbono negro. La Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (SEMARNAT 2012), incluye formalmente el tema de los forzantes climáticos de vida corta en su estrategia climática y presenta el inventario nacional de emisiones de carbono negro de 1990 a 2010. En 2012, con otros siete países, México funda la Coalición de Clima y Aire Limpio (CCAC, por sus siglas en idioma inglés) la cual tiene compromisos muy claros para reducir los CCVC. En 2013 México estima su primera línea base de emisiones y define sus primeras acciones de mitigación de CCVC, particularmente de carbono negro y metano (MCE2 2013).

Todos los contaminantes criterio son en estricto sentido CCVC; se suman a ellos los COV, CN y CO_r. Por su corto tiempo de residencia, el monitoreo atmosférico de ellos es parte esencial de su sistema MRV. Ningún país puede reclamar crédito por acciones de mitigación de CCVC sin un sistema MRV sólidamente apoyado en una red de SMCA. Éstos deben ser robustos y confiables; los datos generados por ellos deben permitir observar tendencias y poder asociar los cambios observados en ellas a intervenciones de política pública. A pesar de los esfuerzos realizados, México está todavía lejos de tener una red de SMCA de esas características. Tenerla es una tarea estratégica de primer orden.

3.1.5 El monitoreo de los nuevos CCVC

Las emisiones de CO₂ de México, derivadas del uso y quema de combustibles fósiles, representaron en 2012 el 1.37 por ciento de las emisiones globales, lo cual nos coloca en el lugar 13 de los países con mayores volúmenes de emisiones de este gas derivados de dicha quema. Según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2013 (INEGI 2013), las emisiones directas de GEI en el país ascendieron a 665 Tg de CO₂ equivalente, de las cuales la mayor contribución se debe al sector transporte (26%), seguido por el de generación de energía eléctrica (19%) y el de industria (17%, Tabla 1). Para el caso del CN, un CCVC, su volumen de emisión alcanzó alrededor de 125 Gg, derivadas, en su mayor parte, de las actividades del sector transporte (38%) e industrial, principalmente del subsector azucarero (28%). Al respecto, el gobierno de México se ha comprometido internacionalmente a reducir el 51% de las emisiones de CN para 2030, las cuales se deberán ver reflejadas en las estimaciones de los inventarios de emisiones, con la incorporación de nuevas tecnologías y acciones en los marcos regulatorios.

Con respecto al impacto del CN en la atmósfera, se considera que tiene una importante contribución al forzamiento radiativo, a la mala calidad del aire y daños directos en la salud (Shoemaker et al. 2013).

Tabla 1 Emisiones de Gases y compuestos de efecto invernadero, INECC (2012)

Sector	Emisiones de GEI (MtCO ₂ e)	Emisiones de carbono negro (miles de toneladas)
Transporte	174	47
Generación de electricidad	127	8
Residencial y comercial	26	19
Petróleo y gas	80	2
Industria	115	35
Agricultura y ganadería	80	9
Residuos	31	<1
USCUSS ¹	32	4
EMISIONES TOTALES		125
USCUSS	Absorciones	0
TOTAL²		492

Sin embargo, en la actualidad no hay un monitoreo regular de carbono negro atmosférico que permita evaluar las condiciones ambientales y determinar los umbrales de concentración apropiados para tener una calidad del aire con base en los estándares recomendados por la OMS (Zavala et al. 2014).

A partir del 2014 se comenzaron a realizar esfuerzos aislados para cuantificar los niveles ambientales de carbono negro en México, siendo el CCA-UNAM, INECC e ITESM los primeros en medir de manera experimental las concentraciones ambientales.

En 2015 el INECC y el CCA-UNAM, establecen una primera red experimental de monitoreo atmosférico de carbono negro, junto con instituciones de gobierno y academia, para constituir la primera línea base de concentraciones ambientales. Se establecieron los primeros protocolos para medir y reportar los valores obtenidos en cada sitio de monitoreo. Dado que las mediciones ópticas de las concentraciones ambientales de CN pueden variar de acuerdo con los diferentes componentes, se consideró importante obtener valores precisos para establecer una línea de base y así evaluar los esfuerzos de mitigación desde una perspectiva ambiental (Peralta et al. 2015).

La red experimental de monitoreo atmosférico de carbono negro es un sistema confiable e independiente creado para establecer una línea base de CN atmosférico y, por lo tanto, en el futuro, evaluar estrategias de mitigación, establecer puntos de referencia y hacer comparaciones precisas con otros países para identificar las fuentes de emisiones.

La red (construida con etalómetros y extintiómetros fotoacústicos) en cuatro ciudades de México y otros lugares miden continuamente concentraciones atmosféricas de BC. Los sitios urbanos son: Iztapalapa (IZ), Ciudad Universitaria (CU), Monterrey (MY) y Guadalajara (GJ); hay un sitio de trasfondo suburbano en Juriquilla (JQ) y un sitio de trasfondo regional en Altzomoni (AZ) (Barrera et al. 2017).

3.1.6 El monitoreo en la ciencia

El monitoreo de los contaminantes atmosféricos, es útil no solo para evaluar si el área representada por la unidad de monitoreo cumple con las normas oficiales mexicanas de niveles máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente (INECC 2016).

Sirve identificar tendencias de niveles de contaminantes criterio (Gonzalez-Santiago et al. 2011), para identificar posibles fuentes de contaminantes (Martínez-Cinco et al. 2016), para evaluar los inventarios de emisiones (Zavala et al. 2009, Mendoza-Domínguez and M. 2011), para estimar impactos de la contaminación atmosférica en la salud de la población (Wöhrnschimmel et al. 2006, Achcar et al. 2008, Wöhrnschimmel et al. 2008, Calderón-Garciduenñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas and Torres-Jardón 2015, Hernández-Paniagua et al. 2018), en el patrimonio histórico (Bravo Alvarez et al. 1998, Bravo Alvarez et al. 2000, Bravo Alvarez et al. 2006), para activar acciones de los programas de contingencia ambiental (SEDEMA 2016), para evaluar el impacto de las políticas públicas (Reyes et al. 2010) y para establecer el contexto en el cual se deben explicar las observaciones realizadas en campañas intensivas de más corta duración (Molina et al. 2010). Por ejemplo, durante la campaña MILAGRO los datos de la RAMA fueron el principal contribuyente en términos del número de publicaciones. Estas mediciones proveen de la información en el largo plazo y la cobertura espacial necesarias para profundizar en el análisis de los datos obtenidos en campañas de monitoreo (INECC 2016), ver Anexo 5 en referencia.

Se han realizado campañas extensivas en otras partes del país utilizando estaciones de monitoreo como referencia en la Ciudad de Monterrey en Nuevo León (Vanoye and Mendoza-Domínguez 2009, Mendoza et al. 2010, Martinez et al. 2012, Cerón-Bretón and Cerón-Bretón 2014, Cerón-Bretón et al. 2014, Menchaca and Mendoza-Domínguez 2014, Menchaca-Torre et al. 2015, Cerón-Bretón et al. 2016), en la de Guadalajara, Jalisco (Mendoza-Domínguez and García 2009, Vanoye and Mendoza 2014, Sanchez et al. 2015) y en Chihuahua (Rodríguez-Rosales et al. 2006). También se han intentado hacer estudios de contaminantes atmosféricos en el Golfo de México, pero se han encontrado pocos resultados, ya que no se cuentan con estaciones de monitoreo confiables en las ciudades que comprenden esa área del país (Muriel-García et al. 2016).

La disponibilidad de la información proporcionada por los SMCA provoca la multiplicación de estudios y publicaciones que contribuyen a la definición de políticas públicas sobre contaminación atmosférica, su amortiguamiento y la posible mitigación del cambio climático. La participación de alumnos en los estudios realizados en las universidades del país, dando uso a esa información, es el semillero de los cuadros técnicos de las dependencias públicas con responsabilidad sobre la calidad del aire y del sector privado que necesitan de sus servicios para cumplir con sus responsabilidades ambientales.

3.2 Propuestas

3.2.1 Sobre el monitoreo

Las oportunidades de mejora de los SMCA están correctamente identificadas en diferentes estudios (INECC 2011, INECC 2014), la ENCA (SEMARNAT 2017), el ProAire de la Megalópolis 2017-2030 (SEMARNAT 2017), y la guía para elaborar ProAires (SEMARNAT 2015). A esas oportunidades de mejora se deben agregar, en la próxima actualización de la NOM-156-SEMARNAT, la definición de varias categorías de estaciones de monitoreo por su función. Se deben incluir los cultivos y los ecosistemas como objetos de protección de esa NOM y de los ProAires. El concepto de cuenca atmosférica debe ser incorporado a la NOM-156.

3.2.2 Sobre los ProAire

El control de la contaminación atmosférica, el monitoreo y la gestión de la calidad del aire deben realizarse en términos de cuenca atmosférica.

Para valores críticos en términos de hora, incluir en los informes anuales y los ProAires, el número de días y horas acumuladas en que se excede la norma de 1 hora y el promedio móvil. Si las funciones exposición-respuesta están calculadas de acuerdo a la exposición horaria, incluyendo la exposición horaria a un promedio móvil, el número de horas que se excede la NOM o el nivel crítico es la variable a considerar.

En los informes anuales y en los ProAires reportar las tendencias anuales de excedencias de las NOMs respectivas, relativas a la última actualización de la NOM y la actualización de las series de tiempos a ese valor.

Los criterios de suficiencia de datos deben homologarse en los informes anuales de calidad del aire y en los ProAires. Es necesaria una discusión sobre lo siguiente:

- El criterio de suficiencia de 75 por ciento debe aplicarse solo para decidir si una municipalidad o zona metropolitana cumple con la norma.
- Por otro lado, para decidir si una municipalidad o zona metropolitana no cumple la NOM, es suficiente una sola medición excediendo la NOM, sin importar la suficiencia de datos. El uso del criterio de suficiencia para decidir si un sitio excede la norma beneficia a la autoridad que descuida el monitoreo, pero perjudica el derecho humano a la salud. Bajo un criterio *pro homine*, la autoridad ambiental incurre en responsabilidad ambiental.
- Para análisis de tendencias debe decidirse un criterio de suficiencia con alta tolerancia a la ausencia de datos, pero consistente a lo largo de los años.

4 Revisión de las capacidades nacionales (recursos humanos, infraestructura, regulación y financiera) para la modelación de ozono y otros contaminantes climáticos de vida corta en el aerosol fotoquímico, incluyendo carbono negro y carbono orgánico

Las atmósferas de una ciudad, una región o toda la tropósfera pueden pensarse como un gran reactor químico bien mezclado. El mezclador es la turbulencia local y los vientos regionales o de gran escala. A ese reactor entran, por emisiones naturales o antropogénicas, centenares de especies químicas que se degradan en sucesivas etapas, en decenas de millares de nuevas especies químicas cada vez más oxidadas. Esto ocurre mediante decenas o centenas de millares de reacciones químicas. Los procesos ocurren al mismo tiempo que las masas de aire los contienen y son transportadas a grandes distancias y/o alturas. La fuente de energía para estos procesos químicos y meteorológicos es el Sol. Todas estas sustancias se eliminan de la atmósfera al chocar con la superficie y adherirse o reaccionar con ella, al incorporarse a partículas suspendidas, que pueden ser gotas de niebla o nube, que luego se sedimentan o al ser lavadas por el agua de lluvia.

Es imposible comprender, analizar o predecir el comportamiento de este sistema tan complejo sin el uso de modelos acoplados de emisiones-dinámica y termodinámica atmosférica-cinética química-equilibrio entre fases-nubes-suelos.

A pesar de su complejidad y de estar siempre inacabados, son la mejor representación matemática de la realidad que tenemos. Son herramientas indispensables, no solo para analizar y comprender, sino también para tomar decisiones de gestión, prevención, de control.

4.1 Antecedentes sobre modelación en México

Aunque se encuentran referencias de trabajos tempranos de simulación numérica sobre algunos contaminantes en la atmósfera de la Ciudad de México en la década de los 80 del siglo XX, éstos fueron presentados en congresos científicos y no son recuperables. Los primeros estudios sobre modelación de la química atmosférica en México, publicados en revistas científicas indizadas, y por lo tanto recuperables, inician con estudios sobre el efecto de la altitud en la reactividad fotoquímica en la Ciudad de México a través de la presión atmosférica y la intensidad de radiación (Ruiz-Suárez et al. 1993). También se estudiaron los impactos del cambio del uso del suelo y la compleja orografía del centro de México sobre la formación y transporte de contaminantes en la ZMVM (Jazcilevich et al. 2000, Jazcilevich Diamant et al. 2002, Barrera-Huertas et al. 2014, Mendoza and Osiel 2016), así como el del transporte de contaminantes transfronterizo (Ordieres et al. 2005, Mendoza-Dominguez et al. 2011, Carabali et al. 2014, Carmona et al. 2015).

La ZMVM ha sido objeto de cinco grandes proyectos de investigación con participación de investigadores y financiamiento internacional. Los proyectos MARI (Streit and Guzmán 1996), IMADA (Edgerton et al. 1999), Calidad de aire en la megaciudad de México: un estudio integral (Molina and Molina 2002), MCMA 2003 (Molina et al. 2007) y MILAGRO (Molina et al. 2010), dieron lugar a numerosos estudios de modelación sobre la formación y transporte y posibles impactos del smog en la salud fotoquímica de la ZMVM. Algunos de ellos fueron realizados por investigadores mexicanos; la mayoría por investigadores extranjeros. Su contribución al desarrollo de capacidades consistió en la adquisición de alguna infraestructura y la formación de recursos humanos o la transferencia de conocimiento entre científicos mexicanos y extranjeros. Los estudios de modelación sobre otras regiones del país son mucho más escasos.

Tres instituciones de investigación dependientes del gobierno federal, realizaron esfuerzos aislados en esta materia y con estudios muy específicos para evaluar el impacto de algunas fuentes de interés. En su momento, el Instituto Nacional de Ecología (INE) hoy Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), hoy Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), desarrollaron los primeros grupos de modelación, sin embargo, no lograron trascender y consolidarse a largo plazo.

4.2 Capacidades actuales de modelación

En México, en 2017 se cuentan tres instituciones con grupos de modelación de la calidad del aire, con producción científica sostenida por varios años. El grupo con mayor continuidad es el del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (García-R et al. 2000, Jazcilevich et al. 2003, Jazcilevich et al. 2007, García-Reynoso et al. 2009, Díaz-Nigenda et al. 2010, Jazcilevich et al. 2011, Borrego-Hernández et al. 2014, Castillo-Miranda et al. 2017). En el sector público, pero con menor dinamismo, se encuentra también el Instituto Mexicano del Petróleo (Williams et al. 1992, Molina et al. 2002, Rivera et al. 2009, Almanza et al. 2014). También está un grupo en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, campus Monterrey (Mendoza-Domínguez and Russell 2001, Mendoza-Domínguez and García 2009, Vanoye and Mendoza-Domínguez 2009, Mendoza-Domínguez and M. 2011, Mendoza-Domínguez et al. 2011, Sierra et al. 2013, Vanoye and Mendoza 2014).

Aun cuando se encuentran otros reportes y publicaciones de investigadores de la UNAM y otras instituciones, en este trabajo se consideran como esfuerzos aislados, ya que no publican de manera sostenida en este tema. A ésta se le podría llamar una *capacidad latente de modelación* (Rodríguez-Rosales et al. 2006, Cerón-Bretón and Cerón-Bretón 2014, Cerón-Bretón et al. 2014, Cerón-Bretón et al. 2016).

De los 20 ProAires vigentes, solo cuatro informan haber realizado la modelación de la calidad del aire o usando resultados de modelos para evaluar escenarios y para la gestión cotidiana de la calidad del aire (Tabla A1-2). Otros cuatro manifiestan la intención de desarrollar esa capacidad. Los otros nueve ProAire ignoran el tema. La única autoridad ambiental local con capacidad operativa de modelación para la gestión cotidiana de la calidad del aire es la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (SEDEMA 2016).

Solo la UNAM y la SEDEMA con el apoyo del Súper Cómputo de Barcelona han desarrollado la capacidad de operar la simulación numérica de la calidad del aire de forma operativa.

4.2.1 Métodos estadísticos de modelación

Los estudios citados arriba se han realizado mediante modelos determinísticos, o a través de la simulación numérica de primeros principios de las ecuaciones de conservación de masa, transporte, transferencia de radiación y cinética química o sus parametrizaciones. Se han reportado otras aproximaciones aplicando métodos estadísticos (Salazar-Ruiz et al. 2008, Reyes et al. 2010), de redes neuronales (Ruiz-Suarez et al. 1994, Ruiz-Suárez et al. 1995, Mendoza-Domínguez and García 2004), pero no han mostrado continuidad.

4.3 Propuestas

La modelación de la calidad del aire es una herramienta indispensable para la investigación sobre la química de la atmósfera, a escala local, regional o global. Es necesaria para evaluar escenarios de gestión, para estimar los impactos de la contaminación atmosférica, y para validar inventarios de emisiones, entre otros. A pesar de los encomiables esfuerzos de la pequeña comunidad de investigadores en modelación de la calidad del aire, es indispensable promover su crecimiento y sostenibilidad.

Para fomentar el desarrollo de mayores capacidades de modelación de la calidad del aire se deben considerar los siguientes elementos:

- Apoyo al desarrollo de infraestructura.
- Formación de recursos humanos.
- Continuidad de los grupos que actualmente desarrollan esta actividad.
- Formación de nuevos grupos de investigación y de nuevas áreas de modelación en la gestión federal y local.

Hoy en día cualquier ejercicio de modelación a gran escala de la calidad del aire u otro tipo de análisis a través de la herramienta como análisis de sensibilidad, de escenarios y otros, requiere de una capacidad de cómputo de alto desempeño. En México esta capacidad se ha fortalecido paulatinamente en universidades o centros de investigación. Por razón del centralismo histórico de México, hace algunos años esa capacidad se concentraba únicamente en la Ciudad de México. En la actualidad se ha fomentado el uso del súper cómputo y descentralizando la capacidad en otras regiones. Ahora hay centros de cómputo de alto desempeño en varias partes del país, los cuales hacen uso del súper cómputo para otras áreas del conocimiento. Es relevante fomentar la formación de grupos interesados en el uso de esa infraestructura para tales propósitos.

Un modelo que ha demostrado generar resultados benéficos para las universidades, centros de investigación y los gobiernos federal y estatal es mediante la implementación de los fondos sectoriales y FOMIX del CONACYT o mediante convenios específicos. Se pueden generar tres elementos importantes:

- Recursos humanos de alto nivel.
- Creación de nuevos grupos semilla en las instituciones de gobierno y universidades.
- Desarrollo de nueva infraestructura.

Estudios recientes (INECC 2014, SEMARNAT 2017) han demostrado que el desarrollo de las capacidades de modelación de la región centro y en general del país, se enfrenta a dos limitantes a considerar para impulsar el tema de la modelación en México:

La primera es resolver la necesidad de un inventario nacional de emisiones de alta resolución espacial y temporal (INEM-AR, (INECC 2014)). Es indispensable desarrollar y mantener un INEM-AR en un repositorio de fácil acceso a todos los grupos interesados en modelar la calidad del aire. A su vez el INEM-AR depende del Inventario Nacional de Emisiones (INEM), el cual, en contraste con el INEGI, ha sido elaborado solo cuatro veces desde 1999 (SEMARNAT 2006, SEMARNAT 2011), todas ellas con métodos diferentes para categorías clave, lo cual los hace poco comparables entre sí. La razón de esta situación es el desarrollo desigual de capacidades en el país. Por su objeto de trabajo, el INEM debe ser un inventario tipo “bottom-up” y un inventario nacional requiere de la concurrencia de los tres niveles de gobierno con capacidades diferentes entre ellas y entre las entidades. La única autoridad ambiental con una práctica consistente en la elaboración de inventarios de emisiones, aplicando buenas prácticas, sometiendo el inventario a auditorías y validándolo contra observaciones experimentales es la SEDEMA del Gobierno de la Ciudad de México. Esta última práctica, la validación contra observaciones, se realiza con el apoyo de la academia, nacional e internacional en las campañas intensivas realizadas en la ZMVM.

La otra limitante a resolver es la ausencia de suficientes series de tiempo de observaciones por estaciones de monitoreo con alcance nacional, en sitios urbanos y con mayor importancia, en sitios rurales para abordar la modelación a escala nacional, que permitan evaluar el desempeño de los modelos de calidad del aire. Esta limitación se discute en la sección precedente de este informe.

5 Revisión de las capacidades nacionales (instrumentos de información adecuados en materia de emisión y exposición a contaminantes climáticos de vida corta), adicionales al monitoreo, para estimar los costos de la contaminación atmosférica utilizando informes de gobierno, ProAires, tesis y artículos científicos más recientes.

5.1 Antecedentes

Los estudios sobre el impacto de la contaminación atmosférica en México se encuentran en publicaciones científicas desde la década de los 90 del siglo pasado (Romieu et al. 1992).

Una parte importante de los estudios sobre impactos de la contaminación atmosférica se realizó por medio de grandes campañas intensivas (Molina and Molina 2002, Molina et al. 2010). Se efectuaron estudios sobre exposición (Tovalin et al. 2007) y sobre efectos en nivel celular (Quintana et al. 2011).

Se registraron y catalogaron 76 artículos sobre efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana. Del total, 31 están dedicados a los efectos en la ZMVM. De otras ciudades importantes, se encontraron 6 en Guadalajara y 8 en Monterrey. Hay solo 11 publicaciones sobre el impacto de la contaminación atmosférica fuera de las principales ciudades (Osornio-Vargas et al. 1991, Moreno et al. 1997, Ramirez-Aguilar et al. 2002, Romieu et al. 2012). Del total, 23 son sobre exposición, 21 son estudios epidemiológicos (Lacasaña-Navarro et al. 1999, Cortez-Lugo et al. 2015), 8 son sobre efectos celulares de la contaminantes (Rosas Pérez et al. 2007, Carbajal-López et al. 2016), otros 7 son sobre identificación de fuentes, 17 sobre identificación de efectos (Calderón-Garcidueñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas et al. 2016). “Los estudios sobre manejo de riesgo o intervenciones poblacionales para la reducción de daños a la salud son prácticamente nulos”. (Riojas-Rodríguez et al. 2013).

Un tema emergente sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud de la población es la presencia de contaminantes en el cerebro humano y su posible impacto en las capacidades cognitivas o enfermedades degenerativas como el Alzheimer (Calderón-Garcidueñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas et al. 2015, Calderón-Garcidueñas and Torres-Jardón 2015), incluso en niños. Esta información debe tomarse con la misma seriedad y urgencia que los estudios reportados a finales del siglo pasado

sobre plomo en la leche materna y la sangre humana, incluyendo menores en la Ciudad de México (Claeys-Thoreau et al. 1987, Flores et al. 1989, Romieu et al. 1994)

También son prácticamente nulos los estudios para estimar los costos de la contaminación atmosférica por efectos en la salud (INECC 2014, Riojas-Rodríguez et al. 2016)

5.2 Métodos para estimar los costos de la contaminación atmosférica

Los métodos para estimar los costos de la contaminación atmosférica pasan por la construcción de mapas de excedencias de niveles críticos de contaminantes sobre diferentes receptores como población (WHO 2006), cultivos (Fuhrer 1995, Fuhrer et al. 1997), bosques y patrimonio (Baldi et al. 1995). En un sistema de información geográfica (GIS) esos mapas se superponen con otros acerca de la distribución geográfica de los receptores que pueden ser: población, cultivos, bosques y patrimonio. La métrica, los niveles críticos y las funciones dosis/respuesta o exposición/respuesta varían según el receptor a evaluar. Un conjunto básico de datos horarios de contaminantes atmosféricos debe organizarse y procesarse de formas diferentes según el receptor a evaluar (UNECE-LRTAP 2004, CLRTAP 2015). Los mapas de excedencias o niveles de concentración se vinculan con los mapas de distribución espacial de receptores mediante el uso de funciones dosis-respuesta o exposición-respuesta. Esas respuestas pueden ser muerte prematura (WHO 2006); visitas de emergencia a un hospital, en caso de personas; pérdida de rendimiento por parte de cultivos (Felzer et al. 2007); o tasas de deterioro de materiales (Tidblad et al. 2001, Kucera et al. 2007). Los niveles críticos son aquellos niveles de concentración en la atmósfera arriba de los cuales efectos directos adversos pueden ocurrir sobre los receptores de acuerdo al conocimiento científico actual (UNECE-LRTAP 2004). Debe señalarse que no hay evidencia de algún valor de concentración ambiental abajo del cual no hay efecto negativo por exposición a ozono y PM (Brunekreef and Holgate 2002). Por esa razón, los valores críticos recomendados por la OMS para PM y O₃ son ligeramente superiores a los niveles de fondo (WHO 2006). La última etapa es convertir esa información a un común denominador que puede ser el costo monetario (Fann et al. 2009, Tidblad et al. 2010, Avnery et al. 2011). Este puede ser público o privado.

5.2.1 Mapas de excedencias

Generalmente los mapas se construyen interpolando datos de series de tiempos de los contaminantes de interés. Los datos pueden ser de estaciones de monitoreo continuo (Tidblad and Kucera 2006, Brauer et al. 2008) o modelos o la combinación de ambos (Voorhees et al. 2014). En este último caso, los datos de las estaciones de monitoreo sirven para corregir los resultados del modelo (Denby et al. 2010).

Las escalas espaciales de los mapas de excedencias dependerán del tipo receptor a evaluar. Para receptores como población o patrimonio, la escala de ciudad puede ser suficiente. Para receptores como cultivos, bosques y ecosistema las escalas nacionales o al menos regionales son indispensables. Incluso, en el contexto de una megalópolis como la de México, la escala regional no puede evadirse, por los complejo procesos de intercambio de contaminantes que se observan entre las cuencas atmosféricas que la contienen (Caetano and Magaña 2007, García Reynoso et al.

2009, INECC 2014) y por la elevada fracción de su población que habita en sitios rurales y periurbanos (INECC 2015). Las escalas regional o nacional hacen indispensable el uso de estaciones de monitoreo rurales.

A la fecha, México cuenta con al menos un puñado de estaciones de monitoreo de calidad del aire que califican como rurales o periurbanas, todas en torno a la Ciudad de México. Por ello, no es posible construir mapas nacionales o regionales de niveles medios o excedencias de niveles críticos de ozono u otros contaminantes solo con información de redes de monitoreo urbanas. Por un lado, las masas de aire contaminado forman más ozono al ser transportadas por el viento abajo de las zonas urbanas; junto con la orografía muy compleja de buena parte del territorio nacional, dificultan el uso de métodos de interpolación con las series de tiempo de las estaciones urbanas de monitoreo de calidad del aire. Por otro lado, contaminantes como PM_{10} y $PM_{2.5}$ se diluyen al ser transportados fuera de las ciudades y al mismo tiempo se enriquecen con nuevas fuentes, como la erosión eólica (Díaz-Nigenda et al. 2010) o la quema de biomasa (Yokelson et al. 2011, Barrera et al. 2012). A esa dificultad se suma la gran disparidad en cobertura, continuidad y calidad de los datos reportados por los SMQA ya discutidos en sección anterior.

La alternativa es la simulación numérica de la calidad del aire para elaborar los mapas de excedencias de niveles críticos de ozono y otros contaminantes. En este caso, los resultados de los modelos deben ser evaluados contra observaciones (Tarrasón et al. 1998, Denby et al. 2005). Una seria limitación de esta alternativa es la ausencia de series de tiempo de los CCVC en sitios rurales para evaluar el desempeño de los modelos. En la Corona de Ciudades del Centro de México se cuenta con mediciones en sitios rurales y periurbanos de varias campañas de campo de corta duración que se pueden usar para corregir los resultados de los modelos. Se puede asumir que los factores de ajuste así obtenidos son válidos por algunos años, dependiendo de la frecuencia de actualización del inventario nacional de emisiones. Es necesario replicar estos estudios en otras cuencas atmosféricas prioritarias en el país.

5.2.2 Sobre los receptores

La información necesaria por parte de los receptores es: cartográfica, en términos de: distribución de población, producción agrícola, distribución de bosques y especies boscosas, así como patrimonio que puede ser cultural, infraestructura pública y patrimonio privado.

5.2.3 Población:

La información cartográfica y geoestadística necesaria para la distribución de población comprende el Marco Geoestadístico Nacional (MGN) v5.0A, del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), como base para límites administrativos y áreas urbanas 2010; Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI), Principales resultados por Área Geoestadística Básica (AGEB) urbana y rural. www.inegi.org.mx.

5.2.3.1 Cultivos y bosques:

Para la distribución de cultivos y bosques se utiliza el Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación Serie V, Capa Unión (Agricultura y Vegetación) (2011-2012). Escala 1:250 000 .

www.inegi.org.mx, La información antes mencionada se encuentra en formato “Shape File”, con proyección CCL (Cónica Conforme de Lambert) y con DATUM ITRF92.

La información estadística de la producción agrícola por municipio se obtiene del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). De esta base de datos se utiliza la siguiente información: superficie sembrada (ha), rendimiento (ton/ha) y precio medio rural (PMR, \$/ton).

Los datos alfanuméricos son relacionados con los datos georeferenciados de los municipios que constituyen el área de estudio. Utilizando estos valores correspondientes al año de estudio y las funciones Exposición/Respuesta, se estima el valor de la pérdida económica ocasionada por el ozono.

5.2.3.2 Patrimonio cultural:

La capa de los bienes materiales de tipo arqueológico, histórico o artístico que comprenden el patrimonio cultural tangible de la Nación se crea con la geo-localización de cada uno de estos sitios registrados en el catálogo del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), Atlas de infraestructura y patrimonio cultural de México. Cap. III. Patrimonio. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, México (Conaculta 2010).

5.2.3.3 Patrimonio privado e infraestructura:

Se requieren mapas de distribución de ese tipo de patrimonio por materiales.

5.2.4 Funciones dosis/respuesta o exposición/respuesta

5.2.4.1 Salud

Para obtener el impacto de la contaminación sobre la población se calculan las excedencias de las Normas Oficiales Mexicanas (SSA 2014, SSA 2014) para cada contaminante o los valores de referencia de la OMS (WHO 2007). La evaluación del impacto en la salud se realiza utilizando funciones concentración-respuesta, generadas en estudios epidemiológicos, que vinculan los cambios en la concentración de ozono con los cambios en la incidencia de efectos adversos para la salud como: mortalidad prematura, admisiones al hospital por enfermedades respiratorias, emergencias debidas a ataques de asma, días perdidos de escuela, días de actividad restringida (Levy et al. 2001). Para *monetizar* los costos se utilizan indicadores como el valor estadístico de la vida, o el de una enfermedad en particular relacionada con la contaminación atmosférica, como la bronquitis (Ostro et al. 2006), adaptados a México (McKinley et al. 2005).

5.2.4.2 Cultivos

Para estimar el impacto del ozono superficial en la reducción de la producción de cultivos y la pérdida económica utilizamos las funciones Exposición-Respuesta compiladas por (Mills et al. 2007), las cuales dan una relación lineal como una función de la métrica AOT40 para los cultivos considerados y bosques.

Para estimar las pérdidas en cultivos se utilizan del SIAP: la superficie sembrada (ha), rendimiento (ton/ha) y precio medio rural (PMR, \$/ton) por municipio (SAGARPA 2011) .

Bosques: para la estimación de las pérdidas en bosques, se necesita conocer la distribución de la biomasa en el árbol, incluyendo, raíces, tronco, ramas y hojas. Luego, convertir esa pérdida en la reducción de algún valor como biomasa maderable, carbón capturado u otro servicio ambiental.

5.2.4.3 Patrimonio

Para un material particular se calcula la tasa de deterioro por nivel de concentración ambiental de los contaminantes de interés. Se estima el costo de mantenimiento, conservación o de reposición. Para el patrimonio cultural solo se puede considerar la conservación. En muchas ocasiones el costo de la conservación no se puede estimar *a priori*. Los estimados de recesión sirven para priorizar sitios donde aplicar recursos de inspección y conservación (Bravo Alvarez et al. , Bravo Alvarez et al. 1998, Bravo Alvarez et al. 2006, Castillo-Miranda et al. 2017).

5.3 Propuestas

5.3.1 Sobre los mapas de excedencias

Es evidente que los *cuellos de botella* para estimar los costos de la contaminación atmosférica se concentran marcadamente; por un lado, en la capacidad de elaborar los mapas de excedencias a partir de series de tiempo deficientes del monitoreo, con la cobertura, continuidad, representatividad y calidad con que se disponen actualmente; por otro lado, en la capacidad de modelación de la química atmosférica a escala regional y nacional. Con la calidad actual de los inventarios de emisiones y con la capacidad de evaluar el desempeño de los modelos. Las propuestas para mejorar estos dos determinantes se discuten en secciones previas.

5.3.2 Sobre funciones dosis/respuesta o exposición/respuesta

En términos de efectos en cultivos es necesario obtener experimentalmente estas funciones para cultivos propios del país y para los cuales no existen estas funciones, como nopales, agave, café, aguacate, etcétera. En términos del patrimonio cultural es necesario también obtener experimentalmente estas funciones para materiales de construcción propios del país y para los cuales no existen estas funciones, como las rocas volcánicas que se usaron para construir pirámides y palacios e iglesias coloniales.

6 Revisión de los instrumentos de gestión existentes en México para la protección de cultivos, bosques y patrimonio cultural por exposición a contaminantes y propuesta de acciones de mejora.

6.1 Antecedentes en la legislación ambiental nacional

Los principios constitucionales del artículo 4, párrafos 3 y 4: “Toda persona tiene derecho a la protección de la salud” y “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”, así como el artículo 25, párrafo primero, son el punto de referencia de las leyes ambientales de México.

El artículo 73, fracción XXIX G de la Constitución es el fundamento de la LGEEPA, LGCC, LGDFS, LGPAS, LGVS, LAN y LH y otras leyes ambientales, y de ahí, el gobierno federal, los estatales y municipales ejercen sus atribuciones en materia de mitigación y adaptación al cambio climático.

En lo subsecuente, este estudio se circunscribe al análisis de los instrumentos de gestión existentes en México para la protección de cultivos, bosques, ecosistemas y patrimonio cultural por exposición a contaminantes atmosféricos.

6.2 ¿Existe el marco legal para el monitoreo rural de la calidad del aire?

Dos de los conceptos eje para contestar esta pregunta son el de bienestar de la población y el de desarrollo sustentable o sostenible:

El concepto de bienestar de la población aparece en la LGEEPA en sus artículos 1.I, 15.XII, 21.V, 36.II, 110.II. Por bienestar entendemos el conjunto de condiciones que permiten a los individuos realizarse y buscar la felicidad. Condiciones básicas de bienestar son la seguridad alimentaria y un ambiente sano.

Por su parte el concepto de desarrollo sustentable o sostenible aparece en la LGCC en sus artículos: 1, 15.III, 15.V, 22.I, 26.IX, 33.I, 34.III.b, d, e). Por desarrollo sustentable o sostenible entendemos la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

No deja de causar sorpresa que en la LGCC no se mencione el bienestar de la población como criterio guiador de la reglamentación o intervención. En su lugar, el concepto de desarrollo y/o uso sustentable de los recursos parece ser el concepto guiador, aunque en su artículo 2.I se señala como su objetivo garantizar el derecho a un ambiente sano.

En apariencia les siguen en jerarquía: equilibrio ecológico y conservación de los recursos naturales, como condición necesaria para garantizar el bienestar de la población y el desarrollo sostenible.

El derecho de las generaciones futuras de mexicanos a la salud y al bienestar solo se puede lograr con un desarrollo sostenible en un ambiente sano, con seguridad alimentaria y conservando los recursos naturales.

La contaminación atmosférica afecta no solo la salud de la población; también afecta su bienestar al dañar los cultivos, reduciendo su rendimiento y poner en riesgo la seguridad alimentaria; más aún si esta población es creciente. Al afectar bosques y ecosistemas reduce la calidad y cantidad de los servicios ambientales que éstos prestan a la sociedad. De esta forma, también pone en riesgo la sostenibilidad del desarrollo para la generación presente y las futuras.

La contaminación atmosférica está regulada de forma explícita en la LGEEPA y la LGCC:

LGEEPA Art. 3.VII. Contaminante:” Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural”.

LGCC. Art.2.V. Compuestos de efecto invernadero: “Gases de efecto invernadero, sus precursores y partículas que absorben y emiten radiación infrarroja en la atmósfera”.

El O₃ es un gas de efecto invernadero y sus precursores (COV, NO_x) son gases de efecto invernadero indirecto por su papel en la formación de ozono. A su vez, éstos compuestos son contaminantes en el sentido del Art. 3.VII de la LGEEPA, tanto como contaminantes locales como contaminantes climáticos.

Como el Art. 3.VII de la LGEEPA no establece límites de escala espacial o temporal a la modificación de la composición y condición natural de la atmósfera, en su definición de contaminante, también permite considerar a los GEI, y al carbono negro y al carbón orgánico como tales. Lo anterior sin contar que, en una gran cantidad de procesos, los GEI y los precursores de ozono son coemitidos a la atmósfera.

En sí, el ozono no es solo un gas de efecto invernadero, es también un fuerte oxidante atmosférico que afecta el crecimiento de las plantas (Middleton et al. 1950, Haagen-Smit et al. 1952), ya sean vegetación natural (Orendovici et al. 2003) o cultivos (Amin et al. 2013). La exposición al O₃ por parte de cultivos reduce su rendimiento (Mills et al. 2011). En bosques y ecosistemas reduce su captura de carbono y expone a la vegetación natural a patógenos oportunistas. Otros precursores de ozono y CCVC, como los NO_x, eutrifican los suelos de ecosistemas alterando el balance entre especies vegetales afectando la biodiversidad (SEMARNAT 2008). Los posibles efectos combinados de la exposición a ozono y un clima cambiante, o los cobeneficios logrados por el abordaje integral

de ambos problemas, son un tema de investigación de la mayor importancia (Reilly et al. 2007, Tollefsen et al. 2009)

La contaminación atmosférica no solo afecta la salud de la población y el clima; también la repercute negativamente en la seguridad alimentaria, el equilibrio ecológico y la sostenibilidad de los servicios ambientales proporcionados por los bosques y ecosistemas. La LGDFS también debe ser parte del andamiaje normativo necesario para abordar este problema.

Como soporte indispensable para la elaboración de política pública sobre el control de la contaminación atmosférica, el monitoreo de ozono y sus precursores en ambientes rurales es también una necesidad. Este consultor considera que el marco legal que justifica y obliga ese monitoreo ya está dado, tanto en la LGEEPA como en la LGCC y la LGDFS y no es necesario modificarlas. El ámbito legal para regular ese monitoreo es la NOM-156-SEMARNAT.

La NOM-156-SEMARNAT debe definir diferentes tipos de estaciones de monitoreo, para otros objetivos en la observación y análisis de la contaminación atmosférica. Entre ellos se deben contar las estaciones periurbanas, rurales y remotas.

6.3 ¿Quién es responsable del monitoreo rural?

En esta sección se realiza un análisis semántico de los textos legales que se refieren a las competencias y responsabilidades sobre el control de la contaminación atmosférica en sitios rurales. La fuente principal de este análisis es la Enciclopedia Jurídica Ed. 2014 en línea (Enciclopedia Jurídica 2014). Todas las ligas en esta sección refieren a esta fuente.

En un reducido sentido legal, parece que en México nadie es responsable de ello. Esto se concluye del análisis de otro par de conceptos eje en la legislación ambiental mexicana, que son los conceptos de competencia y responsabilidad.

Competencia: “Es la capacidad que tiene una autoridad para conocer sobre una materia o asunto. Por su parte, la capacidad (de ejercicio) es el poder ejercer por sí mismo los propios derechos y/o contraer obligaciones. En el caso de una autoridad es la facultad para actuar sobre una materia o asunto. A su vez la facultad es la posibilidad de opción ante una situación jurídica concedida por la ley o la convención. Y, por último, la opción es la facultad de escoger, al propio arbitrio una posibilidad”.

En este periplo de definiciones jurídicas, no se encontró mención alguna a “deber ser” o responsabilidad. Las dependencias de gobierno de los tres niveles de gobierno, con competencia sobre temas ambientales tienen la capacidad para actuar sobre un problema ambiental, pero esa capacidad es opcional y no obligatoria.

Pero ¿cuál es la consecuencia si la entidad gubernamental o el servidor público optaron por no ejercer, o ejercer negligentemente su competencia? ¿Hay alguna responsabilidad?, ¿de qué tipo? ¿Puede ser responsable el Estado, como persona de derecho público?

Las entidades responsables de la gestión ambiental, en los tres niveles de gobierno son personas morales y partes del Estado. De ellas, “sólo se puede considerar que tienen responsabilidad civil; y ello como concepto relativamente moderno, ya que en tiempos antiguos el Estado, como soberano, o el soberano como Estado, eran irresponsables. Particularmente, esa responsabilidad debe considerarse como responsabilidad administrativa cuando se ha producido un daño derivado del funcionamiento anormal de los servicios públicos. El término servicio público hay que entenderlo aquí como comprensivo de toda actividad administrativa; es decir, como sinónimo de gestión o quehacer administrativo”.

“La responsabilidad administrativa es la versión de la responsabilidad extracontractual o aquiliana, de origen civil, aplicada a las relaciones jurídico-administrativas; es decir, a las relaciones entre un particular (¿la población?) y la Administración. En este sentido, pierde protagonismo la culpa y lo gana el daño o perjuicio que debe repararse. Se fundamenta ello en el indiscutible deber de las administraciones públicas de prestar determinados servicios; la carencia o funcionamiento defectuoso de los mismos conlleva el deber de reparar el daño causado, con independencia de la concurrencia de culpa o dolo de los funcionarios responsables”.

Aparentemente, las omisiones del sector público en la gestión de la calidad y el control de la contaminación atmosférica pueden ser materia de la LFRA pues en su Artículo 10 establece: “Toda persona física o moral que con su acción u omisión ocasione directa o indirectamente un daño al ambiente, será responsable y estará obligada a la reparación de los daños, o bien, cuando la reparación no sea posible a la compensación ambiental que proceda, en los términos de la presente Ley. De la misma forma estará obligada a realizar las acciones necesarias para evitar que se incremente el daño ocasionado al ambiente,” por ejemplo, el monitoreo de la calidad del aire.

“LFRA Artículo 11.- La responsabilidad por daños ocasionados al ambiente será subjetiva, y nacerá de actos u omisiones ilícitos con las excepciones y supuestos previstos en este Título, ” pero “Para los efectos de esta Ley, se entenderá que obra ilícitamente el que realiza una conducta activa u omisiva en contravención a las disposiciones legales, reglamentarias, a las normas oficiales mexicanas, o a las autorizaciones, licencias, permisos o concesiones expedidas por la Secretaría u otras autoridades”.

De esta lectura parece derivarse que en un asentamiento poblacional que cumple con los condicionamientos dados en la NOM-156-SEMARNAT, para establecer un SMQA y no se hace, se incurre en responsabilidad ambiental por los posibles daños a la salud y que no se están mitigando, por cuanto no existe un diagnóstico sobre esa afectación. En el contexto de la LFRA, este consultor es de la opinión que son responsables, tanto la dependencia ambiental como persona moral, como el funcionario ejecutivo responsable de la entidad o dependencia, como persona física a cargo. Por otro lado, en el contexto de la LFRA no parece haber responsabilidad ambiental por no establecer estaciones de monitoreo en sitios rurales, incluyendo ANP. Ello porque no están definidas en la NOM-156-SEMARNAT. En todo caso esa responsabilidad parece recaer no en las personas morales o servidores públicos a cargo de los SMQA, sino en la SEMARNAT y los servidores públicos a cargo de la formulación y revisión de la NOM-156-SEMARNAT.

Pero una vez establecida en la NOM156-Sermarnat la obligación del monitoreo atmosférico, ¿a quién competiría ese monitoreo? Sobre las ANP parece ser que a la SEMARNAT le correspondería

el monitoreo en las ANP declaradas de acuerdo a las fracciones I-VIII y el XI del Artículo 46 de la LGERPA, mientras que a los estados y municipios les correspondería las declaradas a iniciativa suya.

Por cuanto la exposición de los bosques y suelos a la contaminación atmosférica contribuye a su degradación, afecta los servicios ambientales que éstos pueden prestar y aumenta su vulnerabilidad ante el cambio climático, la información sobre los niveles ambientales de contaminantes atmosféricos y su depósito, se debe integrar al Inventario Nacional Forestal y Suelos (Sección 3, LGDFS).

Por último, de una lectura de del Capítulo 1, Título Tercero de la LGDFS parece derivarse que la SEMARNAT, las autoridades estatales y municipales deben la **definición de contaminante** e incluir los impactos de la contaminación atmosférica en los bosques como criterio de valoración de los servicios ambientales.

6.4 Conclusiones sobre el marco normativo para la gestión de la calidad del aire en medios rurales

El marco normativo que da sustento legal al monitoreo de la calidad del aire y el depósito atmosférico en cultivos, bosques y ecosistemas ya existe. Por cuanto los efectos de la exposición a ozono por parte de cultivos, bosques y ecosistemas son cuantificables en muchos casos, la omisión del monitoreo y la omisión de políticas públicas de mitigación pueden considerarse generadoras de responsabilidad ambiental.

6.5 Propuestas

La NOM156-SEMARNAT debe ser revisada para incluir el monitoreo de la calidad del aire y el depósito atmosférico en áreas rurales.

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas debe considerar a la contaminación atmosférica como una amenaza real y actuante sobre la salud de los bosques y ecosistemas protegidos por una declaración de área natural protegida y actuar en consecuencia, empezando por el monitoreo de la misma en las ANP.

Los impactos de la contaminación atmosférica, exposición a ozono y depósito atmosférico en cultivos, bosques y ecosistemas, en términos de su rendimiento, captura de carbono y otros servicios ambientales, deben cuantificarse e incluirse en el sistema de cuentas nacionales de INEGI y considerarse en el PIB ambiental.

La implementación de estas propuestas no parece requerir de adecuaciones a nivel de leyes generales o federales como la LGEEPA, LGCC, LGDFS, LFRA aunque una formulación más explícita sería de gran beneficio.

7 El impacto de la expansión urbana en las emisiones de forzantes climáticos

7.1 El estado del arte en México

“La ciudad ha sido una de los más grandes y fascinantes inventos que se han logrado. En algunos casos se considera un artefacto, porque cuenta con estructura, función y causalidad” (Suárez et al. 2011). Una ciudad bien planeada es más eficiente, ya que las personas cuentan con transporte público adecuado y el lugar de trabajo queda cerca del de residencia, lo cual permite el traslado fácil en un menor tiempo y que se genere como resultado menos contaminación atmosférica.

En México las ciudades no se caracterizan por crecer de manera ordenada y la forma en que lo hacen puede implicar altos costos contra la eficiencia de las mismas y su huella ecológica. En el modelo monocéntrico de ciudad, al concentrarse los empleos en su centro, aumenta el costo del suelo, por lo que expulsa a sus habitantes de menor ingreso a la periferia en busca de vivienda más barata. Conforme crece la ciudad y absorbe otras municipalidades se forman zonas metropolitanas que empiezan a generar nuevos polos de atracción de empleo y se forman ciudades policéntricas. La ZMVM y posiblemente otras zonas metropolitanas importantes del país pueden compartir rasgos de ambos modelos (Suárez and Delgado 2009).

Otros factores pueden influir en la forma en que crece una ciudad. En México, la oferta de vivienda juega un papel muy importante en su crecimiento (Álvarez de la Torre 2010), pero la influencia de la fuerte desigualdad del ingreso (Cortés 2013, INEGI 2016), con bajos salarios formales y una alta fracción de la población económicamente activa en trabajos precarios e informales, también incide en una oferta de vivienda muy segregada (Bayón 2008), lo que obliga a viajes cada vez más largos. Por ejemplo (Figura 5) en la Corona Regional de Ciudades del Centro de México, los viajes al trabajo aumentaron un kilómetro en promedio entre 2000 y 2010 (INECC 2015). En la ZMVM y en partes de la Zona Metropolitana de Puebla-Tlaxcala (ZMPT) se observó una disminución en las distancias al trabajo, mientras en los municipios de las periferias hubo un incremento de entre 2 y 4 km. En los municipios más alejados de los centros urbanos el incremento fue mayor de 4 km en los viajes al trabajo.

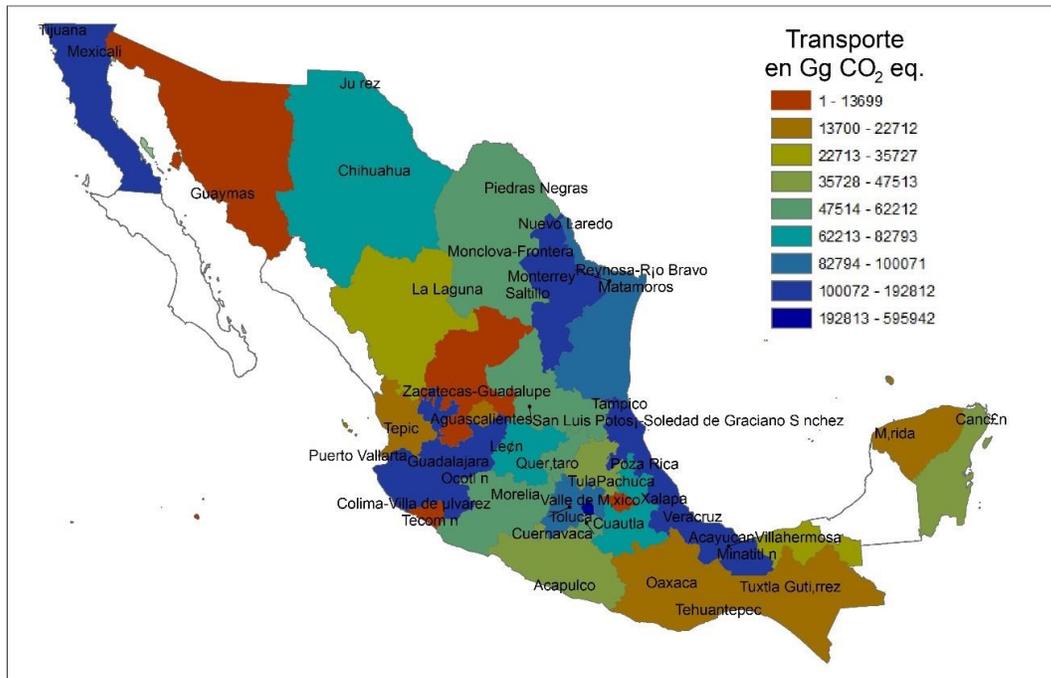


Figura 4-15 Huella de Carbono por Transporte.

Figura 6 Huella de carbono por transporte durante el uso de vivienda de interés social. Fuente (Betancourt Quiroga 2017)

En las municipalidades exteriores de la ZMVM y las municipalidades vecinas bajo su influencia, los viajes más largos para ir al trabajo, escuela, suministros y esparcimiento, obligan a la motorización. Los niveles de ingreso de muchos de sus pobladores los inducen a la adquisición de vehículos de segunda mano. Como solo en las municipalidades al interior de la ZMVM se aplican los rigurosos controles de emisiones vehiculares, los vehículos que no serían autorizados a circular en ellas, son adquiridos por los pobladores de menores ingresos en la periferia de la ZMVM para su uso en esas zonas.

Por otro lado, la baja densidad poblacional en la periferia de las zonas metropolitanas de la Megalópolis, obliga al uso de medios de transporte público de baja capacidad, lo mismo que al uso de autos particulares que no logran pasar controles homologados de emisiones vigentes en ellas.

El impacto de la expansión urbana sin control en las emisiones de GEI y CCVC y precursores de ozono y aerosol orgánico secundario se hace evidente en la Figura 7. No solo se recorren distancias más largas, también importan los vehículos en que se recorren y las condiciones de mantenimiento y operación de los vehículos.

Ese modelo de crecimiento urbano, o precisamente la ausencia de un modelo efectivo de desarrollo urbano que, en un contexto de debilidad institucional, deja al mercado la solución del problema de vivienda, tiene consecuencias en cascada sobre las emisiones de GEI y de CCVC porque a largo plazo vitrifican patrones de emisiones muy difíciles de modificar. No solo los viajes son más largos; también son más lentos. Por ejemplo, en la ZMVM la velocidad promedio pasó de 33 km/h en 2002 (SEDEMA 2002) a 17 km/h en 2012 (SEDEMA 2016). Los resultados de

Betancourt Quiroga (Betancourt Quiroga 2017), confirman cuantitativamente el impacto de la expansión urbana difusa en las emisiones de GEI y CCVC propuesto en la Figura 3.

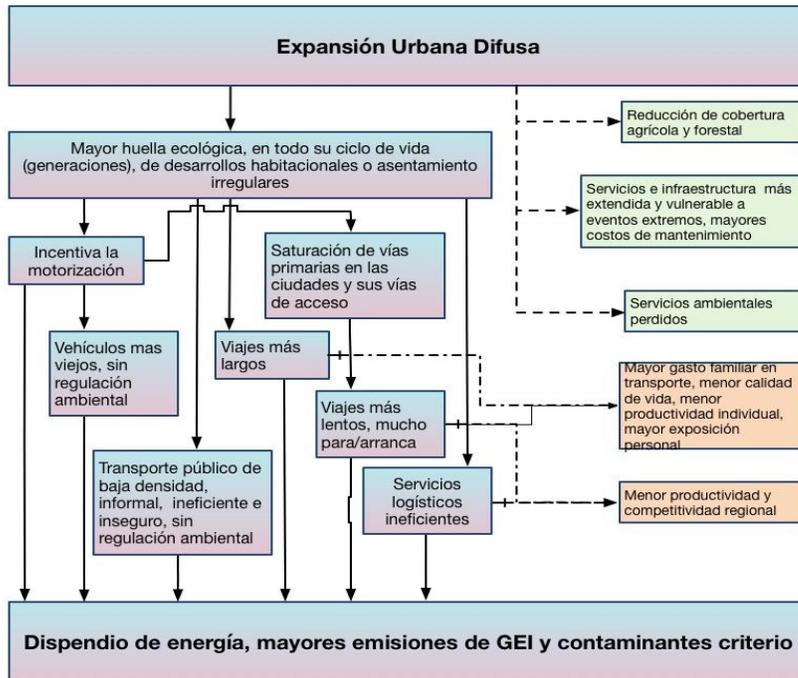


Figura 7 Modelo conceptual de los impactos del modelo presente de urbanización difusa en las emisiones de GEI y CCVC. Las líneas punteadas apuntan a otros procesos de deterioro ambiental y de calidad de vida fuera de los alcances del proyecto ECAIM. Fuente (INECC 2015).

7.2 Conclusiones sobre expansión urbana y emisiones

Los procesos que dan lugar a la expansión urbana en la forma en que se da en México están bien documentados, pero es más difícil cuantificar el impacto en las emisiones de GEI y de CCVC que se derivan de ello. Los resultados de Betancourt Quiroga (Betancourt Quiroga 2017) y el proyecto Ecaim (INECC 2015) muestran el camino para cuantificar y calcular monetariamente esos impactos en términos de emisiones y gasto de energía. Es menester apoyar estas líneas emergentes de investigación. Será necesario también agregar los costos en salud por mayor exposición y daños en cultivos y bosques. (Ortiz et al. 2003, Hernández-Paniagua et al. 2018).

7.3 Recomendaciones sobre expansión urbana y emisiones

La complejidad de los procesos descritos en la Figura 3, no permiten, con el estado del arte actual en México, cuantificar la mitigación de emisiones de GEI y CCVC pero es indispensable desarrollar la capacidad para hacerlo.

En su momento, el análisis de las opciones de mitigación de emisiones asociadas a la expansión urbana como realmente ocurre en México, debe realizarse de forma integral incluyendo, CN, CO_r, COV, CO, NO_x y O₃, pues muchos de los procesos asociados con la expansión urbana incluyen condiciones que favorecen la combustión incompleta de gasolina y diésel y la mayor presencia de súper emisores.

8 Tendencias en las emisiones de forzantes climáticos y comparaciones de inventarios de emisiones de carbono negro.

8.1 Carbono negro en la política pública a nivel estatal

El CN es un contaminante atmosférico que actualmente está siendo considerado por su relevancia en las cuestiones de salud pública, al corresponder a una fracción de las partículas PM_{2.5}; por su capacidad de absorción de compuestos tóxicos, puede llegar a atravesar los alveolos y causar problemas importantes en la salud (Xing et al. 2016) También por su capacidad de absorción de radiación que contribuye al calentamiento global (Bachmann 2009) es importante su cuantificación y control. Por esta razón, actualmente ya se considera un contaminante importante dentro de la Estrategia Nacional de Calidad del Aire.

Para determinar la presencia del CN en los documentos gubernamentales, se realizó el análisis de los Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (Pro Aire) existentes y se encontró que en ninguno de los 21 documentos se menciona al CN. Sin embargo, en el Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire en la Megalópolis, ya se considera a este contaminante.

En los 26 Programas Estatales de Acción contra el Cambio Climático (PEACC) que se revisaron, el carbono negro solamente se encuentra referido en 5 de ellos (Ciudad de México, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo y Jalisco). En el caso de Veracruz, aunque no se mencione en el PEACC, en el Programa Estatal de Cambio Climático del 2017, se considera su importancia y se reconoce que debe empezar a cuantificarse.

Este contaminante ya se registra en los inventarios de emisiones de los estados con mayor problema de contaminación, como es el caso de la Ciudad de México, donde se considera desde el 2012, junto con los compuestos tóxicos. También se encuentra en el inventario del estado de Jalisco.

8.2 Los inventarios nacionales de carbono negro

8.2.1 El inventario preliminar de CN

La primera estimación de emisiones de carbono negro en México fue realizada en 2010 por Molina *et al* en el estudio *Temas Emergentes en Cambio Climático: metano y carbono negro, sus posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación* (INE 2011). En ese documento se calcularon las emisiones por dos vías: a partir del Inventario Nacional de GEI (INEGEI) usando los datos ahí reportados de 2006 (SEMARNAT 2008) y a partir del Inventario Nacional de Emisiones (INEM) de contaminantes criterio 1999 (SEMARNAT 2011).

Como primer estimado y con el objeto de comparar resultados obtenidos a partir de un inventario “top-down” (INEGEI) y “bottom-up” (INEM), se utilizaron categorías muy amplias de emisiones. Dado que las emisiones de carbono negro son muy dependientes de la tecnología de combustión y de las condiciones específicas bajo las cuales ocurre el proceso, los estimados fueron una muy preliminar aproximación al problema.

El inventario de carbono negro a partir del INEGEI, tipo “top-down”, se calculó solo para el sector de la producción y uso de la energía usando categorías de fuentes subsectoriales. Se utilizaron factores de emisión compilados por Streets (Streets *et al.* 2001). Tomando en cuenta la amplia incertidumbre en los factores de emisión y el carácter agregado de la información, se reportaron el límite inferior (49.41 Gg) y el límite superior (473.09 Gg) de los estimados.

El inventario de emisiones a partir del INEM, tipo “bottom-up”, también usa categorías agregadas, pero no necesariamente equivalentes a las del INEGEI. En este caso se tomaron las emisiones de PM_{2.5} y se usaron los cocientes CN/PM_{2.5} reportados por Battye y Boyer (Battye *et al.* 2002). Se incluyeron categorías de fuentes de emisiones consideradas en el ejercicio a partir del INEM. También se reportaron el límite inferior (55.897 Gg) y el superior (98.582 Gg).

8.2.2 El CN en la Quinta Comunicación Nacional

En ese informe ante la CMNUCC (SEMARNAT 2012), México fue el primer país en reportar un inventario nacional de emisiones de CN a la Convención. Elaborando a partir del ejercicio reportado en el informe *Temas Emergentes ...* (INE 2011) el cual fue posteriormente desarrollado como un proceso de cálculo estrechamente vinculado al INEGEI y las metodologías IPCC, se presentan las emisiones de CN con el mismo grado de resolución (Tier) que el reportado para los GEI en el INEGEI.

8.2.2.1 Método

Aquí se reseña la propuesta metodológica que se siguió en ese inventario: como al igual que el CO, el CN es producto de la combustión incompleta de algún combustible, en cada categoría de fuente, con el nivel de resolución en el que se reporte en el INEGEI, en la cual se incluya al monóxido de carbono como GEI indirecto, que es como se les llama a los precursores de ozono en la metodología IPCC, también se estimarían las emisiones de CN. Siguiendo la Guía de Buenas Prácticas del IPCC (IPCC-NGGIP 2000), los datos de actividad se tomaron de los datos de actividad

de los GEI indirectos con el mismo nivel de resolución de fuentes de emisión. Esta aproximación es similar a la seguida por Bond (Bond et al. 2004) y por ello se hizo uso de los factores de emisión compilados por ella. Como buena práctica, cuando se encontraron factores de emisión obtenidos en México, y sometidos a evaluación por pares, se utilizaron éstos en lugar de los reportados por Bond. Si alguna categoría de fuente no es reportada por Bond, o se tiene mejor resolución en el INEGI, se busca o estima un factor de emisión utilizando la misma aproximación metodológica que Bond. Cuando no se encontró un factor de emisión de carbono negro, se usó un factor de emisión de PM_{2.5} y un cociente CN/PM_{2.5}, preferentemente del mismo artículo. De no ser posible esto último, se podrían tomar los factores de emisión de PM_{2.5} y los coeficientes de partición reportados en diferentes artículos para la misma fuente o categoría de fuente por tipo de combustible y de proceso de combustión.

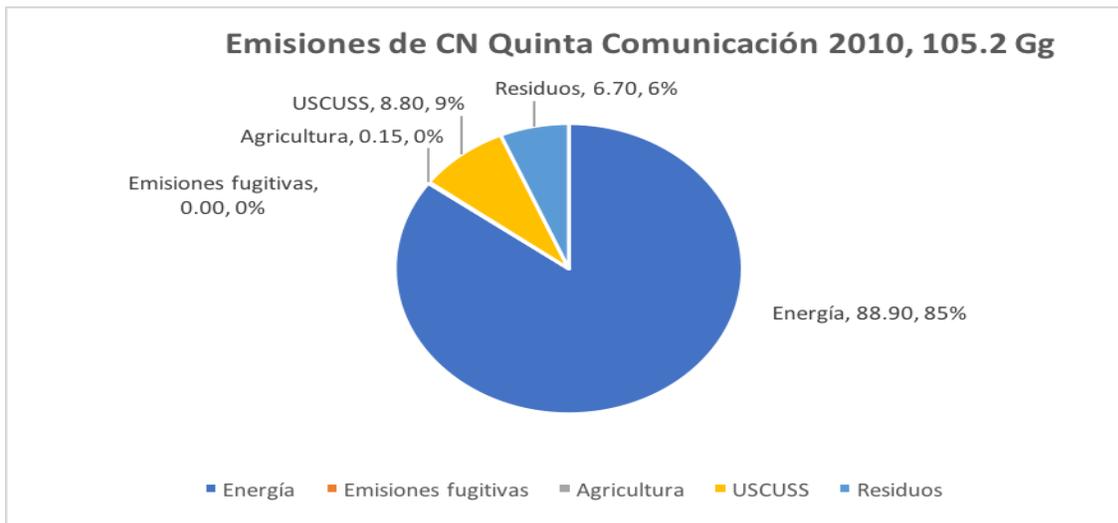


Figura 8 Distribución de emisiones por sector en el inventario nacional de CN en la Quinta Comunicación Nacional. Las contribuciones de CN por emisiones fugitivas no fueron estimadas en la Quinta Comunicación por no tener la información necesaria. Para fines de comparación aquí se toman prestadas las emisiones reportadas y se incorporan a las del sector Energía.

En ese ejercicio, se exploraron varias formas de procesar los cálculos. Con excepción del sector energía, a las Libretas de cálculo del inventario de las metodologías 1996 y 2006 del IPCC se agregaron copias de la correspondiente hoja donde se calcula el CO con ligas al dato de actividad del cálculo de CO y con ligas a una libreta Excel, repositorio de factores de emisión de CN, donde cada factor tiene documentada su fuente y las consideraciones realizadas para su uso. En el sector energía, el inventario del GEI sigue un método basado en el uso final de combustibles por sector. Respetando la estructura de la libreta de cálculo y sus hojas respectivas, luego de los bloques para CO, NO_x, SO₂, CH₄ y COV, se agregó bloque para el CN. Se adicionó una hoja con los factores de emisión en las mismas unidades de Gg/TJ, usadas para los GEI. Igual que para los GEI, se estimó la serie de tiempo de emisiones de CN, de 1990 a 2010. Para el 2010, se estimaron 104 Gg de CN sin incluir las emisiones por quemadores asociados a las emisiones fugitivas de gas natural en la industria del gas y del petróleo por no contar con información sobre esa fuente.

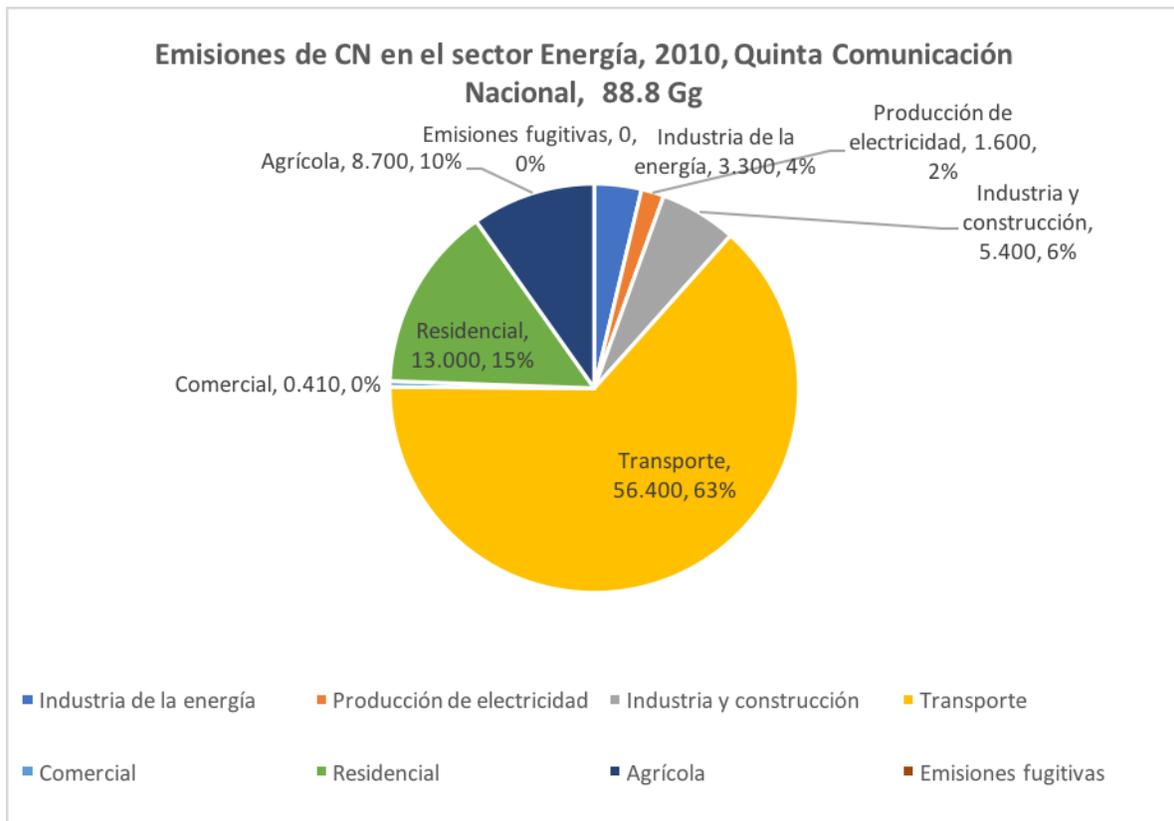


Figura 9 Distribución de emisiones por subsector en sector energía del inventario nacional de CN en la Quinta Comunicación Nacional. Las emisiones fugitivas no se estimaron por no contar información sobre ello.

8.2.2.2 Distribución sectorial

Para 2010, el primer Inventario Nacional de Emisiones de CN publicado como anexo en la Quinta Comunicación Nacional arrojó un total de CN (105.2 Gg) sin incluir las emisiones en el subsector de Emisiones fugitivas, las cuales no se estimaron por no contar con la información sobre actividad del tipo de fuentes correspondientes (quemadores y desfuegos). Las emisiones en el sector Energía fueron 88.9 Gg representando el 85% de las emisiones. Le siguen USCUS con 8.8 Gg (8%) y Residuos con 6.7 Gg (6%), Figura 8.

En el sector Energía la fuente sectorial más importante fue Transporte con 56.4 Gg (63%), le sigue el consumo residencial de energía, principalmente leña con 13 Gg (15%). El uso de energía en la agricultura sigue 8 Gg (10%) luego el uso de energía en la Industria de la transformación y la construcción con 5.4 Gg (6%), Figura 9.

8.2.2.3 Series de tiempo

En la “Quinta Comunicación” las emisiones de CN en México fueron de 65.07 Gg en 1990 y 101.76 Gg en 2010, mostrando un incremento del 56%. (Figura 6). En 1990, el sector energético emitió 53,79 Gg (83%) y en 2010 77,32 Gg (76%) de CN. Esto fue un aumento del 38% en intensidad, pero una reducción del 7% en su aportación relativa. La segunda fuente sectorial más importante es el USCUS, con 6.61 Gg (10%) en 1990 y 16.74 Gg (16%) en 2010. Este es un aumento del 53% en

emisiones y del 6% en participación. La tercera fuente de sector más importante fue residuos. La Figura 10 muestra la tendencia histórica de las emisiones de cada sector.

Las emisiones de CO₂ fueron de 144.50 Gg en 1990 y de 259.58 Gg en 2010, con un aumento del 80%. La distribución de las emisiones muestra un fuerte aumento de USCUS a expensas de la energía. Se observan pocos cambios en la importancia relativa para los otros sectores (Figura 11). La fuente sectorial más grande es USCUS con 71.97 Gg (50%) en 1990 y 170.99 Gg (66%). Este es un aumento de un factor de 2.4 y un aumento de su contribución relativa del 16%. El segundo sector importante es energía con 67.05 Gg (46%) en 1990 a 79.86 Gg (31%) en 2010, lo que representa un aumento del 19% en emisiones, pero su reducción en la participación en un 16%.

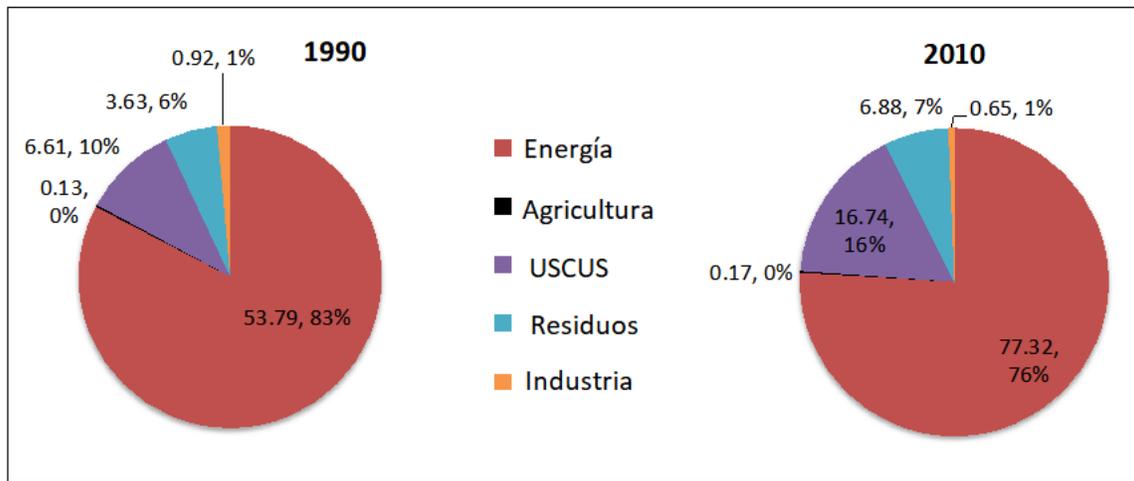


Figura 10 Distribución relativa sectorial de CN en 1990 y en el 2010.

La tendencia de emisiones de 1990 a 2010 se muestra en la Figura 12, El fuerte aumento se debió a un cambio importante en la tasa de deforestación en el inventario forestal nacional en 2001.

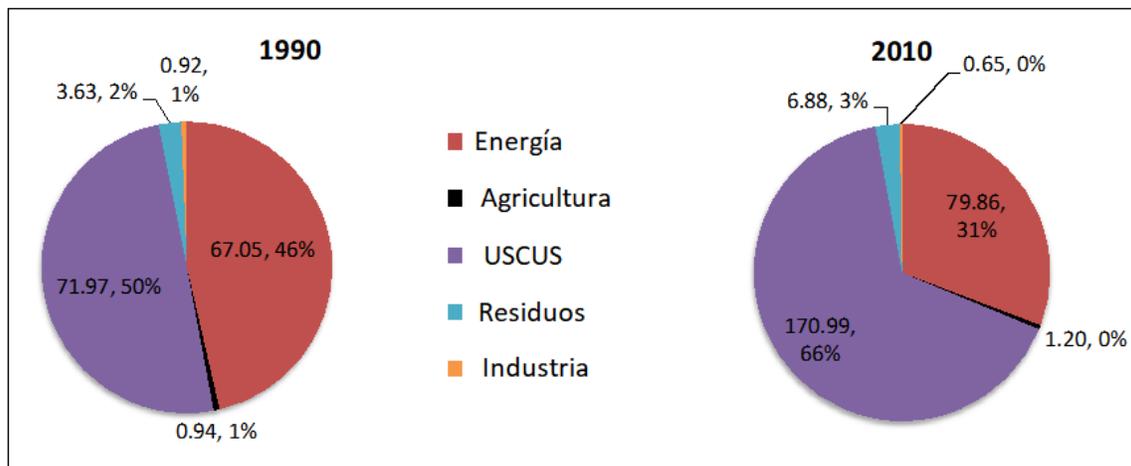


Figura 11 Distribución relativa sectorial de CO₂ en 1990 y en el 2010

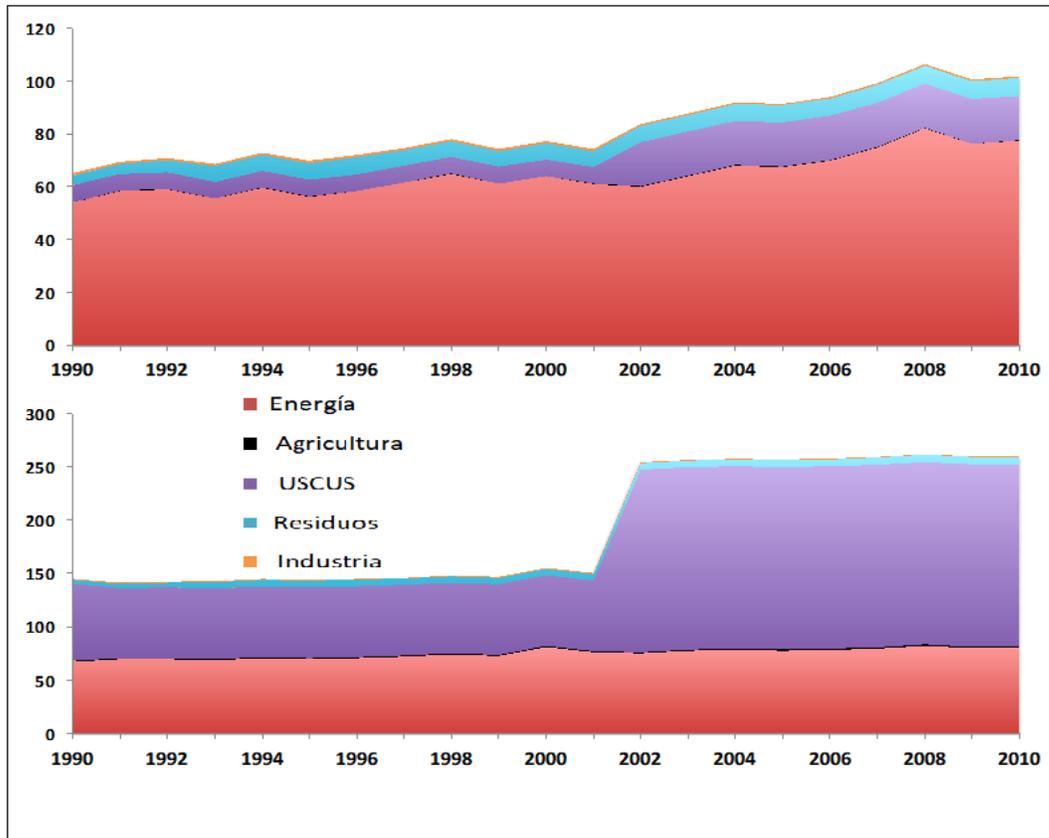


Figura 12 Tendencias de emisión de CN (panel superior) y COR (panel inferior) de 1990 a 2010. Fuente de datos de actividad, INEGI 1990-2010 en la Quinta Comunicación Nacional, [SEMARNAT, 2012].

Las emisiones de CN en la producción y el consumo de energía fueron 53,79 Gg en 1990 y 77,32 Gg en 2010, con un aumento del 44%. Las emisiones de COR de la producción y consumo de energía fueron de 67.05 Gg en 1990 y de 79.86 Gg en 2010, lo que representa un aumento del 19%. Las Figuras 13 y 14 muestran la distribución del subsector de emisiones para CN y COR.

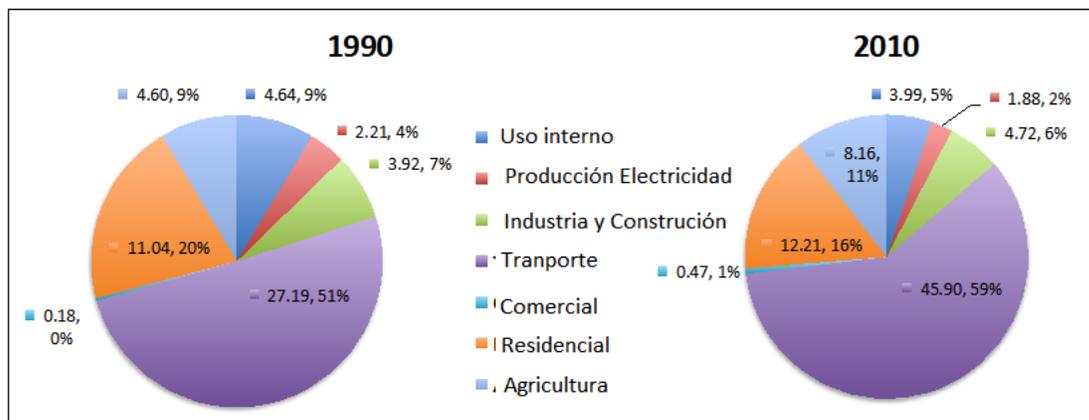


Figura 13 Distribución de las emisiones de CN en 1990 y 2010 (Gg %) del sector energía.

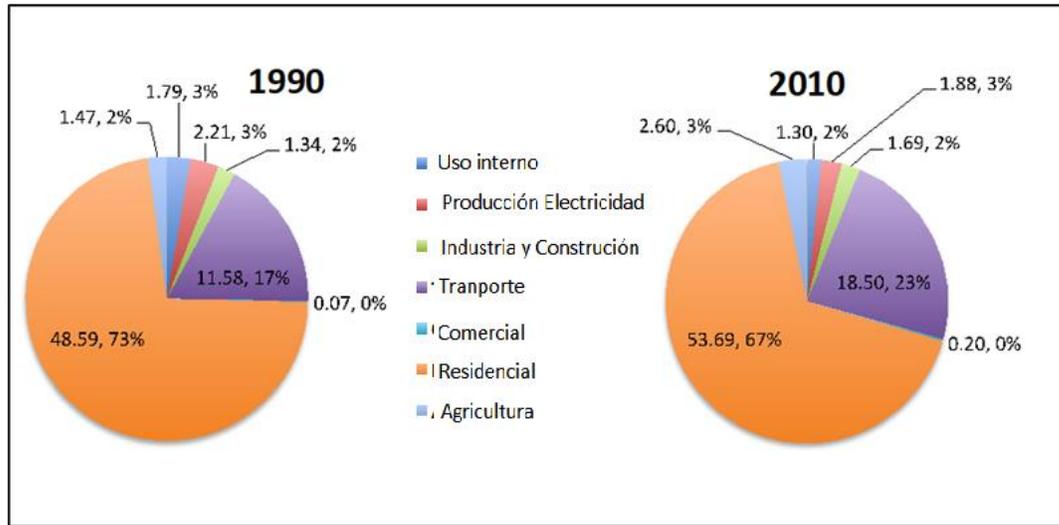


Figura 14 Emisiones (Gg %) del sector energía de CO₂ de 1990 al 2010

8.2.3 El CN en el Primer Informe Bienal de Actualización ante la CMNUCC

En ese informe (INECC/SEMARNAT 2015), se reportan emisiones totales 125.1 Gg de CN para 2013 a partir del INEGI para ese año (Figura 15). El salto de 20.6 Gg en tres años con respecto al total reportado en la Quinta Comunicación se debe al uso de métodos diferentes de cálculo y diferentes factores de emisión en algunas categorías. Hay dos cambios metodológicos importantes.

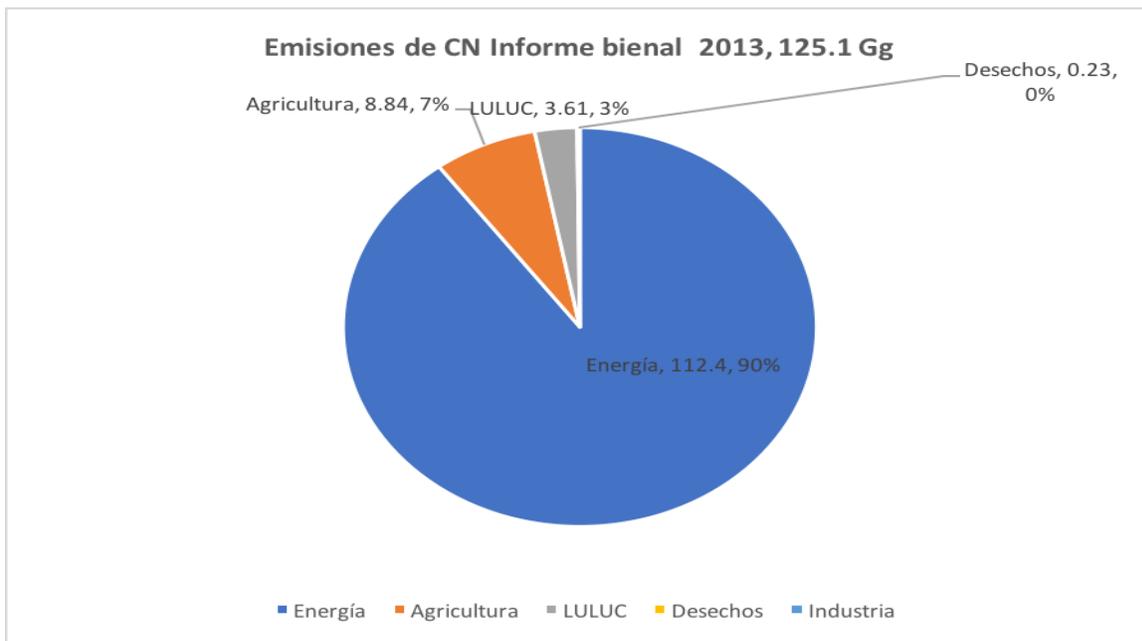


Figura 15 Distribución de emisiones por sector en el inventario nacional de CN en el Informe Bienal de Actualización ante la CMNUCC.

Uno de ellos se refiere al método de estimación de CN para fuentes como industria, fuentes móviles no carreteras, residencial y comercial, quema de leña en estufas, e incendios forestales. Para estas fuentes, si no hay un factor de emisión obtenido para fuentes en México y publicado en documentos científicos arbitrada por pares e indizada, se utilizaron cocientes CN/PM_{2.5} usados por CARB (CARB 2018). De la lectura del informe bienal se deriva que estos cocientes se aplicaron al estimado total de PM_{2.5} de la categoría de la fuente respectiva.

Otro cambio metodológico importante fue la estimación de emisiones de GEI en fuentes móviles por un método no usado antes. Hasta el inventario de 2013, las emisiones de GEI directas e indirectas por fuentes móviles en el INEGEI se estimaron por consumo de combustible por sector de la economía, tal como se reporta en el Balance Nacional de Energía (SENER 2011). Por otro lado, en el INEM, hasta el inventario del 2008, las emisiones se estimaban mediante el uso del modelo MOBILE (Schifter et al. 2005) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA por sus siglas en inglés). A partir del inventario del 2013 se usa el modelo MOVES (Koupal et al. 2003). A la fecha no hay publicaciones que reporten que el modelo MOVES haya sido adaptado a las condiciones de la flota de vehículos en México.

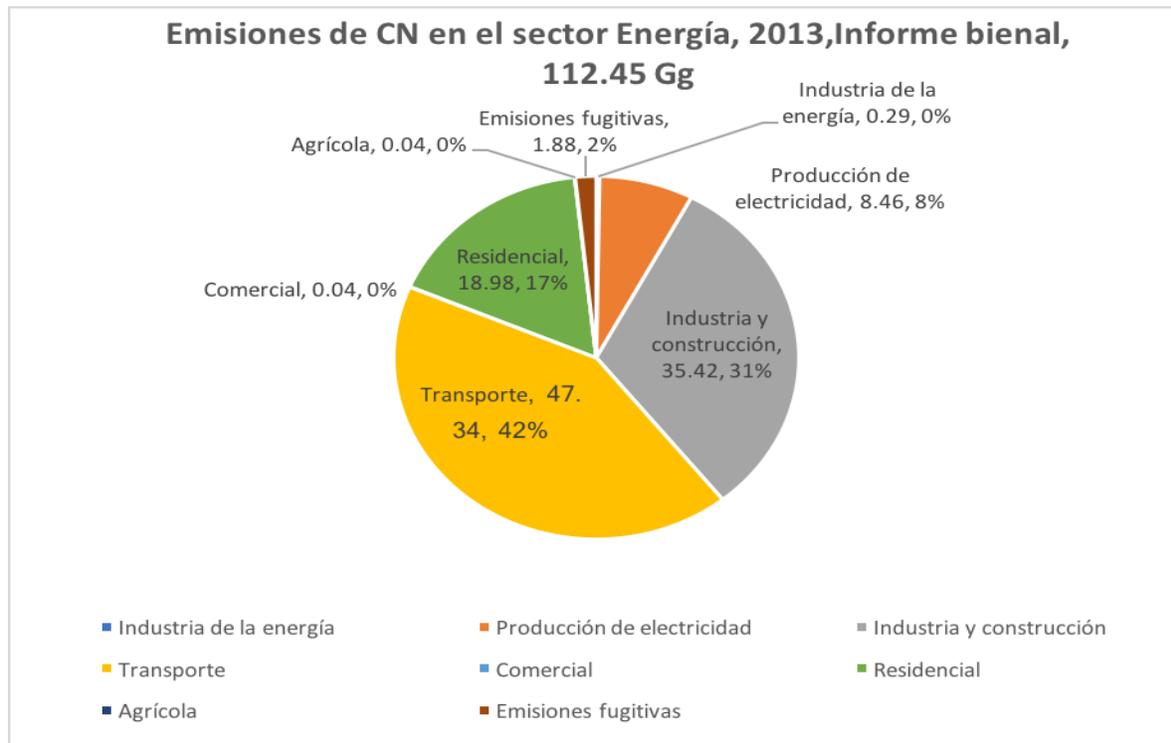


Figura 16 Distribución de emisiones por subsector en sector energía del inventario nacional de CN en el Primer Informe Bienal de Actualización ante la CMNUCC.

Las emisiones de CN en el BUR fueron 125.1 Gg, de las cuales 112.45 Gg (90%) corresponden al sector energía, 8.8Gg (7%) del sector agricultura, seguido por 3.61 Gg (3%) de USCUS, Figura 11.

En el sector energía, la fuente sectorial más importante fue transporte con 47.43 Gg (42%), luego la industria y construcción con 35.42 Gg (31%) seguido del consumo residencial con 18.98 Gg

(17%), la producción de electricidad con 8.46 Gg (8%) y emisiones fugitivas con 1.88 Gg (2%) Figura 16.

8.3 Análisis comparativo

Una comparación de los totales de los tres inventarios revisados muestra que las diferencias son pequeñas, menores a 6% para las diferencias más grandes, entre el inventario de la Quinta Comunicación Nacional y el Primer Reporte Bienal. No obstante, una comparación más detallada muestra que la distribución entre los sectores del inventario varía entre los tres inventarios (Figuras 10, 15 y 16, Tabla 2). Aunque las diferencias pueden explicarse por cambio en los métodos y factores de emisión usados, es importante someter a una revisión crítica esos valores por cuanto la selección de las opciones de mitigación dependen de un análisis de fuentes clave que es altamente dependiente de esos valores y opciones metodológicas.

Las categorías sectoriales corresponden a las establecidas por la Guías Metodológicas del IPCC de 1996, las que reportan por separado las emisiones de las actividades agrícolas y las del uso y el cambio del uso del suelo.

Tabla 2 Comparación de las emisiones de CN total y sectorial tomado del 5NC, 1st BRP y 6NC para 2010.

	5NC		1 st BRP		6NC (2 nd BRP)	
Energía	87.87	78%	112.4	90%	109.36	95%
Agricultura	0.17	0%	8.84	7%	3.51	3%
USCUSS	16.74	15%	3.61	3%	0.75	1%
Residuos	6.88	6%	0.23	0%	1.60	1%
Procesos Industriales	0.47	1%	0.04	0%	0.00	0%
Totales	112.31		125.08		115.22	

En la Tabla 3, el total de emisiones en la Quinta Comunicación fueron 112.31 Gg. Para ese valor se tomaron prestadas 9.542 Gg de CN de las emisiones reportadas para el subsector de emisiones fugitivas en la Sexta Comunicación.

Al interior del sector Energía, la importancia relativa y las diferencias absolutas entre las emisiones de CN en los inventarios en la Quinta y la Sexta Comunicaciones Nacionales observados en la Tabla 2, pueden evaluarse con ayuda de la Tabla 3 y las Figuras 9, 11 y 13.

Tabla 3 Comparativo total subsectorial de las emisiones de CN del sector energía en la Quinta Comunicación, BUR 2013 y la 6ª Comunicación 6NC

EMISIONES de CN por sector energía (Gg)						
	5NC		1 BRP		6NC	
Industria de la energía	3.99	1.5%	2.17	2%	1.59	1%
Producción de electricidad	1.88	2%	8.46	8%	7.46	7%
Industria y construcción	4.72	5%	35.42	31%	27.27	25%
Transporte	45.90	52%	47.34	42%	29.34	27%
Comercial	0.47	1%	0.04	0%	2.37	2%
Residencial	13.04	15%	18.98	17%	31.47	29%
Agricultura	8.16	9%	0.04	0%	0.31	0%
Emisiones fugitivas*	9.54	11%	0.00	0%	9.54	9%
Total	87.695		112.45		109.358	

* Tomado de la 6NC

Las diferencias más importantes entre ambos inventarios se encuentran en las estimaciones para los subsectores: industria y construcción, transporte y residencial, aunque no son los únicos.

Para el subsector industria + construcción, la diferencia se debe a un factor de emisión en el inventario de 6NC que es seis veces mayor que el utilizado en el 5NC. El factor de emisión es el bagazo quemado en los ingenios azucareros.

En el sector del transporte, hay dos explicaciones posibles para la diferencia. Por un lado, en el inventario de 5NC, las emisiones se estimaron a partir de los datos de consumo de combustible del Balance Energético Nacional utilizando factores de emisión genéricos ponderados y es Genérico porque se usa un factor de emisión promedio para todo el consumo en una categoría de combustible, por ejemplo, gasolina. Este factor se obtiene ponderando los factores de emisión según sus años de uso y aplicando una fracción del 20% de super emisores a todas las categorías de motores de combustión interna (Bond et al., 2004).

Por otro lado, la estimación para el 6NC se obtuvo del resultado del modelo MOVES con sus datos predeterminados, sin una aparente consideración explícita de la existencia de unidades. Este consultor considera que un inventario CN en este subsector debe hacer un análisis explícito del impacto de los super emisores, debido a la posible relación costo / beneficio de una política de

mitigación de emisiones centrada en este tipo de fuente. Las emisiones de 6NC son 40% más bajas que en 5NC, con una diferencia absoluta de 16.56 Gg. (Tabla 4).

En el subsector residencial, las emisiones en 6NC son 2.4 veces mayores que en 5NC con una diferencia absoluta de 18.43 Gg (Tabla 4). La relación BC / PM2.5 en 6NC es 0.17 mientras que en 5NC es 0.2. Por lo tanto, es necesario buscar la diferencia en los factores de emisiones de PM2.5 y en los datos de actividad

Tabla 4 Diferencias absolutas y relativas de las emisiones de CN del sector Energía para el 2010 10.

	6NC/5NC	6NC-5NC
Subsector		Gg
Industria	0.40	-2.40
Producción de electricidad	3.97	5.58
Industria y construcción	5.78	22.55
Transporte	0.64	-16.56
Comercial	5.09	1.90
Residencial	2.41	18.43
Agricultura	0.04	-7.85
Emisiones fugitivas	1.00	0.00

8.4 Conclusiones sobre buenas prácticas en el inventario de CN

Los ejercicios de estimación de emisiones de CN posteriores a la Quinta Comunicación parecen cumplir con buenas prácticas de elaboración de inventarios en términos de documentación.

Tomando en cuenta que la incorporación del inventario de CN en las comunicaciones nacionales y en los informes bienales es una novedad, y que las metodologías para hacerlo de la mano de los inventarios de GEI están en desarrollo, así como el papel innovador de México —el cual debe conservarse—, habrá que sistematizar la selección de métodos y factores de emisión. Por buena práctica, los datos de actividad deben ser los mismos que para los GEI en la categoría de fuente que corresponda y hay que asegurar la integración al interior de cada categoría de fuente, y nivel de cálculo (Tier), con los otros forzantes climáticos de vida corta ya calculados en el INEGI siguiendo las guías metodológicas del IPCC.

Como el CN es solo otro producto de la combustión incompleta y es coemitido con el monóxido de carbono, el carbono orgánico y los COV, debe medirse en la misma etapa de cálculo que estos otros contaminantes climáticos. La distribución de los compuestos de carbono no quemados entre CO, COV, CN y CO_r es altamente dependiente de la tecnología usada y las condiciones de operación. Las opciones de mitigación efectivas solo pueden ser evaluadas con la visión completa de la distribución de estas especies en las emisiones.

8.5 Conclusiones sobre mitigación

México es un país pionero en su esfuerzo por estimar las emisiones de carbono negro como forzante climático de vida corta, pero sus emisiones y sus tendencias no deben analizarse aisladamente de las emisiones de los GEI y de otros forzantes climáticos indirectos como son el CO_r, CO, los NO_x y los COV. La combustión incompleta de compuestos del carbono da lugar al CO, COV, CN y CO_r. La distribución de estas especies en las emisiones depende de la tecnología de combustión y las condiciones del proceso. La selección adecuada de las intervenciones de mitigación solo puede darse a partir del análisis costo (beneficio + cobeneficio) de las contribuciones relativas e integradas de los GEI y de los CCVC, incluyendo el carbono orgánico, los precursores del ozono y el aerosol fotoquímico reportados como GEI de efecto indirecto.

Como pudo verse al comparar las emisiones de CN, derivadas de los dos inventarios revisados, al aplicar un análisis de fuentes clave a cada uno de ellos, se pueden derivar diferentes listas jerárquicas de opciones de mitigación.

Las mejores propuestas que pueden ofrecerse de este ejercicio, están relacionadas con implementar estrictas prácticas en la elaboración del inventario nacional de CN.

Los saltos metodológicos entre el inventario reportado en la Quinta Comunicación y el BUR no permiten proponer con certeza medidas de mitigación. Por ejemplo, en la Quinta Comunicación las fuentes clave son el transporte, principalmente diésel y la quema doméstica de leña. En el BUR también es transporte, principalmente, pero le sigue la quema de bagazo en los ingenios. En la Quinta Comunicación en el sector transporte se consideran explícitamente los súper emisores y no queda claro si en el BUR se incluyen.

Evidentemente, las estrategias de mitigación pueden variar de forma notable dependiendo de que inventario se tome como referencia.

El cambio metodológico en el sector transporte, el uso del modelo MOVES, merece especial atención. No solo comparando con el método empleado en la Quinta Comunicación, por consumo de combustible, arroja diferencias importantes. También en el inventario de contaminantes criterio de fuentes móviles, el cambio del modelo de emisiones MOBILE a MOVES resulta en un salto en las emisiones, lo que debe ser validado con observaciones de campo.

9 Propuesta de agenda científica del INECC sobre GEI y CCVC

9.1 Notas previas

Esta propuesta se elaboró con la valiosa colaboración muchos integrantes de la comunidad científica en las ciencias de la contaminación atmosférica.

Algunas de las propuestas concretas empezaron a tomar cuerpo durante las discusiones realizadas en el contexto de la Red Temática CONACyT sobre Contaminación Atmosférica y Mitigación del Cambio Climático, incluyendo las discusiones durante sus Primer Reunión Anual.

En el proceso de elaboración de la Sexta Comunicación Nacional se ofreció la oportunidad de generar esta propuesta de agenda. Luego de organizar las ideas iniciales se circuló entre algunos miembros de la comunidad el primer borrador. Este se puso a discusión de una buena parte de la comunidad en un Taller realizado en el INECC el 11 de abril de 2018, el cual resulto muy animado y se recibieron importantes contribuciones.

Espero haber logrado incorporar todas las aportaciones, varias de ellas permitieron elaborar mejor lo ya presente en el borrador. Muchas otras, con diferentes matices, fueron presentadas por varios participantes, lo que muestra la existencia de consensos sobre temas prioritarios para una agenda científica con los objetivos de ésta. Muchos de los participantes en la consulta son integrantes de la red Temática CONACyT “Contaminación Atmosférica y Mitigación del Cambio Climático”.

Contribuyeron en la revisión de la propuesta

1. Alberto Mendoza Domínguez (ITESM)
2. Daniel Fernando Prato Sánchez (MEC2)
3. José Agustín García Reynoso (CCA, UNAM)
4. Luis Antonio Ladino Moreno (CCA, UNAM)
5. Luisa Molina (MCE2)
6. Miguel Zavala Pérez (MEC2)
7. Telma Castro Romero (CCA, UNAM)
8. Víctor Hugo Almanza Veloz (MEC29)
9. Ricardo Torres Jardón (CCA, UNAM9)
10. Andrea Díaz Fernández (Consultora)

En el Taller del 11 de abril de 2018 participaron:

Alberto Mendoza Domínguez (ITESM)

1. Alejandro Vilchis Pineda (ININ)
2. Ana Patricia Martínez (Directora General GCA y RETC, SEMARNAT)
3. Arón Jazcilevich Diamant (CCA, UNAM)
4. Arturo Gavilán García (INECC)
5. Beatriz Hernández Méndez (ININ)
6. Bertha Mar Morales (CCA, UNAM)
7. Daniel Fernando Prato Sánchez (MEC2)

8. Daniel López Vicuña (Director de Calidad del Aire SEMARNAT)
9. Elías Granados Hernández (CCH, UNAM)
10. Eva Mélgar Paniagua (ININ)
11. Felipe Adrián Vázquez Gálvez (UACJ)
12. Gloria Emeli Cortina (ININ)
13. Gonzalo García Miaja (INECC)
14. Graciela Raga Binimelis (CCA, UNAM)
15. Grea Litai Moreno (INSP)
16. Hugo Barrera Huertas (Centro Mario Molina)
17. J. Walter Rangel Urrea (ININ)
18. José Abraham Ortíz Álvarez (INECC)
19. José Agustín García Reynoso (CCA, UNAM)
20. Leonardo Martínez Flores (Consultor AEQUUM, Centro de Estudios sobre Equidad y Desarrollo)
21. Lida Andrea Solórzano García (CCA, UNAM)
22. Luis Antonio Ladino Moreno (CCA, UNAM)
23. Luis Gerardo Ruiz Suárez (CCA, UNAM)
24. Luisa Molina (MCE2)
25. María del Carmen Torres Barrera (CCA, UNAM)
26. Michel Grutter de la Mora (CCA, UNAM)
27. Miguel Magaña Reyes (INECC)
28. Miguel Zavala Pérez (MEC2)
29. Patricia Domínguez Taylor (CCA, UNAM)
30. Roberto Basaldud Cruz (INECC)
31. Sergio Zirath Hernández Villaseñor (INECC)
32. Telma Castro Romero (CCA, UNAM)
33. Teresa García Pérez (ININ)
34. Víctor Hugo Almanza Veloz (MEC2)
35. Víctor Hugo Páramo (INECC)
36. Andrea Díaz Fernández (Consultora)

9.2 Introducción

La agenda científica que se propone al INECC sobre la vinculación entre la contaminación atmosférica y el cambio climático tiene por objeto identificar puntos de convergencia entre estos dos grandes problemas nacionales que permitan focalizar y optimizar los siempre escasos recursos dedicados a la investigación científica. Permite también identificar acciones de mitigación efectivas y con impacto en ambos problemas nacionales lo que puede incrementar el cociente beneficio/costo de esas acciones.

La discusión de la propuesta se organiza a lo largo de cuatro categorías.

- Ciencia básica en química atmosférica
- Aspectos sociales
- Instrumentos
- Infraestructura

Esta propuesta se presenta luego de una serie de consultas informales a investigadores en el tema y de un taller de discusión sobre en la que abordaron los temas que contenía el primer borrador fue enviado una semana antes. Esta versión incorpora las aportaciones recibidas sobre el borrador y las recogidas durante la reunión de expertos y líderes académicos que se realizó el 12 de abril de 2018.

9.3 Ciencia básica en química atmosférica

Los retos relacionados con la producción de energía para el desarrollo del país, así como sus crecientes necesidades para expandir su producción industrial y agrícola, implican cambios en la intensidad y perfil de las emisiones asociadas a esas actividades. Ello repercute en cambios de la composición de la atmósfera y con ello en una contribución al cambio climático global y la contaminación atmosférica en las cuencas atmosféricas urbanas lo que provoca efectos nocivos a la salud y al bienestar de la población. El estudio de la química atmosférica constituye una actividad fundamental para entender el metabolismo de los agentes químicos y las mejores opciones de mitigación. En México requerimos, por un lado, incrementar y profundizar en el doble rol de observar, aprender y descubrir la interacción en el medio físico, y por otro lado, su impacto en la comunidad. Estas prioridades se engloban en cinco áreas principales: (1) profundizar en el conocimiento de la distribución, reacciones y vida media tanto de gases como de partículas en la atmósfera baja; (2) cuantificar las emisiones, su transporte y los procesos de depositación; (3) diseñar un enfoque que integre los estudios sobre química atmosférica con los modelos meteorológicos y climáticos; (4) realizar estudios de la química atmosférica de gases particularmente nocivos a la salud humana; y (5) analizar la interacción de la atmósfera con los ecosistemas naturales o manejados.

9.3.1 Profundizar en el conocimiento de la distribución, reacciones, transformaciones y la vida media tanto de gases y como de partículas en la atmósfera baja.

Los CCVC son sustancias con efectos radiativos que contribuyen al calentamiento de la atmósfera, pero con tiempos de residencia cortos, de días a décadas. Los principales CCVC son: metano CH₄, carbono negro CN y ozono. Los HFCs también son CCVC, pero su contribución presente al calentamiento global es pequeña, aunque se proyecta que para el 2050 sea equivalente hasta un 19% respecto de la de CO₂. Los GEI indirectos, CO, NO_x y COV que son los precursores de ozono, son coemitidos con el CO₂ en todos los procesos de combustión y también coemitidos con el carbono negro donde quiera que se presente una combustión incompleta.

Los GEI indirectos generalmente no están presentes explícitamente en discurso sobre los CCVC, como tampoco lo está el COR, igualmente presente en la combustión incompleta, el cual también tiene propiedades radiativas y puede actuar como una reserva temporal de COV. No obstante, lo anterior, una estrategia de mitigación del cambio climático que considere una reducción importante en las emisiones de CCVC debe incorporar explícitamente a los GEI indirectos y al COR. A la vez, ese abordaje integral permitiría explotar los cobeneficios en salud y bienestar de la población que se logran al reducir los precursores de aerosol otoquímico.

Es necesario caracterizar espacialmente la mezcla compleja de COV y compuestos orgánicos semivolátiles (COVS), incluyendo los compuestos orgánicos persistentes (COP) en aire ambiente, en las emisiones y sus derivados en la atmósfera, en forma gaseosa o en partículas suspendidas que ocurren bajo condiciones específicas del contexto nacional; tanto en ambientes rurales, como urbanos, y en nivel de calle e intramuros.

Se deben desarrollar y aplicar de forma sistemática indicadores del potencial de forzamiento radiativo indirecto de los COV, por ejemplo; de formación de O₃, su efecto en la fotoxidación del metano, aerosol orgánico secundario, de derivados fotolizables. Además, deben cuantificarse las velocidades de reacción para mecanismos químicos detallados en ambientes con multi-contaminantes que incluyan regímenes de zonas urbanas contaminadas a regiones naturales remotas.

Es necesario desarrollar la capacidad de caracterizar las especies químicas de interés ambiental de forma continua en el aerosol fotoquímico, así como su distribución espacial y sus tiempos de residencia. También es importante vincular la caracterización de la composición química de la contaminación atmosférica con estudios epidemiológicos e in vitro de impactos en salud o de impactos en cultivos, ecosistemas y patrimonio cultural.

Debemos entender mejor el rol de las partículas suspendidas en el aerosol atmosférico, como moduladores de la microfísica de nubes y la eficiencia de la precipitación en ambientes naturales y perturbados por el hombre. Es conveniente participar en el desarrollo mejores modelos fisicoquímicos que describan la evolución de los constituyentes atmosféricos para la predicción de su impacto en el clima y el estado del tiempo e implementarlos de forma operativa en el país.

Es conveniente explorar la interconexión de química y dinámica estratosférica con las troposférica a las latitudes del altiplano de México.

9.3.2 Integración de los estudios sobre química atmosférica con los modelos meteorológicos y climáticos

Campañas intensivas realizadas en México como MILAGRO, CARIEM, Cal-Mex, Amecameca 2011, Puebla 2012 y Toluca 2017, muestran el intercambio masas de aire entre cuencas atmosféricas en el centro del país. Estudios de modelación muestran que a lo largo la frontera entre México y los Estados Unidos se observa el intercambio bidireccional de contaminantes. Estudios en proceso indican que México es receptor transporte de contaminantes a gran escala través del Atlántico y desde los Estados Unidos. También, se ha modelado el impacto de emisiones de barcos que navegan a lo largo de sus costas mostrando que sus emisiones influyen en la calidad del aire en el centro de México. Así mismo, simulaciones aisladas sobre trayectorias de emisiones de plantas de generación eléctrica en las costas del Pacífico y del Golfo de México indican que éstas pueden impactar la calidad del aire en el centro del país.

Hay pocos estudios sobre los niveles de fondo de los componentes del aerosol fotoquímico como el CN, CO_r, el O₃ y sus precursores a escala regional y continental en el país. En general las zonas rurales y costeras han sido poco estudiadas, tanto en términos de observaciones como de modelos. Entender la dinámica atmosférica en estas zonas del país es fundamental para establecer la línea base de niveles de contaminantes a escala regional o de cuenca atmosférica, y así evaluar correctamente los márgenes de acción para lograr el cumplimiento de las NOM o evitar rebasar niveles críticos.

Se considera pertinente estudiar el impacto del sector energético (termoeléctricas y refinerías) así como petroquímica básica en cuanto a la calidad del aire, de costa a costa, en el centro de México, así como el transporte de contaminantes a gran escala desde y hacia México. Es necesario incorporar en los modelos de pronóstico de calidad del aire, las emisiones y transporte de contaminantes a nivel de cuenca del Golfo de México y del Mar Caribe. El transporte transfronterizo con los EE.UU. ha sido más estudiado en términos de transporte hacia el norte, pero evidentemente existen condiciones que favorecen lo contrario, por ello, en el contexto del Convenio de la Paz, es necesario profundizar en el estudio del problema del transporte transfronterizo de la contaminación atmosférica en términos de cuenca atmosférica. Se debe evaluar la pertinencia de participar en acuerdos como el Convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia (CLRTAP, por sus siglas en idioma inglés).

También es necesario estudiar el impacto de la reforma energética en la calidad del aire y en la mitigación del cambio climático, por ejemplo; la actualización de normas oficiales o la generación de nuevas normas, la explotación de petróleo o gas en nuevas cuencas, la producción y uso de biocombustibles, la captura y el secuestro de carbono.

Los GEI directo e indirecto y las partículas influyen en la radiación y dinámica de la atmosfera, afectando el estado del tiempo en formas como el cambio en los patrones de precipitación y circulaciones monzónicas. Los aerosoles son importantes en la formación y crecimiento de nubes y precipitación. Cambios en la dinámica atmosférica y circulación se ligan a cambios en su composición; por ejemplo: sales inorgánicas, Carbón elemental, CO_r, o en términos radiativos como CN o carbono marrón.

Es indispensable entender el rol de los aerosoles como moduladores de la microfísica y eficiencia de la precipitación en ambientes naturales y perturbados por el hombre. Es conveniente participar en el desarrollo de los modelos de interacción químicos y físicos que describen la evolución de los constituyentes atmosféricos para la predicción del impacto de estos en el clima y el tiempo meteorológico. Para ello se requiere de mejores laboratorios y de colaboración internacional.

9.3.3 Estudio de la química atmosférica de gases y componentes de partículas suspendidas particularmente nocivos para la salud humana

Se estima que la contaminación atmosférica es responsable de 1 de 8 muertes prematuras a nivel mundial. Sin embargo, la composición de los gases y partículas y sus efectos sinérgicos con otros procesos inflamatorios no son bien conocidos. Se requiere de estudios avanzados de química atmosférica con técnicas que permitan entender las características (identidad), fuentes y los mecanismos de exposición. Adicionalmente, es necesario profundizar en el rol de ciertos gases y partículas en personas con estrés por las condiciones de vida (situación de violencia, pobreza, condiciones de trabajo, etc.).

La creciente urbanización de la población del país y la expansión urbana hacen que la principal situación de exposición de la población sea a nivel de calle durante los traslados al trabajo, la escuela y la prestación de servicios entre otros. Por ello es necesario el estudio de la evolución de gases reactivos y partículas en el aerosol alrededor de vialidades y su efecto en la salud. Las partículas ultra finas son generadas por emisiones vehiculares y son las que representan mayores riesgos para la salud.

El uso de monitores de bajo costo es una tecnología emergente todavía en desarrollo; aun así, su uso es conveniente en estudios de exposición a nivel de calle o interiores. Es importante el desarrollo y/o implementación de modelos de exposición a nivel de calle y cañones urbanos. Ello no significa que las redes de monitoreo tradicionales pierdan su razón de ser, pero deben ser mejor diseñadas, con objetivos más específicos: protección de la salud, validación de inventarios de emisiones, monitoreo de grandes fuentes.

Es ineludible la construcción y mantenimiento de una climatología química a escala nacional, no solo de contaminantes criterio, sino también de especiación de precursores de ozono, PM, CN, CO_x, COP, y otros compuestos tóxicos. Deben establecerse supersitios centinelas en varias partes del país con una visión de largo plazo y la comunidad científica debe hacer uso óptimo de esa climatología, para documentar y explicar tendencias, así como evaluar inventarios de emisiones y políticas públicas de mitigación.

9.3.4 Interacción con ecosistemas naturales o manejados

El depósito atmosférico sobre superficies es una de las rutas de remoción de las especies reactivas y partículas emitidas a la atmósfera, o en su caso el de sus derivados secundarios.

Los cultivos y bosques tienen un alto potencial de afectación por la exposición a especies químicas reactivas o tóxicas. Los ecosistemas naturales y manejados también son susceptibles al depósito atmosférico de nitrógeno reactivo y especies ácidas. La salud de éstos impacta el rol que desempeñan en los ciclos biogeoquímicos. Por ejemplo, especies arbóreas y vegetación natural en

ecosistemas afectados por exposición a O₃ ven reducida su capacidad de fijar carbono. A su vez las emisiones de COV biogénicos pueden ser incrementadas debido al estrés que sobre diferentes tipos de vegetación ocasiona diversos contaminantes reactivos lo que puede incrementar la formación de O₃ y el aerosol orgánico secundario (AOS) en una cuenca atmosférica. El depósito atmosférico de compuestos de nitrógeno también puede influir sobre la competencia entre especies vegetales de un ecosistema, afectando su capacidad de fijar carbono. Además de que estas especies tienen el potencial de incrementar la eutricación de mantos acuíferos.

En consecuencia, se debe mejorar la a representación de estos dos procesos, depósito atmosférico y emisiones biogénicas y naturales, en los modelos de calidad del aire para lograr un mejor pronóstico y una mejor estimación de impactos y evaluación de escenarios a escala regional y nacional.

Es importante contribuir a la identificación de mecanismos y medición de flujos de emisión y de remoción por depósito seco y húmedo de gases y partículas de la atmosfera. Así como contribuir a la determinación de la influencia de la meteorología (temperatura, precipitación, eventos extremos) en la emisión y remoción de especies químicas.

Es necesario: evaluar la influencia las elecciones sociales (fuentes de energía, uso de suelo) en las emisiones y la remoción de compuestos atmosféricos, así como, identificar y cuantificar la composición química, transformaciones, bio-viabilidad y transporte de nutrientes y contaminantes en la atmosfera y su interacción con la biósfera.

Requerimos jerarquizar y focalizar los estudios sobre la interacción de la atmósfera contaminada con cultivos y ecosistemas, con énfasis en especies de interés especial para México, ya sea por su importancia económica, carácter endógeno y/o ausencia de estudios relativos en la literatura científica internacional. La climatología química propuesta debe extenderse a las zonas rurales incluir cultivos, bosques y zonas costeras.

9.4 Aspectos sociales

9.4.1 Urbanización

La creciente urbanización de México hace de las ciudades mexicanas el espacio donde la lucha contra el cambio climático será más importante.

De acuerdo con la información de los censos 2000 y 2010, y con base de los resultados de los Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la región Centro de México (ECAIM), se mostró qué, en la Corona Regional de Ciudades del Centro de México, la distancia promedio al trabajo aumentó un kilómetro entra ambos censos. El único lugar donde esa distancia disminuyó fue en las municipalidades interiores de la ZMVM. Como producto de la expansión urbana, con 10 millones de viajes (en un sentido) al trabajo, en 2010 se recorrían 20 millones más de kilómetros al día adicionales. A ese incremento se deben agregar los incrementos en los viajes a la escuela y los relativos a la distribución de mercancías. Ese incremento puede anular parte de las emisiones evitadas por mayor eficiencia y controles de emisiones en los vehículos automotores.

Un análisis de ciclo de vida de los desarrollos de vivienda de interés social en México mostró que, en las principales zonas metropolitanas del país, la contribución del transporte a la huella de carbono de esas viviendas alcanza el 90%. Por lo tanto, es imprescindible profundizar en el análisis del vínculo entre expansión urbana y emisiones de GEI, directos e indirectos, así como de CN y CO₂. Se deben desarrollar métodos e indicadores para cuantificar y dar seguimiento al cambio en emisiones por la urbanización y la forma concreta en que ésta se desarrolla. También es necesario profundizar en el análisis del impacto de los servicios informales de transporte en las emisiones de GEI y otros forzantes climáticos.

Las mayores distancias recorridas se realizan en vialidades crecientemente congestionadas, tomando tiempos cada vez más largos, lo que incide en mayores tiempos de exposición a perfiles y concentraciones de contaminantes que dependen de los modos de transporte disponibles, algunos de ellos con escasa regulación de emisiones. De esta forma, la expansión urbana desordenada incide en la salud de la población en formas no suficientemente exploradas.

Es así que los problemas derivados de la expansión urbana, entre ellos la contaminación atmosférica, la isla de calor, la generación y disposición inadecuada de residuos y otros, deben analizarse en un marco de referencia ecosistémico o de organismo, ya que los procesos que regulan los intercambios de materia y energía con el medio ambiente regional en que se desarrolla la ciudad son parte de su metabolismo. Aquéllos deben comprenderse mejor para lograr un uso eficiente y sostenible de los recursos.

9.4.2 Ordenamiento territorial y cuencas atmosféricas

La creación de la Comisión Ambiental de la Megalópolis en 2014 fue un avance en la concepción de los problemas ambientales de las entidades del centro de México, ya que permitió verlos como problemas compartidos a escala regional, pero la definición de su competencia en términos territoriales no es consistente con el marco jurídico constitucional ni con lo dispuesto en la LGEEPA en cuanto a la regulación de la contaminación atmosférica en términos de cuencas atmosféricas.

Desde la Constitución federal, las competencias ambientales se distribuyen por orden de gobierno (federación, entidades federativas, municipios y Ciudad de México). Mientras que la LGEEPA establece que la gestión de la calidad del aire debe ser en el marco conceptual de cuenca atmosférica, pero la gestión se realiza en términos de zona metropolitana, definidas éstas en un marco conceptual demográfico. Por lo tanto, es necesario avanzar en la elaboración de una definición operativa de cuenca atmosférica y desarrollar los métodos para aplicarla.

Esa inconsistencia se propaga a las medidas que se pueden aplicar al control de la contaminación atmosférica y las acciones de mitigación del cambio climático asociadas. Por ejemplo, la inconsistencia entre los municipios integrantes de la ZMVM y los municipios donde se aplican instrumentos de gestión como el Programa Hoy NO Circula y el Programa de Verificación de Emisiones, así como los alcances en términos territoriales de los Programas de Ordenamiento Territorial de las zonas metropolitanas.

Sería conveniente explorar cómo formalizar la administración de las cuencas atmosféricas, con la participación de usuarios tal y como sucede con las cuencas hidrológicas. Es necesario armonizar los diferentes programas de gestión: Los ProAire, los programas de ordenamiento territorial y desarrollo urbano, los programas de desarrollo ecológico y los programas de acción climática.

9.4.3 Barreras institucionales

El desarrollo de los inventarios de emisiones, el desarrollo de la climatología química, la aceptación e implementación de opciones de mitigación, están limitados por barreras legislativas como: Una no siempre clara asignación de responsabilidades ambientales, debilidades estructurales de las autoridades competentes, traslape de competencias, normatividad ambiental débil, y lagunas jurídicas, por mencionar algunas.

Las elecciones de los grupos y actores sociales pueden determinar patrones de desarrollo urbano, de uso del suelo y de recursos, así como de emisiones que actúan en contra de la sostenibilidad de la Megalópolis de México y de otras zonas metropolitanas importantes en el país. De manera que resulta pertinente identificar, analizar y proponer reformas a los marcos normativos que su ausencia o por diseño deficiente o falta de inclusión favorecen esas elecciones.

Los conceptos de ciclo de vida, huella de carbono y cargas críticas deben ser incorporados de forma operativa en las manifestaciones de impacto ambiental y/o urbano. Pues de lo contrario, la toma de decisiones sobre inversiones, infraestructura, desarrollo urbano o cambio de uso de suelo no pueden incorporar integralmente la estimación de las externalidades derivadas de los usos de tales inversiones o desarrollos. Es necesario avanzar en el desarrollo de los métodos de estas formas de análisis para asegurar su uso reglamentario y avanzar hacia la sostenibilidad.

9.5 Instrumentos

La construcción y seguimiento de las políticas públicas sobre contaminación atmosférica y cambio climático descansan en tres pilares fundamentales. El inventario de emisiones, el monitoreo y la modelación.

Estos tres instrumentos se han desarrollado a partir de la evidencia acumulada del efecto negativo de la contaminación atmosférica en la salud humana, los cultivos, ecosistemas y el patrimonio público y privado, así como, aunque en menor medida, todavía de los efectos negativos del cambio climático.

9.5.1 El inventario de daños

La evidencia sobre los efectos de la contaminación atmosférica y el cambio climático en las vidas, salud, bienestar, patrimonio y recursos para la sostenibilidad de las generaciones futuras, existe y están en constante expansión y actualización, no obstante, carecen de un inventario de daños sistematizado, equivalente al proceso que se sigue al inventariar las emisiones. El inventario de daños es un concepto interesante que tiene elementos comunes al concepto de externalidad y al

de producto interno bruto ecológico, los cuales, a su vez, se relacionan con el principio contaminador/pagador o quien contamina paga, que se puede vincular con impuestos ecológicos y/o incentivos fiscales.

La tarea es más difícil en tanto la cuantificación del daño requiere de algún tipo de funciones exposición-respuesta o dosis-respuesta para cada tipo de receptor; personas, vegetación, materiales. Se requiere también estimar con la mejor precisión y exactitud posibles la distribución de los receptores y la severidad de las excedencias de los niveles críticos. Para ello se requiere de redes de monitoreo de amplia cobertura o modelos confiables. Algunos de esos costos pueden ser monetizados, pero otros son invaluable.

A pesar de las dificultades para ello, es necesario iniciar la construcción sistemática del inventario de daños el cual que debe incorporarse al cálculo del PIB ecológico. Si los afectados tienen una correcta evaluación de los costos de la contaminación atmosférica y del cambio climático, estarán más dispuestos a tomar acción, asumir el cambio de paradigmas para enfrentar el deterioro ambiental a todas las escalas y pagar los costos de la mitigación.

Herramientas como el monitoreo y los modelos acoplados de dinámica y química atmosférica que están en continuo desarrollo, nuevos monitores de bajo costo, plataformas satelitales, nuevos instrumentos de análisis químico de la atmósfera en tiempo real hacen más factible enfrentar ese reto.

9.5.2 El inventario de emisiones

Para identificar las fuentes clave de emisiones y seleccionar opciones de mitigación; para evaluar su posible impacto en la contaminación atmosférica y sus costos; los inventarios de emisiones deben mejorarse sustancialmente, incluyendo los inventarios de alta resolución espacial y temporal indispensables para su uso en modelos de calidad del aire.

Hay una creciente lista de inventarios de emisiones de contaminantes criterio, GEI, CCVC, compuestos tóxicos. También se incorporan nuevas especies a la lista de especies a inventariar. En muchos casos estas diferentes categorías de contaminantes son coemitidos en un mismo proceso. Esto hace necesario optimizar recursos integrando los inventarios de emisiones en uno solo esfuerzo.

El desarrollo de las tecnologías de la información como el Big Data y el Smart Data en la economía y la vigilancia fiscal, el creciente poder de los sistemas de cómputo, y la internet de las cosas diluyen diferencias entre categorías de fuentes de emisión. Quienes elaboran inventarios de emisiones tienen ante sí nuevas opciones metodológicas para construir inventarios más robustos, exactos y con mayor resolución espacial y temporal.

La homologación de inventarios y su convergencia hacia inventarios de emisiones de alto nivel (tier) y de alta resolución espacial pasa por el uso de métodos y protocolos comunes, de estándares comunes para los componentes bibliográficos, cartográficos, de nomenclatura química y de descripción de procesos en los registros del inventario. Ellos compatibles con la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica.

Se deben medir y especificar químicamente los factores de emisión de fuentes clave. Emisiones y datos de actividad se deben verificar con observaciones en campo, incluyendo sensores remotos y métodos de identificación de imágenes y patrones. Además, se debe desarrollar la capacidad de atribución a fuentes.

Es necesario mejorar la estimación de emisiones para fuentes naturales (terrestres y marinas) y antropogénicas y sus distribuciones geográficas, variaciones temporales y tendencias. Así como desarrollar la capacidad para identificar “hot spots” de emisiones de CH₄ y COV.

Se deben caracterizar las fuentes y reacciones químicas que ocurren en interiores que poseen implicaciones en la química atmosférica y salud (leña, solventes, amoníaco, aromatizantes, etc).

Los inventarios de emisiones deben ser validados por una variedad de métodos observacionales, con mediciones puntuales, sensores remotos, satélites, y mediante modelación directa e inversa.

9.5.3 Monitoreo

Es necesario construir una climatología química a escala nacional en el país para: Identificar tendencias de la calidad del aire que incluya precursores del smog fotoquímico, GEI, SLCF, compuestos tóxico; identificar los efectos de las políticas públicas de mitigación; validar los inventarios de emisiones; apoyar la validación de los modelos de calidad del aire; e identificar especies químicas de interés ambiental para las cuales se deban establecer normas ambientales y de emisiones.

Aunque con un enfoque tradicional, monotemático, la medición de las concentraciones ambientales en zonas urbanas, ya hay, o debería de haber entre 30 o 40 años de datos de calidad del aire para las principales zonas metropolitanas del país, es necesario hacer el mejor uso posible de los datos disponibles. El monitoreo en zonas rurales apenas empieza, pero solo en la vecindad de la ZMVM y no hay monitoreo en zonas remotas.

Es necesario ampliar el alcance del monitoreo de la composición química de la atmósfera. El monitoreo se mandata en tres leyes generales del país; la LGEEPA, la LGCC y la LGDFS, con tres objetivos bien definidos; proteger la salud de la población, proteger su bienestar y garantizar el desarrollo sustentable. Como el monitoreo cumple entonces varias funciones, y la función define qué, quien, cómo y dónde realizarlo, es necesario establecer una política nacional de monitoreo que defina normas para diferentes monitoreos y establezca las bases para desarrollar y darle continuidad a la climatología química del país.

Esa política nacional de monitoreo atmosférico, debe promover: i) Uso de nuevas tecnologías como la observación desde satélite o los monitores de bajo costo, tomando en cuenta, qué, con el estado actual de la tecnología, estas no sustituyen el monitoreo puntual estándar. ii) Definir que especies químicas monitorear y con qué objeto. iii) Seleccionar métodos y estándares, definir protocolos.

9.5.4 Modelación

Los modelos de calidad del aire son necesarios: para evaluar y explicar procesos de transformación, transporte y depósito atmosférico de contaminantes; para construir mapas de excedencias de niveles críticos relativos a impactos en salud, cultivos, bosques y patrimonio; para evaluar escenarios de mitigación y para mejorar la capacidad productiva de los modelos actuales.

La asimilación de datos de variables meteorológicas y químicas es necesaria para mejorar la predicción a corto y mediano plazo, esta debe incluir tanto variables de superficie como perfiles verticales y datos satelitales.

Se requiere mejorar la integración entre los modelos acoplados de química, meteorología y ecosistemas con los modelos de emisiones de alta resolución, incluyendo la asimilación de datos de emisiones episódicas para un número creciente de categorías de fuentes, por ejemplo, incendios forestales o emisiones accidentales o provocadas. La distancia entre los océanos Pacífico y Atlántico en buena parte del territorio nacional hace evidente la necesidad de acoplar también modelos oceánicos a los componentes meteorológicos de los modelos de calidad del aire para su uso de forma sistemática en estudios de diagnóstico y el pronóstico de la calidad del aire.

Se debe hacer uso de modelos de diferente escala para estimar de la exposición a contaminantes atmosféricos por parte de poblaciones, grupos en riesgo, cultivos, ecosistemas y patrimonio. La influencia de las concentraciones de fondo en el logro de las metas propuestas en los ProAire y la ENCA solo puede entenderse con el concurso de modelos a escala nacional y de transporte a gran escala o a escala de gran cuenca.

Empleo de modelos acoplados, de tipo determinístico y de inteligencia artificial (redes neuronales, “deep learning”) ofrece mejorar la capacidad de pronóstico de calidad del aire

Es necesario implementar un programa de control y aseguramiento de calidad de datos para su uso en modelos y de los resultados de modelos. Se deben conservar datos de campañas intensivas para que sirvan de casos de referencia para pruebas de modelos.

Se recomienda, la formación y consolidación de una comunidad de usuarios de modelos que evolucione a desarrollar aportaciones en nuevos modelos, parametrizaciones, acoplamiento entre modelos fotoquímicos y climáticos de diversas aplicaciones y escalas espaciales y temporales. Esa comunidad podría consensar un conjunto de métricas estadísticas para la evaluación de modelos. Es necesario un centro nacional de modelación de calidad del aire.

Es pertinente contribuir al desarrollo de nuevas parametrizaciones de procesos físicos y químicos característicos de las condiciones del país.

9.6 Infraestructura

9.6.1 El Laboratorio del INECC

En algunos de sus objetivos, el Laboratorio del INECC (LabINECC) asemeja los objetivos de una institución emblemática en las ciencias atmosféricas a nivel mundial, el "National Center for Atmospheric Research".

El LabINECC es el laboratorio mejor equipado en país para estudios de calidad del aire. Los planes de equipamiento en marcha mejorarán esas capacidades. Aunque de forma incipiente, con su equipamiento actual y el propuesto para adquisiciones recién ejercido, así como los objetivos específicos de su programa estratégico, el LabINECC reúne de hecho, varios de los rasgos que caracterizan un laboratorio nacional.

Es prioritario generar las colaboraciones necesarias con investigadores consolidados en universidades, para el uso óptimo de sus recursos instrumentales y de los técnicos altamente especializados con los que cuenta.

9.6.2 La Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos

Otra muy contribución importante a la infraestructura nacional para la investigación sobre contaminación atmosférica y cambio climático la proporcionan la Universidad Nacional Autónoma de México y otras universidades del país, con la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA) coordinada por el Centro de Ciencias de la Atmósfera.

La ROUA cuenta con el único observatorio de altura en México, Altzomoni, parte del día se encuentra por encima de la capa límite planetaria y parte bajo la influencia de la Megalópolis de México. Cuenta también con tres sitios en las costas del país con posibilidades de observar y documentar transporte de contaminantes a larga escala. El sitio de la ROUA en su sede, el Centro de Ciencias de la Atmósfera, con la infraestructura disponible en algunos de sus laboratorios puede considerarse como el único supersitio en México para el análisis detallado de la composición química de atmósferas urbanas. Es pertinente seleccionar otros posibles supersitios con objetivos posiblemente diferentes por su metabolismo industrial como por la interacción con la meteorología y climatología en latitudes tropicales como medias.

9.6.3 Laboratorio Nacional de Contaminación Atmosférica

Se propone fomentar y apoyar los esfuerzos de colaboración existentes entre la comunidad de la química atmosférica en México, para establecer un consorcio de instituciones que asuma la formación y sostenimiento de un Laboratorio Nacional bajo el esquema de laboratorios nacionales del CONACyT para adquirir y compartir infraestructura científica de punta para potenciar los estudios sobre contaminación atmosférica y los forzantes climáticos en México.

Este laboratorio nacional debe contemplar el equipamiento de un laboratorio de combustión y uno de emisiones vehiculares.

9.6.4 El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra

El Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT), con sede en el Instituto de Geografía de la UNAM, cuenta con estaciones de recepción de imágenes meteorológicas de GOES-16, GeonetCast y con otra más capaz de recibir imágenes de satélites de órbita polar como: SUOMI NPP (próximamente JPSS-1), Aqua, Terra, EUMETSAT MetOp y NSMC Fengyun-3.

Con las contribuciones del LANOT es posible mejorar el inventario de emisiones de alta resolución, iniciar la generación del inventario de daños, mejorar la asimilación de datos en los modelos de calidad del aire.

Es recomendable aprovechar la existencia del LANOT su misión y la infraestructura de la que dispone para hacer el mejor uso posible de las plataformas satelitales a las que podemos tener acceso, por ejemplo, el nuevo satélite TEMPO.

9.6.5 Un repositorio nacional de datos

Es importante crear y sostener un repositorio nacional de datos de monitoreo y campañas intensivas usando estándares acordados de formato y clasificación, así como un conjunto de condiciones iniciales y de frontera e inventarios de emisiones de alta resolución espacial y temporal que sirvan de casos de referencia para evaluar modelos. Esta podría ser una de las funciones de un Servicio Climatoquímico Nacional.

De hecho, la LEGEEPA mandata ya la existencia de un Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales, En su forma actual solo mantiene información colectada de las redes de monitoreo de calidad del aire. Por ello, es pertinente avanzar en su construcción y garantizar su continuidad.

9.6.6 Supercómputo para modelación de calidad del aire.

Existen en el país varios laboratorios nacionales de supercómputo, ninguno de ellos tiene por objetivo específico ofrecer y sostener la capacidad de modelación de calidad del aire. Sería recomendable desarrollar esa capacidad en alguno de esos laboratorios.

10 Referencias

1. Achcar, J. A., A. A. Fernández-Bremauntz, E. R. Rodrigues and G. Tzintzun (2008). "Estimating the number of ozone peaks in Mexico City using a non-homogeneous Poisson model." Environmetrics **19**(5): 469-485.
2. Almanza, V. H., L. T. Molina, G. Li, J. Fast and G. Sosa (2014). "Impact of external industrial sources on the regional and local SO₂ and O₃ levels of the Mexico megacity." Atmospheric Chemistry & Physics **14**(16): 8483-8499.10.5194/acp-14-8483-2014
3. Álvarez de la Torre, G. B. (2010). "El crecimiento urbano y estructura urbana en las ciudades medias mexicanas." Quivera **12**(2).
4. Amin, N., Y. Ken, O. Toshimasa, K. Junichi and Y. Kazuyo (2013). "Evaluation of the Effect of Surface Ozone on Main Crops in East Asia: 2000, 2005, and 2020." Water, Air, & Soil Pollution **224**(5): 1-19.10.1007/s11270-013-1537-x
5. Arreortua, L. A. S. (2013). "Gentrificación en la ciudad latinoamericana. El caso de Buenos Aires y Ciudad de México." GeoGraphos: Revista Digital para Estudiantes de Geografía y Ciencias Sociales **4**(44): 281-304.
6. ASF (2009). Informe del resultado de la fiscalización superior de la cuenta pública 2009, Tratados Internacionales en materia de medio ambiente. Ciudad de México.
7. Avnery, S., D. L. Mauzerall, J. Liu and L. W. Horowitz (2011). "Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage." Atmospheric Environment **45**(13): 2284-2296.<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.045>
8. Bachmann, J. (2009). Black Carbon: A Science/Policy Primer, Pew Center on Global Climate Vhange.
9. Baldi, P., A. Giovagnoli, M. Marabelli and R. Coppi (1995). "Models and methods for the construction of risk maps for cultural heritage." Statistical Methods & Applications **4**(1): 1-15.
10. Barrera, V., O. Peralta, Karen Granado, Abraham Ortinez, Harry Alvarez-Ospina, Maria de la Luz Espinoza and T. Castro (2017). Black Carbon network in Mexico. First Results. EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria.
11. Barrera, V. A., J. Miranda, A. A. Espinosa, J. Meinguer, J. N. Martinez, E. Ceron, J. R. Morales, P. A. Miranda and J. F. Dias (2012). "Contribution of Soil, Sulfate, and Biomass Burning Sources to the Elemental Composition of PM₁₀ from Mexico City." International Journal of Environmental Research **6**(3): 597-612.
12. Barrera-Huertas, H., R. Torres, L. Ruiz-Suárez, J. Garcia, W. Gutierrez and A. Torres (2014). Analysis of Ozone Transportation in Tlaxcala-Puebla Mexico Air Basin. AGU Fall Meeting Abstracts.
13. Battye, W., K. Boyer and T. Pace (2002). Methods for improving global inventories of black carbon and organic carbon particulates. 11th International Emission Inventory Conference, 'Emission Inventories-Partnering for the Future,' Atlanta, GA.
14. Baylon, J. L., W. Stremme, M. Grutter, F. Hase and T. Blumenstock (2017). "Background CO₂ levels and error analysis from ground-based solar absorption IR measurements in central Mexico." Atmospheric Measurement Techniques **10**(7): 2425.<https://doi.org/10.5194/amt-10-2425-2017>

15. Bayón, M. C. (2008). "Desigualdad y procesos de exclusión social. Concentración socioespacial de desventajas en el Gran Buenos Aires y la Ciudad de México." Estudios Demográficos y Urbanos: 123-150.
16. Betancourt Quiroga, C. I. (2017). El Análisis de ciclo de vida como herramienta de planificación territorial empleando las matrices insumo-producto aplicado a la vivienda de interés social en Mexico durante el 2000-2012. Doctorado en Urbanismo, Universidad Nacional Autónoma de México.
17. Bond, T. C., S. J. Doherty, D. W. Fahey, P. M. Forster, T. Berntsen, B. J. DeAngelo, M. G. Flanner, S. Ghan, B. Kärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P. K. Quinn, M. C. Sarofim, M. G. Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S. K. Guttikunda, P. K. Hopke, M. Z. Jacobson, J. W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J. P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S. G. Warren and C. S. Zender (2013). "Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **118**(11): 5380-5552.10.1002/jgrd.50171
18. Bond, T. C., D. G. Streets, K. F. Yarber, S. M. Nelson, J.-H. Woo and Z. Klimont (2004). "A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **109**(D14): D14203.10.1029/2003jd003697
19. Borrego-Hernández, Ó., J. A. García-Reynoso, M. M. Ojeda-Ramírez and M. Suárez-Lastra (2014). "Retrospective health impact assessment for ozone pollution in Mexico City from 1991 to 2011." Atmósfera **27**(3): 261-271.
20. Brauer, M., C. Lencar, L. Tamburic, M. Koehoorn, P. Demers and C. Karr (2008). "A Cohort Study of Traffic-Related Air Pollution Impacts on Birth Outcomes." Environmental Health Perspectives **116**(5): 680-686.10.1289/ehp.10952
21. Bravo A, H. (1960). "Variation of different pollutants in the atmosphere of Mexico City." Journal of the Air Pollution Control Association **10**(6): 447-449.
22. Bravo Alvarez, H., I. Saavedra, P. Sánchez, R. Torres Jardón and L. M. M. Granada (2000). "Chemical composition of precipitation in a Mexican Maya region." Atmospheric Environment **34**(8): 1197-1204.[http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00305-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00305-2)
23. Bravo Álvarez, H., R. Soto, I. Saavedra, R. Torres Jardón, L. M. M. Granada and P. Sánchez (1998). "Acid rain in Mexico case: Maya monuments." Transactions on Ecology and Environment **21**: 661-674.
24. Bravo Alvarez, H., R. Soto, R. Sosa Echeverria, P. Sánchez, A. L. Alarcón, J. D. Kahl and J. Ruíz B. "Acid deposition effects on archeological monuments in Mexico."
25. Bravo Alvarez, H., R. Soto, R. Sosa, P. Sánchez, A. L. Alarcón, J. D. Kahl and J. Ruíz B. (2006). "Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico." Environmental Pollution **144**(2): 655-660.<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.052>
26. Brunekreef, B. and S. T. Holgate (2002). "Air pollution and health." The Lancet **360**(9341): 1233-1242.10.1016/S0140-6736(02)11274-8
27. Caetano, E. and V. Magaña (2007). Identificación de Cuencas Atmosféricas en México. Instituto Nacional de Ecología. "D. n. g. d. i. n. s. l. c. n. u. y. regional."
28. Calderón-Garcidueñas, L., A. Vojdani, E. Blaurock-Busch, Y. Busch, A. Friedle, M. Franco-Lira, P. Sarathi-Mukherjee, X. Martínez-Aguirre, S. B. Park, R. Torres-Jardón and A. D'Angiulli (2015). "Air pollution and children: Neural and tight junction antibodies and combustion metals, the role of barrier breakdown and brain immunity in neurodegeneration." Journal of Alzheimer's Disease **43**(3): 1039-1058.10.3233/JAD-141365
28. Calderón-Garcidueñas, L., A. Calderón-Garcidueñas, R. Torres-Jardón, J. Avila-Ramírez, R. J. Kulesza and A. D. Angiulli (2015). "Air pollution and your brain: what do you need to know right

- now." Primary Health Care Research & Development **16(4)**: 329-345.10.1017/S146342361400036X
29. Calderón-Garcidueñas, L., E. Leray, P. Heydarpour, R. Torres-Jardón and J. Reis (2016). "Air pollution, a rising environmental risk factor for cognition, neuroinflammation and neurodegeneration: The clinical impact on children and beyond." Revue Neurologique **172(1)**: 69-80.10.1016/j.neurol.2015.10.008
 30. Calderón-Garcidueñas, L., A. Mora-Tiscareño, M. Franco-Lira, H. Zhu, Z. Lu, E. Solorio, R. Torres-Jardón and A. D'Angiulli (2015). "Decreases in Short Term Memory, IQ, and Altered Brain Metabolic Ratios in Urban Apolipoprotein ϵ 4 Children Exposed to Air Pollution." Journal of Alzheimer's Disease **45(3)**: 757-770.10.3233/JAD-142685
 31. Calderón-Garcidueñas, L., A. Mora-Tiscareño, G. Melo-Sánchez, J. Rodríguez-Díaz, R. Torres-Jardón, M. Styner, P. S. Mukherjee, W. Lin and V. Jewells (2015). "A critical proton MR spectroscopy marker of Alzheimer's disease early neurodegenerative change: Low hippocampal NAA/Cr ratio impacts APOE ϵ 4 Mexico City children and their parents." Journal of Alzheimer's Disease **48(4)**: 1065-1075.10.3233/JAD-150415
 32. Calderón-Garcidueñas, L. and R. Torres-Jardón (2015). "The impact of air pollutants on the brain." JAMA Psychiatry **72(6)**: 529-530.10.1001/jamapsychiatry.2015.0192
 33. Carabali, G., R. Torres-Jardón, T. Castro, D. Salcedo, O. Peralta, L. G. Ruiz-Suárez, J. García-Yee, I. Saavedra, A. A. Campos, B. Cárdenas, J. A. Torres-Jaramillo, I. Rosas, M. Quintero and L. Molina (2014). "A comparison between Cal-Mex in Tijuana and Cal-Nex in Pasadena on aerosol optical properties, ozone and reactive nitrogen." Urban Climate **10(5)**: 782-800.<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.10.007>
 34. CARB (2017). Short-lived Climate Pollutant Reduction Strategy. California Environmental Protection Agency."C. A. R. Board."149.https://www.arb.ca.gov/cc/shortlived/meetings/03142017/final_slcp_report.pdf
 35. CARB. (2018, 20180129). "Speciation Profiles Used in ARB Modeling." Retrieved 20180226, from <https://www.arb.ca.gov/ei/speciate/speciate.htm>.
 36. Carbajal-López, Y., S. Gómez-Arroyo, R. Villalobos-Pietrini, M. E. Calderón-Segura and A. Martínez-Arroyo (2016). "Biomonitoring of agricultural workers exposed to pesticide mixtures in Guerrero state, Mexico, with comet assay and micronucleus test." Environmental Science and Pollution Research **23(3)**: 2513-2520.10.1007/s11356-015-5474-7
 37. Carmona, J. M., A. Y. Vanoye, F. Lozano and A. Mendoza (2015). "Dust emission modeling for the western border region of Mexico and the USA." Environmental Earth Sciences **74(2)**: 1687-1697.10.1007/s12665-015-4173-5
 38. Castillo-Miranda, J. O., R. Torres-Jadón, A. García-Reynoso, B. E. Mar-Morales, L. G. Ruiz-Suárez and F. J. Rodríguez-Gómez (2017). "Mapping recession risk for cultural heritage stone in Mexico City due to dry and wet deposition of urban air pollutants." Atmósfera **30(3)**: 189-207.
 39. Cerón-Bretón, J. G. and R. M. Cerón-Bretón (2014). "Seasonal and diurnal variations of carbonyl compounds and air criteria pollutants in Monterrey, Mexico." WSEAS Transactions on Environment and Development **10(1)**: 347-357.
 40. Cerón-Bretón, J. G., R. M. Cerón-Bretón, J. D. W. Kahl, E. Ramírez-Lara, C. A. Aguilar-Ucán, C. Montalvo-Romero, A. Mendoza-Dominguez, M. Muriel-García and J. A. Ortíz-Alvarez (2016). "Carbonyls in the urban atmosphere of Monterrey, Mexico: sources, exposure, and health risk." Air Quality, Atmosphere & Health: 1-15.10.1007/s11869-016-0408-1
 41. Cerón-Bretón, J. G., R. M. Cerón-Bretón, J. D. W. Kahl, E. Ramírez-Lara, C. Guarnaccia, C. A. Aguilar-Ucán, C. Montalvo-Romero, F. Anguebes-Franceschi and U. López-Chuken (2014). "Diurnal and seasonal variation of BTEX in the air of Monterrey, Mexico: preliminary study of

- sources and photochemical ozone pollution." *Air Quality, Atmosphere and Health* **8**(5): 469-482.10.1007/s11869-014-0296-1
42. Claeys-Thoreau, F., L. Thiessen, P. Bruaux, G. Ducoffre and G. Verduyn (1987). "Assessment and comparison of human exposure to lead between Belgium, Malta, Mexico and Sweden." *International archives of occupational and environmental health* **59**(1): 31-41.
43. CLRTAP (2015). Mapping Critical Levels for Vegetation, Chapter III of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. [.http://www.rivm.nl/media/documenten/cce/manual/binnenop17Juni/Ch3-MapMan-2016-05-03_vf.pdf](http://www.rivm.nl/media/documenten/cce/manual/binnenop17Juni/Ch3-MapMan-2016-05-03_vf.pdf)
44. Conaculta (2010). Patrimonio. *Atlas de Infraestructura Cultural de México*, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes 33-94.
45. Cortés, F. (2013). "Medio siglo de desigualdad en el ingreso en México." *Economía unam* **10**(29): 12-34.
46. Cortez-Lugo, M., M. Ramirez-Aguilar, R. Perez-Padilla, R. Sansores-Martinez, A. Ramirez-Venegas and A. Barraza-Villarreal (2015). "Effect of Personal Exposure to PM2.5 on Respiratory Health in a Mexican Panel of Patients with COPD." *International Journal of Environmental Research and Public Health* **12**(9): 10635-10647.10.3390/ijerph120910635
47. de Bauer, L. I., Krupa, S.V. (1990). "The Valley of Mexico: Summary of observational studies on its air quality and effects on vegetation." *Environmental Pollution*: 109-118.
48. Denby, B., O. J. Horálek, S. E. Walker, K. Eben and J. Fiala (2005). Interpolation and assimilation methods for European scale air quality assessment and mapping Part I: Review and Recommendations.ETC/ACC Technical Paper 2005/7.51.https://www.researchgate.net/profile/Sam-Erik-Walker/publication/242220876_Interpolation_and_assimilation_methods_for_European_scale_air_quality_assessment_and_mapping_Part_I_Review_and_recommendations/links/00b7d52e9717e99029000000/Interpolation-and-assimilation-methods-for-European-scale-air-quality-assessment-and-mapping-Part-I-Review-and-recommendations.pdf
49. Denby, B., I. Sundvor, M. Cassiani, P. de Smet, F. de Leeuw and J. Horálek (2010). "Spatial Mapping of Ozone and SO2 Trends in Europe." *Science of The Total Environment* **408**(20): 4795-4806.<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.021>
50. DF (1996). CONVENIO de Coordinación por el que se crea la Comisión Ambiental Metropolitana. D. d. D. Federal. Ciudad de México, Diario Oficial de la Federación. **DOF: 20170917**.
51. Díaz-Nigenda, E., J. Tatarko, A. D. Jazcilevich, A. R. García, E. Caetano and L. G. Ruíz-Suárez (2010). "A modeling study of Aeolian erosion enhanced by surface wind confluences over Mexico City." *Aeolian Research* **2**(2-3): 143-157.<http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2010.04.004>
52. Doran, J. C., X. Bian, S. F. J. de Wekker, S. Edgerton, J. D. Fast, J. M. Hubbe, W. J. Shaw, C. D. Whiteman, S. Abbott, C. King, J. Leach, M. Mulhearn, C. Russell, B. Templeman, D. Wolfe, J. Archuleta, S. Elliott, A. Fernandez, D. Langley, J. T. Lee, W. Porch, L. Tellier, J. Chow, J. G. Watson, R. L. Coulter, T. J. Martin, J. D. Shannon, R. White, D. Martinez, J. L. Martinez, V. Mora, G. Sosa, G. Mercado, J. L. Pena, R. Salas and R. Petty (1998). "The IMADA-AVER Boundary Layer Experiment in the Mexico City Area." *Bulletin of the American Meteorological Society* **79**(11): 2497-2508.10.1175/1520-0477(1998)079<2497:TIABLE>2.0.CO;2
53. Edgerton, S. A., X. Bian, J. C. Doran, J. D. Fast, J. M. Hubbe, E. L. Malone, W. J. Shaw, C. D. Whiteman, S. Zhong, J. L. Arriaga, E. Ortiz, M. Ruiz, G. Sosa, E. Vega, T. Limon, F. Guzman, J. Archuleta, J. E. Bossert, S. M. Elliot, J. T. Lee, L. A. McNair, J. C. Chow, J. G. Watson, R. L. Coulter, P. V. Doskey, J. S. Gaffney, N. A. Marley, W. Neff and R. Petty (1999). "Particulate Air Pollution

- in Mexico City: A Collaborative Research Project." *Journal of the Air & Waste Management Association* **49**(10): 1221-1229.10.1080/10473289.1999.10463915
54. Enciclopedia Jurídica, z. (2014). "Diccionario del Derecho." from <http://www.encyclopedia-juridica.biz14.com/inicio-encyclopedia-diccionario-juridico.html>.
 55. Fann, N., C. M. Fulcher and B. J. Hubbell (2009). "The influence of location, source, and emission type in estimates of the human health benefits of reducing a ton of air pollution." *Air Quality, Atmosphere & Health* **2**(3): 169-176.10.1007/s11869-009-0044-0
 56. Felzer, B. S., T. Cronin, J. M. Reilly, J. M. Melillo and X. Wang (2007). "Impacts of ozone on trees and crops." *Comptes Rendus Geoscience* **339**(11): 784-798.<https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.08.008>
 57. Flores, E. L., J. A. Cano and J. L. Bobadilla (1989). "Factores asociados a los niveles de plomo en sangre en residentes de la Ciudad de México." *Salud Pública de México* **31**(5): 625-633.
 58. Fuhrer, J. (1995). "Critical level for ozone to protect agricultural crops: Interaction with water availability." *Water, Air and Soil Pollution* **85**(3): 1355-1360.<https://doi.org/10.1007/BF00477170>
 59. Fuhrer, J., L. Skärby and M. R. Ashmore (1997). "Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe." *Environmental Pollution* **97**(1): 91-106.[http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00067-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00067-5)
 60. García Reynoso, J. A., L. G. Ruiz Suárez., S. García Escalante and R. J. N.A. (2009). Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de caso. Instituto Nacional de Economía. INE/A1-004/2009. México, DF. http://www.ine.gob.mx/descargas/calaire/2009_inf_cuencas2.pdf
 61. García-R, A., T. Schoenemeyer, A. Jazcilevich D, G. Ruiz-Suárez and V. Fuentes-Gea (2000). *Implementation of the multiscale climate chemistry model (MCCM) for Central Mexico*.
 62. García-Reynoso, A., A. Jazcilevich, L. G. Ruiz-Suarez, R. Torres-Jardon, M. S. Lastra and N. A. R. Juárez (2009). "Ozone weekend effect analysis in Mexico City." *Atmosfera* **22**(3): 281-297.<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.05.046>
 63. González-Santiago, O., C. T. Badillo-Castaneda, J. D. Kahl, E. Ramirez-Lara and I. Balderas-Renteria (2011). "Temporal analysis of PM10 in Metropolitan Monterrey, Mexico." *Journal of the Air & Waste Management Association* **61**(5): 573-579.
 64. H. Congreso de la Unión (1982). Ley Federal para la Protección del Ambiente.
 65. H. Congreso de la Unión (2012). Ley General de Cambio Climático. México, DF, Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación. En Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
 66. H. Congreso de la Unión (2013). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. México, DF., Diaro Oficial de la Federación. En Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión
 67. Haagen-Smit, A. J., E. F. Darley, M. Zaitlin, H. Hull and W. Noble (1952). "Investigation on Injury to Plants from Air Pollution in the Los Angeles Area." *Plant Physiology* **27**(1): 18-34.
 68. Hernández-Paniagua, I. Y., G. L. Andraca-Ayala, U. Diego-Ayala, L. G. Ruiz-Suarez, J. C. Zavala-Reyes, S. Cid-Juárez, L. Torre-Bouscoulet, L. Gochicoa-Rangel, I. Rosas-Pérez and A. Jazcilevich (2018). "Personal Exposure to PM2. 5 in the Megacity of Mexico: A Multi-Mode Transport Study." *Atmosphere* **9**(2): 57.
 69. INE (2010). Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico. México, Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. SEMARNAT.
 70. INE (2011). Temas emergentes en cambio climático: metano y carbono negro, sus posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación. Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de

- México. 118.
http://www.inec.gob.mx/descargas/cclimatico/2010_cca_mce2_temas_emergentes.pdf
http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2010_cca_mce2_temas_emergentes.pdf
71. INECC. (2011). "Sistema Nacional de Indicadores de Calidad del Aire." Retrieved 20180309, 2018, from <http://sinaica.inecc.gob.mx/>.
 72. INECC (2012). Diagnóstico de la medición de la calidad del aire en México, 60 años monitoreando la calidad del aire. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México.
 73. INECC (2014). Acciones para el Fortalecimiento de dos Sistemas de Monitoreo de Contaminantes Atmosféricos. Instituto Nacional de Ecología. Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197008/2014_CGCSA_Fortalecimiento_de_SMCA_parte_1.pdf
 74. INECC (2014). Estudios de Calidad del Aire y su Impacto en la región Centro de México (Ecaim). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México. Ciudad de México. 744.
http://www.inecc.gob.mx/descargas/calaire/2014_calaire_imp_reg_centro_mex.pdf
 75. INECC (2014). Informe Nacional de Calidad del Aire 2013, México. Ciudad de México, Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
 76. INECC (2015). Evaluación de las capacidades técnicas y de infraestructura de los laboratorios institucionales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Mexico, DF. 25.
 77. INECC (2015). Informe Nacional de Calidad del Aire 2014, México. I. G. d. C. y. S. Ambiental. Ciudad de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: 262.
 78. INECC (2016). Informe Nacional de Calidad del Aire 2015, México. Ciudad de México, Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: 191.
 79. INECC. (2016). "México presentó en la COP22 su estrategia de cambio climático al 2050." 20171205, from <https://www.gob.mx/inecc/prensa/mexico-presento-en-la-cop-22-su-estrategia-de-cambio-climatico-al-2050>.
 80. INECC/SEMARNAT (2015). Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC. Ciudad de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: 288.
 81. INEGI (2016). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2016. México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
 82. IPCC-NGGIP (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpgaum.htm>
 83. Jazcilevich, A., V. Fuentes, E. Jauregui and E. Luna (2000). "Simulated urban climate response to historical land use modification in the Basin of Mexico." *Climatic Change* **44**(4): 515-536.
 84. Jazcilevich, A., A. García and L. Ruiz-Suarez (2003). "A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico." *Atmospheric Environment* **37**(2): 183-193. 10.1016/S1352-2310(02)00893-2
 85. Jazcilevich, A. D., A. García-Fragoso, A. García Reynoso, M. Grutter, U. Diego-Ayala, J. Lents and N. Davis (2007). "A Vehicle Emissions System Using a Car Simulator and a Geographical Information System: Part 1—System Description and Testing." *Journal of the Air & Waste Management Association* **57**: 1234-1240.
 86. Jazcilevich, A. D., A. G. Reynoso, M. Grutter, J. Delgado, U. D. Ayala, M. S. Lastra, M. Zuk, R. G. Oropeza, J. Lents and N. Davis (2011). "An evaluation of the hybrid car technology for the

- Mexico Mega City." Journal of Power Sources **196**(13): 5704-5718.10.1016/j.jpowsour.2011.01.076
87. Jazcilevich Diamant, A., J. A. García Reynoso and L. G. Ruiz-Suarez (2002). "A modeling study of air pollution modulation through land-use change in the Valley of Mexico." Atmospheric Environment **36**(14): 2297-2307.[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00197-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00197-8)
 88. Koupal, J., M. Cumberworth, H. Michaels, M. Beardsley and D. Brzezinski (2003). Design and Implementation of MOVES: EPA's New Generation Mobile Source Emission Model.U.S. EPA."O. o. T. a. A. Q. A. a. S. Division."48105.Ann Arbor, MI. 9.<http://www.epa.gov/ttn/chief/conference/ei12/mobile/koupal.pdf>
 89. Krebs, D. J. (1999). A tale of two cities: the regulation of particulate air pollution in Mexico City and Los Angeles. Master, Massachusetts Institute of Technology.
 90. Kucera, V., J. Tidblad, K. Kreislova, D. Knotkova, M. Faller, D. Reiss, R. Snethlage, T. Yates, J. Henriksen, M. Schreiner, M. Melcher, M. Ferm, R.-A. Lefèvre and J. Kobus (2007). "UNECE ICP Materials Dose-response Functions for the Multi-pollutant Situation." Water, Air, & Soil Pollution: Focus **7**(1-3): 249-258.10.1007/s11267-006-9080-z
 91. Lacasaña-Navarro, M., C. Aguilar-Garduño and I. Romieu (1999). "Evolution of air pollution and impact of control programs in three Megacities of Latin America." Salud Pública de México **41**(3): 203-215.
 92. Levy, J. I., T. J. Carrothers, J. T. Tuomisto, J. K. Hammitt and J. S. Evans (2001). "Assessing the public health benefits of reduced ozone concentrations." Environmental Health Perspectives **109**(12): 1215.
 93. Martínez, A. P. and I. Romieu Isabelle (1997). Introducción al Monitoreo Atmosférico, .OPS - GTZ,
 94. Departamento del Distrito Federal.Ciudad de México, DF. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap2.pdf>
 95. Martínez, M. A., P. Caballero, O. Carrillo, A. Mendoza and G. M. Mejía (2012). "Chemical characterization and factor analysis of PM2.5 in two sites of Monterrey, Mexico." Air and Waste Management Association **62**(7): 817-827.10.1080/10962247.2012.681421
 96. Martínez-Cinco, M., J. Santos-Guzmán and G. Mejía-Velázquez (2016). "Source apportionment of PM2.5 for supporting control strategies in the Monterrey Metropolitan Area, Mexico." Journal of the Air and Waste Management Association **66**(6): 631-642.10.1080/10962247.2016.1159259
 97. MCE2 (2013). Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta en México, .Climate and Clean Air Coalition, Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191436/2013_Plan_Nacional_de_Contaminantes.pdf
 98. McKinley, G., M. Zuk, M. Hojer, M. Ávalos, I. González, R. Iniestra, I. Laguna, M.A. Martínez, P. Osnaya, L.M. Reynales, R. Valdés and J. Martínez (2005). "Quantification of local and global benefits from air pollution control in Mexico City." Environmental Science and Technology **39**: 1954-1961.
 99. Menchaca, L. and A. Mendoza-Domínguez (2014). Relación de los Niveles de Compuestos Orgánicos Volátiles en la Atmósfera de Monterrey e Identificación de Fuentes. Encuentro Nacional de la AMIDIQ. Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química. Puerto Vallarta, Jalisco, México.

100. Menchaca-Torre, H. L., R. Mercado-Hernández, J. Rodríguez-Rodríguez and A. Mendoza-Domínguez (2015). "Diurnal and seasonal variations of carbonyls and their effect on ozone concentrations in the atmosphere of Monterrey, Mexico." Journal of the Air & Waste Management Association **65**(4): 500-510.
101. Mendoza, A., E. I. Pardo and A. A. Gutierrez (2010). "Chemical characterization and preliminary source contribution of fine particulate matter in the Mexicali/Imperial Valley border area." Journal of the Air & Waste Management Association **60**(3): 258-270.
102. Mendoza, L. and O. Osiel (2016). Influencia y transporte de la contaminación atmosférica generada en la Zona Metropolitana del Valle de México en la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Puebla. Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
103. Mendoza-Domínguez, A. and I. García (2004). Desarrollo de un Modelo de Red Neuronal Artificial para el pronóstico de los Niveles de Concentración de Ozono en el Aire Ambiente de Monterrey, N.L. III Congreso Internacional sobre Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. I. H. S. Gallegos, S. Botello, F. Zárate, y G. Ayala Barcelona, CIMNE: 10.
104. Mendoza-Domínguez, A. and M. R. García (2009). "Aplicación de un Modelo de Calidad del Aire de Segunda Generación a la Zona Metropolitana de Guadalajara, México." Revista Internacional de Contaminación Ambiental **25**(2): 73 - 85.
105. Mendoza-Domínguez, A. and G. M. (2011). "Modelación Inversa Aplicada al Análisis del Inventario de Emisiones de la Zoa Metropolitana de Guadalajara, México." Revista Internacional de Contaminación Ambiental **27**(3): 199 - 214.
106. Mendoza-Domínguez, A. and A. G. Russell (2001). "Emission strength validation using four-dimensional data assimilation: application to primary aerosol and precursors to ozone and secondary aerosol." Journal of the Air & Waste Management Association **51**(11): 1538-1550.
107. Mendoza-Dominguez, A., J. Wilkinson, G., Y.-J. Yang and A. G. Russell (2011). "Modeling and direct sensitivity analysis of biogenic emissions impacts on regional ozone formation in the Mexico-US Border Area." Journal of the Air & Waste Management Association **50**(1).
108. Middleton, J. T., J. B. Kendrick Jr and H. W. Schwalm (1950). "Injury to herbaceous plants by smog or air pollution." Plant Disease **34**(9).
109. Miller, P. R., M. L. de Bauer, A. Quevedo Nolasco and T. Hernández Tejeda (1994). "Comparison of ozone exposure characteristics in forested regions near Mexico City and Los Angeles." Atmospheric Environment **28**(1): 141-148.
110. Mills, G., A. Buse, B. Gimeno, V. Bermejo, M. Holland, L. Emberson and H. Pleijel (2007). "A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops." Atmospheric Environment **41**: 2630–2643. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.016>
111. Mills, G., F. Hayes, D. Simpson, L. Emberson, D. Norris, H. Harmens and P. Büker (2011). "Evidence of widespread effects of ozone on crops and (semi-) natural vegetation in Europe (1990–2006) in relation to AOT40-and flux-based risk maps." Global Change Biology **17**(1): 592-613.
112. Molina, L., L. G. Ruiz Suárez, X. Cruz-Núñez, W. Lei and A. Garcia-Reynoso (2010). Temas emergentes en cambio climático: metano y carbono negro, sus posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación.
113. Molina, L. T., C. E. Kolb, B. DeFoy, B. K. Lamb, W. H. Brune, J. L. Jimenez and M. Molina (2007). "Air quality in North America's most populous city –overview of the MCMA-2003 campaign." Atmospheric Chemistry & Physics **7**: 2447–2473.
114. Molina, L. T., S. Madronich, J. S. Gaffney, E. Apel, B. de Foy, J. Fast, R. Ferrare, S. Herndon, J. L. Jimenez, B. Lamb, A. R. Osornio-Vargas, P. Russell, J. J. Schauer, P. S. Stevens, R. Volkamer and

- M. Zavala (2010). "An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation." *Atmospheric Chemistry & Physics* **10**: 8697-8760.
115. Molina, L. T. and M. J. Molina (2002). *Air quality in the Mexico megacity: an integrated assessment*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
116. Molina, M., L. Molina, J. West, G. Sosa, C. Pardo, F. San Martini, M. Zavala and G. McRae (2002). Air Pollution Science in the MCMA: Understanding Source-Receptor Relationships through Emissions Inventories, Measurements, and Modeling. *Air Quality in the Mexico Megacity*. L. Molina and M. Molina, Springer Netherlands. **2**: 137-212.
117. Moreno, E. A., G. F. Rojas, F. H. Frenk, A. O. De la Huerta, R. Q. Belmares and A. R. O. Vargas (1997). "In vitro induction of abnormal anaphases by contaminating atmospheric dust from the City of Mexicali, Baja California, Mexico." *Archives of Medical Research* **28**(4): 549-553.
118. Muriel-García, M., R. M. Cerón-Bretón and J. Cerón-Bretón (2016). "Air pollution in the Gulf of Mexico." *Open Journal of Ecology* **6**: 32 - 46.
119. ONU (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Organización de las Naciones Unidas.
120. Ordieres, J. B., E. P. Vergara, R. S. Capuz and R. E. Salazar (2005). "Neural network prediction model for fine particulate matter (PM_{2.5}) on the US-Mexico border in El Paso (Texas) and Ciudad Juárez (Chihuahua)." *Environmental Modelling and Software* **20**: 547 - 559.
121. Orendovici, T., J. M. Skelly, J. A. Ferdinand, J. E. Savage, M. J. Sanz and G. C. Smith (2003). "Response of native plants of northeastern United States and southern Spain to ozone exposures; determining exposure/response relationships." *Environmental Pollution* **125**(1): 31-40. [http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00089-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00089-7)
122. Ortiz, E., P. Olaya, E. Alemon and J. M. Herrera (2003). On the exposure of bus drivers to organic volatile compounds at Guadalajara City, Mexico. *Urban Transport IX: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. L. J. Sucharov and C. A. Brebbia. Southampton, Wit Press. **14**: 353-361.
123. Osornio-Vargas, A. R., N. A. Hernández-Rodríguez, A. G. Yáñez-Buruel, W. Ussler, L. H. Overby and A. R. Brody (1991). "Lung cell toxicity experimentally induced by a mixed dust from Mexicali, Baja California, Mexico." *Environmental Research* **56**(1): 31-47.
124. Ostro, B. D., H. Tran and J. I. Levy (2006). "The health benefits of reduced tropospheric ozone in California." *Journal of the Air & Waste Management Association* **56**(7): 1007-1021.
125. Peralta, O., A. Ortinez, T. Castro, M. D. L. Espinoza, I. Saavedra, G. A. Carabali-Sandoval, V. H. Páramo, A. Gavilán and A. Martínez-Arroyo (2015). Continuous measurement of carbon black in a denseley populated area of Mexico City. *AGU Fall Meeting*. San Francisco.
126. PNUMA (2017). El Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono, Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente.
127. Presidencia (1992). Acuerdo por el que se crea la Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México. P. d. I. República, Diario Oficial de la Federación. **DOF 20170108**.
128. Quintana, R., J. Serrano, V. Gómez, B. de Foy, J. Miranda, C. Garcia-Cuellar, E. Vega, I. Vázquez-López, L. T. Molina and N. Manzano-León (2011). "The oxidative potential and biological effects induced by PM₁₀ obtained in Mexico City and a receptor site during the MILAGRO Campaign." *Environmental Pollution* **159**(12): 3446-3454.
129. Ramírez-Aguilar, M., P. Cicero-Fernandez, A. M. Winer, I. Romieu, F. Meneses-Gonzalez and M. Hernandez-Avila (2002). "Measurements of personal exposure to nitrogen dioxide in four Mexican cities in 1996." *Journal of the Air & Waste Management Association* **52**(1): 50-57.

130. Reilly, J., S. Paltsev, B. Felzer, X. Wang, D. Kicklighter, J. Melillo, R. Prinn, M. Sarofim, A. Sokolov and C. Wang (2007). "Global economic effects of changes in crops, pasture, and forests due to changing climate, carbon dioxide, and ozone." *Energy Policy* **35**(11): 5370-5383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.01.040>
131. Reyes, H. J., H. Vaquera and J. A. Villaseñor (2010). "Estimation of trends in high urban ozone levels using the quantiles of (GEV)." *Environmetrics* **21**(5): 470-481.
132. Riojas-Rodríguez, H., José Luis Texcalac Sangrador, Conrado Martínez Suárez, Karla Cervantes Martínez, Magali Hurtado Díaz, Carlos Manuel Guerrero López, Luz Angélica de la Sierra de la Vega and Pamela Zuñiga (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. "C. d. I. e. S. Pública." Cuernavaca, Morelos. 72. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196765/Estimacion_de_impactos_2016.pdf
133. Riojas-Rodríguez, H., A. Schilman, L. López-Carrillo and J. Finkelman (2013). "Environmental health in Mexico: current situation and future prospects." *Salud Pública de México* **55**(6): 638-649.
134. Rivera, C., G. Sosa, H. Wöhrnschimmel, B. de Foy, M. Johansson and B. Galle (2009). "Tula industrial complex (Mexico) emissions of SO₂ and NO₂ during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system." *Atmospheric Chemistry & Physics* **9**(17).
135. Rodríguez-Rosales, V., J. Parra-Berumen, A. Campos-Trujillo, A. De la Peña-Arellano, J. Rodríguez-Rosales and S. Valle-Cervantes (2006). "Modelación atmosférica de la calidad del aire en la Ciudad de Chihuahua." *Revista Mexicana de Ingeniería Química* **5**(1): 15 - 21.
136. Romieu, I., N. Gouveia, L. A. Cifuentes, A. P. de Leon, W. Junger, J. Vera, V. Strappa, M. Hurtado-Díaz, V. Miranda-Soberanis, L. Rojas-Bracho, L. Carbajal-Arroyo, G. Tzintzun-Cervantes and null (2012). "Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study)." *Research Report (Health Effects Institute)*(171): 5-86.
137. Romieu, I., M. C. Lugo, S. R. Velasco, S. Sanchez, F. Meneses and M. Hernandez (1992). "Air pollution and school absenteeism among children in Mexico City." *American Journal of Epidemiology* **136**(12): 1524-1531.
138. Romieu, I., E. Palazuelos, M. H. Avila, C. Rios, I. Muñoz, C. Jimenez and G. Cahero (1994). "Sources of lead exposure in Mexico City." *Environmental Health Perspectives* **102**(4): 384.
139. Rosas Pérez, I., J. Serrano, E. Alfaro-Moreno, D. Baumgardner, C. García-Cuellar, J. M. Martín del Campo, G. B. Raga, M. Castillejos, R. D. Colín and A. R. Osornio Vargas (2007). "Relations between PM₁₀ composition and cell toxicity: A multivariate and graphical approach." *Chemosphere* **67**(6): 1218-1228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.078>
140. Ruiz-Suárez, J., O. Mayora, R. Smith-Perez and L. Ruiz-Suarez (1994). Neural network-based prediction model of ozone for Mexico City. *Computational Mechanics Publ, Southampton, (Engl)*. **1**: 393-400.
141. Ruiz-Suárez, J. C., O. A. Mayora-Ibarra, J. Torres-Jiménez and L. G. Ruiz-Suárez (1995). "Short-term ozone forecasting by artificial neural networks." *Advances in Engineering Software* **23**(3): 143-149. [http://dx.doi.org/10.1016/0965-9978\(95\)00076-3](http://dx.doi.org/10.1016/0965-9978(95)00076-3)
142. Ruiz-Suárez, J. C., L. G. Ruiz-Suárez, C. Gay, T. Castro, M. Montero, S. Eidels-Dubovoi and A. Muhlia (1993). "Photolytic rates for NO₂, O₃ and HCHO in the atmosphere of Mexico City." *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* **27**(3): 427-430. [http://dx.doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90116-G](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1686(93)90116-G)
143. Ruiz-Suárez, L. G., T. Castro, B. Mar, M. E. Ruiz-Santoyo and X. Cruz (1993). "Do we need an Ad hoc chemical mechanism for Mexico City's photochemical smog?" *Atmospheric*

Environment. Part A. General Topics 27(3): 405-425. [http://dx.doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90115-F](http://dx.doi.org/10.1016/0960-1686(93)90115-F)

144. SAGARPA (2011). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Ciudad de México, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
145. Salazar-Ruiz, E., J. B. Ordieres, E. P. Vergara and S. F. Capuz-Rizo (2008). "Development and Comparativr analysis of trophosperic ozone prediction model using linear and artificial intelligence-based models in Mexicali, Baja California (Mexico) and Calexico, California (US)." Environmental Modelling Software 23: 1056-1069.10.1016/j.envsoft.2007.11.009
146. Sanchez, R., S. Sánchez, R. J. Sánchez, J. Alcalá and G. R. Aguirre (2015). "Análisis espacial estimado regiones de riego por contaminantes que exceden con más frecuencia la norma en Guadalajara, México." Revista Iberoamericana de Ciencias 2(2): 65 - 85.
147. Schifter, I., L. Díaz, V. Múgica and E. López-Salinas (2005). "Fuel-based motor vehicle emission inventory for the metropolitan area of Mexico city." Atmospheric Environment 39(5): 931-940. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.079>
148. SEDEMA (2002). Inventario de Emisiones a la Atmósfera 2000: Zona Metropolitana del Valle de México. México, DF, Secretaría del Medio Ambiente: 360.
149. SEDEMA (2016). Aviso por el que se da a conocer el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México (vigente). Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno de la Ciudad de México, Gaceta Ofical de la Ciudad de México: 13.
150. SEDEMA (2016). Calidad del Aire en la Ciudad de México 2015. Ciudad de México, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México.
151. SEDEMA (2016). Inventario de Emisiones de la ZMVM 2014, Contaminantes Criterio, Toxicos y de Efecto Invernadero. Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México.
152. SEDEMA, SMAGEM, SEMARNAT and COFEPRIS (2011). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Mexico 2011-2020. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire-2011-2020-anexos/>
153. SEMARNAT (2006). Inventario Nacional de Emisiones 1999. Ciudad de México, Instituto Nacional de Ecología: 380.
154. SEMARNAT (2008). La degradación de los suelos en México. Informe de la situación ambiental en México. Ciudad de México.
155. SEMARNAT (2008). México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. Cd. de Mexico.
156. SEMARNAT (2010). Aire Limpio, Programa para el Valle de Toluca 2007-2011, informe de evaluación 2009. D. g. d. g. d. l. c. d. a. y. r. d. e. y. t. d. contaminantes. México DF.
157. SEMARNAT (2011). Inventario Nacional de Emisiones, 2005. Cd. de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: 200.
158. SEMARNAT (2012). México Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ciudad de México.
159. SEMARNAT (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. México, DF, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. **NOM-156**.
160. SEMARNAT (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40. Ciudad de México.
161. SEMARNAT (2015). El medio ambiente 2013-2014, atmósfera y cambio climático.

162. SEMARNAT (2015). Guía para la elaboración de programas de gestión para mejorar la calidad del Aire (ProAire). Ciudad de México, Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Subdirección de Programas de Calidad del Aire. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
163. SEMARNAT. (2017). "Consulta Temática." from http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_12&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce.
164. SEMARNAT (2017). Estrategia Nacional de Calidad del Aire; Visión 2017-2030. S. d. M. A. y. R. Naturales. Ciudad de México: 70.
165. SEMARNAT (2017). Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis 2017 - 2030. Ciudad de México, SEMARNAT: 314.
166. SEMARNAT, Edo. de Hidalgo, Edo. de México, Edo. de Morelos, Edo. de Puebla and Edo. de Tlaxcala (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. DOF 03/10/2013. Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación.
167. SENER (2011). Balance Nacional de Energía 2010. Ciudad de México, DF, Secretaría de Energía: 138.
168. Shindell, D., J. C. I. Kuylenstierna, E. Vignati, R. van Dingenen, M. Amann, Z. Klimont, S. C. Anenberg, N. Muller, G. Janssens-Maenhout and F. Raes (2012). "Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security." Science **335**(6065): 183-189.
169. Shoemaker, J., D. Schrag, M. Molina and V. Ramanathan (2013). "What Role for Short-Lived Climate Pollutants in Mitigation Policy?" Science **342**(6164): 1323-1324.
170. Sierra, A., A. Y. Vanoye and A. Mendoza (2013). "Ozone sensitivity to its precursor emissions in northeastern Mexico for a summer air pollution episode." Journal of the Air & Waste Management Association **63**(10): 1221-1233.
171. Soto Coloballes, N. V. (2017). "El control de la contaminación atmosférica en México (1970-1980): tensiones y coincidencias entre el sector salud y los industriales." Dynamis **37**: 187-209.
172. SSA (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Mexico, Secretaría de Salud.
173. SSA (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Mexico, Secretaría de Salud.
174. Streets, D. G., S. Gupta, S. T. Waldhoff, M. Q. Wang, T. C. Bond and B. Yiyun (2001). "Black carbon emissions in China." Atmospheric Environment **35**(25): 4281-4296.
175. Streit, G. E. and F. Guzmán (1996). "Mexico City Air quality: Progress of an international collaborative project to define air quality management options." Atmospheric Environment **30**(5): 723-733. [http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00275-8](http://dx.doi.org/10.1016/1352-2310(95)00275-8)
176. Suárez Lastra, M. and J. Delgado Campos (2007). "Estructura y eficiencia urbanas. Accesibilidad a empleos, localización residencial e ingreso en la ZMCM 1990-2000." Economía Sociedad y Territorio **6**(23): 693-724.
177. Suárez, M. and J. Delgado (2009). "Is Mexico City Polycentric? A trip attraction capacity approach." Urban Studies **46**(10): 2187-2211.

178. Suárez, M., M. Murata and J. Delgado Campos (2016). "Why do the poor travel less? Urban structure, commuting and economic informality in Mexico City." *Urban Studies* **53**(12): 2548-2566.
179. Suárez, M., L. G. Ruiz Suárez, A. García and J. Delgado (2011). *Expansión y eficiencia urbana. Taller en Metano y Carbono Negro*. L. G. Ruiz-Suárez and L. T. Molina. Ciudad de México.
180. Tarrasón, L., A. Semb, A. G. Hjellbrekke, S. Tsyro, J. Schaug, J. Bartnicki and S. Solberg (1998). Geographical distribution of sulphur and nitrogen compounds in Europe derived both from modelled and observed concentrations. Norwegian Meteorological Institute. Kjeller, Norway. http://www.emep.int/publ/reports/1998/EMEP_1998_N4.pdf
181. Tidblad, J. and V. Kucera (2006). Technical manual for the trend exposure programme 2005-2006. Corrosion and Metals Research Institute (KIMAB). Stockholm, Sweden.
182. Tidblad, J., V. Kucera, A. Mikhailov, J. Henriksen, K. Kreislova, T. Yates, B. Stöckle and M. Schreiner (2001). UN ECE ICP Materials: Dose-Response Functions on Dry and Wet Acid Deposition Effects After 8 Years of Exposure. *Acid rain 2000*. K. Satake, J. Shindo, T. Takamatsu et al., Springer Netherlands: 1457-1462.
183. Tidblad, J., M. Faller, T. Grøntoft, K. Kreislova, C. Varotsos, D. De la Fuente, T. Lombardo, S. Doytchinov, S. Brüggerhoff and T. Yates (2010). Report No 65 Economic assessment of corrosion and soiling of materials including cultural heritage., Swerea KIMAB AB. Stockholm, Sweden.
184. Tollefsen, P., K. Rypdal, A. Torvanger and N. Rive (2009). "Air pollution policies in Europe: efficiency gains from integrating climate effects with damage costs to health and crops." *Environmental Science & Policy* **12**(7): 870-881. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.006>
185. Tovalin, H., J. Hicks, R. Marroquín, I. Olivares, M. Hernández and P. Sierra (2007). "Oxidative Stress and Place of Living in Children From the MCMA During the Milagro-MCMA 2006 Campaign." *Epidemiology* **18**(5).
186. UNECE-LRTAP (2004). Mapping Manual 2004. *Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends*. R. a. T. International Cooperative Programme on Modelling and Mapping of Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects: 251.
187. UNFCCC (2014). Kyoto Protocol. Status of Ratification. U. N. F. C. o. C. Change.
188. Vanoye, A. Y. and A. Mendoza (2014). "Application of direct regularization techniques and bounded-variable least squares for inverse modeling of an urban emissions inventory." *Atmospheric Pollution Research* **5**(2): 219-225. 10.5094/APR.2014.027
189. Vanoye, A. Y. and A. Mendoza-Dominguez (2009). "Mesoscale meteorological simulations of summer ozone episodes in Mexicali and Monterrey, Mexico: Analysis of model sensitivity to Grid Resolution and Parameterization Schemes." *Water, Air & Soil Pollution: Focus* **9**(3-4): 185 - 202.
190. Voorhees, A. S., J. Wang, C. Wang, B. Zhao, S. Wang and H. Kan (2014). "Public health benefits of reducing air pollution in Shanghai: a proof-of-concept methodology with application to BenMAP." *Science of the Total Environment* **485**: 396-405.
191. WHO (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment, World Health Organization.
192. WHO (2007). Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Geneva, Switzerland, World Health Organization.
193. Williams, M. D., G. Streit, X. Cruz, M. Ruiz, G. Sosa, A. G. Russell and L. A. McNair (1992). Development and testing of an air quality model for Mexico City. Los Alamos National Lab., NM (United States).

194. Wöhrnschimmel, H., C. Márquez, V. Mugica, W. A. Stahel, J. Staehelin, B. Cárdenas and S. Blanco (2006). "Vertical profiles and receptor modeling of volatile organic compounds over Southeastern Mexico City." *Atmospheric Environment* **40**(27): 5125-5136.
195. Wöhrnschimmel, H., M. Zuk, G. Martinez-Villa, J. Ceron, B. Cardenas, L. Rojas-Bracho and A. Fernandez-Bremauntz (2008). "The impact of a Bus Rapid Transit system on commuters' exposure to Benzene, CO, PM2.5 and PM10 in Mexico City." *Atmospheric Environment* **42**(35): 8194-8203.10.1016/j.atmosenv.2008.07.062
196. Xing, Y.-F., Y.-H. Xu, M.-H. Shi and Y.-X. Lian (2016). "The impact of PM2.5 on the human respiratory system." *Journal of Thoracic Disease* **8**(1): E69.
197. Yokelson, R. J., I. R. Burling, S. P. Urbanski, E. L. Atlas, K. Adachi, P. R. Buseck, C. Wiedinmyer, S. K. Akagi, D. W. Toohey and C. E. Wold (2011). "Trace gas and particle emissions from open biomass burning in Mexico." *Atmospheric Chemistry and Physics* **11**: 6787-6808.DOI: 10.5194/acp-11-6787-2011
198. Zavala, M., S. C. Herndon, E. C. Wood, T. B. Onasch, W. B. Knighton, L. C. Marr, C. E. Kolb and L. T. Molina (2009). "Evaluation of mobile emissions contributions to Mexico City's emissions inventory using on-road and cross-road emission measurements and ambient data." *Atmospheric Chemistry and Physics* **9**(17): 6305-6317.10.5194/acp-9-6305-2009
199. Zavala, M., L. T. Molina, E. Fortner, B. Knighton, S. Herndon, T. Yacovitch, F. Cody, R. Joseph, C. Kolb, J. A. Mejia, J. Sarmiento, V. H. Paramo, S. Zirath and A. Jazcilevich (2014). Emissions of black carbon and co-pollutants emitted from diesel vehicles in the Mexico City Metropolitan Area. *EGU General Assembly*, EGU.

Derechos Reservados © 2018

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña,
Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec,
Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Este trabajo se realizó con financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial a través del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo para la Sexta comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

