© 2021 INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION

Beneficios en calidad del aire y salud por la mejora de normas de emisiones para vehículos y combustibles en México¹

Autores: Leticia Pineda, Kate Blumberg, Maita Schade, John Koupal, Ingrid Pérez, Sergio Zirath, Joshua Fu, Kan Huang, Lingzhi Jin y Ulises Hernández **Palabras clave:** calidad del aire, mortalidad prematura, normas de emisiones, NOM-044,

Resumen

NOM-042, NOM-016, México

En junio de 2016, en la <u>Cumbre de Líderes de América del Norte</u>, los jefes de los Gobiernos de Canadá, México y Estados Unidos acordaron "comprometerse a reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos para 2018, ajustando las normas de emisión de contaminantes atmosféricos para vehículos livianos y pesados, y las normas correspondientes al combustible ultra bajo en azufre" (The White House, 2016). Con el fin de apoyar los esfuerzos regulatorios necesarios para lograr este objetivo en México, el Consejo Internacional del Transporte Limpio (ICCT, por su sigla en inglés) coordinó los trabajos de varias organizaciones para modelar las emisiones, la calidad del aire y los beneficios en salud pública que se tendrían al alinear las normas que regulan las emisiones de vehículos y combustibles en México con las del resto de América del Norte.

El estudio investigó los impactos que tendría actualizar tres normas mexicanas ajustándolas a las mejores prácticas internacionales utilizadas en el resto de América del Norte: las normas de contenido de azufre para gasolina y diésel, las normas de emisiones de automóviles, y las normas de emisiones de camiones y autobuses. Entre los colaboradores del estudio se encuentran Eastern Research Group (ERG), la Universidad de Tennessee (UT) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México.

www.theicct.org
americalatina@theicct.org
twitter @theicct_latam



¹ Esta es una traducción del reporte original en inglés en 2018 la cual incluye actualizaciones sobre el contexto de política pública hasta abril 2021. Los resultados originales de la modelación no fueron actualizados.

HALLAZGOS PRINCIPALES

- » La implementación de únicamente tres normas clave para combustibles y vehículos en México dará como resultado una importante reducción de la mortalidad prematura. El modelo sugiere que pueden evitarse aproximadamente 9000 muertes tan solo en 2035, con cerca del 80 % de los beneficios derivados de reducir las concentraciones de partículas finas, y el resto, de la reducción del ozono. Considerando exclusivamente las muertes prematuras evitadas en ese año, los beneficios monetarios se calculan en más de \$20.8 mil millones de dólares (2010 USD). Este análisis no considera los beneficios acumulativos para la salud que se suman hasta 2035 y que se extenderán a los años siguientes. Otros beneficios para la salud que no se cuantificaron en este análisis incluyen la reducción de casos de asma y bronquitis crónica; ni tampoco los días laborales perdidos.
- » Estas normas resultarán en una dramática reducción de emisiones en México. Como parte de las emisiones del sector del transporte por carretera en 2035, los óxidos de nitrógeno ($\mathrm{NO_x}$) se reducen en un 66 %, los compuestos orgánicos volátiles (COV) en 53 %, y el material particulado fino ($\mathrm{PM_{2.5}}$) en más del 90 %, incluido un descenso del 84 % de carbono negro (BC, por su sigla en ingles). Como proporción del total de las emisiones de todos los sectores, los $\mathrm{NO_x}$ y los COV los dos precursores clave en la producción de ozono—se reducen en 43 % y 31 %, respectivamente.
- » La reducción de emisiones se traduce en beneficios importantes para la calidad del aire tanto a nivel local como nacional, especialmente en áreas densamente pobladas. Las concentraciones de PM_{2.5} se redujeron en un 18 % a nivel nacional y un 20 % en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Durante la temporada alta, las concentraciones máximas de ozono disminuyeron un 12 % y un 14 %, respectivamente. Estas reducciones serían un paso significativo hacia la disminución de incidentes de contingencias ambientales.

RECOMENDACIONES DE POLÍTICA PÚBLICA

Para alcanzar la buena calidad del aire y las mejoras en salud demostradas en este análisis, se necesitan varias acciones de política pública. En diciembre de 2017 el gobierno mexicano estaba en las últimas etapas para aprobar y publicar la actualización de la NOM-044, la cual regula las emisiones de vehículos pesados a diésel y logrará la compatibilidad con las normativas U.S. 2010 / Euro VI (SEMARNAT, 2017). Esta política pública brindará enormes beneficios para la salud y la calidad del aire, y es la responsable del 69 % de los beneficios económicos y para la salud en este análisis.

Existen otras dos políticas clave responsables del 31 % de los beneficios restantes, para las cuales aún se necesitan estas acciones:

» La NOM-042, que regula las emisiones de vehículos livianos, debería actualizarse para adoptar límites más rigurosos para las emisiones de escape y evaporativas. La norma debería alinearse inmediatamente con los estándares Tier 2 y Euro 6 para emisiones del tubo de escape, pero se debería exigir que todos los vehículos cumplan con los estándares estadounidenses que son mucho más rigurosos para el control de emisiones evaporativas. Las normas Tier 3 de Estados Unidos traerán un aumento significativo de los beneficios para la salud y la calidad del aire, y serán necesarias para asegurar que las emisiones continúen disminuyendo incluso si la flota sigue creciendo.

» La NOM-016, que regula la calidad del combustible, debería actualizarse para reducir la concentración de azufre en la gasolina a 10 partes por millón (ppm). Además, no debería permitirse en las ciudades o municipalidades más contaminadas flexibilidades para incrementar la presión de vapor Reid (RVP), lo que contribuiría a emisiones de COV más elevadas.

Introducción

El objetivo de este estudio fue investigar los impactos de la revisión de tres normas federales en México: las normas sobre el azufre en gasolina y diésel (NOM-016-CRE-2016), las normas que regulan las emisiones de los automóviles de pasajeros (NOM-042-SEMARNAT-2005) y las normas que regulan las emisiones de los camiones y autobuses (NOM-044-SEMARNAT-2006). El estudio consideró dichas normas vigentes como línea base y midió la posible reducción de contaminantes del aire y las muertes prematuras que se podrían evitar al adoptar las mejores prácticas que actualmente se utilizan en el resto de Norteamérica.

Entre los colaboradores del estudio se encuentran el Eastern Research Group (ERG), la Universidad de Tennessee (University of Tenessee, UT) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) de México. El ERG utilizó escenarios de políticas definidos por el ICCT para generar datos de entrada para el MOVES-México, una adaptación al contexto mexicano (ERG, 2016a) del Simulador de Emisiones de Vehículos Automotores (Motor Vehicle Emission Simulator, MOVES) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, o U.S. EPA). En la UT los investigadores utilizaron los resultados del MOVES-México como un insumo para modelar los impactos sobre la calidad del aire en el escenario de las mejores prácticas, utilizando el Modelo Comunitario Multiescala de Calidad del Aire (CMAQ, por su sigla en inglés) de código abierto. Finalmente, el INECC y el ICCT obtuvieron una estimación de la reducción de muertes prematuras atribuibles a la contaminación por material particulado fino (PM_{2.5}) y ozono de acuerdo con dicho escenario, utilizando como herramienta el Programa de Mapeo de Beneficios y Análisis de la EPA (BenMAP, por su sigla en inglés).

Las siguientes secciones exponen el contexto de las políticas públicas, la metodología del análisis, los resultados, las áreas de incertidumbre y de posterior estudio, y las conclusiones.

CALIDAD DEL COMBUSTIBLE

La calidad del combustible es tanto un determinante directo en la reducción de emisiones como un elemento esencial que permite la introducción de vehículos más limpios. Las regulaciones para las emisiones de los vehículos están dentro del ámbito ambiental, mientras que la calidad del combustible es ahora considerada parte del sector de energético.

En 2013, el Congreso de México promulgó un paquete de reformas para el sector energético que, entre otros muchos cambios, abre los combustibles refinados a un mercado competitivo, que incluye la desregulación de los precios del combustible y permite que compañías privadas produzcan e importen combustibles refinados, y posean y operen estaciones de servicio, para así terminar con el monopolio de la compañía petrolera perteneciente a la nación, Petróleos Mexicanos (PEMEX).

Como parte de la reforma, la jurisdicción de las normas sobre la calidad de combustibles se modificó: de una autoridad compartida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Energía (SENER), a la Comisión

Reguladora de Energía (CRE). Los tipos de combustibles relevantes para este análisis son la gasolina y el diésel para uso en vehículos de carretera.

Antecedentes

En 1994 se publicó la NOM-086-ECOL-1994 para reglamentar los combustibles fósiles tanto para fuentes fijas como móviles (INE, 1994). Esta norma fue reemplazada por la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 (NOM-086), la cual exigía desde 2009 que tanto la gasolina como el diésel tuvieran concentraciones muy bajas de azufre (SEMARNAT y SENER, 2006). PEMEX, que era el único proveedor de combustibles refinados en el país antes de la reforma energética², nunca alcanzó el cumplimiento total de la NOM-086 sobre límites de azufre en gasolina y diésel.

Una vez transferida la autoridad a la CRE, esta aprobó una norma de emergencia de 6 meses, la NOM-EM-005-CRE-2015 (NOM-EII-005), que se extendió otros 6 meses (CRE, 2015a, 2015b). La norma de emergencia fue reemplazada por una permanente, la NOM-016-CRE-2016 (NOM-016), en agosto de 2016 (CRE, 2016).

Regulaciones actuales

La NOM-016 establece especificaciones para los combustibles utilizados en carretera y otros tipos de vehículos y usos; establece normas nacionales, que en algunos casos requieren estándares más exigentes para regiones prioritarias. El cumplimiento se mide a lo largo de la cadena completa de distribución para los combustibles localmente refinados e importados.

La NOM-016 exige que toda la gasolina que se venda en México cumpla con un promedio de azufre de 30 ppm, con un máximo de 80 ppm. En cuanto al diésel, exige que cumpla con un límite para el azufre de 15 ppm desde la frontera de la región norte³ y a lo largo de una red de once corredores principales de carga, en las áreas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y la Ciudad de México, y para todos los combustibles de importación. A partir del 31 de diciembre de 2018 se exige que todo el diésel que se venda en México cumpla con el límite para el azufre de 15 ppm.

Entre las especificaciones sobre la calidad del combustible, las más críticas para la calidad del aire son las relacionadas con el contenido de azufre y la presión de vapor Reid (RVP, por su sigla en inglés).

- » El contenido de azufre es el factor limitante en la introducción de nuevas tecnologías para vehículos, y por lo tanto está estrechamente relacionado con la aplicación de nuevas normas para los vehículos. La reducción del contenido de azufre también tiene un impacto inmediato en la emisión de partículas de todos los vehículos diésel existentes y en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de todos los vehículos de gasolina equipados con convertidores catalíticos (que son la mayoría de los vehículos que circulan hoy en día por carretera).
- » La RVP atañe solamente a la gasolina y afecta a la tasa de evaporación de la gasolina durante la recarga de combustible, el estacionamiento y el uso del vehículo. Aunque la RVP no afecta a las emisiones de COV del tubo de escape, es uno de los factores más importantes en la cantidad de emisiones evaporativas de

² La NOM-086 exigía que el diésel cumpliera con un límite de azufre de 15 ppm y que la gasolina cumpliera con un promedio de 30 ppm con un máximo de 80 ppm para 2009. Mientras que PEMEX obedeció los límites para el diésel en ciertas regiones y cumplió los límites para la gasolina Premium, nunca alcanzó el pleno cumplimiento de las normas para el azufre de la NOM-086 a nivel nacional, tanto para gasolina como para diésel. Ver Alcántar González y Gómez Cruz (2011) para mayor información.

³ Incluyendo partes de los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.

COV. Los niveles de RVP varían por región y estación del año, con especificaciones establecidas según altitud, latitud, temperatura promedio y formación de contaminantes secundarios.

Los valores límites de azufre para los combustibles en México derivados de la NOM-016 se encuentran resumidos en la tabla 1.

Cuando la NOM-016 fue publicada no contemplaba cambios en la RVP, sin embargo este parámetro sufrió dos modificaciones. La primera permitiendo una RVP más alta, lo cual es correspondiente a un límite más relajado para el uso de etanol (CRE, 2017). El etanol es un oxigenante utilizado típicamente en la gasolina de Estados Unidos al 10 % por volumen. La NOM-016 originalmente estableció un contenido máximo del 5.8 % por volumen en las concentraciones de etanol en la gasolina. En junio de 2017 este parámetro se modificó para permitir que se añadiera etanol hasta en un 10 % por volumen en todas las regiones excepto en las áreas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y la Ciudad de México. Dado que el etanol tiene una RVP mayor, también se permite que la gasolina con entre 9 % y 10 % de etanol tenga una RVP mayor que la requerida en las especificaciones. Esta modificación fue revertida por un amparo publicado el 18 de septiembre de 2020 para regresar el contenido máximo de etanol a 5.8 % en el territorio mexicano y se mantiene la prohibición de uso de etanol en las tres áres metropolitanas antes mencionadas (CRE, 2020).

Este estudio no tomó en cuenta ningún cambio en el contenido de etanol o en la RVP. Una RVP más alta incrementará las emisiones evaporativas, y las concentraciones de etanol más altas también podrían asociarse con emisiones evaporativas más elevadas, especialmente en vehículos más viejos. Tampoco se consideraron las ligeras reducciones en otros contaminantes del tubo de escape que se han asociado con el etanol. Aunque en las áreas metropolitanas críticas no se permite el uso del etanol como oxigenante, existe una necesidad de llevar a cabo más estudios para evaluar el impacto de las emisiones debidas a mezclas con mayor cantidad de etanol y una RVP más alta en la flota mexicana existente, y en el clima y la altitud típicas de México. El INECC publicó en junio de 2018 un estudio donde presentó las recomendaciones de modificación de la norma referentes entre otros, a no incrementar la RVP y reducir el contenido de azufre en gasolinas a 10 ppm máx y 80 ppm promedio (INECC, 2018).

Comparación con las mejores prácticas

En términos de cantidad de azufre, la calidad del combustible en México continúa rezagándose con respecto a la del combustible en Estados Unidos y Europa, con límites de azufre ultra bajos para diésel y gasolina (ver Figura 1).

Tabla 1. Especificaciones de azufre para diésel y gasolina en la NOM-016

Combustible	Límite de azufre actual	Límite de azufre a partir del 31 de diciembre de 2018
Diésel	15 ppm máximo: en la región fronteriza, en las tres áreas metropolitanas más importantes, en los 11 corredores de carga, y para todas las importaciones de combustible 500 ppm máximo: en el resto del país	15 ppm máximo
Gasolina	30 ppm promedio 80 ppm máximo	

La CRE ha iniciado un proceso de revisión de la NOM-016 recientemente adoptada, con un enfoque en las especificaciones sobre gasolina y diésel; es posible que este proceso resulte en posteriores actualizaciones para armonizar las concentraciones de azufre en México con las mejores prácticas mundiales. El escenario sobre control de emisiones para este análisis se basó en la NOM-EM-005 original, la cual establece la completa implementación de 15 ppm para el diésel en 2018. También se consideró posible una etapa más hacia 10 ppm de azufre en la gasolina para implementarse en 2020, lo que permitiría adecuarse a las mejores prácticas mundiales.

EMISIONES DE LOS VEHÍCULOS

La SEMARNAT tiene autoridad para regular la emisión de contaminantes de los vehículos. Actualmente, las normas para las emisiones vehiculares se basan en las regulaciones europeas y de Estados Unidos, y en general permiten el cumplimiento de cualquiera de los programas regulatorios. Las normas vehiculares se establecen para los vehículos de carga ligera (vehículos livianos, o LDV por su siglas en inglés; peso bruto del vehículo menor o igual a 3857 kg) y los de carga pesada (vehículos pesados, o HDV por su siglas en inglés; peso bruto del vehículo mayor a 3857 kg).

Antecedentes

Las emisiones de los vehículos nuevos vendidos en México primero fueron reguladas por la NOM-044-ECOL-1993 (INE, 1993b) para los HDV, y la NOM-042-ECOL-1993 (INE, 1993b) para los LDV. A partir de 1995, los HDV alimentados por gasolina, gas natural o gas licuado de petróleo se regularon de manera separada por la NOM-076-ECOL-1995 (SEMARNAT, 1995).

Cada una de estas normas sufrió actualizaciones posteriores, con las últimas revisiones de la SEMARNAT adoptadas en 2005 como NOM-042-SEMARNAT-2003 (NOM-042) (SEMARNAT, 2005), en 2006 como NOM-044-SEMARNAT-2006 (NOM-044) (SEMARNAT, 2006) y en 2012 como NOM-076-SEMARNAT-2012 (NOM-076) (SEMARNAT, 2012), respectivamente. Una propuesta de modificación para la NOM-044 se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* en diciembre de 2014 (SEMARNAT, 2014), con una actualización emitida en septiembre de 2017 (SEMARNAT, 2017).

Regulaciones vigentes

Vehículos pesados

La NOM-044 se aplica únicamente a emisiones de motores diésel y a HDV con motor diésel. Actualmente, la norma da a los fabricantes la opción de cumplir ya sea con la regulación de U.S. 2004 o con la Euro IV. Debido a que existe una diferencia entre ambos estándares por el costo de la alta tecnología, aproximadamente el 90 % de los nuevos vehículos son provistos de motores que cumplen con el costo más bajo de las normativas U.S. 2004 (Blumberg, Posada y Miller, 2014). La propuesta de modificación de 2014 de la NOM-044 intentó alinearse con las normativas U.S. 2010 y con la Euro VI en 2018 (ICCT, 2014). La actualización modifica la fecha de completa armonización con las normativas U.S. 2010 o la Euro VI hasta el 1º de enero de 2021 (SEMARNAT, 2017).

La NOM-076 solicita que los motores que funcionen con combustibles que no sean diésel y que los vehículos impulsados por estos motores cumplan con las regulaciones de la EPA, incrementando la rigurosidad en función del programa de calidad del combustible. El Estándar A, comparable con las normativas EPA 2004, entró en vigencia inmediatamente después de la promulgación de la NOM-076. El Estándar B, equivalente a las normativas U.S. 2010, entraría en vigor 18 meses después de que la gasolina con una concentración promedio de azufre de 30 ppm (máximo de 80 ppm) estuviera

ampliamente disponible en todo el país. La NOM-EM-005 exigió el 31 de enero de 2016 la disponibilidad total de gasolina con este último contenido de azufre a lo largo del país, pero no está claro si el estándar B entrará en vigor según el programa de la norma de emergencia (NOM-EM-005) o de la norma final (NOM-016).

Vehículos livianos

La NOM-042 establece normas de emisiones de escape y evaporativas para los nuevos LDV, lo que permite cumplir con las normativas europeas o estadounidenses para emisiones de escape y también establece límites a las emisiones evaporativas basados en el programa europeo. Se establecieron tres niveles de normas, que se introducirán gradualmente en un programa regido por el contenido de azufre del combustible. El Estándar A se alineó principalmente con la U.S. Tier 1.

Los valores límite que se están aplicando actualmente pertenecen al Estándar B, que se incorporó por completo en 2009. Según el método europeo, el Estándar B establece límites Euro 3 para vehículos diésel, y ligeramente mejores que el Euro 3 para vehículos de gasolina. Según el método estadounidense, el cumplimiento se mide mediante los procedimientos federales de prueba de Estados Unidos, aunque los valores límite no están realmente en concordancia con las normas estadounidenses. Los límites establecidos en el Estándar B varían de acuerdo con el contaminante; comprenden valores límite tomados de la Tier 1 y de los grupos (bins) temporales incluidos en la Tier 2, con límites más leves para las emisiones evaporativas y requisitos de vida útil más laxos (Miller et al., 2016).

	Región	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
na	Unión Europea	10 ppm máximo														
asolina	Estados Unidos	30 ppm promedio (80 ppm máximo) 10 ppm promedio (80 ppm máximo)														
Ga	México	30 ppi	n prome	edio/300	ppm m	aximo	30 ppm promedio (80 ppm máximo)									
	Unión Europea	10 ppm máximo														
iése	Estados Unidos	15 ppm máximo														
	México	15/500 ppm máximo														

Figura 1. Límites de azufre para gasolina y diésel en la Unión Europea, Estados Unidos y México

El Estándar C se implementará gradualmente en el transcurso de 4 años, comenzando 18 meses después de que se establezca la disponibilidad total de combustible bajo en azufre (definido en la norma en 30 ppm en promedio y 80 ppm máximo para gasolina y 10 ppm máximo para diésel). Bajo el método europeo, el Estándar C exige que los vehículos cumplan con las normas Euro 4. Según el método estadounidense, el Estándar C nuevamente establece límites variables, que en su mayoría van desde el bin 7 hasta el bin temporal 10, bajo el programa U.S. Tier 2.4

Las siguientes son algunas de las reducciones importantes en la rigurosidad en comparación con el programa estadounidense: (1) para los vehículos diésel, los límites de los Estándares B y C para el material particulado se basan en las normas Tier 1 y no exigen filtros de partículas, a pesar de la disponibilidad de diésel ultrabajo en azufre; (2)

⁴ Los estándares U.S. Tier 2 exigen que los fabricantes cumplan con un promedio de flota para emisiones de NO_{χ} equivalente al bin 5, de los ocho bins de certificación permanentes disponibles. Según el programa, los vehículos pueden certificarse para bins con límites de emisión más altos o bajos, siempre que el fabricante cumpla con el límite de NO_{χ} del bin 5 en un promedio ponderado por ventas.

los límites de las emisiones evaporativas son equivalentes a los estándares europeos, los cuales son significativamente más débiles que las normas Tier 2;⁵ y (3) los requisitos de durabilidad se limitan a 80 000 km en lugar de 190 000 km.

Aunque las emisiones se reducirán en todos los vehículos que utilicen combustibles con bajo contenido de azufre, ninguna de las opciones para el Estándar C exige realmente que el diésel o la gasolina ultrabajos en azufre cumplan con los límites de emisiones ni posibilita alguna tecnología necesaria para cumplir con esos límites. Dados los retrasos en la implementación de las normas sobre la calidad del combustible, no se esperaría un cumplimiento total del Estándar C antes de 2020. A pesar de que menos del 2 % de los vehículos nuevos son diésel, la norma exige que se cumplan los límites de contenido de azufre tanto en gasolina como en diésel para establecer la aplicación del Estándar C.

Comparación con las mejores prácticas

Vehículos pesados

La Figura 2 muestra el cronograma de la actualización de la NOM-044 recientemente publicada junto con los cronogramas de adopción de las normas en la Unión Europea y los Estados Unidos. Si bien en México las normas se alinean con las mejores prácticas globales, su implementación se ha retrasado entre 7 y 11 años en comparación con la Unión Europea y los Estados Unidos.

El escenario de control de emisiones de este análisis se basó en la propuesta original de la NOM-044, que estableció un camino directo hacia las normativas U.S.2010 / Euro VI en 2018, sin pasos intermedios. Si bien el cronograma de 2021 reduciría los beneficios esperados para 2035, los programas adicionales para acelerar la renovación de la flota podrían compensar el retraso.

Vehículos livianos

Aunque las normas para los LDV también están muy por detrás de la Unión Europea y Estados Unidos, como lo muestra la Figura 3, no se ha publicado ninguna propuesta de modificación a la NOM-042, ni se ha iniciado ningún grupo de trabajo oficial.

A pesar de que no hubo una propuesta oficial por parte del gobierno que enmarcara nuestro análisis, este estudio basado en el cronograma original de la NOM-EM-005 para combustibles modeló una ruta razonable y alcanzable para lograr la armonización con el resto del norteamérica. En nuestro escenario de control de emisiones, México cumpliría con las normas de emisiones del tubo de escape Tier 2 / Euro 6, con requisitos de emisiones evaporativas basados en la normativa de los Estados Unidos (recuperación de vapor por reabastecimiento de combustible a bordo u *on-board refueling vapor recovery* (ORVR, por su sigla en inglés) a partir de 2018, seguido de una introducción gradual de las normas Tier 3.



Figura 2. Normas HDV en la Unión Europea, Estados Unidos y México

⁵ Las normas de emisiones de los Estados Unidos requieren el control de emisiones evaporativas durante el reabastecimiento de combustible, conocido como recuperación de vapor por reabastecimiento de combustible a bordo (ORVR), que también resulta en una evaporación mucho menor durante el uso del vehículo y mientras está estacionado.

Región	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Unión Europea		Euro	5a / b			Euro 6									
Estados Unidos		Tier 2							Tier 3						
México	Euro 3 / Tier 1+											Eur	o 4 / Tie	er 1+	

Figura 3. Normas LDV en la Unión Europea, Estados Unidos y México

Metodología

El ICCT coordinó este proyecto para determinar la calidad del aire y los beneficios para la salud en México derivados de la mejora de las normas nacionales de emisiones y combustibles para vehículos de carretera.

El análisis implicó los siguientes pasos:

- El ICCT definió un escenario de referencia (Base) y un escenario de control de emisiones (Control). El análisis se extiende hasta 2035, año en el que se espera que la mayoría de la flota vehicular en circulación cumpla con normas mejoradas (ERG, 2016b).
- 2. El ERG ejecutó estos escenarios utilizando el MOVES-México (ERG, 2016a), el cual brindó estimaciones detalladas para los escenarios base y control. También se completaron corridas del modelo menos detalladas para varios casos alternativos con el fin de comprender el impacto de cada paso de la política y considerar enfoques de política alternativos.
- Los investigadores de la UT utilizaron el modelo CMAQ para pronosticar las concentraciones de contaminación del aire resultantes en los escenarios base y de control a nivel municipio para 2035.
- 4. Finalmente, el INECC y el ICCT utilizaron el modelo BenMAP de la EPA para estimar la reducción del número de muertes prematuras atribuibles a la contaminación por PM_{2.5} y ozono en el escenario control y calcular los beneficios económicos en ese año.

ESCENARIOS

El ICCT definió dos principales escenarios de modelación. El caso base se determinó por el status quo de 2015, y el caso control supuso la adopción y la implementación de normas basadas en las mejores prácticas para combustibles y vehículos. Además, el ICCT definió escenarios de sensibilidad para evaluar los efectos de programas de inspección y mantenimiento (I/M) más robustos a nivel nacional, y normas menos estrictas para LDV y gasolina.

La Tabla 2 resume las principales características y los supuestos de los escenarios analizados, que se describen con mayor detalle a continuación.

Caso base

El escenario del caso base modeló el *statu quo* de la calidad del combustible previamente a la promulgación de la NOM-EM-005. El diésel ultrabajo en azufre (15 ppm) y la gasolina con bajo contenido de azufre (30 ppm) estaban disponibles en regiones prioritarias (la frontera norte y áreas metropolitanas). La disponibilidad de gasolina con bajo contenido de azufre fuera de las áreas metropolitanas se restringió al 15 %, y el 85 % restante contenía hasta 300 ppm de azufre. El único diésel considerado

disponible fuera de los estados de la frontera norte y las áreas metropolitanas era de 500 ppm de azufre.

Para el caso base, las normas regulatorias para los LDV (NOM-042) y los HDV (NOM-044 y NOM-76) se mantuvieron sin cambios a lo largo de la duración del análisis. En cuanto a las emisiones de escape de los LDV, el caso base, apoyándose en el análisis de los datos medidos en México sobre emisiones en carretera mediante los sensores remotos, considera el sobre cumplimiento de la NOM-042 debido a las ventas de vehículos certificados bajo normas más estrictas en Estados Unidos y Europa. Se pueden encontrar más detalles en ERG (2016b).

Caso control

El escenario de control de emisiones se definió por medio de la implementación de las normas de las mejores prácticas, caracterizadas por el compromiso del presidente de la república en la Cumbre de Líderes de América del Norte (NALS) en junio de 2016. Este escenario fue respaldado tanto con las propuestas de políticas vigentes y las discusiones de políticas con la SEMARNAT y la CRE, como con las opiniones de expertos sobre el cronograma de implementación más ambicioso pero factible.

Tabla 2. Descripción de los escenarios base, de control y alternativos para el contenido de azufre de los combustibles y las normas de emisión para los vehículos

Combustibles/ Vehículos	Caso base	Caso control	Casos alternativos
Azufre en gasolina	Áreas metropolitanas: • 30 ppm Resto del país: • 85 % 300 ppm • 15 % 30 ppm	2016: • 150 ppm 2017-2019: • 30 ppm 2020+: • 10 ppm	La gasolina y LDV permanecen sin cambios después de 2018: La gasolina permanece en 30 ppm Los LDV permanecen en U.S. Tier 2
Vehículos livianos	PM ₂₅ : • U.S. Tier 1 NO _x : • U.S. Tier 2 bin 7	2018—2020: • U.S. Tier 2 / Euro 6+ORVR 2021: • U.S. Tier 3 implementación completa en 2025	2. Caso base con I/M
Azufre en diésel	Áreas metropolitanas y frontera norte: • 15 ppm Resto del país: • 500 ppm	2016-2017: • 500 ppm 2018-2019: • 15 ppm 2020+: • 10 ppm	
Vehículos pesados	A nivel nacional: • U.S. 2004/Euro IV	2018+: • U.S. 2010/Euro VI	

El escenario de control de emisiones supuso el cumplimiento completo de 30 ppm de azufre para la gasolina en 2017, y de 15 ppm de azufre para diésel en 2018. A este escenario se añadió un paso adicional para los combustibles con contenido de azufre de 10 ppm en 2020.

Para los LDV el escenario cambió hacia un enfoque regulatorio bajo las normas estadounidenses⁶ que se orientaron al cumplimiento completo de U.S. Tier 2 / Euro 6 con la adición de los requisitos de ORVR de Estados Unidos para el control de las emisiones evaporativas en 2018. Las normas U.S. Tier 3 se implementarán gradualmente a partir de 2021, para alcanzar en 2025 una completa armonización con las normas estadounidenses para el promedio de la flota. Para los HDV el escenario siguió la propuesta de la SEMARNAT de 2014 sobre la modificación de la NOM-044, con la implementación de las normas Euro VI / U.S. 2010 en 2018.

Casos alternativos

Para evaluar el efecto de controles específicos en el resultado general, las emisiones en los casos alternativos se modelaron a un nivel nacional agregado. Cada caso alternativo se investigó por separado, lo cual permitió evaluar los beneficios relativos de (1) la importancia del paso final para la regulación de los LDV, lo que incluye el contenido promedio de azufre de 10 ppm en gasolina y los vehículos Tier 3; (2) la importancia relativa de los programas de inspección y mantenimiento, en comparación con las normas para combustible y vehículos nuevos; y (3) la importancia de la inspección y el mantenimiento una vez que se establecieron normas estrictas.

Para distinguir los efectos de las normas Tier 2 y Tier 3, junto con la gasolina con contenido de azufre de 30 ppm y 10 ppm, se incluyó una versión relajada del escenario de control para lograr distinguir los beneficios asociados a cada fase de las normas para los LDV. Para este fin, las normas que regulan el azufre en la gasolina no se mejoraron más allá de 30 ppm, eliminando así el paso adicional a 10 ppm de azufre en gasolinas. Las normas de emisiones evaporativas y de escape para automóviles y camiones de carga ligera tampoco se mejoraron por encima de la U.S. Tier 2 / Euro 6+ORVR, lo que excluye cualquier avance regulatorio más allá de 2018.

Para describir los efectos potenciales de un programa nacional de I/M para ambos escenarios principales, todas las tasas de deterioro se configuraron para que cumplieran con los grados más bajos que pueden encontrarse en los Estados Unidos.

MODELADO DE EMISIONES DE VEHÍCULOS

ERG había adaptado previamente el simulador U.S. EPA MOVES para cumplir con las condiciones de México, y desarrolló el MOVES-México (ERG, 2016a). MOVES considera los tipos de vehículos y combustibles, carreteras, contaminantes, regiones geográficas y procesos de operación de los vehículos, y se puede ejecutar a nivel nacional o con un alcance más pequeño a nivel municipal o por proyecto (U.S. EPA, 2015). Las bases de datos que por defecto construyó el ERG para el MOVES-México incluyeron datos sobre flota y actividad vehicular, distribución de la población de vehículos por municipio, datos sobre condiciones meteorológicas locales, especificaciones de combustible y programas de I/M (ERG, 2016a, 2016b).

El caso base utilizó la configuración predeterminada elaborada para el MOVES-México, mientras que el caso control requirió modificaciones adicionales de varias entradas. El modelo se corrió a nivel municipal para respaldar el modelado fotoquímico de la calidad del aire, y a nivel nacional agregado para evaluar las reducciones generales de las

⁶ Las normas para vehículos livianos en Estados Unidos. representan actualmente las mejores prácticas mundiales. Los límites de emisión U.S. Tier 3 son notablemente más estrictos que las normas Euro 6 y se espera que resulten, en el mundo real, en emisiones significativamente más bajas tanto de NO_{χ} para los vehículos diésel como evaporativas de hidrocarburos para los vehículos de gasolina.

emisiones y los casos alternativos. Esto también ayudó a reducir el tiempo de cómputo de cada corrida de los distintos escenarios.

A partir del MOVES-México, el ERG obtuvo una base de datos específica para México con tasas de emisión por tipo de vehículo, clase regulada, tipo de combustible, año del modelo y modo de operación. En México, los datos del sensor remoto (RSD) se utilizaron para calibrar los factores de emisión de los óxidos de nitrógeno (NO $_{\rm X}$), el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos de escape (HC) de los LDV, lo cual permite que las emisiones reflejen de manera más aproximada las condiciones de funcionamiento del mundo real en México. Los datos del RSD mostraron que en México las emisiones se deterioran a un ritmo mayor que en los Estados Unidos, posiblemente como resultado de los combustibles con alto contenido de azufre (que reducen la efectividad de los convertidores catalíticos), y de programas y prácticas de I/M deficientes. Para modelar mejor las condiciones del mundo real, tanto el caso base como el control supusieron tasas de deterioro más altas para las emisiones de los LDV en México en comparación con los valores de referencia y las tasas de deterioro de Estados Unidos. Las tasas varían en función de si un área determinada cuenta con programa I/M, lo que genera tasas de emisión geográficamente específicas.

Los datos del RSD también mostraron que muchos vehículos más nuevos cumplen con creces los límites de la NOM-042, dado que están certificados con estándares más estrictos. Otras tasas de emisión por clases de vehículos o contaminantes, en donde no se disponía de datos directos, se actualizaron al mapear tecnologías de Estados Unidos con tecnologías de México por año del modelo, y se ajustaron con base en la implementación de las normas NOM-042, NOM-044 y NOM-076 (tabla 2).

El MOVES-México considera dos tipos de emisiones:

- » Emisiones de escape, resultantes de la quema del combustible durante la operación del vehículo. Estas se modelaron tomando como base las relaciones entre las normas de Estados Unidos y de México.
- » Emisiones evaporativas, que ocurren cuando los vapores escapan del sistema de combustible del vehículo, y pueden resultar en fugas o filtraciones (permeabilidad) del combustible a través del tanque y de las líneas del combustible. Las emisiones evaporativas pueden ocurrir a través de diferentes procesos, como vapores liberados durante la recarga de combustible, al estar estacionado (emisiones en reposo con motor frío o cold soak) o durante la operación del vehículo (pérdida durante la marcha o running loss), o inmediatamente después del apagado del motor (emisiones en reposo con motor caliente o hot soak). En el proceso de modelado, todas las tasas de emisión por evaporación se adoptaron de las normas estadounidenses correspondientes y se mapearon a años en el MOVES-México. Debido a los controles de evaporación menos estrictos de la NOM-042, se utilizaron las normas "premejoradas" de Estados Unidos, en el caso base desde el año-modelo (MY, por su sigla en inglés) 1978 en adelante. Para el caso control, se implementó U.S. Tier 2 desde el MY 2018-2024 y U.S. Tier 3 del MY 2025 en adelante.

Para respaldar la resolución espacial y temporal detallada requerida para la modelación fotoquímica de la calidad del aire, el MOVES-México ejecutó los casos base y control para los 2457 municipios de México, para los días típicos de la semana y los fines de semana de cada mes del año. El caso base se ejecutó para 2008 y 2035, mientras que el escenario de control se ejecutó para 2035. Se necesita aproximadamente un año de tiempo de cómputo para desarrollar este grado de

detalle; por lo tanto, el modelo se ejecutó con una configuración de computación en nube establecida por ERG, lo cual redujo considerablemente el tiempo requerido para completar las ejecuciones del modelo.

Para entender cómo los casos base, control y alternativos afectarán a las emisiones totales, el modelo también se ejecutó a nivel agregado nacional y anual, en el que todas las entradas se redujeron a promedios nacionales únicos. Las emisiones nacionales se calcularon en 2008 y en intervalos de 5 años entre 2015 y 2035, con un pronóstico adicional a largo plazo en 2050.

Se consideraron cerca de 160 contaminantes para las modelaciones de la calidad del aire, mientras que para las corridas del modelo a nivel nacional solo se reportaron COV, CO, $\mathrm{NO_x}$ y $\mathrm{PM_{2.5}}$. Agregar datos sobre emisiones a nivel nacional permite esencialmente conocer los efectos relativos de los diferentes escenarios regulatorios. Los datos a nivel municipal se destinaron a modelar la calidad del aire con un alto nivel de detalle geográfico.

MODELADO DE LA CALIDAD DEL AIRE

La UT utilizó el modelo CMAQ de código abierto, desarrollado y mantenido por la EPA, para estimar los impactos de los casos base y control sobre la calidad del aire.

El primer paso fue ejecutar el modelo CMAQ comparando los resultados con un año de modelación en el que estuvieran disponibles datos de observación. Se utilizó la modelación del caso base de 2008 para completar este paso. Los investigadores de la UT utilizaron su propio algoritmo de reordenamiento para asignar emisiones de vehículos en cada municipio a una cuadrícula con una resolución de celdas de 50 km x 50 km. Para el año 2008, las emisiones no relacionadas con el tráfico tomaron como referencia la Base de Datos de la Comisión Europea para la Investigación Atmosférica Mundial (EDGAR, por su sigla en inglés). Para el año 2035, las emisiones no provenientes de vehículos surgieron del escenario base del proyecto de modelación Evaluación de los Impactos de los Contaminantes de Vida Corta sobre el Clima y la Calidad del Aire (ECLIPSE, por su sigla en inglés). El Modelo de Emisiones de Gases y Aerosoles de la Naturaleza (MEGAN, por su sigla en inglés) suministró las emisiones biogénicas. El Modelo de Pronóstico para la Investigación Meteorológica (WRF, por su sigla en inglés) se utilizó para contrastar los datos de observación de los principales parámetros meteorológicos a fin de desarrollar opciones físicas optimizadas para simulaciones meteorológicas en México. Además, los resultados del CMAQ se compararon con las mediciones locales de ozono y PM₂₅ en 2008 para garantizar que estuvieran dentro de los objetivos del modelo de referencia. Las emisiones no relacionadas con el tráfico se mantuvieron constantes en cada escenario modelado.

El proceso de modelación de la calidad del aire se llevó a cabo con y sin emisiones de transporte para estimar los impactos debidos específicamente a las fuentes móviles. Se hicieron varias pruebas de sensibilidad para ver cómo cambiaban las concentraciones de $PM_{2.5}$ y ozono como resultado de un mayor o menor control de cada contaminante individual. Mediante un enfoque simplificado para modelar las concentraciones a nivel nacional, las corridas se realizaron con reducción de emisiones solo para las normas de vehículos livianos o pesados y suponiendo un control total en las emisiones para todos los demás contaminantes, mientras que cada contaminante individual se mantuvo constante en los niveles del caso base.

ESTIMACIÓN DE LOS IMPACTOS EN LA SALUD

El INECC y el ICCT llevaron a cabo la estimación de los beneficios para la salud del escenario de control utilizando la herramienta BenMAP de la EPA (U.S. EPA, 2017) a nivel municipal, que evaluó el número de muertes relacionadas con los cambios en la calidad del aire según las concentraciones de ozono y PM_{2.5}.

La cuadrícula de salida del CMAQ con las concentraciones de contaminantes atmosféricos se ingresó al BenMAP para determinar el impacto en la salud en cada municipio. Para realizar esta evaluación se requiere información demográfica a nivel municipal.

El INECC utilizó las estimaciones anuales de población del Consejo Nacional de Población (CONAPO) para proyectar la población a nivel municipal en 2035 para los grupos de edad 0-14, 15-64 y ≥65 años. Utilizando la tasa de cambio de estos grupos durante el periodo de años evaluado, se determinó la población afectada para los grupos de edad >30 años y <1 año.

Las tasas de incidencia de enfermedades a nivel municipal se obtuvieron del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el año 2014, el año más reciente disponible. Estas se proyectaron para 2035 por medio de la tasa histórica promedio de cambio de los datos publicados por el INEGI en los últimos 16 años. Para aquellos municipios que no contaban con información, se utilizó un promedio de la incidencia de enfermedades de todos los municipios para completar los valores faltantes que de otro modo llevarían a una subestimación de los resultados.

Se aplicaron parámetros de riesgo relativo de la función del impacto en la salud para todo el país y se consideraron las siguientes enfermedades: respiratorias (J00-J99), cardiovasculares (110-199) y cáncer pulmonar (C33-C34). El riesgo relativo de esas enfermedades se obtuvo de estudios estadounidenses, que incluyen a Krewski (2009), para la mortalidad cardiovascular relacionada con $PM_{2.5}$ en adultos; Woodruff, Grillo y Schoendorf (1997), para la mortalidad respiratoria infantil relacionada con $PM_{2.5}$; y Jerrett et al. (2009), para la mortalidad respiratoria en adultos relacionada con ozono. Un enfoque de dos contaminantes permitió que se tratara por separado el impacto de cada contaminante (Anenberg, 2017).

En el caso del ozono, se utilizó la producción diaria máxima de ozono de una hora del CMAQ para calcular un valor promedio de 6 meses. Los meses considerados fueron de marzo a agosto, la temporada de ozono en México. El enfoque ayuda a reducir la variabilidad dentro de los meses y brinda una mejor estimación de la temporada de ozono (Anenberg, 2017; Jerrett et al., 2009).

Monetización de los beneficios para la salud

Una vez que el BenMAP arrojó los resultados sobre mortalidad de los escenarios primarios, la monetización de los beneficios para la salud se calculó utilizando el valor de una vida estadística (*value of a statistical life*, VSL) y un enfoque de "transferencia de beneficios". Esta metodología se ha aplicado en otros estudios del ICCT para México, y remitimos a estos documentos para obtener mayores detalles (ver Miller, Blumberg y Sharpe [2014] y Minjares et al. [2014]).

El VSL refleja el valor económico para la sociedad o la disposición de cada individuo a pagar por reducir la incidencia estadística de la mortalidad prematura (He y Wang, 2010). Por lo tanto, el valor VSL de 2035 calculado para este estudio es de 3.9 millones de dólares (2010 USD). Finalmente, para descontar los beneficios al año corriente, 2017, se utilizó una tasa del 3 %.

Resultados

REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE ESCAPE

Impacto de las emisiones sectoriales

Las proyecciones para las emisiones que se muestran en esta sección solamente consideran el transporte por carretera, dejando a un lado otras fuentes importantes de contaminación, como las embarcaciones, que tienen un enorme impacto, especialmente en las emisiones de PM_{25}^{-7}

En el año 2035, el sector del transporte por carretera contribuirá con más de la mitad de las emisiones de NO_x , COV y CO en el caso base. Las contribuciones del transporte también representan más de un tercio del carbono negro (BC, por su sigla en inglés) y el 20 % de las partículas finas primarias (ver Figura 4).

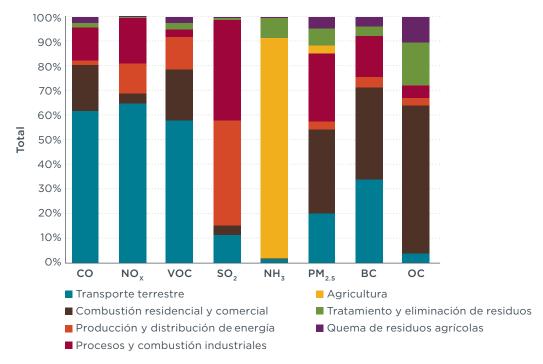


Figura 4. Emisiones sectoriales en 2035 por contaminante en el caso base

En el caso control, la participación del sector del transporte al total de emisiones se reduce significativamente: sus contribuciones de CO, NO_x y COV por debajo del 50 %. La porción de $PM_{2.5}$ y partículas de BC del transporte se reducen drásticamente, un beneficio de la tecnología del filtro de partículas de diésel (Figura 5).

La Figura 6 muestra el grado de reducción de las emisiones alcanzado por medio del caso control, en términos tanto del impacto en el sector del transporte en general como en todos los sectores.

⁷ De acuerdo con el Inventario Marino Nacional de 2013, los barcos a una distancia de 200 millas náuticas de la costa mexicana representan más del doble del total de PM_{2.5} de fuentes móviles en México (Corbert, Comer y Silberman, 2014).

Resultados de emisiones por contaminante

Los resultados de las modelaciones del MOVES-México muestran una reducción de las emisiones del transporte en cada clase de contaminante para cada escenario modelado. Las siguientes gráficas muestran la contribución de cada medida incluida en la Tabla 2 a las reducciones de emisiones del sector transporte en el caso control.

Óxidos de nitrógeno

Los NO_{χ} , que incluyen tanto el óxido de nitrógeno (NO) como el dióxido de nitrógeno (NO_2), funcionan como precursores de la formación de contaminantes en la atmósfera, esenciales para la producción de ozono y también eficaces precursores secundarios de PM. El NO_2 es también un irritante respiratorio directo (Gamble, Jones y Minshall, 1987).

La Figura 7 muestra que las reducciones potenciales de las emisiones de NO_{x} se dividen de manera bastante uniforme entre las normas para los HDV y los LDV. Los casos alternativos demuestran que los programas de I/M mejorados podrían tener un impacto a corto plazo en las emisiones, mientras que las normas para vehículos nuevos duplicarían con creces el potencial a corto plazo y son necesarias para permitir reducciones a largo plazo.

La evidencia de los principales mercados de vehículos diésel alrededor del mundo, incluido México, muestra que las emisiones de $\mathrm{NO_X}$ de los vehículos diésel en el mundo real son, en la mayoría de los casos, significativamente más altas que los límites de certificación (Anenberg et al., 2017). Solo las normas Euro VI y U.S. 2010 resuelven en gran medida este problema para los HDV, lo que hace más importante acelerar la implementación de nuevas normas vehiculares para controlar estas emisiones. Para los LDV únicamente las normas Tier 3 ofrecen una solución. El MOVES-México probablemente subestima el bajo cumplimiento de la flota actual de los HDV, lo cual sugiere que las reducciones estimadas de $\mathrm{NO_X}$ asociadas con el caso control pueden ser conservadoras.

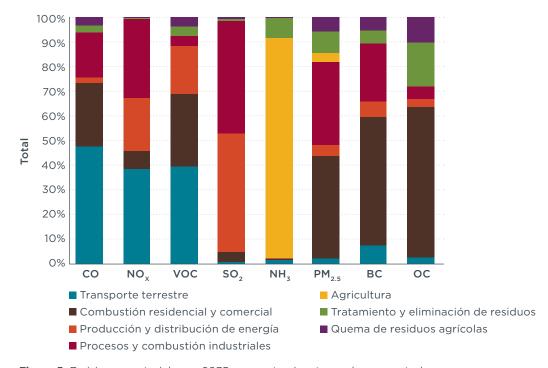


Figura 5. Emisiones sectoriales en 2035 por contaminante en el caso control

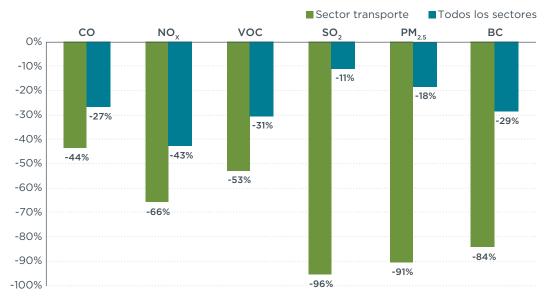


Figura 6. Reducciones de emisiones en el caso control en 2035 solo para transporte y para todos los sectores

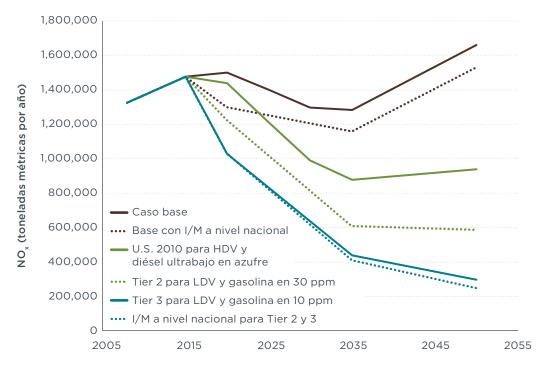


Figura 7. Emisiones de NO_x en diversos escenarios regulatorios

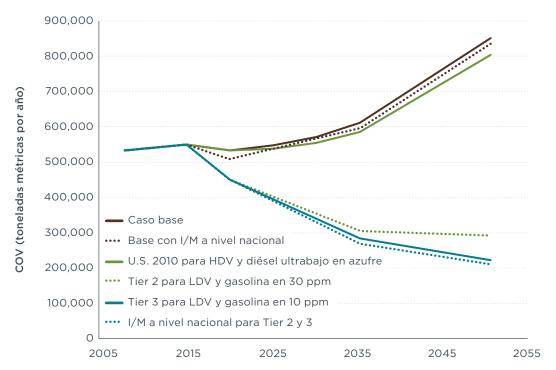


Figura 8. Emisiones de COV en diversos escenarios regulatorios

Los casos alternativos muestran que la adecuación de las normas para LDV y para gasolina U.S. Tier 2 es responsable de aproximadamente el 30 % del potencial de reducción total en 2035. Al considerar las emisiones de 2020, en la Figura 7, se vuelve aparente que la reducción del azufre en el combustible un poco más hacia niveles de 10 ppm, proporcionaría una reducción inmediata y adicional del 10 % del NO $_{\chi}$ en la flota existente, dado que las normas mejoradas tendrían un impacto insignificante en esos primeros años (ERG, 2016b). Las normas Tier 3 más el combustible con azufre en 10 ppm representan el 20 % del potencial de reducción y son la única manera de continuar con la disminución de las emisiones de NO $_{\chi}$ a largo plazo, dado el crecimiento continuo de la flota.

Compuestos orgánicos volátiles

Como resultado principalmente de las emisiones evaporativas y la combustión incompleta en los vehículos de gasolina, los COV incluyen varias especies diferentes de hidrocarburos, muchos de los cuales son tóxicos o cancerígenos. Los COV son precursores esenciales del ozono y son especialmente críticos en algunas de las principales ciudades de México, donde la producción de ozono puede verse limitada por la cantidad de COV disponible. Los COV también pueden funcionar como precursores de partículas secundarias, pero parece que son significativamente menos importantes que el NO_x como precursor, y dependen de la disponibilidad atmosférica de las otras especies de contaminantes, así como de las condiciones climáticas y meteorológicas.

Las normas para los LDV y para la gasolina fueron responsables de la mayor parte de la reducción de los COV, los cuales se espera que se incrementen de manera significativa en ausencia de mejores normas. Las normas Tier 3 fueron menos decisivas para este contaminante que para el NO_{X} , pero son necesarias para reducir las emisiones a largo plazo (Figura 8). No se modelaron cambios para la RVP, aunque límites más altos de RVP y un incumplimiento de las normas para RVP podrían incrementar sustancialmente las emisiones de COV (Kirchstetter, Singer, Harley, Kendall y Traverse, 1999).

Los casos alternativos muestran que Tier 3 y la gasolina con contenido de azufre de 10 ppm no producirán beneficios significativos a corto plazo en comparación con Tier 2 y la gasolina con contenido de azufre en 30 ppm, lo anterior como resultado de los controles avanzados para las emisiones evaporativas adoptadas en esta etapa. Los primeros programas de I/M adoptados muestran cierto impacto a corto plazo, pero no se espera que resulten en una reducción significativa de las emisiones de COV con el tiempo.

Material particulado fino

El material particulado fino incluye todas las partículas de 2.5 micrómetros de diámetro o más pequeñas. Los vehículos diésel son la fuente principal de emisiones de partículas primarias relacionadas con el transporte. Si bien el modelo MOVES-México solo captura las emisiones de partículas primarias, el $\rm PM_{2.5}$ también se puede formar en la atmósfera a partir de emisiones precursoras, como son los $\rm NO_{\chi}$, óxidos de azufre (SO_{\chi}) y COV. La formación de partículas secundarias es capturada en el proceso de modelado del CMAQ. El $\rm PM_{2.5}$ está asociado con una serie de impactos sobre la salud que van desde enfermedades pulmonares y cardiovasculares hasta bronquitis crónica y muerte prematura (Blumberg, Walsh y Pera, 2003).

El caso control demuestra que las emisiones primarias de $PM_{2.5}$ pueden reducirse en más del 90 % a partir de las normas de emisiones de los HDV y los combustibles (Figura 9). El diésel ultrabajo en azufre permite la adopción de tecnologías más limpias, especialmente los filtros de partículas para diésel (DPF, por su sigla en inglés), los cuales reducen drásticamente las emisiones primarias de $PM_{2.5}$. Aunque no se espera que se reduzcan las emisiones de partículas primarias de los LDV y los combustibles, estos vehículos y combustibles más limpios tendrán un impacto importante sobre el material particulado secundario, aproximadamente el 44 % de las reducciones totales de $PM_{2.5}$ en este estudio.

Monóxido de carbono

El monóxido de carbono altera la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, y en concentraciones elevadas es peligroso para las personas con enfermedades cardiovasculares (Blumberg, Walsh y Pera, 2003). Cabe señalar que a pesar del tamaño relativo de la reducción alcanzable de las emisiones de CO, en México este contaminante ya no es una fuente principal de contaminación relevante para la salud, y por lo tanto su reducción es una preocupación secundaria (INECC, 2015). Las emisiones de CO observadas en la Figura 10 muestran tendencias similares a las de otros contaminantes, con una reducción del 41 % en el caso control para 2035. Para este contaminante, las normas sobre los LDV y el azufre fueron en conjunto responsables de la mayoría de las mejoras.

La Figura 11 muestra la proporción del potencial de reducción de los LDV y HDV. Las reducciones de CO y COV se atribuyen principalmente a las mejoras en las tecnologías de los vehículos para pasajeros y al uso de gasolina con bajo contenido de azufre. Las disminuciones de $PM_{2.5}$ se atribuyen casi en su totalidad al uso de diésel ultrabajo en azufre y a las normas de emisiones que exigen los DPF para los HDV. El potencial de reducción de las emisiones NO_x se divide casi uniformemente entre los LDV y los HDV.

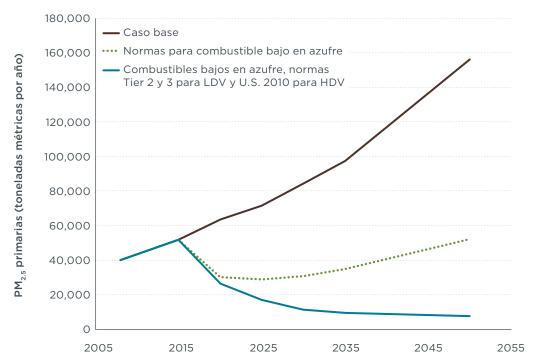


Figura 9. Emisiones de PM₂₅ en diversos escenarios regulatorios

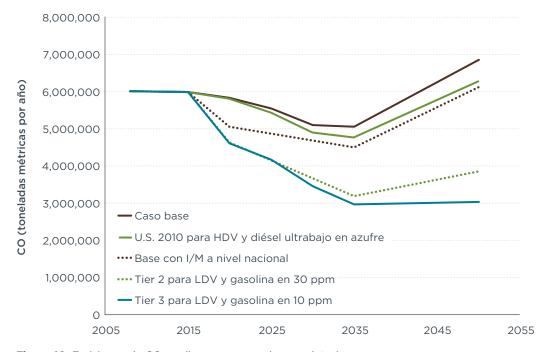


Figura 10. Emisiones de CO en diversos escenarios regulatorios

IMPACTOS EN LA CALIDAD DEL AIRE

La reducción sustancial de las emisiones primarias y precursoras da como resultado una disminución significativa en las concentraciones atmosféricas de ozono y de material particulado, los dos contaminantes más preocupantes.

La exposición al ozono está asociada con una serie de efectos sobre la salud a corto y largo plazo, incluidos problemas respiratorios, enfermedades cardiopulmonares y cardiovasculares y muerte prematura (Turner et al., 2016). El material particulado también incrementa el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares y pulmonares y el riesgo de muerte prematura, así como un aumento en los riesgos de morbilidad respiratoria infantil, de cáncer de pulmón y de mortalidad (Pope y Dockery, 2006).

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ se redujeron en un 18 % a nivel nacional y un 20 % en el área de la Ciudad de México, con una disminución de hasta 28 % en los meses de invierno, cuando las concentraciones son más altas. El modelado del CMAQ sugiere que el 44 % de la reducción de las emisiones de $PM_{2.5}$ se debió a que disminuyó la formación de partículas secundarias, aunque parece que el CMAQ subestima la formación de partículas secundarias, en algunos casos de manera bastante significativa (Park et al., 2006).

Las concentraciones de ozono también se redujeron en diferentes medidas con respecto a valores máximos en 8 horas, 1 hora, y 1 hora en primavera. Las concentraciones de ozono son más altas en primavera y a principios del verano, antes de que comience la temporada de lluvias. Si se considera solo esta época, los picos de ozono en 1 hora se redujeron en un 12 % en todo el país y un 14 % en la Ciudad de México. La Tabla 3 muestra las reducciones de ozono y partículas finas provenientes del escenario control.

Los mapas de las Figuras 12 y 13 muestran la ubicación de los beneficios de la calidad del aire e ilustran que las mayores reducciones (escenario base menos control) para ambos contaminantes se encuentran en las regiones con más alta concentración poblacional, típicamente las áreas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y la Ciudad de México. En estas figuras, el color rojo más oscuro muestra el mayor grado de reducción de la contaminación del aire entre los escenarios de base y de control.

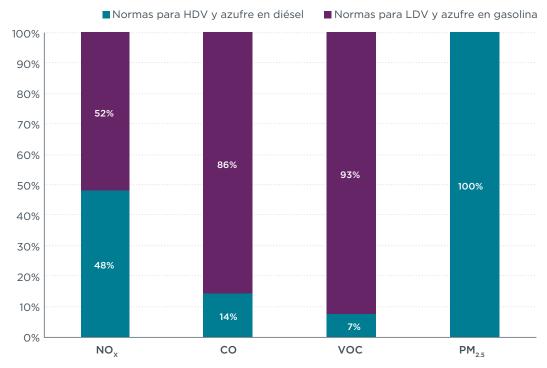


Figura 11. Contribución a la reducción de emisiones en 2035 bajo el caso control

Tabla 3. Reducciones ponderadas por población en las concentraciones de material particulado y ozono

Indicador de calidad del aire (ponderado por población)	Nivel nacional	Ciudad de México
Promedio anual de PM _{2.5}	-18 %	-20 %
Ozono máximo en 8 horas	-8 %	-5 %
Ozono máximo en 1 hora (promedio en primavera)	-12 %	-14 %

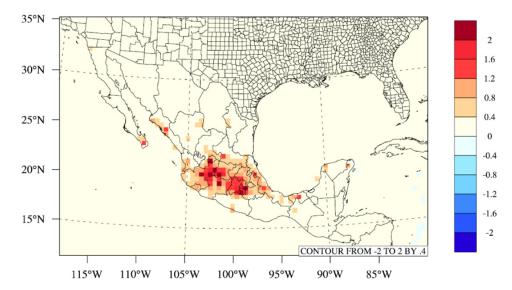


Figura 12. Reducción a nivel nacional del promedio anual de PM₂₅ (μg/m³)

A partir de estas figuras es evidente que la región central desempeña un papel importante en la definición de medidas políticas claves para reducir ambos contaminantes. Esta región central incluye la Megalópolis –una región con 35 millones de habitantes– la cual comprendía seis estados: México, Hidalgo, Puebla, Morelos, Tlaxcala y la Ciudad de México. Recientemente se ha añadido Querétaro. La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAMe) trabaja de manera conjunta con los seis gobiernos para mejorar la calidad del aire en la región, donde no se cumplen las normas para ozono y PM_{2.5}. En el programa sobre la calidad del aire recientemente publicado (ProAire), la CAMe reconoce el impacto del sector transporte en las emisiones locales y propone el desarrollo de un plan de reducción de emisiones para los LDV y los HDV (SEMARNAT, 2017). Otras regiones urbanas importantes que requieren atención urgente son Guadalajara y Monterrey, especialmente sobre la formación de ozono.

El escenario de control da como resultado reducciones significativas de las concentraciones pico de ozono en 1 hora en primavera -12 % a nivel nacional y 14 % en la región metropolitana de la Ciudad de México, y una caída aún más drástica en las concentraciones de partículas finas- 18 % en el promedio nacional y 20 % en la región metropolitana de la Ciudad de México.

IMPACTOS EN LA SALUD

Este estudio encontró que en el año 2035 podrían evitarse aproximadamente 9000 muertes. Por lo general, nos gusta considerar los impactos de las normas vehiculares en un punto en el que la flota se habrá renovado por completo y casi todos los vehículos más antiguos habrán sido reemplazados por nuevas tecnologías. Debido a la larga vida

útil de muchos de los HDV y dado que las normas Tier 3 no se habrán implementado por completo en el escenario de control hasta 2025, este análisis no podrá dar cuenta por completo de los impactos del programa.

En el caso control, las reducciones en la concentración de ozono permitirían que se eviten unas 2000 muertes prematuras debido a enfermedades respiratorias. Las reducciones de la concentración de $\mathrm{PM}_{2.5}$ permitieron que se evitaran 7000 muertes prematuras, principalmente por enfermedades cardiovasculares en adultos y por problemas respiratorias en niños menores de un año de edad. En la Tabla 4 se encuentra un desglose detallado de la reducción de la mortalidad por contaminantes.

Las reducciones en concentración reflejan las regiones con mayor densidad poblacional en el país. En consecuencia, los impactos sobre la salud también siguen de cerca la densidad poblacional. El estado de México, el más poblado, fue la ubicación de aproximadamente una quinta parte de todas las muertes evitadas relacionadas con el ozono y una cuarta parte de todas las muertes evitadas relacionadas con PM en México.

Las distribuciones geográficas de la reducción de la mortalidad debida a cada contaminante se muestran en las figuras 14 y 15. Cada burbuja representa la mortalidad en cada estado por contaminante específico, y el tamaño de la burbuja refleja el número de muertes: entre más grande la burbuja, mayor será el número de muertes en ese estado en particular.

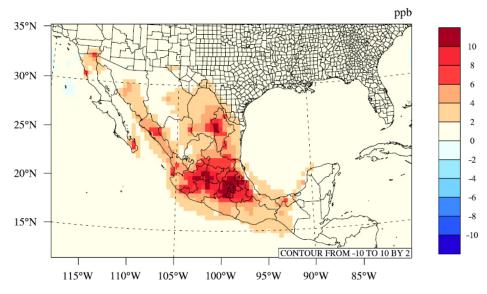


Figura 13. Reducción a nivel nacional de la media de ozono de 1 hora en primavera (ppb)

Tabla 4. Reducción de la mortalidad en el año 2035 por contaminante y tipo de vehículo, con valor monetario en 2017

Contaminante / Tipo de vehículo	HDV	LDV	Incremento de LDV Tier 3	Total	Proporción	Valoración 2017 (miles de millones 2010 USD)
Ozono	900	1100	400	2000	22 %	\$4.6
PM secundario	1400	1700	500	3100	34 %	\$7.2
PM primario	3900	0	0	3900	43%	\$9
PM total	5300	1700	500	7000	78 %	\$16.2
Total	6200	2800	900	9000	100 %	\$20.8
Proporción	69 %	31 %	10 %	100 %		
Valoración 2017 (miles de millones 2010 USD)	\$14.3	\$6.5	\$2.1	\$20.8		

Como se muestra en las figuras, las áreas con mayor densidad poblacional tienen tasas más altas de mortalidad; en ambos casos, el estado de México es la región con mayor población y mayor mortalidad.

Asignación a las normas de transporte consideradas

Para asignar los impactos sobre la calidad del aire y la salud a las diferentes políticas, utilizamos pruebas de sensibilidad dirigidas por el equipo de modelado del CMAQ. Estas pruebas sugirieron que la contribución del NO_x a la formación de partículas secundarias y ozono era mayor que la de cualquier otro contaminante. Los resultados mostraron que los COV tenían un mayor impacto en la producción de ozono en la región de la Ciudad de México, mientras que a nivel nacional la producción de ozono parecía estar en gran medida limitada al NO_x . El SO_x tiene claramente un impacto importante sobre la producción de partículas secundarias, pero debido a la cantidad mucho menor del contaminante primario reducido, no es tan importante como el NO_x . A causa de que la formación de ambos tipos de contaminantes en la atmósfera no es lineal, fue difícil cuantificar con precisión el impacto de cada contaminante.

Otros estudios sugieren que la producción tanto de ozono como de PM secundario a partir de sus precursores podría distribuirse de manera más uniforme entre los COV y el NO $_{\rm x}$ (como sugieren Song et al. [2010] y Hodan y Barnard [2004] para ozono y partículas secundarias, respectivamente). Sin embargo, las diferencias entre los valores ponderados obtenidos por medio de las corridas de sensibilidad y los resultantes de una ponderación uniforme al NO $_{\rm x}$ y a los COV no son tan grandes, con una variedad de factores de ponderación que llegan a conclusiones similares, principalmente como resultado de la distribución relativamente similar del potencial de reducción del NO $_{\rm x}$ para los LDV y los HDV y de la cantidad de reducción total de NO $_{\rm x}$ mucho mayor en comparación con los otros contaminantes.

El valor actual de los ahorros en salud por las reducciones de la mortalidad prematura del escenario de control en 2035 corresponde a \$20.8 mil millones de dólares (2010 USD). El desglose de las emisiones y los beneficios para la salud en 2035 se muestran en la Tabla 4, donde se resalta la contribución significativa de cada conjunto de normas a la ganancia total.

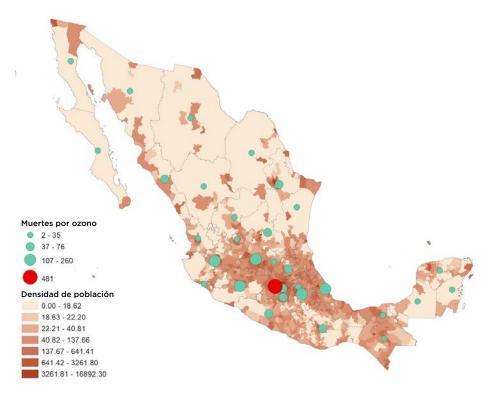


Figura 14. Distribución geográfica de las muertes evitadas en 2035 debido a la reducción de ozono

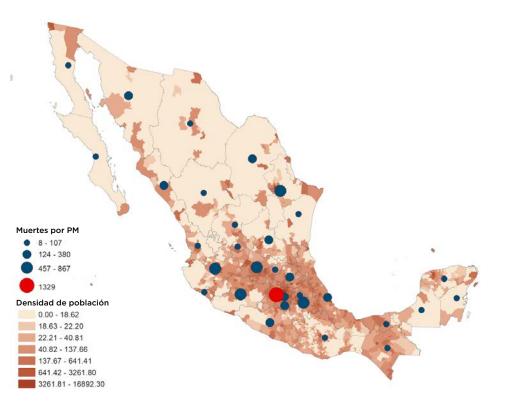


Figura 15. Distribución geográfica de las muertes evitadas en 2035 debido a las reducciones de PM_{25}

Incertidumbre y áreas de futuro estudio

Existen muchas áreas de incertidumbre en este análisis; las más importantes se discuten en este apartado. Aunque sin duda habrá una investigación más profunda sobre muchos temas, en general encontramos que la evaluación es conservadora, y que probablemente subestima los impactos de estas normas fundamentales.

Una forma crucial de subestimar los beneficios de estos escenarios de políticas sobre mejores prácticas (caso control) es que el estudio solo considera los beneficios para la salud debido a las reducciones de la mortalidad relacionadas con el ozono y las partículas finas en el año 2035. No se consideran los beneficios acumulados durante los años anteriores a las normas, ni los años futuros, ni los otros muchos beneficios relacionados con la salud y el bienestar, como las reducciones de los casos de asma, bronquitis crónica, enfermedades cardiopulmonares, la menor pérdida de días laborales y escolares, la menor duración de los resfriados, y otros impactos bien documentados, no necesariamente letales, de estos contaminantes.

Las metodologías y los modelos usados en este estudio se apegan a los últimos hallazgos; cada módulo de la evaluación tiene supuestos específicos y una incertidumbre asociada, como se indica a continuación:

- » En el caso del MOVES-México aún hay incertidumbres significativas sobre la cantidad de vehículos en la flota existente, la tasa de renovación de la flota, la reducción del deterioro de las emisiones disponible en México debido a la aplicación de nuevas normas para los vehículos, e incluso sobre los factores de emisión de los vehículos nuevos y existentes en el mundo real.
- » Para el modelado de la calidad del aire se utilizaron diferentes inventarios para los sectores distintos al transporte en 2008, el año en que se realizó la correlación del modelo, y en 2035. Ambos conjuntos de datos fueron el resultado de los esfuerzos realizados a nivel global, sin el detalle que hubiera estado disponible a partir de un sólido inventario local. Como resultado, al parecer las PM_{2.5}, el SO₂ y los NO_x fueron todos significativamente subestimados por el modelo, con las mayores diferencias observadas para PM_{2.5}. Las concentraciones de ozono se sobrestimaron un poco en el extremo inferior, dado que elegimos utilizar los impactos de los picos de ozono para estimar los impactos sobre la salud; esta sobrestimación no debería afectar a los resultados.
- » Para la modelación del impacto sobre la salud hubo algunos huecos en la información que debieron estimarse. Por ejemplo, las tasas de incidencia faltantes a nivel municipal se completaron con el promedio de todos los municipios, lo que redujo la subestimación contabilizada para los valores faltantes. La mortalidad por ozono parece ser más alta de lo esperado (en relación con el impacto general de la mortalidad); sin embargo, eso podría haber sido causado por beneficios para la salud relacionados con cantidades de PM más bajas de lo esperado debido a la subestimación de las concentraciones de PM del CMAQ.

La visualización de la Carga Mundial de Enfermedad (GBD, por su sigla en inglés) del Instituto para la Medición y Evaluación de la Salud (IHME, por su sigla en inglés) sugiere que la mortalidad total relacionada con el ozono en México en 2015 fue de 1859 defunciones, y la mortalidad relacionada con el PM, de 28 991 en el mismo año (IHME, 2016). En nuestros resultados, la mortalidad por ozono representa el 22 % del total de muertes evitadas; en el caso de las estimaciones del IHME, el ozono representa el 6 % de las muertes relacionadas con la calidad del aire. Como se sugirió anteriormente, esto

puede ser debido a una subestimación de las concentraciones de PM, pero también podría estar relacionado con el impacto más importante que tiene el transporte por carretera sobre los picos de ozono.

Nuestra mayor preocupación en la modelación, y el resultado que tendrá el mayor impacto en los hallazgos, es la subestimación significativa de las concentraciones de PM₂₅ a nivel nacional y local, con concentraciones promedio de una cuarta parte o la mitad de los niveles monitoreados de PM₂₅. Algunos estudios han sugerido que el CMAQ subestima significativamente la formación secundaria de partículas orgánicas en la atmósfera, especialmente la porción de partículas secundarias formadas a partir de los precursores de hidrocarburos orgánicos altamente volátiles que se encuentran en la gasolina (Von Stackelberg, Buonocore, Bhave y Schwartz, 2013). El anterior podría ser un factor significativo, especialmente en este estudio, pero también puede que haya huecos importantes en el inventario. Por ejemplo, nuestro inventario no toma en cuenta las emisiones marinas. De acuerdo con el Inventario Marino Nacional de 2013, los barcos dentro de las 200 millas náuticas de las costas mexicanas representan más del doble del total de emisiones de fuentes móviles de PM_{25} , así como el doble de emisiones de NO_{χ} en todo el sector (Corbert et al., 2014). Aunque no es seguro que en este estudio los aumentos del inventario también resulten en mayores impactos, es probable que hubiera algún incremento en la formación de partículas secundarias debido a grados más altos de contaminación general.

Finalmente, en este estudio no se consideraron los cambios adicionales en la calidad del combustible más allá del límite de azufre. Si bien otros cambios en las especificaciones del combustible podrían tener un impacto en las emisiones, en la calidad del aire y en los criterios de valoración de la salud, las concentraciones de azufre tienen el impacto general más elevado. No obstante, otras especificaciones para el combustible, como la RVP, merecen atención especial y deben ser estudiadas en las condiciones extremas de México (gran altitud y baja latitud) y con la flota existente de vehículos antiguos aún en circulación.

Conclusión

Los resultados de este detallado modelo de evaluación demuestran los enormes beneficios disponibles para México mediante la alineación con tres importantes normas para combustible y vehículos de carretera vigentes en el resto de Norteamérica. A pesar de que los desafíos para mantener la buena calidad del aire implícitos en la geografía y el tamaño de la Ciudad de México continuarán, estas normas reducirán los picos de ozono en un 14 %, lo que a su vez reducirá el número de contingencias que se activan por contaminación del aire y las restricciones que resultan. Además, disminuirán las concentraciones de PM_{2.5} en un 20 %, una enorme reducción de la contaminación más letal, pero a menudo invisible, en las áreas urbanas.

Las reducciones de las concentraciones de ozono y de $PM_{2.5}$ derivadas de la implementación de estas normas permitirán que México evite 9000 muertes prematuras tan solo en 2035. Este análisis no evaluó el número de muertes evitadas que continuarán acumulándose más allá de 2035 ni las que se acumulen hasta esa fecha. Este estudio tampoco pudo cuantificar otros beneficios para la salud; sin embargo, sabemos que el aire más limpio reducirá la aparición de episodios de asma, la bronquitis crónica, la gravedad y la duración de los resfriados, el costo que la enfermedad tiene en la productividad laboral y escolar, así como una serie de enfermedades cardiopulmonares y respiratorias más severas. La monetización de los beneficios evaluados en el año 2035

se traducen hoy en \$20.8 mil millones de dólares (2010 USD). Los beneficios totales de este conjunto de normas serían muchas veces mayores.

Las reducciones de las emisiones más importantes fueron las disminuciones directas de $PM_{2.5}$ a partir de las regulaciones que exigen DPF a los camiones diésel. Estos filtros casi eliminan las emisiones de partículas primarias y, en 2035, después de años de crecimiento de la flota, aunque con pocos de los camiones actuales aún en funcionamiento, la reducción de $PM_{2.5}$ en este sector sería del 91 %, lo que corresponde a una reducción del 18 % para toda la economía. También son cruciales para toda la actividad económica las reducciones del 30 %-40 % de NO_x y COV, en menor medida por sus impactos directos sobre la salud que por lo que pueden catalizar y convertir en la atmósfera. Los NO_x y los COV son los dos ingredientes necesarios (junto con la luz solar) para la producción de ozono, pero ambos también contribuyen a la producción de $PM_{2.5}$ secundario, partículas que se forman en la atmósfera y son catalizadas por la compleja mezcla de contaminantes que ya existe.

 ${\rm El\,SO}_2$ también forma partículas secundarias en la atmósfera, aunque el resultado más importante de la reducción de azufre en el combustible es la disminución de otros contaminantes. El diésel con bajo contenido de azufre reduce las emisiones de partículas primarias de todos los vehículos que lo utilizan, incluso los vehículos más antiguos y contaminantes de carretera, a la vez que permite el uso de filtros para virtualmente eliminar estas partículas en los vehículos más nuevos. La gasolina con bajo contenido de azufre hace posible que los catalizadores, utilizados en la mayoría de los autos de pasajeros en México, funcionen de forma más eficiente, pues proporcionan un mejor control de ${\rm NO_x}$, ${\rm COV}$ y ${\rm CO}$. El combustible de 10 ppm de azufre por sí mismo ofrece una reducción inmediata del 10 % del ${\rm NO_x}$ en los vehículos actuales. Al igual que el diésel ultrabajo en azufre, la gasolina con 10 ppm de azufre también permite la adopción de las normas Tier 3 de las mejores prácticas, que ofrecen el 20 % del potencial total de reducción de ${\rm NO_x}$ disponible en estas normas y el 10 % de los beneficios cuantificados para la salud.

El combustible de 10 ppm de azufre también es importante para las emisiones de COV, aunque sus impactos están ocultos por las enormes reducciones disponibles mediante la adopción de normas rigurosas sobre las emisiones evaporativas. Las normas vehiculares son fundamentales para disminuir la evaporación de combustible en la gran altitud y el clima soleado y cálido de México, pero las especificaciones del combustible también desempeñan un papel importante. Aunque en este estudio no evaluamos el impacto del incumplimiento de las normas de RVP para combustibles o el impacto de un mayor contenido de etanol en las emisiones de la flota de vehículos más antiguos, estas son consideraciones importantes que México debe estudiar y tomar en cuenta.

El estudio mostró los beneficios, especialmente a corto plazo, de contar con programas sólidos de I/M, y sugiere que el fortalecimiento de estos programas y su adopción en todas las áreas urbanas que no cumplen con las normas de la calidad del aire aceleraría los beneficios de estas medidas. Sin embargo, sin una transición hacia estándares de vehículos más limpios, estos programas por sí solos no pueden reducir las emisiones a medida que la flota vehicular continúa creciendo.

Para las tres normas clave consideradas, el tiempo de implementación y grado de exigencia son cruciales para alcanzar los beneficios demostrados. La norma final que regula las emisiones para los HDV, la NOM-044, ya ha sido aprobada, aunque la norma final introduce un retraso de tres años para alcanzar la armonización completa con las normativas U.S. 2010 y Euro VI, en comparación con la propuesta inicial. Las siguientes

son otras medidas políticas fundamentales que deben promulgarse para realizar las mejoras cuantificadas en la calidad del aire y la salud:

- » Actualizar y publicar la norma que regula las emisiones para los LDV, la NOM-042, para alinearla con las mejores prácticas internacionales para el control de emisiones tanto de escape como evaporativas. El objetivo inmediato de la política sería adecuarla a las normas U.S. Tier 2. Las normas Euro 6 deben permitirse únicamente con la adición de un control avanzado de emisiones evaporativas al estilo de Estados Unidos. Es necesario pasar a las normas U.S. Tier 3 para contrarestar a la creciente flota vehicular. Estas normas no tienen un análogo actual bajo el sistema Euro.
- » Actualizar la NOM-016 para pasar de 30 ppm a 10 ppm de azufre en la gasolina y hacer cumplir la norma de 15 ppm de azufre para el diésel. También se deben hacer cumplir las especificaciones para la RVP, con especial atención y sin exenciones en las regiones que contravienen las normas de calidad del aire. Aunque es preferible reducir el azufre del diésel de 15 ppm a 10 ppm, esto tendrá un impacto general significativamente menor sobre las emisiones, la calidad del aire y la salud, que pasar a 10 ppm en la gasolina.

Lista de abreviaturas, acrónimos, siglas y símbolos

BC carbono negro (black carbon)

BenMAP Programa de Mapeo de Beneficios y Análisis de la EPA (Benefits

Mapping and Analysis Program)

CAMe Comisión Ambiental de la Megalópolis

CMAQ Modelo Comunitario Multiescala de Calidad del Aire (Community

Multiscale Air Quality)

CO monóxido de carbono

CONAPO Consejo Nacional de Población
CRE Comisión Reguladora de Energía

DPF filtros de partículas diésel (diesel particle filters)

ECLIPSE Evaluación de los Impactos de los Contaminantes de Vida Corta sobre

el Clima y la Calidad del Aire (Evaluating the Climate and Air Quality

Impacts of Short Lived Pollutants)

EDGAR Base de Datos de la Comisión Europea para la Investigación Atmosférica

Mundial (European Commission's Database for Global Atmospheric

Research)

Grupo de Investigación del Este (Eastern Research Group)GBD Carga Mundial de Enfermedad (Global Burden of Disease)

HDV vehículo pesado (heavy-duty vehicle)

I/M inspección y mantenimiento (inspection and maintenance)

ICCT Consejo Internacional del Transporte Limpio (International Council on

Clean Transportation)

ICM Iniciativa Climática de México

IHME Instituto para la Medición y Evaluación de la Salud (Institute for Health

Metrics and Evaluation)

INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía

LDV vehículo liviano (light-duty vehícle)

MEGAN Modelo de Emisiones de Gases y Aerosoles de la Naturaleza (Model of

Emissions of Gases and Aerosols from Nature)

MOVES Simulador de Emisiones de Vehículos Automotores (Motor Vehicle

Emission Simulator)

NALS Cumbre de Líderes de América del Norte (North American Leaders

Summit)

NO óxido de nitrógeno NO₂ dióxido de nitrógeno

NOM-016 NOM-016-CRE-2016

NOM-042 NOM-042-SEMARNAT-2003 NOM-044 NOM-044-SEMARNAT-2006 NOM-076 NOM-076-SEMARNAT-2012 NOM-086 NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005

NOM-EM-005 NOM-EM-005-CRE-2015

NO_x óxidos de nitrógeno

ORVR recuperación de vapor por reabastecimiento de combustible a bordo

(on-board refueling vapor recovery)

PEMEX Petróleos Mexicanos

PM₂₅ material particulado fino (fine particulate matter)

ppm partes por millón

RSD sensor remoto (remote-sensing device)

RVP presión de vapor Reid (Reid vapor pressure)

SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SENER Secretaría de Energía

 SO_{χ} óxidos de azufre (sulfur oxides)

U.S. Estados Unidos de América

U.S. EPA Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S.

Environmental Protection Agency)

USD dólares estadounidenses

UT Universidad de Tennessee (University of Tennessee)

COV compuestos orgánicos volátiles (volatile organic compounds)

VSL valor de una vida estadística (value of a statistical life)

WRF Modelo de Pronóstico para la Investigación Meteorológica (Weather

Research Forecasting Model)

Referencias

- Alcántar González, F. S., & Gómez Cruz, M. J. (2011). Análisis de la distribución de azufre en productos, emisiones de SOx y la recuperación del mismo en el sistema nacional de refinación. *Revista internacional de contaminación ambiental, 27*(2), 153-163.
- Anenberg, S. C. (July 2017). [Personal communication].
- Anenberg, S. C., Miller, J., Minjares, R., Du, L., Henze, D. K., Lacey, F., . . . Heyes, C. (2017). Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets. *Nature, 545*(7655), 467–471. doi:10.1038/nature22086
- Blumberg, K., Posada, F., & Miller, J. (2014). Revising Mexico's NOM 044 standards: Considerations for decision-making. *Heavy-Duty Vehicle Policies for Mexico. Working paper 2014-5.* The International Council on Clean Transportation. Retrieved from http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_NOM-044_proposal_20140530.pdf
- Blumberg, K., Walsh, M. P., & Pera, C. (2003). Low-sulfur gasoline & diesel: The key to lower vehicle emissions. The International Council on Clean Transportation. Retrieved from http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Low-Sulfur_ICCT_2003.pdf
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2015a). Acuerdo por el que la Comisión Reguladora de Energía expide por segunda vez consecutiva la Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-005-CRE-2015, Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5435482&fecha=29/04/2016
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2015b). Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-005-CRE-2015, Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5413788&fecha=30/10/2015
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2016). Acuerdo por el que la Comisión Reguladora de Energía expide la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2017). Acuerdo de la Comisión Reguladora de Energía que modifica la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos, con fundamento en el artículo 51 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5488031&fecha=26/06/2017
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2020). ACUERDO de la Comisión Reguladora de Energía que da cumplimiento a la resolución dictada por la Segunda Sala de la Suprema Corte de Justicia de la Nación en el Amparo en Revisión A.R. 610/2019; derivado del Juicio de Amparo Indirecto 1118/2017 interpuesto en contra del Acuerdo Núm. A/028/2017 por el que se modifica la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos, con fundamento en el artículo 51 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Retrieved from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600830&fecha=18/09/2020
- Corbert, J., Comer, B., & Silberman, J. (2014). 2013 Ship Emissions Inventory for Mexico (INEB 2013): Energy and Environmental Research Associates.
- Eastern Research Group Inc. (ERG). (2016a). Adaption of the Vehicle Emission Model MOVES to Mexico. Final Technical Report. Prepared for the U.S. Agency for International Development (USAID) and Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
- Eastern Research Group Inc. (ERG). (2016b). Emissions Modeling to Support Analysis of New Vehicle and Fuel Standards in Mexico: Final Report. Prepared for Latin America Regional Climate Initiative (LARCI).
- Gamble, J., Jones, W., & Minshall, S. (1987). Epidemiological-environmental study of diesel bus garage workers: Acute effects of NO2 and respirable particulate on the respiratory system. *Environmental Research, 42*(1), 201-214. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0013-9351(87)80022-1
- He, J., & Wang, H. (2010). The value of statistical life: a contingent investigation in China. The World Bank. Retrieved from https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/1813-9450-5421
- Hodan, W., & Barnard, W. R. (2004). Evaluating the contribution of PM2.5 precursor gases and reentrained road emissions to mobile source PM2.5 particulate matter emissions. *MACTEC Federal Programs, Research Triangle Park, NC.*

- Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). (2016). GBD Compare Data Visualization. Retrieved from http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (1993a). Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-007-ECOL/1993, que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4795459&fecha=22/10/1993
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (1993b). Norma Oficial Mexicana NOM-CCAT-004-ECOL/1993, que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape de vehículos automotores nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petroleo (gas l.p.), gas natural y otros combustibles alternos, con peso bruto vehicular de 400 a 3,857 kilogramos. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4795442&fecha=22/10/1993
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-086-ECOL-1994, Contaminación atmosférica-Especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4769989&fecha=02/12/1994
- Instituto Nacional De Ecología y Cambio Climático (INECC). (2015). Informe Nacional de Calidad del Aire 2014, México. Retrieved from http://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2014.pdf
- Instituto Nacional De Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). Propuesta de modificación de las especificaciones de la gasolina, NOM-016-CRE-2016. Retrieved from <a href="http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/43/720_2017_Propuesta_modificacion_especificaciones_gasolina.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- The International Council on Clean Transportation. (2014). Mexico heavy-duty vehicle emissions standards. *Policy Update.* Retrieved from http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_NOM-044_20141222_updated.pdf
- Jerrett, M., Burnett, R. T., Pope, C. A. I., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., . . . Thun, M. (2009). Long-term ozone exposure and mortality. *New England Journal of Medicine, 360*(11), 1085–1095. doi:10.1056/NEJMoa0803894
- Kirchstetter, T. W., Singer, B. C., Harley, R. A., Kendall, G. R., & Traverse, M. (1999). Impact of California reformulated gasoline on motor vehicle emissions. 1. Mass emission rates. *Environmental Science & Technology, 33*(2), 318–328. doi:10.1021/es9803714
- Krewski, D. (2009). Evaluating the effects of ambient air pollution on life expectancy. *New England Journal of Medicine*, *360*(4), 413-415. doi:10.1056/NEJMe0809178
- Miller, J., Blumberg, K., Olivares, E., Wagner, V., Stahl, R., & Foukes, E. (2016). EU: Light-duty: Emissions. The International Council on Clean Transportation & Dieselnet. Retrieved from http://transportpolicy.net/index.php?title=EU:_Light-duty:_Emissions
- Miller, J., Blumberg, K., & Sharpe, B. (2014). Cost-Benefit Analysis of Mexico's Heavy-duty Emission Standards (NOM 044). Heavy-Duty Vehicle Policies for Mexico. Working paper 2014-7. Retrieved from The International Council on Clean Transportation, http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_MexicoNOM-044_CBA_20140811.pdf
- Minjares, R., Wagner, D. V., Baral, A., Chambliss, S., Galarza, S., Posada, F., . . . Akbar, S. (2014). Reducing black carbon emissions from diesel vehicles: Impacts, control strategies, and cost-benefit analysis. Washington, D.C., World Bank Group. Retrieved from http://documents.worldbank.org/curated/en/329901468151500078/pdf/864850WP00PUBL0I0report002April2014.pdf
- Park, S.-K., Marmur, A., Kim, S. B., Tian, D., Hu, Y., McMurry, P. H., & Russell, A. G. (2006). Evaluation of fine particle number concentrations in CMAQ. *Aerosol Science and Technology, 40*(11), 985–996. doi:10.1080/02786820600907353
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association, 56*(6), 709-742. doi:10.1080/10473 289.2006.10464485

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1995). Norma Oficial Mexicana NOM-076-ECOL-1995, Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores, con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=48866 47&fecha=26/12/1995
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales o no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de los vehículos automotores nuevos cuyo peso bruto vehicular no exceda los 3,857 kilogramos, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diesel, así como de las emisiones de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible de dichos vehículos. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2091196&fecha=07/09/2005
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 fkilogramos, así como para unidades nuevas con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipadas con este tipo de motores. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4934189&fecha=12/10/2006
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-076-SEMARNAT-2012, Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible, que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y otros combustibles alternos y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta. Retrieved from http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=52792378fecha=27/11/2012
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). Proyecto de Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehícular mayor de 3,857 kilogramos. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5376263&fecha=17/12/2014
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos totales, hidrocarburos no metano, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos. Retrieved from http://www.cofemersimir.gob.mx/expedientes/20708
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). ACUERDO por el que se modifica la vigencia del periodo establecido en las notas al pie de las tablas 1, 2 y 4, de los numerales 4.1 y 4.2, únicamente en lo que se refiere a los estándares AA, de la Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no metano, hidrocarburos no metano más óxidos de nitrógeno, partículas y amoniaco, provenientes del escape de motores nuevos que utilizan diésel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos, así como del escape de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipados con este tipo de motores. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5604713&fecha=11/11/2020

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), & Secretaría de Energía (SENER). (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental. Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2107972&fecha=30/01/2006
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). Programa de gestión federal para mejorar la calida del aire de la Megalópolis: Proaire de la Megalópolis 2017-2030. Retrieved from https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa_de_Gestión_Federal_2017-2030_final.pdf
- Song, J., Lei, W., Bei, N., Zavala, M., de Foy, B., Volkamer, R., . . . Molina, L. T. (2010). Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics, 10*(8), 3827–3846. doi:10.5194/acp-10-3827-2010
- The White house. 2016. Leaders' Statement on a North American Climate, Clean Energy and Environment Partnership. Office of the Press Secretary. Retrieved from https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/06/29/leaders-statement-north-american-climate-clean-energy-and-environment
- Turner, M. C., Jerrett, M., Pope III, C. A., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R., . . . Crouse, D. L. (2016). Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(10), 1134–1142.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2015). MOVES2014a user guide. Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality, U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100NNCY.txt
- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). How BenMAP-CE estimates the health and economic effects of air pollution. Retrieved from https://www.epa.gov/benmap/how-benmap-ce-estimates-health-and-economic-effects-air-pollution
- von Stackelberg, K., Buonocore, J., Bhave, P. V., & Schwartz, J. A. (2013). Public health impacts of secondary particulate formation from aromatic hydrocarbons in gasoline. *Environmental Health,* 12(1), 19. doi:10.1186/1476-069x-12-19
- Woodruff, T. J., Grillo, J., & Schoendorf, K. C. (1997). The relationship between selected causes of postneonatal infant mortality and particulate air pollution in the United States. *Environmental Health Perspectives*, 105(6), 608–612.