

ESTIMACIÓN DE IMPACTOS EN LA SALUD POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS Y ALTERNATIVAS DE GESTIÓN

Documento Final

2017

CONTAMINACION Y SALUD AMBIENTAL



Preparado por:

Instituto Nacional de Salud Pública

Elaborado para:

**Coordinación General de
Contaminación y Salud Ambiental.**

Periférico Sur, No. 5000, Col.
Insurgentes/Cuicuilco, Del. Coyoacán,
México, D.F. C.P. 04530. Tel. +52 (55)
54246400. Fax. +52 (55) 54245404.
www.inecc.gob.mx

Índice

Índice	2
DIRECTORIO.....	4
GRUPO DE TRABAJO.....	5
GLOSARIO	6
SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	7
RESUMEN EJECUTIVO	8
EXECUTIVE SUMMARY	11
INTRODUCCIÓN	13
Contexto y relevancia del estudio	13
La Evaluación de Impactos a la Salud	13
La Región Centro de México	14
Objetivos.....	17
General.....	17
Particulares	17
Método	18
Identificación de impactos y selección de FCR	20
Evidencia de efectos a la salud por exposición a PM _{2.5}	24
Evidencia de efectos a la salud por exposición a PM ₁₀	24
Evidencia de efectos a la salud por exposición a O ₃	25
Estimación de exposición a contaminantes.....	26
Escenarios de gestión de la calidad del aire.....	29
Caracterización de la mortalidad evitable	30
Valoración económica.....	32
Resultados	36
Exposición basal a contaminantes atmosféricos en la región centro	36
Reducción de PM _{2.5} : mortalidad evitable y valoración económica	42

Mortalidad evitable	42
Valoración económica	44
Reducción de PM ₁₀ : mortalidad evitable y valoración económica.....	45
Mortalidad evitable.....	45
Valoración económica.....	48
Reducción de O ₃ : mortalidad evitable y valoración económica.....	49
Mortalidad evitable.....	49
Valoración económica.....	51
Análisis de resultados	53
Comparación de resultados de mortalidad evitable	53
Valoración económica.....	55
Factores de incertidumbre y limitaciones de la EIS	56
Recomendaciones.....	58
Conclusiones	62
Bibliografía.....	63
Anexo I. Resultados de mortalidad evitable por municipios seleccionados	67

DIRECTORIO**INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO**

Dra. María Amparo Martínez Arroyo
Directora General

Dr. J. Víctor Hugo Páramo Figueroa
Coordinador General de Contaminación y
Salud Ambiental

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor
Director de Investigación sobre la Calidad
del Aire y Contaminantes Climáticos de
Vida Corta

Biol. Rodolfo Iniestra Gómez
Subdirector de Calidad del Aire

M en C. José Andrés Aguilar Gómez
Subdirector de Modelos e Inventarios de
Emisiones

Act. María Guadalupe Tzintzun Cervantes
Jefa de departamento de análisis
estadístico y caracterización de la calidad
del aire.

M en C. Laura Elizabeth Ramos Casillas
Jefa de departamento de caracterización
de fuentes de emisiones a la atmosfera

GRUPO DE TRABAJO

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Ing. Sergio Zirath Hernández Villaseñor

Biól. Rodolfo Iniestra Gómez

M. en C. José Andrés Aguilar Gómez

Act. María Guadalupe Tzintzun Cervantes

M. en C. Laura Elizabeth Ramos Casillas

INSTITUTO NACIONAL DE SALUD PÚBLICA

Dr. Horacio Riojas Rodríguez

M. en C. José Luis Texcalac Sangrador

M. en C. Conrado Martínez Suárez

MSP. Karla Cervantes Martínez

M. en C. Magali Hurtado Díaz

M. en C. Carlos Manuel Guerrero López

M. en C. Luz Angélica de la Sierra de la Vega

M. en C. Pamela Zuñiga

GLOSARIO

Función Concentración Respuesta (FCR): Indica la probabilidad de ocurrencia de un impacto a la salud en función un cambio dado de concentraciones de contaminantes. Las FCR se representan por distintas métricas, siendo la más común el Riesgo Relativo (RR), mismas que se derivan de estudios epidemiológicos.

Estudios de cohorte: Es un tipo de diseño de estudio epidemiológico en el que se toma una muestra de individuos de una población que se desea analizar y se le da un seguimiento a través de largos periodos de tiempo, midiendo la exposición y otras variables de interés para el estudio. La ventaja de los estudios de cohorte es que permiten evaluar efectos a la salud a largo plazo o crónicos, a diferencia de otros diseños de estudio como los de series de tiempo o transversales.

Meta-análisis: Son estudios que sintetizan estudios epidemiológicos, en este caso, los de cohorte y de series de tiempo, para encontrar una medida resumida del efecto de los contaminantes sobre la salud.

Muertes evitables: En el contexto de la evaluación de impactos a la salud de este

estudio, son el número de muertes prematuras que estadísticamente podrían evitarse anualmente como resultado de tener niveles aceptables de calidad del aire, en función de normas o lineamientos de referencia.

Exposición: Se determina por la interacción entre la población y las concentraciones de contaminantes. En el contexto de la EIS, la exposición toma en cuenta la distribución geográfica de un subconjunto de población de interés y por ende la manera en que entra en contacto con ciertas concentraciones ambientales.

Riesgo Relativo (RR): Indica el incremento (o decremento) de la probabilidad de que un impacto (eg. mortalidad prematura) a la salud ocurra en un individuo o población que están expuestos a cierto factor de riesgo (eg. un contaminante del aire) con respecto a una población que no lo está o que tiene menores niveles de exposición. Si $RR = 1$ significa que no hay diferencia; si $RR > 1$ significa que sí hay un incremento del riesgo; y si $RR < 1$ significa que el riesgo en relación a la población base de estudio.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

EIS	Evaluación de Impactos a la Salud
DAP	Disposición a Pagar
OMS	Organización Mundial de la Salud
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
VVE	Valor de una Vida Estadística
FCR	Función Concentración-Respuesta
RR	Riesgo Relativo
PM_{2.5}	Partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras (μm)
PM₁₀	Partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras (μm)
O₃	Ozono
BenMAP-CE	<i>Benefits Mapping and Analysis Program – Community Edition</i>
CIE	Clasificación Internacional de Enfermedades
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
EPOC	Enfermedad Pulmonar Crónica Obstructiva
GBD	<i>Global Burden of Disease</i> (carga global de la enfermedad)
IC	Intervalo de Confianza
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
SMCA	Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire
MXN	Pesos mexicanos
USD	Dólares americanos
M.E.	Muertes evitables

RESUMEN EJECUTIVO

La contaminación del aire por partículas se sitúa como el quinto factor de riesgo a la salud por el número de muertes prematuras, de acuerdo con el estudio sobre carga global de la enfermedad del 2015. Para México, dicho estudio estima que en el 2015 cerca de 29,000 muertes y casi 558,000 DALY (años de vida ajustados por discapacidad) serían atribuibles a la mala calidad del aire (IHME, 2016).

La región centro del país (Región Centro), integrada por la Ciudad de México y los estados de Hidalgo, México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala, acumula poco más de 39 millones de habitantes al 2015 (INEGI, 2015), lo que representa cerca del 33% de la población nacional. Como consecuencia de la intensa actividad económica y la dinámica urbana y poblacional de esta región, se presentan problemas de calidad del aire, que se reflejan en el incumplimiento frecuente de las normas de calidad del aire. El ejemplo más claro es la crisis ambiental suscitada a raíz de la activación del Programa de Contingencias Atmosféricas en el Valle de México por Ozono en ocho ocasiones durante marzo y junio del presente año, y que suscitó a la implementación de diversas medidas y políticas para mejorar la calidad del aire esta región.

En el presente estudio se cuantificó el número de muertes prematuras que podrían evitarse anualmente si se redujeran las concentraciones de los principales contaminantes atmosféricos ($PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3) en los municipios de las entidades que integran la Región Centro. Esta estimación se realizó de acuerdo a la metodología Evaluación de Impactos a la Salud (EIS) recomendada por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2016) y su valoración económica por el método de Disponibilidad a Pagar (DAP), utilizando el software BenMAP-CE de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Se empleó a su vez evidencia epidemiológica derivada de una revisión especializada y actualizada de los principales efectos a la salud.

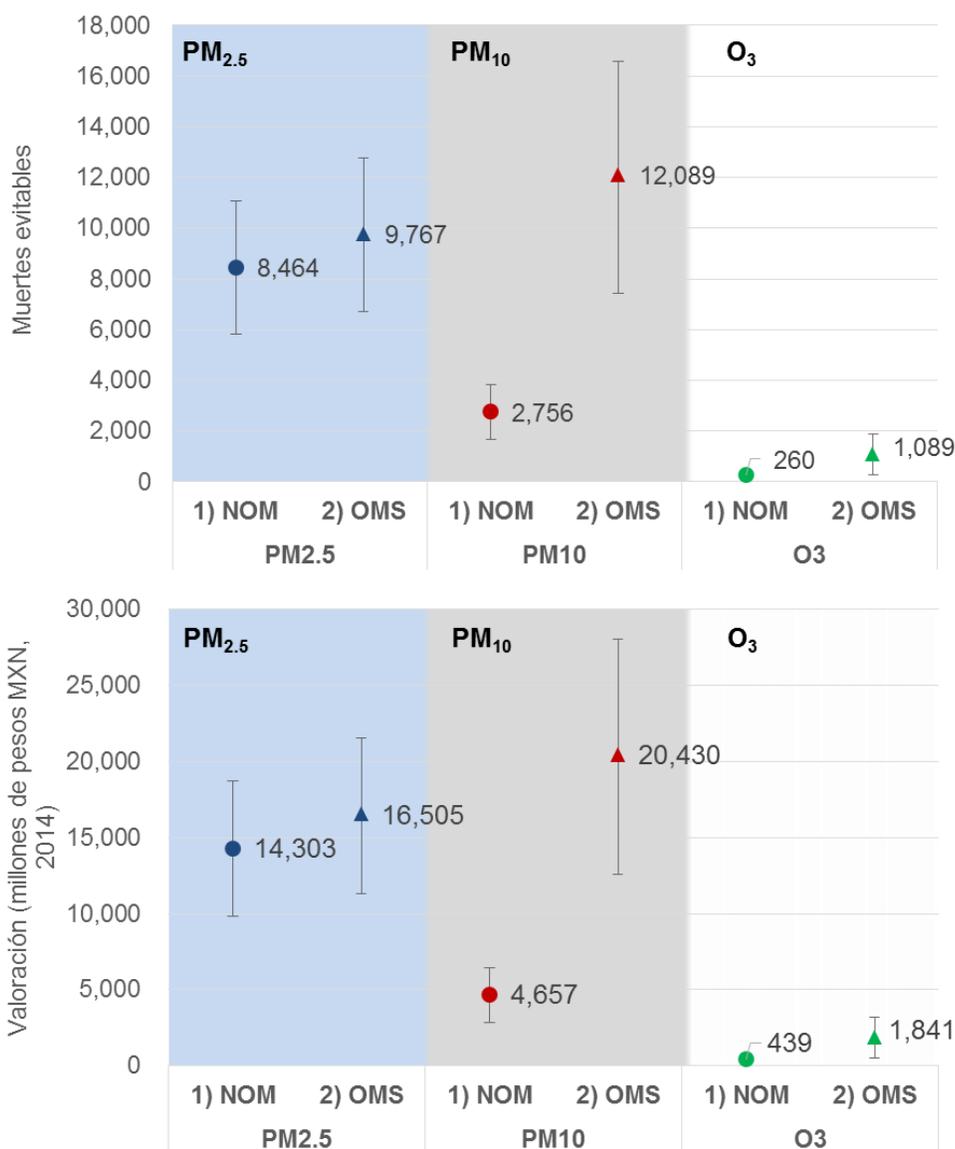
Se analizaron los impactos ligados a la mortalidad de largo plazo o por exposición crónica a contaminantes atmosféricos. Además, se utilizó como escenario base las concentraciones de contaminantes proporcionadas por las redes de monitoreo de calidad del aire de los sistemas de las entidades de la Región Centro durante el año 2014. Asimismo, se introdujeron escenarios de gestión que simulan la reducción hipotética de concentraciones de contaminantes que podrían alcanzarse tras la ejecución de medidas de control de emisiones y políticas para mejorar la calidad del aire de la región, con

referencia a los estándares de las Normas Oficiales Mexicanas y a los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud.

Los principales resultados de esta evaluación se ilustran en la Figura 1. Aquí se demuestra que si las concentraciones de contaminantes se redujeran drásticamente en la Región Centro, se podrían evitar alrededor de 12 mil muertes prematuras anuales (Figura 1a, estimador para PM_{10} , escenario OMS). Esta cifra se puede valorar en un beneficio social de aproximadamente 20 mil millones de pesos del 2014 (Figura 1b, estimador para PM_{10} , escenario OMS).

En resumen, se puede considerar que existe un número significativo de muertes evitables asociadas con la contaminación del aire en la zona centro del país. Esto ocurre porque las ciudades están lejos de alcanzar promedios de concentraciones anuales cercanos a la Norma de Salud y sobre todo a las recomendaciones de la OMS. Es la población y el sector salud quien está pagando los costos en esta región de por no contar con un aire saludable.

Figura 1 Mortalidad evitable por contaminación atmosférica y su valoración económica en la región centro del país durante el 2014. Síntesis de resultados



- a) Mortalidad evitable promedio e intervalo de confianza (IC 95%) correspondiente a la incertidumbre de las FCR utilizadas.
- b) Valoración económica con base en un VVE de \$1.6 millones de pesos MXN del 2014. Intervalo de confianza (IC 95%) correspondiente a la incertidumbre de las FCR utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

EXECUTIVE SUMMARY

Ambient particulate matter pollution is the fifth risk factor due to premature mortality, according to the Global Burden of Disease study in 2015. For Mexico, this study, estimates that about 29,000 deaths and 558,000 disability-adjusted life-years (DALY) were attributed to ambient air pollution during 2015 (IHME, 2016).

Mexico's central region (Central Region) is integrated by Mexico City and the states of Hidalgo, Mexico, Morelos, Puebla, Queretaro and Tlaxcala. It accumulated over 39 million habitants by 2015 (INEGI, 2015), which represents over 33% of national population. As a result of the intensive economic activity and the urban dynamics, this region features air quality issues, which are traduced into frequent non-compliance of local air quality standards. The most recent example of these issues was the environmental emergency raised after the activation of the Mexico City Metropolitan Area Contingency Plan due to Ozone levels exceeded during eight times between March and June, 2016. As a result of this emergency, several public policies and measures are being implemented in the region.

In this study an estimation of annual avoided premature mortality was performed, considering that concentrations of main atmospheric pollutants ($PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3) were reduced in the municipalities across the Central Region. This analysis was performed using the methodology Health Impacts Assessment (HIA) recommended by the World Health Organization (WHO, 2016) and economic valuation as per the Willingness to Pay (WTP) method. The software BenMAP-CE, developed by the United States Environmental (EPA) of the United States, was used in this study. Moreover, an updated and specialized literature review of epidemiologic studies was performed in order to identify relevant health outcomes.

Long-term mortality impacts due to chronic exposure to atmospheric pollutants was assessed. Furthermore, a base scenario was constructed using air quality measurements delivered by the local air quality monitoring networks with available data during 2014. Three control scenarios (management scenarios) were analyzed in order to simulate the implementation of air quality measures and policies in the region. Such scenarios take into account the limits recommended by the Mexican Official Standards (NOM, as per their acronym in Spanish), WHO guidelines and interim levels.

The main results of this assessment are depicted in Figure 1. Here, it is observed that if concentrations of pollutants were drastically reduced in the Central Region, about 12 thousand premature deaths could be avoided every year (Figure 1a, according to PM_{10}

estimation using WHO scenario). An economic value to these impacts may be assigned which translates into a social benefit of about 20 billion¹ pesos (MXN) during 2014.

In summary, it can be considered that there is a significant number of avoided deaths associated with improving air quality in Mexico's central region. This is because most cities are far from complying annual local air quality standards, and even further from WHO guidelines. Society and health sector are the ones paying for those costs associated with breathing a polluted air.

¹ 1 Billion = 1,000,000,000.

INTRODUCCIÓN

Contexto y relevancia del estudio

Durante marzo y junio del año en curso se suscitó una grave problemática ambiental derivada de la activación del Programa de Contingencias Atmosféricas en el Valle de México por Ozono en ocho ocasiones. Esta situación llevó a las autoridades federales y locales a implementar un nuevo plan de contingencias atmosféricas con modificaciones temporales al programa Hoy No Circula, así como a la emisión de una norma emergente de verificación vehicular. Además de estas medidas emergentes, se acordó llevar a cabo una serie de acciones encaminadas a prevenir la ocurrencia de estos escenarios en el futuro.

Como parte de los programas y políticas para la gestión de la calidad del aire en México es indispensable contar con indicadores y metas de gestión para evaluar sus resultados. Los Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (Proaire) son el instrumento para prevenir y controlar las emisiones de contaminantes atmosféricos, alcanzar los niveles óptimos de calidad del aire y su impacto en la salud de la población. No obstante, y hasta fechas recientes, no en todos los casos se han incorporado estimaciones de la línea basal de los impactos a la salud pública, y que posteriormente se puedan contrastar con las reducciones de contaminantes y, por ende, los beneficios sociales de la mejora de la calidad del aire. Un primer estudio de este tipo se realizó en la Ciudad de México y quedó incorporado el primer capítulo del Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (CAM, 2011) con base en las estimaciones de Riojas-Rodríguez et al (2014).

La contaminación del aire por partículas se sitúa como el quinto factor de riesgo a la salud por su contribución al número de muertes prematuras mundiales, de acuerdo con el estudio sobre carga global de la enfermedad del 2015. Para México, dicho estudio estima que en el 2015 cerca de 29,000 muertes y casi 558,000 DALY² serían atribuibles a la mala calidad del aire (IHME, 2016).

La Evaluación de Impactos a la Salud

Para estimar los impactos en salud por contaminación atmosférica en la región centro del país se recurre a la metodología de Evaluación de Impactos a la Salud (EIS). Esta es una

² Años de vida ajustados por discapacidad.

combinación de procedimientos y métodos que proporciona información a los tomadores de decisiones sobre el posible impacto que una intervención puede tener sobre la salud de la población. La EIS permite caracterizar las incidencias vinculadas (exceso de eventos) a la exposición a un factor de riesgo (eg. contaminantes atmosféricos $PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3) utilizando evidencia epidemiológica y sus estimadores, los cuales sustentan y dan certeza de la estimación obtenida. Los estimadores de riesgo utilizados en la EIS nos indican, por ejemplo, el número de veces que se incrementa la probabilidad de que un individuo de cierta población sufra un padecimiento respiratorio como consecuencia del aumento de la concentración de un contaminante como el Ozono troposférico (WHO, 2016).

La EIS se ha utilizado en México anteriormente por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), quien ha hecho evaluaciones como la del estudio de beneficios por reducción de $PM_{2.5}$ en tres zonas metropolitanas (INECC, 2014a). A nivel mundial se publica continuamente el estudio de Carga Global de la Enfermedad (GBD, por sus siglas en inglés), el cual incluye el análisis sistematizado más completo sobre los principales factores de riesgo, incluyendo la exposición a contaminantes atmosféricos (Forouzanfar et al., 2015).

Otras experiencias recientes en México con respecto a la EIS ha sido su uso en la actualización de normas de emisiones de contaminantes y de calidad del aire, como el estudio de costos y beneficios para justificar la actualización de la Norma Oficial Mexicana NOM-044, sobre los límites máximos permisibles de emisiones de vehículos pesados a diésel (ICCT, 2014), o la propuesta de anteproyecto de la NOM-025-SSA1-2014, que actualizaría los límites permisibles de la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente (COFEPRIS, 2014a).

La Región Centro de México

La región centro del país (Región Centro) se ha definido para fines del presente estudio como la zona geográfica integrada por las entidades de Ciudad de México, Hidalgo, México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala. Esta delimitación engloba la previamente denominada Megalópolis de México, conformada por las citadas entidades, con excepción del estado de Querétaro, mismo que ha sido adicionado a este estudio con la finalidad de ampliar las estimaciones de impactos en la salud y en consideración de la cercanía e interacción de estas dos regiones.

La Región Centro presenta una población de cerca de 40 millones de habitantes al año 2015, de acuerdo con la Encuesta Intercensal 2015 de INEGI (2015). Esta población se

encuentra distribuida entre las siete entidades como se muestra en la Tabla 1. El estado de México y la Ciudad de México representan poco más del 60% de la población total de esta región.

Tabla 1 Distribución de población en las entidades de la Región Centro al 2015

Entidad	Población al 2015	
	Habitantes	%
Ciudad de México	8,918,653	23%
Hidalgo	2,858,359	7%
México	16,187,608	41%
Morelos	1,903,811	5%
Puebla	6,168,883	16%
Querétaro	2,038,372	5%
Tlaxcala	1,272,847	3%
Total Región Centro	39,348,533	100%

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2015).

Además de acumular cerca del 33% de la población nacional, la Región Centro del país aporta cerca del 33% del PIB nacional, como se muestra en la Tabla 2. Esta situación lo sitúa claramente como un importante motor de la economía nacional.

Tabla 2 Producto Interno Bruto (PIB) anual por entidades federativas

Entidad	PIB a precios del 2014	
	Millones de MXN	% del PIB nacional
Ciudad de México	2,691,932	16.5%
Hidalgo	277,322	1.7%
México	1,519,851	9.3%
Morelos	187,503	1.15%
Puebla	516,694	3.17%
Querétaro	354,791	2.17%
Tlaxcala	90,778	0.56%
Región Centro	5,638,871	34.57%
Nacional	16,314,300	100%

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (2016a).

Objetivos

General

Estimar los impactos en salud atribuible a los contaminantes atmosféricos PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ en la región centro del país y alternativas de gestión en salud.

Particulares

- I. Estimar la mortalidad atribuible a las concentraciones de contaminantes en el aire, utilizando la información disponible de las redes de monitoreo.
- II. Estimar los beneficios (muertes evitadas) bajo diferentes metas de gestión de la calidad del aire en la región centro del país.
- III. Estimar el costo económico en salud atribuible a las metas de gestión de la calidad del aire en la región centro del país.
- IV. Proponer medidas de gestión en salud para la región centro del país.

Método

La Evaluación de Impactos a la Salud (EIS) es un procedimiento estandarizado de evaluación de riesgo que permite estimar el cambio en el número de incidencias (en este caso mortalidad prematura evitada) a la salud asociadas a un cambio en la calidad del aire. Asimismo, es muy común utilizar los resultados de la EIS como parte de una estrategia de análisis más amplia como la evaluación de beneficios, también referida como análisis costo-beneficio (ACB). Las muertes evitadas se valoran económicamente, siguiendo las recomendaciones de la OECD (OECD, 2011; OECD, 2014), lo cual determina finalmente los beneficios económicos asociados a la mejora de la calidad del aire (MMA, 2013).

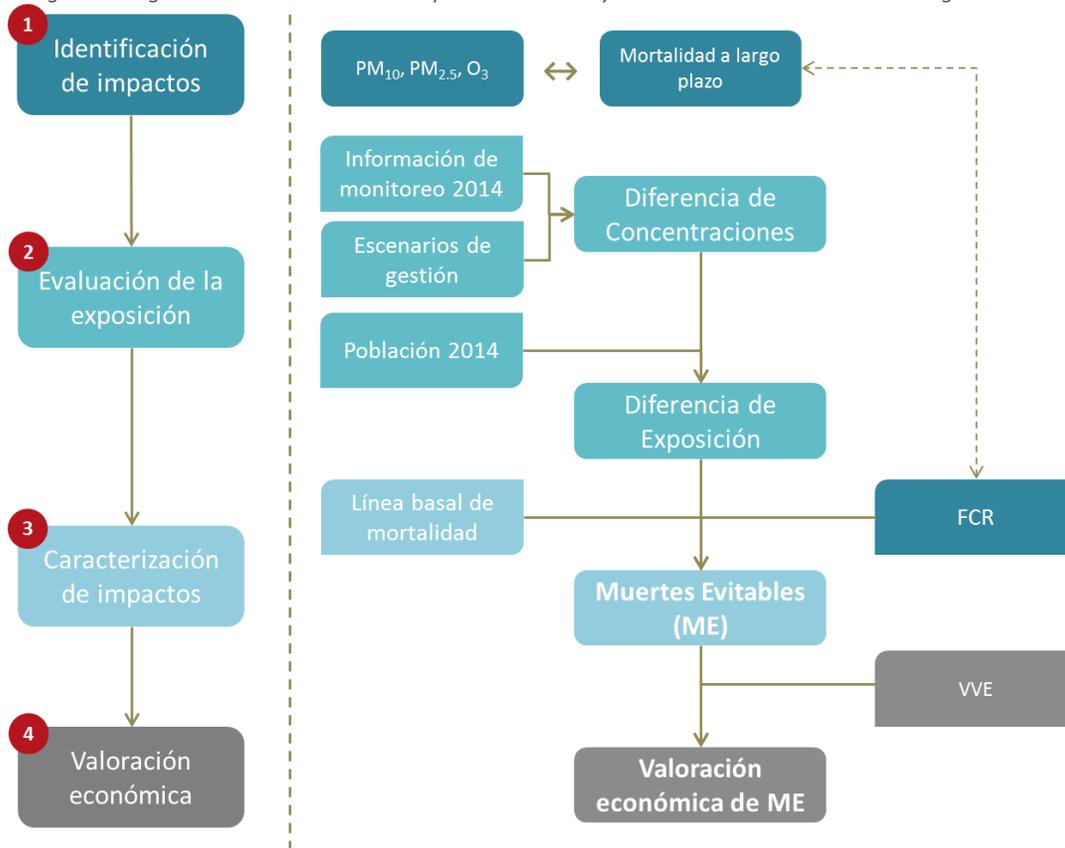
Como parte del presente estudio se realizó una EIS enfocada a estimar la línea base de mortalidad evitable en la población de la Región Centro como resultado de la reducción a la exposición de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃, evaluada a través de escenarios de gestión. Además, se cuantifica económicamente el beneficio social que este número de muertes evitadas traería consigo.

La EIS y su valoración económica implican una serie de pasos a seguir como parte de un enfoque sistematizado. La EIS y su valoración económica se realizaron utilizando el software BenMAP-CE, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). En la Figura 2 se esquematiza la secuencia metodológica seguida en este estudio:

1. **Identificación de impactos y selección de FCR.** Se determinan los contaminantes a evaluar y los impactos a la salud asociados. La identificación de impactos debe estar sustentada por evidencia epidemiológica, de la cual derivan también las Funciones Concentración-Respuesta (FCR) utilizadas en el paso 3 de la EIS.
2. **Evaluación de la exposición.** Se determina el cambio en la calidad del aire al que la población está expuesta. Esto implica determinar cuál es la diferencia entre la exposición de contaminantes de los escenarios base y control. En el presente análisis el escenario base corresponde a las concentraciones de contaminantes en el 2014 (año base). Los escenarios control son una serie de escenarios de análisis de la reducción hipotética de concentraciones que se lograría mediante la aplicación de políticas de gestión de la calidad del aire. La determinación de la exposición implica evaluar la interacción de las concentraciones de contaminantes y la distribución espacial de la población, tomando en cuenta sus características demográficas como edad, sexo, entre otras.

3. **Caracterización de impactos.** En esta etapa se integra la información generada en los pasos 1, 2 y 3 de la EIS a través de una *función de impacto*, la cual cuantifica el cambio de impactos a la salud (mortalidad evitada), como resultado del cambio en la calidad del aire (escenarios de control o gestión). Se debe especificar cuál es la línea basal de incidencias o prevalencias (en este caso la mortalidad en el año base de las causas analizadas) y las FCR que caracterizan los impactos a la salud seleccionados en el paso 1 de la EIS. Los resultados obtenidos indican el incremento o reducción de incidencias que ocurrirían como consecuencia del cambio en calidad el aire.
4. **Valoración económica.** Aquí se cuantifica la magnitud de los impactos o beneficios económicos asociados al cambio en el número de impactos a la salud resultantes de la etapa 3. Se requiere utilizar una medida que cuantifique económicamente el valor total asociado a los beneficios o impactos a la salud. Si se determina el número de muertes prematuras evitadas, como en el presente EIS, se necesita utilizar un valor que monetice el beneficio que implica evitar esa muerte para la sociedad, como el valor de una vida estadística, mismo que se trata más adelante con detenimiento.

Figura 2 Diagrama de la Evaluación de Impactos a la Salud y su Valoración Económica en la Región Centro



* **FCR**: Función Concentración-Respuesta; **VVE**: Valor de una Vida Estadística.

Fuente: Elaboración propia.

Identificación de impactos y selección de FCR

En la presente EIS y valoración económica se ha delimitado la identificación de impactos a la salud relacionados con la mortalidad a largo plazo por la exposición crónica a los contaminantes $PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3 en la Región Centro.

Para identificar los impactos a la salud que se incluirían en la EIS de la Región Centro se realizó una revisión del estado del arte de la literatura científica sobre efectos a la salud por exposición a contaminantes atmosféricos, con énfasis en los impactos por mortalidad a largo plazo.

Se llevó a cabo una búsqueda de estudios epidemiológicos nacionales e internacionales publicados en revistas indexadas en bases de datos médicas. Dicha búsqueda derivó en una actualización de la evidencia disponible sobre asociación de los contaminantes $PM_{2.5}$,

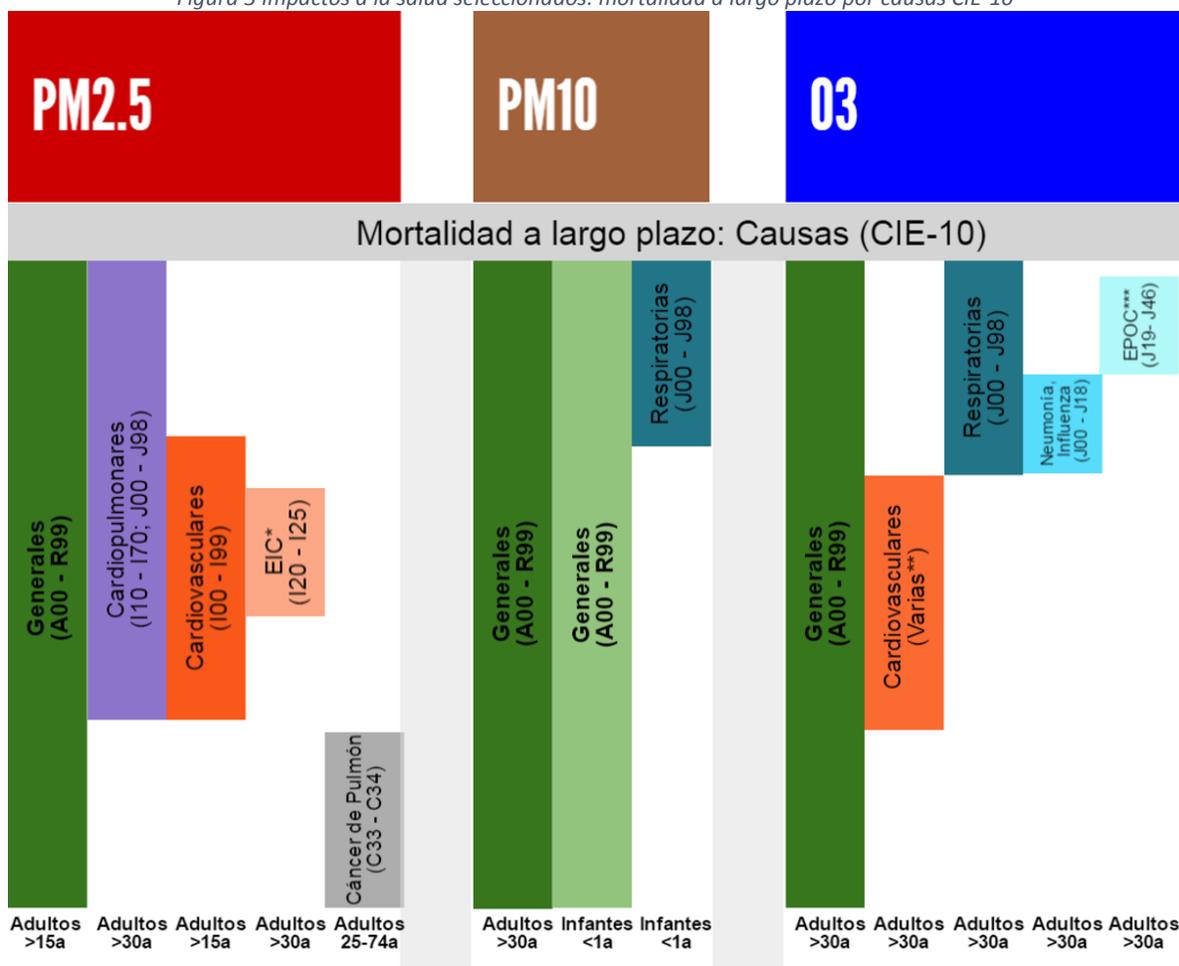
PM₁₀ y O₃ y sus efectos sobre la mortalidad general o por causas específicas, como respiratorias y cardiovasculares y por diversos grupos de edad.

La evidencia encontrada se sistematizó en tablas resumen, incluyendo las principales características de los estudios (tipo de estudio, impacto analizado, causas de enfermedad incluidas, grupos de edad de la población estudiada, métrica de exposición a contaminantes, lugar, año y autor). Adicionalmente, se identificaron las medidas de asociación entre el cambio de exposición y el incremento de riesgo del impacto, es decir las Funciones Concentración Respuesta (FCR), que pueden encontrarse en forma de Riesgo Relativo (RR), *Hazard Ratio* (HR), Razones de Momios u *Odds Ratio* (OR) o porcentaje de cambio en la variable de resultado (RPC), mismas que son usadas en el tercer paso de la EIS (caracterización de impactos).

En la selección de estudios epidemiológicos se tomaron como criterio de priorización: 1) diseños epidemiológicos de cohorte y/o meta-análisis de cohortes, 2) año de publicación, 3) rigurosidad metodológica y 4) mejor estimación de la exposición (Texcalac-Sangrador, et al., 2014).

Los impactos identificados a partir de la revisión de literatura epidemiológica se resumen en la Figura 3. Cabe destacar que estos permiten una caracterización detallada de los beneficios potenciales a la salud por la mejora de la calidad del aire, por contaminante, grupos de edad (adultos e infantes) y por las principales causas. Se agrega la clave de las causas según Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE-10).

Figura 3 Impactos a la salud seleccionados: mortalidad a largo plazo por causas CIE-10



* Enfermedades Isquémicas del Corazón.
 ** Causas CIE-10: I20-I25, I30-I51, I60-I69, I70.
 *** Enfermedad Pulmonar Crónica Obstructiva.

Fuente: Elaboración propia.

En la presente EIS se analiza la mortalidad evitable a largo plazo por exposición a contaminantes atmosféricos. Aunque sería deseable utilizar FCR derivadas de estudios locales, en México no se cuenta con estudios de cohorte, por lo que se tuvo que recurrir a estudios de la literatura internacional. Estos estudios provienen de cohortes, revisiones sistemáticas o meta-análisis, incluyendo las conocidas cohortes de la *American Cancer Society* (ACS) y del estudio de seis ciudades (*Six Cities Study*). No se seleccionaron FCR de cohortes de grupos específicos de población (eg maestros, mineros, sexo masculino o femenino, entre otras) y además se utilizaron sólo estudios multi-ciudad.

Las Funciones Concentración-Respuesta (FCR) derivadas de esta misma revisión se resumen en la Tabla 2. En esta se especifica el tipo de impacto (mortalidad por causas generales o por causas específicas); las causas incluidas de acuerdo a su clasificación CIE-

10³; el grupo de edad aplicable; la FCR expresada como Riesgo Relativo por cada 10 unidades de cambio de concentración del contaminante y su intervalo de confianza al 95%; así como el autor y año del estudio de donde se seleccionó la FCR.

Tabla 3 Selección de Funciones Concentración-Respuesta (FCR) seleccionadas por contaminante e impacto identificado

Impacto	Causas (CIE-10)	Grupo de edad	FCR (IC 95%) ^a	Referencia
PM_{2.5}				
Mortalidad general	Todas, no externas (A00-R99)	≥15 años	1.06 (1.04-1.08)	Hoek et al (2013)
Mortalidad específica	Cardiovasculares (I00-I99)	≥15 años	1.11 (1.05-1.16)	Hoek et al (2013)
Mortalidad específica	Enfermedades isquémicas del corazón (EIC) (I20-I25)	≥30 años	1.18 (1.14-1.23)	Pope et al (2004)
Mortalidad específica	Cáncer de Pulmón (C33-C34)	25-74 años	1.37 (1.07-1.75)	Lepeule et al (2012)
Mortalidad específica	Cardiopulmonares (I10-I70; J00-J98)	≥30 años	1.09 (1.03-1.16)	Pope et al (2002)
PM₁₀				
Mortalidad general	Todas, no externas (A00-R99)	≥30 años	1.043 (1.026-1.061)	Kunzli et al (2000)
Mortalidad general	Todas, no externas (A00-R99)	< 1 año	1.04 (1.02-1.07)	Woodruff et al (1997)
Mortalidad específica	Respiratorias (Resp) (J00-J98)	< 1 año	1.162 (1.054-1.278)	Woodruff et al (2008)
O₃				
Mortalidad general	Todas, no externas (A00-R99)	≥30 años	1.02 (1.01-1.04)	Turner et al (2015)
Mortalidad específica	Cardiovasculares	≥30 años	1.03 (1.01 – 1.05)	Turner et al (2015)
Mortalidad específica	Respiratorias (Resp)	≥30 años	1.12 (1.08 – 1.16)	Turner et al (2015)
Mortalidad específica	Neumonía e influenza (Neumonía)	≥30 años	1.10 (1.03 – 1.18)	Turner et al (2015)
Mortalidad específica	EPOC	≥30 años	1-14 (1-08 – 1.21)	Turner et al (2015)

^a Por cada 10 unidades de cambio de concentración del contaminante (PM_{2.5}, PM₁₀: 10 µg/m³; O₃: 10 ppb).

³ Décima edición de la Clasificación Internacional de Enfermedades de la OMS.

Fuente: Elaboración propia.

Evidencia de efectos a la salud por exposición a PM_{2.5}

La evidencia identificada para PM_{2.5} y sus efectos en mortalidad a largo plazo es la más amplia y consistente. En el estudio de Hoek et al (2013) se realiza un meta-análisis de los estudios epidemiológicos publicados hasta el 2013 sobre efectos a la mortalidad general, cardiovascular y respiratoria por exposición a largo plazo de PM_{2.5}, incluyendo análisis de la cohorte ACS y nuevos estudios realizados en regiones como Asia. El meta-análisis resulta en un incremento de 6% en el riesgo de mortalidad por **causas generales** (IC 95%: 4-8%) y de 11% (IC 95%: 5-16%) por **causas cardiovasculares**.

En el estudio de Pope et al (2004) los autores utilizan los datos de la cohorte de la ACS e información de contaminación atmosférica para áreas metropolitanas en 50 estados de los Estados Unidos. El estudio considera alrededor de 1.2 millones de adultos mayores de 30 años en ciudades con buena calidad de datos de monitoreo. El riesgo relativo de mortalidad por causas específicas se estima por un modelo de regresión de riesgo proporcional de Cox, controlando por covariables como hábitos de tabaco y alcohol. De este estudio se observó una asociación estadística robusta entre PM_{2.5} y el incremento de mortalidad por **enfermedades isquémicas del corazón** del 18% (IC 95%: 14-23%) asociado a un cambio de 10 µg/m³ en la concentración del contaminante.

Por su parte, Lepeule et al (2012) realiza una revisión de la cohorte *Six Cities* de Harvard, extendiéndole 11 años más y replicando el modelo de regresión de Cox aplicado en el estudio original (Dockery, et al., 1993). Se considera una población de una muestra de 8,096 adultos de entre 25 y 74 años. Los autores encuentran una asociación estadísticamente significativa entre la exposición a PM_{2.5} y distintas causas de mortalidad. En el caso de **cáncer de pulmón** se encontró que un incremento de 10 µg/m³ en la concentración de PM_{2.5}, incrementaba a su vez 37% (IC 95%: 7-75%) el riesgo de mortalidad por esta causa.

Evidencia de efectos a la salud por exposición a PM₁₀

En el caso de la evidencia hallada para PM₁₀ esta es menos amplia y consistente que en el caso de PM_{2.5}. La mayor parte de la evidencia de los efectos de las PM₁₀ se centra en exposiciones de corto plazo. No obstante destacan dos estudios que evalúan la mortalidad en infantes menores de un año (Woodruff, et al., 1997; Woodruff, et al., 2008) y uno que analiza la mortalidad general en adultos (Künzli, et al., 2000).

En Woofruff et al (1997) se analiza la relación entre exposición crónica a partículas suspendidas y mortalidad infantil en Estados Unidos, utilizando una cohorte de cerca de 4 millones de infantes nacidos entre 1989 y 1991 en 86 áreas metropolitanas estadísticas. La mortalidad posneonatal (mayores de un mes y menores de un año) se examina con un modelo de regresión logístico controlado por factores demográficos y ambientales. El estimador resultante para **mortalidad posneonatal por causas generales**, dado como *odds ratio* (OR), es de 1.04 (IC95%: 1.02-1.07) para un cambio de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso de Woodruff et al (2008) se brinda un estimador estadísticamente significativo, dado como OR, de 1.18 (IC 95%: 1.06-1.31) para un incremento de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} para mortalidad por **causas respiratorias en población posneonatal**.

Por su parte, en (Künzli, et al., 2000) los autores estiman el impacto en salud pública a una mala calidad del aire en relación a fuentes móviles en Austria, Francia y Suiza. Las FCR determinadas se estiman a partir de un meta-análisis ponderado por el inverso de la varianza. Este estudio encuentra un incremento del riesgo relativo de 4.3% (IC 95%: 2.6-6.1%) para un cambio de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} en el aumento de **la mortalidad por causas generales en adultos** mayores a 30 años, controlando por la heterogeneidad entre estudios.

Evidencia de efectos a la salud por exposición a O_3

La evidencia más reciente encontrada para la asociación de la exposición de O_3 y la mortalidad a largo plazo es la del estudio de Turner et al (2016), el cual determina que el ozono puede contribuir significativamente al riesgo de mortalidad respiratoria y cardiovascular. El estudio analiza 6,669,046 participantes del Estudio de Prevención de Cáncer II (Cancer Prevention Study II) entre 1982 y 2004. Los autores asignaron la concentración de O_3 a nivel de residencia del participante a partir de un modelo espacio-temporal jerárquico Bayesiano, mientras que se efectuaron estimaciones de $\text{PM}_{2.5}$ y NO_2 por un modelo de regresión de uso de suelo. Los coeficientes de riesgo (HR) se obtuvieron de modelos de regresión proporcionales de Cox ajustado por covariables individuales y ecológicas.

Los resultados del análisis mono-contaminante revelan una asociación positiva significativa entre la exposición a O_3 y la mortalidad por **causas generales** (1.02; IC95%: 1.01-1.04), **cardiovasculares** (1.03; IC95%: 1.01-1.05), **respiratorias** (1.12; IC95%: 1.08-1.16), así como dentro de estas últimas la **neumonía e influenza** (1.10; IC95%: 1.03-1.18) y **Enfermedad Pulmonar Crónica Obstructiva** (EPOC) (1.14; IC95%: 1.08-1.21), por un incremento 10 de ppb de O_3 .

Estimación de exposición a contaminantes

La estimación de exposición a contaminantes atmosféricos se realiza utilizando información válida de los Sistemas de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA) ubicados en la Región Centro. Las bases de datos horarias de los SMCA fueron proporcionadas para el año base 2014 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). La información de calidad del aire de cada una de las estaciones de lo SMCA fue validada a través de un análisis de suficiencia de información diaria, trimestral y anual al 75%. Esto implica que si la estación analizada no tiene al menos el 75% de suficiencia de información se descarta de la EIS por no ser representativa. Esta evaluación coincide con las especificaciones establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas.

La información de las estaciones con suficiencia de información se utilizó para estimar métricas de exposición, las cuales se definen con base en las FCR seleccionadas. En el caso de PM_{10} y $PM_{2.5}$ la métrica de exposición diaria es el promedio de 24 horas diario, mientras que para O_3 es el promedio móvil de 8 horas máximo diario. En ambos casos la métrica anual resulta de determinar las medias válidas trimestrales, así como anuales (en ambos casos con suficiencia de información al 75%). En la Tabla 3 se presentan las métricas de exposición de las estaciones con información válida.

Tabla 4 Concentración promedio anual de los contaminantes $PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3 en las estaciones de monitoreo de la Región Centro durante el 2014

No.	SMCA	Entidad	Estación (clave)	Concentración promedio anual ^a		
				$PM_{2.5}$	PM_{10}	O_3
				$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	ppb
1	Hidalgo	Hidalgo	ATI_Hgo	68.4	NA	26
2	Hidalgo	Hidalgo	AJA	NA	35	NA
3	Puebla	Puebla	AguaSanta	NA	48.8	27
4	Puebla	Puebla	BINE	NA	40.8	NA
5	Puebla	Puebla	UTP	NA	45.8	NA
6	Puebla	Puebla	Velodromo	29.4	61.2	NA
7	Querétaro	Querétaro	BOM	12.7	NA	NA
8	Querétaro	Querétaro	MAR	NA	44.3	34
9	ZMVM	México	ACO	NA	28.5	52
10	ZMVM	México	ATI_ZMVM	NA	44	53
11	ZMVM	CDMX	CAM	27.1	50	53
12	ZMVM	México	CHO	NA	53.7	52
13	ZMVM	CDMX	COY	24.1	NA	58
14	ZMVM	CDMX	CUA	NA	NA	59
15	ZMVM	México	CUT	NA	NA	47
16	ZMVM	México	FAC	NA	39.1	55
17	ZMVM	CDMX	HGM	23.4	42.6	NA
18	ZMVM	CDMX	IZT	NA	36.6	58
19	ZMVM	México	LLA	NA	NA	55
20	ZMVM	CDMX	MER	27.7	57.3	NA
21	ZMVM	Montecillo	MON	NA	NA	56
22	ZMVM	México	NEZ	19.6	NA	59
23	ZMVM	CDMX	PED	20.7	39.5	56
24	ZMVM	México	SAG	22.6	46.6	51
25	ZMVM	CDMX	SFE	18.7	36.2	59
26	ZMVM	CDMX	SJA	21.1	NA	57
27	ZMVM	CDMX	SUR	NA	35.2	63
28	ZMVM	CDMX	TAH	NA	40	61
29	ZMVM	CDMX	TLA	25.6	54.8	51
30	ZMVM	México	TLI	NA	41.4	50
31	ZMVM	México	TPN	NA	NA	59
32	ZMVM	CDMX	UAX	19.1	NA	57
33	ZMVM	CDMX	UIZ	24.7	46.8	60
34	ZMVM	México	VIF	NA	NA	56
35	ZMVM	México	XAL	NA	NA	48
36	ZMVT	México	AP	35.4	71.5	35
37	ZMVT	México	CB	29.3	55.2	48

No.	SMCA	Entidad	Estación (clave)	Concentración promedio anual ^a		
				PM _{2.5}	PM ₁₀	O ₃
				µg/m ³	µg/m ³	ppb
38	ZMVT	México	CE	23.9	35.4	33
39	ZMVT	México	MT	30.4	53.2	37
40	ZMVT	México	OX	27.8	51.9	46
41	ZMVT	México	SC	39.5	82.2	51
42	ZMVT	México	SM	31.3	57.8	38
Total estaciones válidas				22	28	36

NA: Estaciones sin datos del contaminante o sin suficiencia de información.

^a Las concentraciones anuales se calculan con referencia a las métricas de exposición anual que requieren las FCR seleccionadas. PM_{2.5} y PM₁₀: promedio de 24 horas diarias (media trimestral y anual); O₃: máximo de los promedios móviles de 8 horas diarios (media trimestral y anual). En todos los casos se aplica un criterio de suficiencia de información del 75% diario, trimestral y anual.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las concentraciones promedio anuales de las estaciones de monitoreo se estimó la exposición a los contaminantes por municipio en las entidades que integran la Región Centro. Para determinar esta exposición se realizó una interpolación de las concentraciones anuales promedio a cada uno de los municipios considerando la población de los grupos de edad pertinentes al año 2014. La interpolación de concentraciones se efectuó con el método de promedios de vecinos de Voronoi (Voronoi Neighbour Averaging, VNA) con ponderación por inverso de la distancia al cuadrado, incorporado en el software BenMAP-CE.

La interpolación de métricas de exposición se limitó a un radio de cobertura de 10 km de cada estación de monitoreo. Esto se realizó para evitar la asignación de exposición en áreas con datos de monitoreo de calidad del aire en las se desconoce la representatividad las redes de monitoreo en operación. De este análisis se seleccionaron los municipios y la población asociada que comprende el radio de cobertura de monitoreo a 10 km. Cabe señalar que para estimar la población municipal durante el año 2014 se utilizó la información de INEGI del Censo de Población 2010 y la Encuesta Intercensal 2015 con la que se interpoló la población estimada al año 2014, considerando una tendencia de crecimiento de tipo exponencial. La población estimada al 2014 y la cobertura a 10 km de radio se muestran en la Tabla 4.

Tabla 5 Población incluida en la EIS considerando un radio de 10 km de cobertura de las estaciones de monitoreo en la Región Centro durante el 2014

Entidad	Población	Población incluida en la EIS	Cobertura de población
---------	-----------	------------------------------	------------------------

	total 2014	(%)					
		O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}
Estado de México	15,975,116	13,503,267	12,131,389	11,026,815	85%	76%	69%
Ciudad de México	8,904,558	8,904,558	8,904,558	8,768,133	100%	100%	98%
Puebla	6,086,625	1,861,642	2,250,107	2,080,787	31%	37%	34%
Hidalgo	2,817,951	302,684	223,435	302,684	11%	8%	11%
Querétaro	1,993,536	1,221,249	1,221,249	1,221,249	61%	61%	61%
Morelos	1,877,498	0	0	0	0%	0%	0%
Tlaxcala	1,251,478	0	225,224	225,224	0%	18%	18%
Región Centro	38,906,761	25,793,401	24,955,962	23,624,892	66%	64%	61%

Fuente: Elaboración propia.

La cobertura global de población varía entre 61 y 66%, para los diferentes considerados. De tal forma, la población mínima cubierta comprende 23.6 millones de habitantes de la Región Centro, para PM_{2.5} (Tabla 5). Cabe señalar que en el caso del estado de Morelos no existió información válida para poder evaluar la exposición a contaminantes atmosféricos.

Escenarios de gestión de la calidad del aire

Para evaluar la mortalidad evitable que se podría alcanzar por reducir los niveles de exposición a PM_{2.5}, PM₁₀ y O₃ en la Región Centro, se estudiaron una serie de escenarios de gestión (escenarios de control) los cuales consideran concentraciones contrafactuales. Dichas concentraciones corresponden a los límites permisibles recomendados por las normas de calidad del aire mexicanas (NOM) y los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), así como un escenario intermedio entre estas dos referencias. En la siguiente tabla se resumen estos escenarios. Las concentraciones contrafactuales se indican como promedios anuales, y con respecto a las métricas de exposición aplicables cada contaminante.

Tabla 6 Escenarios de reducción de concentraciones de contaminantes (escenarios de gestión)

Contaminante	Métrica de exposición	Valores de referencia			Unidades
		Escenario 1) NOM ^a	Escenario 2) OMS ^b	Escenario 3) Medio	
PM _{2.5}	Promedio anual ^c	10	12	11	µg/m ³
PM ₁₀	Promedio anual ^d	20	40	30	µg/m ³
O ₃	Promedio móvil	50	70	60	ppb

de 8 horas^e

- a) Con base en NOM-020-SSA1-2014 y NOM-025-SSA1-2014.
- b) Con base en los lineamientos de Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).
- c) El valor de referencia se aplica al promedio anual de las concentraciones medias de 24 horas diarias.
- d) El valor de referencia se aplica al promedio anual de las concentraciones medias de 24 horas diarias.
- e) El valor de referencia se aplica a los promedios móviles de 8 horas máximos diarios. Posteriormente se estima el promedio anual de los promedios de 8 horas máximos diarios, conforme a las FCR utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

La importancia de los escenarios de reducción de concentraciones es que suponen que los impactos a la salud y su valoración económica son los que se obtendrían al haber conseguido un nivel óptimo de calidad del aire. Alcanzar este estado implica emprender diversas políticas e gestión de calidad del aire para prevenir y controlar la emisión de contaminantes atmosféricos. Por tal motivo, es recomendable que se evalúen particularmente las medidas de reducción de emisiones específicas en la Región Centro, para estimar sus beneficios particulares y poder contrastarlo con los costos de su implementación.

Caracterización de la mortalidad evitable

En la presente EIS se utilizó el software Benefits Mapping and Analysis Program – Community Edition (BenMAP-CE) versión 1.1-7. La metodología EIS vincula la información epidemiológica, ie Función Concentración-Respuesta y las concentraciones de contaminantes para cuantificar las muertes evitables correspondientes a los escenarios de gestión establecidos. BenMAP-CE emplea un modelo que calcula la distribución de la probabilidad de que ocurra el impacto en la salud dada la distribución de cada una de las variables (en este caso de las FCR). De manera específica este software utiliza la técnica de Montecarlo, con la cual se captura la incertidumbre de los estimadores de la FCR. El modelo utiliza la siguiente ecuación (Figura 4) para estimar el número de incidencias evitadas (en este caso muertes evitables) a nivel de municipio para el contaminante i.

Figura 4 Ecuación utilizada en la EIS

$$\Delta Y = (1 - e^{-\beta \cdot \Delta C_i}) \cdot P \cdot Y_0$$

The diagram illustrates the components of the equation $\Delta Y = (1 - e^{-\beta \cdot \Delta C_i}) \cdot P \cdot Y_0$. Below the equation, five green arrows point down to corresponding boxes:

- ΔY points to **Mortalidad evitada**
- β points to **FCR** with the formula $\beta = \ln(RR)/\Delta C$
- ΔC_i points to **Cambio de concentración**
- P points to **Población expuesta**
- Y_0 points to **Tasa de mortalidad basal**

Fuente: Elaboración propia con base en RTI International (2015)

En donde:

ΔY = Número de muertes evitables correspondientes al escenario de cambio o de gestión de la calidad del aire, para la población expuesta y la causa de muerte analizada.

β = Coeficiente de riesgo unitario, el cual es una representación logarítmica de la relación entre el riesgo relativo y el cambio de concentración del contaminante, los cuales provienen directamente de las FCR de la revisión de literatura epidemiológica.

ΔC_i = Cambio de concentraciones de contaminante i corespondiente al escenario de cambio o de gestión de la calidad del aire (i.e. escenario control – escenario base).

P = Población expuesta analizada del grupo de edad correspondiente

Y_0 = Tasa de mortalidad basal para el grupo de edad correspondiente y para la causa de mortalidad analizada.

El coeficiente de riesgo unitario se estima como se indica a continuación (ecuaciones 1 y 2):

A partir del riesgo relativo (RR),

$$\beta = \frac{\ln(RR)}{\Delta C} \quad (1)$$

Donde ΔC es el cambio en la concentración del contaminante, o de manera más general del factor de riesgo que se está evaluando.

En caso de que en el estudio epidemiológico se presente la información en forma de razón de momios (OR), el procedimiento para obtener el coeficiente de riesgo unitario es el mismo que para el riesgo relativo, es decir:

$$\beta = \frac{\ln(OR)}{\Delta C} \quad (2)$$

Como se había anticipado anteriormente, la población expuesta (P) fue estimada a partir de información del censo y conteo 2010 y 2015, respectivamente, a nivel de municipio y por grupos de edades correspondientes a las FCR seleccionadas.

Finalmente, las tasas de mortalidad (Y_0) se obtuvieron a partir de la base de información “Estadística de defunciones generales” (INEGI, 2016b). En esta base de datos las causas de defunción se codifican de acuerdo a la Clasificación Internacional de Enfermedades (CIE), publicada por la OMS y cuya versión actual es la correspondiente a la décima revisión (CIE-10). La causa CIE-10 es directamente relacionada con las FCR de la literatura epidemiológica. La información que brinda esta base de datos es el número de casos registrados (ie defunciones en un año calendárico). Para el presente estudio se obtuvo la base del año 2014 misma que se procesó para obtener el número de casos de cada una de

las causas (CIE-10) de interés y para los grupos de edad indicados por las FCR seleccionadas.

Debido a que el software BenMAP-CE precisa tasas de mortalidad y no número de casos se procedió a calcular la tasa de mortalidad anual de cada impacto a la salud requerido, usando la información de población estimada al 2014 para cada municipio y para los grupos de edad en cuestión. La tasa de mortalidad específica por grupo etario y causa, en el sitio seleccionado, está dada por:

$$R_{j,k,l} = \frac{D_{k,l,m}}{P_{j,m,2}} \quad (3)$$

Donde:

$R_{k,l,m}$ es la tasa de mortalidad por grupo de edad k , causa de mortalidad l y municipio m , en el año 2014.

$D_{k,l,m}$ es el conteo de muertes del subgrupo para el año 2014.

$P_{j,m}$ es el tamaño de la población en el municipio m , del grupo de edad j para el año 2014.

El producto de la población expuesta (P) y la tasa de mortalidad (Y0) dan como resultado la incidencia basal; es decir, indican el número de muertes que ocurren en el año base, y sobre las cuales se aplican los estimadores epidemiológicos de riesgo relativo.

Valoración económica

En esta etapa se asigna un valor monetario a las muertes evitadas estimadas en los pasos anteriores de la EIS. La finalidad de asignar un valor a la mortalidad evitable es transformar los beneficios a la salud a una métrica común, en este caso un valor monetario, con lo cual se facilite la comparación entre los costos de otras políticas públicas.

En la literatura económica se describen dos métodos generales para la valoración de mortalidad: i) la aproximación por capital humano y ii) el método de disposición a pagar o valor de una vida estadística (VVE) (Arthur, 1981). El método elegido para la valoración económica es el de VVE, el cual consiste en calcular la disposición a pagar de los individuos para asegurar una disminución marginal en el riesgo de una muerte prematura (WHO - OECD, 2015).

El VVE no debe confundirse con un valor asignado a la vida de una persona en específico, se refiere a la suma del valor que cada individuo otorga a pequeños cambios en el riesgo de muerte (OECD, 2011), lo cual también puede interpretarse como “el valor que le otorga

una sociedad a evitar la muerte de una persona no identificada dentro de la misma” (INSP-CMM, 2015).

En México no se ha consensado un VVE para que sea utilizado en esta clase de análisis a nivel nacional. Además, en México es muy escasa la realización de estudios primarios (estudios de preferencias declaradas o reveladas). Usualmente se ha recurrido a transferir los valores de estudios efectuados en otros países, generalmente de Estados Unidos y Europa, ajustándolos por las diferencias de ingreso entre el país de donde provenga el VVE y México. Esta, recomendada por la OECD (2012), es conocida como transferencia de beneficios.

A partir de una revisión de los VVE disponibles para México (INSP-CMM, 2015) se observó que los valores obtenidos por estudios primarios en México tienden a ser significativamente menores que los obtenidos por transferencia de beneficios. Esto se podría explicar, al menos parcialmente, debido a que la mayoría de estudios se han realizado en países desarrollados (Hammit & Robinson, 2011; Ready & Navrud, 2006).

Al carecer de un VVE oficial, y a la clara diferencia entre los valores locales y los transferidos, debe tomarse con cautela la valoración económica de las muertes evitables. Ante esta situación se decidió efectuar la valoración por medio de un VVE local como estimador primario, así como un VVE determinado por transferencia de beneficios, como estimador secundario para determinar la sensibilidad de esta variable crítica del estudio.

El VVE local elegido corresponde a un valor de 1.6 millones de MXN (a preciso del 2014), que resulta del estudio de valoración contingente más reciente que se haya realizado en México⁴. Aunque dicho estudio aún se encuentra en calidad de borrador, se ha demostrado que este es un valor aceptable y que además puede ser referido como un estimador conservador del rango de VVE.

Alternativamente, y para facilitar la comparación con otras evaluaciones recientemente efectuadas, se transfirió el VVE determinado en el meta-análisis de Kochi et al. (2006), mismo que considera estudios tanto de preferencias reveladas como declaradas. El valor de este estudio es frecuentemente citado, y se utilizó en el estudio efectuado recientemente por el INECC (2014b) para las Zonas Metropolitanas del Valle de México, Monterrey y Guadalajara.

⁴ A partir del borrador del informe: INECC-LSE (2015). The value of statistical life in Mexico: a contingent valuation study

El VVE central de Kochi et al. (2006) es de 5.4 millones de USD a precios del 2000. Siguiendo el método de transferencia por el INECC (2014b), la transferencia de beneficios realizó a partir de la siguiente expresión:

$$VVE_{MEX}(2014) = VVE_{Kochi}(2000) * \left(\frac{Y_{MEX}(2000)}{Y_{EEUU}(2000)} \right)^{\beta} \quad (1)$$

Donde,

$VVE_{MEX}(2014)$, es el Valor de una Vida Estadística (VVE) para México en dólares estadounidenses del 2014.

$VVE_{Kochi}(2000)$, es el VVE en dólares estadounidenses del 2000, obtenido del meta-análisis realizado por Kochi et al. (2006).

Y_{MEX} , es el Ingreso Nacional Bruto (INB) real per cápita de México, basado en el método del PPP, del mismo año que el VVE original (World Bank, 2015).

Y_{EEUU} , es el Ingreso Nacional Bruto (INB) real per cápita de Estados Unidos, basado en el método del PPP, del mismo año que el VVE original (World Bank, 2015).

β , es la elasticidad ingreso del VVE. Se utilizaron elasticidades de **0.5 y 2**, siguiendo INECC (2014b).

A partir de la expresión anterior se obtuvieron dos VVE, a partir de $\beta= 0.5$ y $\beta= 2.0$ (INECC, 2014a). A partir de esos dos resultados se calcula la media geométrica de los valores. El valor resultante se ajusta por inflación con el incremento porcentual de los precios del año 2000 al 2014, calculado a partir del CPI de Estados Unidos (OECD, 2015).

El valor obtenido se convirtió a pesos mexicanos del 2014, con el tipo de cambio corregido por el PPP del mismo año. El valor que se obtiene es un VVE para México de 13.85 millones de MXN (a preciso del 2014).

En la Tabla 7 se resumen los VE utilizados en la valoración económica de las muertes evitables estimadas en la presente EIS para la Región Centro.

Tabla 7 Resumen de VVE seleccionados (a precios del 2014)

VVE seleccionados	Millones de MXN	Millones de USD
VVE ₁ : Estimador primario	1.69	0.211
VVE ₂ : Estimador alternativo	13.85	1.75

Fuente: Elaboración propia.

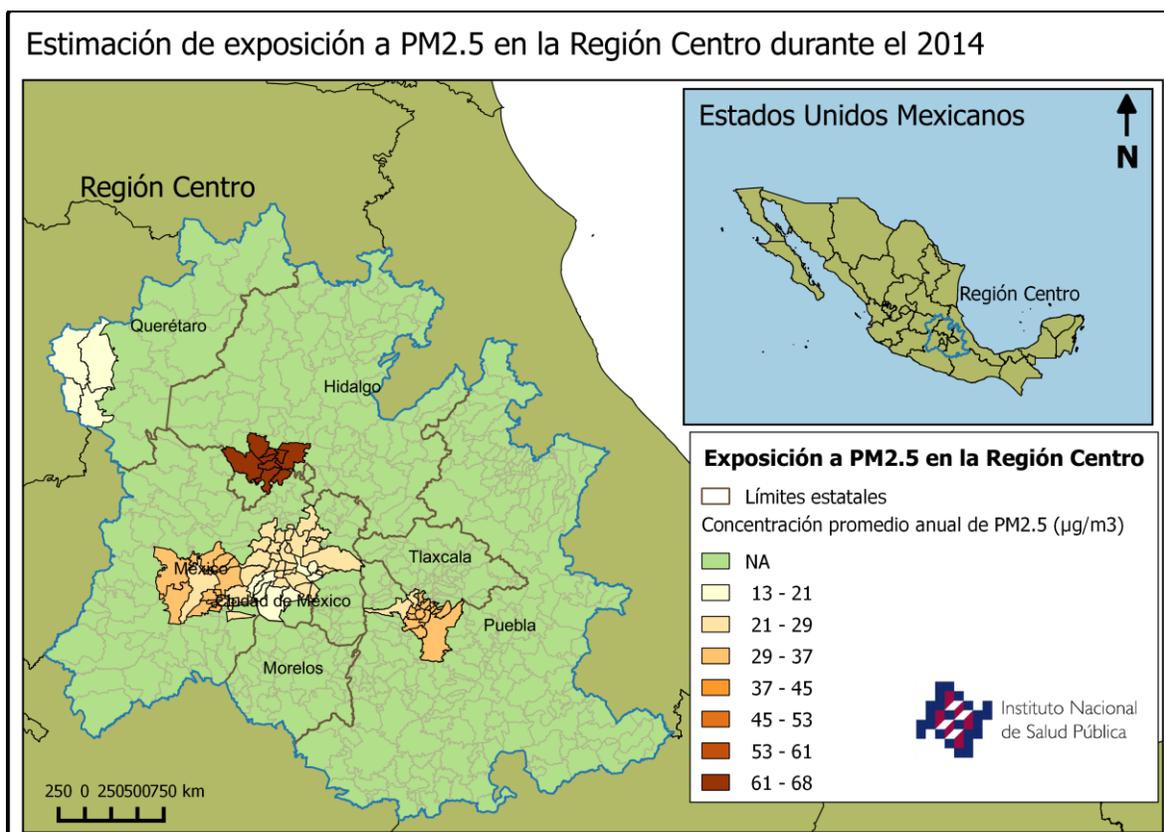
Resultados

Exposición basal a contaminantes atmosféricos en la región centro

Siendo el alcance central de este estudio la evaluación de la mortalidad que se podría evitar en la Región Centro si se mejorara la calidad del aire, y en apego a la metodología de EIS, es indispensable conocer las concentraciones actuales de los contaminantes de interés. Las FCR seleccionadas determinan la métrica de exposición requerida para evaluar los impactos deseados (ie mortalidad a largo plazo). En el caso de PM_{10} y $PM_{2.5}$ las FCR emplean como métrica diaria el promedio de 24 horas diarias; mientras que en el caso de O_3 se utiliza el máximo diario de los promedios móviles de 8 horas. En todos los casos se estima una concentración promedio anual bajo consideraciones específicas, como la validación de la suficiencia de información igual o mayor al 75% de datos diarios, trimestrales y anuales, en concordancia de las especificaciones de las Normas Oficiales Mexicanas.

A continuación se describen los resultados de la estimación de exposición de $PM_{2.5}$ (Figura 5), PM_{10} (Figura 6) y O_3 (Figura 7) en la Región Centro durante el 2014, con base en la información de estaciones de monitoreo de calidad del aire de los sistemas locales.

En la Figura 5 se muestra el resultado de la evaluación de exposición a $PM_{2.5}$, uno de los contaminantes de mayor impacto a la mortalidad de largo plazo (crónica). En el mapa se pueden constatar concentraciones anuales promedio de entre 13 y 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; es decir que en todos los casos se registran valores por encima del estándar de la NOM (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el lineamiento de la OMS (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Se destaca, no obstante, que un número importante de municipios no cuentan con información confiable de calidad del aire (ie 39% de la población), por lo que no se incluyen en la presente EIS.

Figura 5 Estimación de exposición a $PM_{2.5}$ en la Región Centro durante el 2014 (promedio anual)

* Concentración promedio anual determinada a partir de los promedio de 24 horas diarios y con un criterio de suficiencia de información igual o mayor a 75% diario, trimestral y anual. NA: Municipio sin información de calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el mapa anterior los municipios circundantes a Tula de Allende en Hidalgo son los que presentan las concentraciones anuales más altas de $PM_{2.5}$. Los municipios de Atitalaquia, Tlaxcoapan, Tlahuelilpan, Tetepango y Tezontepec de Aldaman de dicho estado son los 5 municipios con los niveles más altos de la región. Después de estos, los municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca también presentan valores particularmente altos con respecto al resto de la región.

En resumen, la concentración promedio de $PM_{2.5}$ ponderada por población de las entidades (Tabla 8) indica que el valor más alto se presenta en el estado de Hidalgo ($65.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), no obstante su cobertura de monitoreo es baja (11%) y por tanto no representativa del estado. La concentración ponderada más baja se presenta en Querétaro ($13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con una cobertura de monitoreo aceptable del 61%. El promedio ponderado de toda la Región Centro es de $24.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que lo coloca entre 2.0 y 2.5

veces por encima de los estándares de las NOM ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), respectivamente. Cabe destacarse que el promedio ponderado del Estado de México incluye valores de los SMCA de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Morelos no se evaluó por falta de información.

Tabla 8 Concentración anual de $\text{PM}_{2.5}$ ponderada por población

Entidad	Población total 2014	Población EIS ^a	Cobertura (%) ^b	Concentración anual ponderada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^c
Estado de México ^d	15,975,116	11,026,815	69%	24.9
Ciudad de México	8,904,558	8,768,133	98%	23.1
Puebla	6,086,625	2,080,787	34%	29.2
Hidalgo	2,817,951	302,684	11%	65.4
Querétaro	1,993,536	1,221,249	61%	13.5
Morelos	1,877,498	0	0%	NA
Tlaxcala	1,251,478	225,224	18%	29.4
Región Centro	38,906,761	23,624,892	61%	24.6

^a Población de los municipios seleccionados con cobertura de monitoreo a un radio de 10 km de las estaciones.

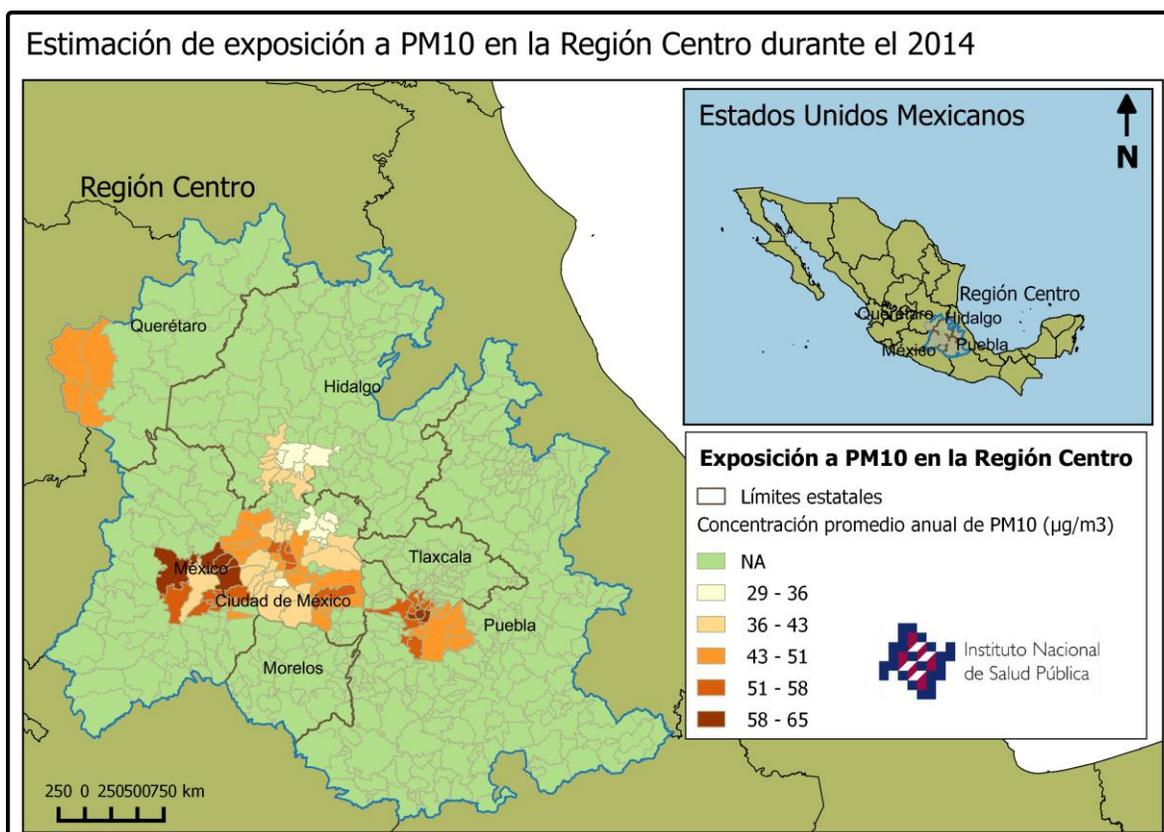
^b Fracción de la población con cobertura de monitoreo con respecto a la población total en el 2014.

^c Concentración ponderada por la población incluida en la EIS de cada entidad federativa de la Región Centro.

^d Comprende valores de los SMCA de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se muestra el resultado de la evaluación de exposición a PM_{10} . En el mapa se pueden observar concentraciones anuales promedio de entre 29 y $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se destaca, no obstante, que un número importante de municipios no cuentan con información confiable de calidad del aire (ie 36% de la población), por lo que no se incluyen en la presente EIS.

Figura 6 Estimación de exposición a PM₁₀ en la Región Centro durante el 2014

* Concentración promedio anual determinada a partir de los promedio de 24 horas diarios y con un criterio de suficiencia de información igual o mayor a 75% diario, trimestral y anual.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el mapa anterior los municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en el estado de México y de la Zona Metropolitana de Puebla son los que presentan las concentraciones anuales más altas de PM₁₀. Los municipios de Almoloya de Juárez, Temoaya, Oztolotepec y Lerma del estado de México se encuentran dentro de los 5 municipios con los niveles más altos de la región, junto con el municipio de Juan C. Bonilla de Puebla.

En resumen, la concentración promedio de PM₁₀ ponderada por población de las entidades (Tabla 9) indica que el valor más alto se presenta en el estado de Tlaxcala (52.0 µg/m³), no obstante su cobertura de monitoreo es baja (18%), por lo que no es representativa de todo el estado. La concentración ponderada más baja se presenta en Hidalgo (36.2 µg/m³), también con una cobertura de monitoreo baja (8%). El promedio ponderado de toda la Región Centro es de 45.2 µg/m³, lo que lo coloca entre 1.1 y 2.3 veces por encima de los estándares de las NOM (40 µg/m³) y la OMS (20 µg/m³),

respectivamente. Cabe destacarse que el promedio ponderado del Estado de México incluye valores de los SMCA de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Morelos no se evaluó por falta de información.

Tabla 9 Concentración anual de PM_{10} ponderada por población

Entidad	Población total 2014	Población EIS ^a	Cobertura (%) ^b	Concentración anual ponderada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^c
Estado de México	15,975,116	12,131,389	76%	45.7
Ciudad de México	8,904,558	8,904,558	100%	44.0
Puebla	6,086,625	2,250,107	37%	47.6
Hidalgo	2,817,951	223,435	8%	36.2
Querétaro	1,993,536	1,221,249	61%	44.3
Morelos	1,877,498	0	0%	NA
Tlaxcala	1,251,478	225,224	18%	52.0
Región Centro	38,906,761	24,955,962	64%	45.2

^a Población de los municipios seleccionados con cobertura de monitoreo a un radio de 10 km de las estaciones.

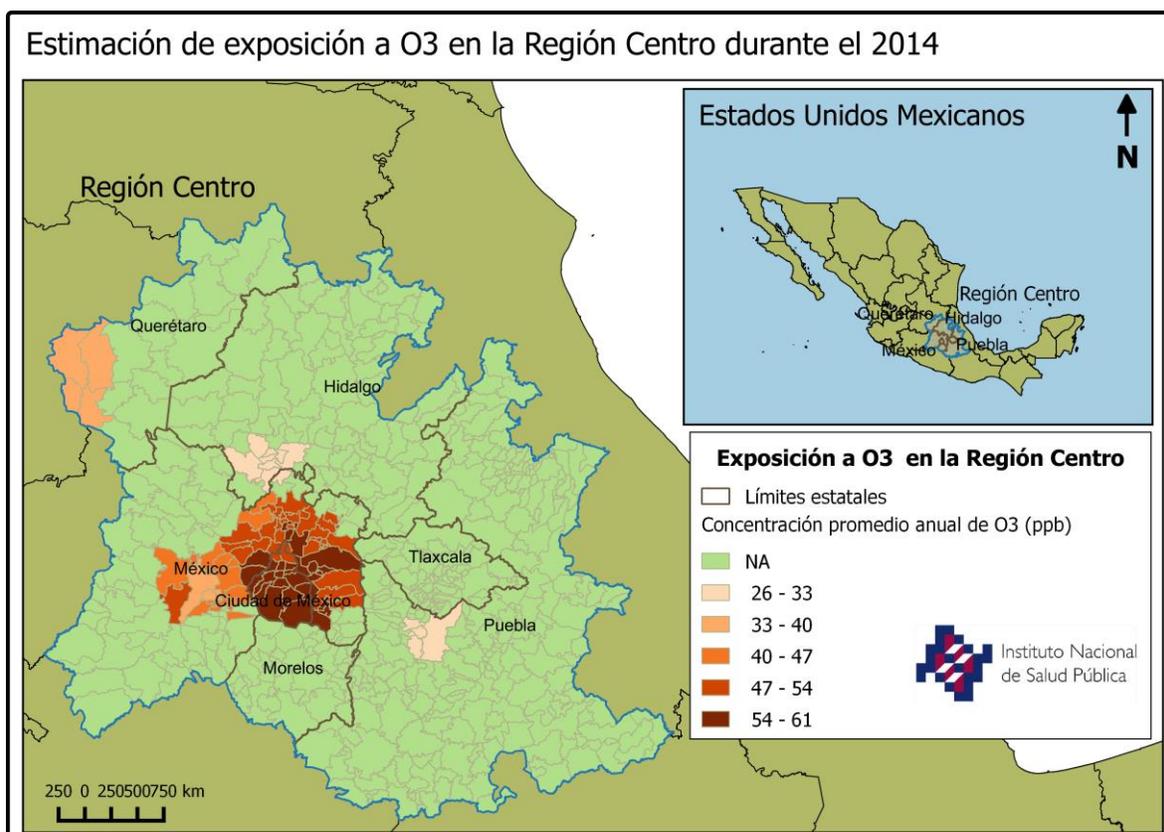
^b Fracción de la población con cobertura de monitoreo con respecto a la población total en el 2014.

^c Concentración ponderada por la población incluida en la EIS de cada entidad federativa de la Región Centro.

^d Comprende valores de los SMCA de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se muestra el resultado de la evaluación de exposición a O_3 . En el mapa se pueden observar concentraciones anuales promedio de entre 26 y 61 ppb. Se destaca, no obstante, que un número importante de municipios no cuentan con información confiable de calidad del aire (ie 34 % de la población), por lo que no se incluyen en la presente EIS.

Figura 7 Estimación de exposición a O₃ en la Región Centro durante el 2014

* Concentración promedio anual determinada a partir de los promedios móviles de 8 horas máximos diarios y con un criterio de suficiencia de información igual o mayor a 75% diario, trimestral y anual. NA: sin información de calidad del aire.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el mapa anterior los municipios de la Ciudad de México, principalmente los del sur, son los que presentan las concentraciones ponderadas más altas. Los municipios de Coyoacán, Tláhuac, Iztapalapa, Xochimilco e Iztacalco de dicha ciudad son las 5 delegaciones con los niveles más altos de la región. Algunos municipios de la zona conurbada del estado de México también presentan valores similarmente altos.

En resumen, la concentración promedio de O₃ ponderada por población de las entidades (Tabla 10) indica que el valor más alto se presenta en la Ciudad de México (57.3 ppb), con una excelente cobertura de monitoreo absoluta. La concentración ponderada más baja se presenta en Puebla (27.6 ppb), con una cobertura de monitoreo regular (33%). El promedio ponderado de toda la Región Centro es de 50.8 ppb, lo que lo coloca por debajo del estándar de la NOM (70 ppb) y ligeramente por encima del estándar de la OMS (50 ppb). Cabe destacarse que el promedio ponderado del Estado de México incluye valores

de los SMCA de la Ciudad de México y de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Morelos y Tlaxcala no fueron evaluados por falta de información.

Tabla 10 Concentración anual de O₃ ponderada por población

Entidad	Población total 2014	Población EIS ^a	Cobertura (%) ^b	Concentración anual ponderada (µg/m ³) ^c
Estado de México	15,975,116	13,503,267	85%	51.6
Ciudad de México	8,904,558	8,904,558	100%	57.3
Puebla	6,086,625	1,861,642	31%	27.6
Hidalgo	2,817,951	302,684	11%	29.5
Querétaro	1,993,536	1,221,249	61%	34.0
Morelos	1,877,498	0	0%	NA
Tlaxcala	1,251,478	0	0%	NA
Región Centro	38,906,761	25,793,401	66%	50.8

Fuente: Elaboración propia.

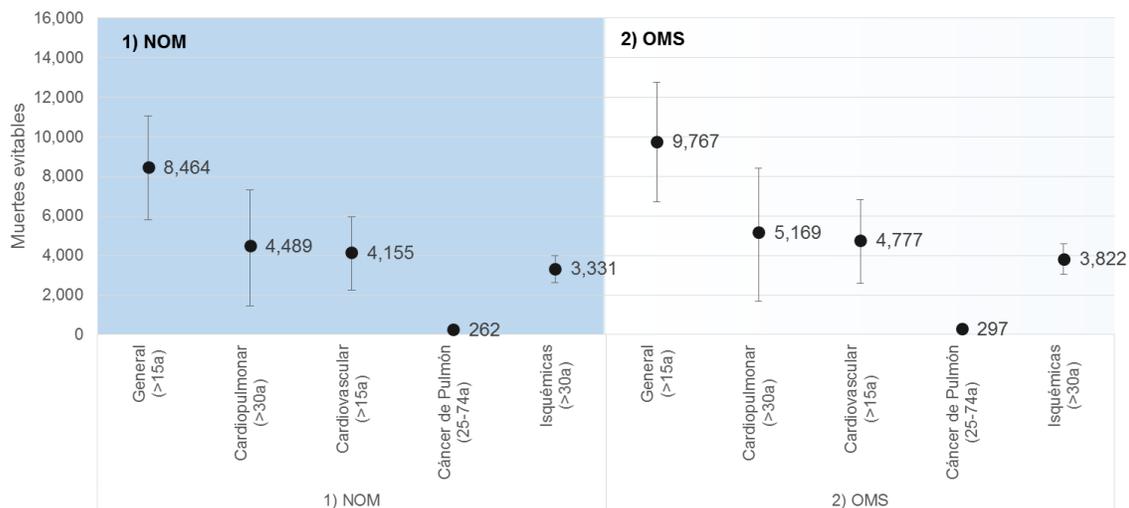
Reducción de PM_{2.5}: mortalidad evitable y valoración económica

En las siguientes secciones se presentan los resultados de la EIS en torno a las muertes evitables (M.E.) por la reducción de la exposición a largo plazo de PM_{2.5} en la Región Centro, así como la valoración económica de estas.

Mortalidad evitable

En la Figura 8 se presentan los resultados globales sobre la caracterización de mortalidad evitable por causas generales (no externas) y específicas (cardiopulmonares, cardiovasculares, cáncer de pulmón y enfermedades isquémicas del corazón) en distintos estratos de población en la Región Centro durante el 2014. Se muestran resultados para los escenarios correspondientes a los estándares: 1) 12 µg/m³ (NOM) y 2) 10 µg/m³ (OMS). Se indican los estimadores promedio (M.E. media) y los del intervalo de confianza al 95% (Percentiles 2.5 y 97.5) vinculados a la incertidumbre de las FCR utilizadas.

Figura 8 Muertes evitables promedio (IC 95%) por escenario y causa a consecuencia de la reducción de $PM_{2.5}$ en la Región Centro (año base 2014)



* Escenarios de gestión: 1) NOM ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2) OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados promedio de la evaluación por causas generales (naturales no externas) en la Región Centro son de 8,464 y 9,767 M.E. para los escenarios NOM y OMS, respectivamente. Con respecto a las causas específicas analizadas las cardiopulmonares representan el 53% de las causas generales, mientras que las cardiovasculares el 49%, cáncer de pulmón el 3% y las enfermedades isquémicas del corazón el 39%, en ambos escenarios.

Adicionalmente, se estima que en el escenario medio ($11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se podrían evitar 9,115 muertes prematuras por causas generales en la Región Centro durante 2014.

Las muertes evitables promedio se desagregan por entidad federativa en la Tabla 11. Destaca la contribución de poco más de 80% de la Ciudad de México y el Estado de México a la mortalidad evitable por causas generales de la Región Centro, como resultado de alta población y a la cobertura de monitoreo que presentan. Se muestran también los resultados para cada una de las causas específicas analizadas. En Morelos no fue posible realizar la evaluación debido a la falta de información válida de monitoreo de $PM_{2.5}$ en el 2014. Por su parte, el estado de Tlaxcala es evaluado a consecuencia de la influencia que tienen sobre algunos de sus municipios las estaciones del estado de Puebla.

Tabla 11 Mortalidad evitable promedio por escenario y causa a consecuencia de la reducción de $PM_{2.5}$ en las entidades de la Región Centro

Entidades	Pob. Tot. 2014	Cob. Pob. (%)	Mortalidad General (>15a)		Cardiopulmonar (>30a)		Cardiovascular (>15a)		Cáncer de Pulmón (25-74a)		Isquémicas del Corazón (>30a)	
			NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS
Ciudad de México	8,904,558	98%	4,038	4,709	2,235	2,600	2,076	2,411	150	171	1,758	2,034
Estado de México	15,975,116	69%	2,978	3,420	1,556	1,780	1,431	1,635	77	86	1,125	1,281
Hidalgo	2,817,951	11%	284	293	138	142	120	123	5	5	85	87
Puebla	6,086,625	34%	1,047	1,162	503	556	477	527	27	29	324	356
Querétaro	1,993,536	61%	43	102	23	54	21	48	1	3	18	42
Tlaxcala	1,251,478	18%	73	81	34	38	31	34	2	2	21	23
Morelos	1,877,498	0%	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Región Centro	38,906,761	61%	8,464	9,767	4,489	5,169	4,155	4,777	262	297	3,331	3,822

* Escenarios de gestión: 1) NOM ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2) OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

** NA: No evaluado por falta de información de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

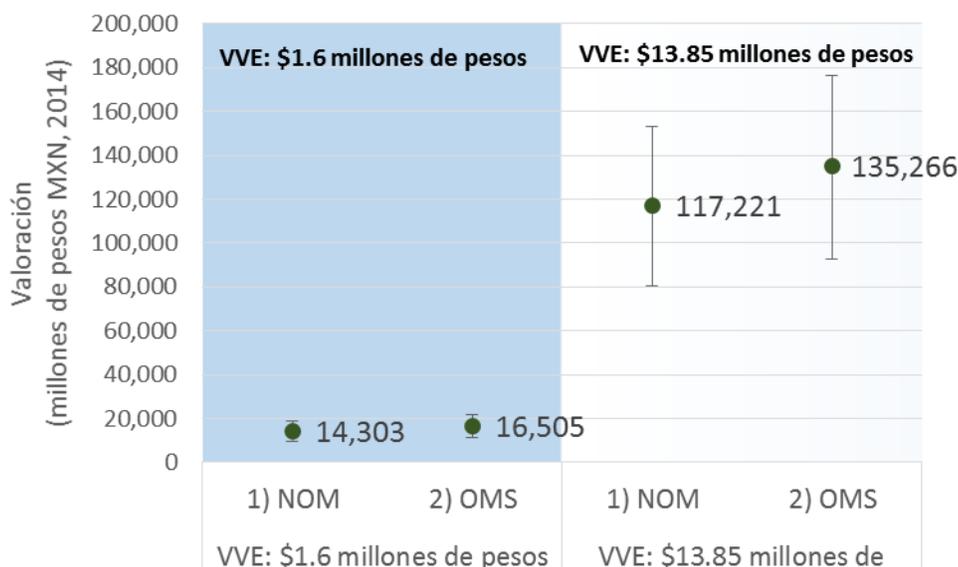
Valoración económica

La valoración económica de las muertes evitables por causas generales en la Región Centro correspondiente a la reducción de $PM_{2.5}$ se ilustra en la Figura 9. Aquí se muestra la valoración de los escenarios NOM y OMS con los dos VVE seleccionados para el estudio: 1.6 millones de pesos y 13.85 millones de pesos (MXN, 2014), respectivamente.

La valoración indica que los beneficios por reducir las $PM_{2.5}$ en la Región Centro oscilarían entre 14 y 16 mil millones de pesos (NOM y OMS, respectivamente) bajo el VVE más conservador (VVE: 1.6 millones de pesos). Asimismo, la valoración ascendería a entre 117 y 135 mil millones de pesos (NOM y OMS, respectivamente) bajo el VVE menos conservador (VVE: 13.85 millones de pesos); es decir, alrededor de 8 veces mayor que el primer supuesto.

Adicionalmente, en el escenario medio ($11 \mu\text{g}/\text{m}^3$) los beneficios sociales serían de entre 14.6 y 126 mil millones de pesos, con respecto a cada uno de los VVE empleados.

Figura 9 Valoración económica de las muertes evitables por causas generales asociadas a la reducción de PM_{2.5} en la Región Centro



Fuente: Elaboración propia.

Reducción de PM₁₀: mortalidad evitable y valoración económica

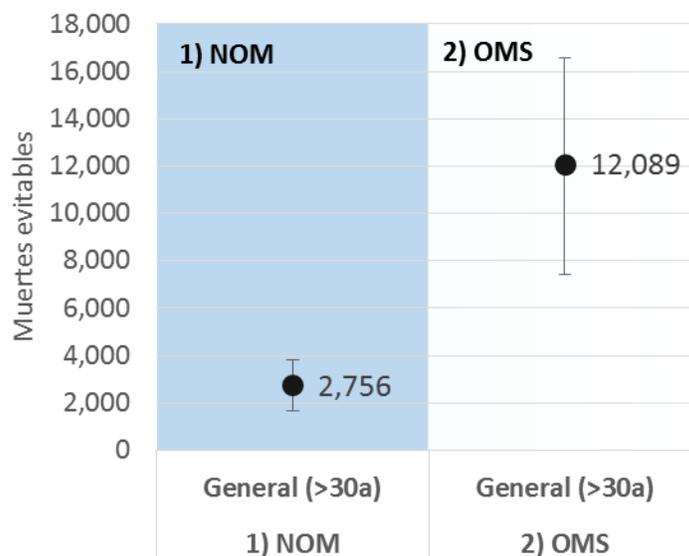
En las siguientes secciones se presentan los resultados de la EIS en torno a las muertes evitables por la reducción de la exposición a largo plazo de PM₁₀ en la Región Centro, así como la valoración económica de estas.

Mortalidad evitable

Población adulta

En la Figura 10 se presentan los resultados globales sobre la caracterización de mortalidad evitable por causas generales (no externas) en población de 30 años o más en la Región Centro en el año de análisis. Se muestran resultados para los escenarios correspondientes a los estándares: 1) 40 µg/m³ (NOM) y 2) 20 µg/m³ (OMS). Se indican los estimadores medios (M.E. media) y los del intervalo de confianza al 95% (Percentiles 2.5 y 97.5) vinculados a la incertidumbre de las FCR utilizadas.

Figura 10 Muertes evitables promedio (IC 95%) por escenario en adultos a consecuencia de la reducción de PM_{10} en la Región Centro (año base 2014)



* Escenarios de gestión: 1) NOM ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2) OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados promedio de la evaluación por causas generales (no externas) en la Región Centro son de 2,756 y 2,089 M.E. para los escenarios NOM y OMS, respectivamente. Es resaltable el incremento sustancial de las muertes evitables en el escenario OMS con respecto al NOM (4.4 veces mayor), misma que no se observa en el caso de la evaluación de $PM_{2.5}$ (Figura 8). Los factores que denotan dicho comportamiento son: 1) mayor cobertura de monitoreo de PM_{10} , y 2) la amplia diferencia entre el escenario OMS y NOM ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para PM_{10} , con respecto a los escenarios de $PM_{2.5}$ (diferencia de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cabe destacar que en la evaluación de PM_{10} en adultos no se analizó ninguna causa específica debido a la escasez de evidencia particular.

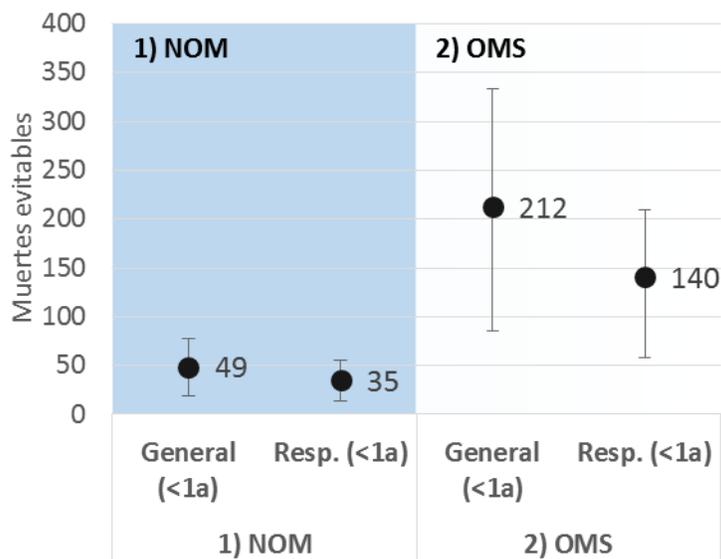
Adicionalmente, se estimó que en el escenario medio ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se podrían evitar 7,422 muertes prematuras en adultos por causas generales en la Región Centro durante 2014.

Población infantil menor a un año

En la Figura 11 se presentan los resultados globales sobre la caracterización de mortalidad evitable por causas generales (no externas) en población infantil menor de un año en la Región Centro en el año de análisis. Se muestran resultados para los escenarios correspondientes a los estándares: 1) $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (NOM) y 2) $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS). Se indican los

estimadores medios (M.E. media) y los del intervalo de confianza al 95% (Percentiles 2.5 y 97.5) vinculados a la incertidumbre de las FCR utilizadas.

Figura 11 Muertes evitables promedio (IC 95%) por escenario y causa en infantes a consecuencia de la reducción de PM_{10} en la Región Centro (año base 2014)



* Escenarios de gestión: 1) NOM ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2) OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados promedio de la evaluación por causas generales (no externas) en infantes menores de un año en la Región Centro son de 49 y 212 M.E. para los escenarios NOM y OMS, respectivamente. Asimismo, en la evaluación de causas específicas se encontraron entre 35 y 140 M.E. por causas respiratorias en este grupo de población.

Adicionalmente, se estimó que en el escenario medio ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se podrían evitar 42 muertes prematuras en infantes posneonatales en la Región Centro durante 2014.

Las muertes evitables promedio en adultos e infantes se desagregan por entidad federativa en la Tabla 12. Destaca la contribución mayor a 80% de la Ciudad de México y el Estado de México a la mortalidad evitable en los diversos grupos de población y causas de la Región Centro, como resultado de alta población y a la cobertura de monitoreo que presentan. Se muestran también los resultados para cada una de las causas específicas analizadas. En Morelos no fue posible realizar la evaluación debido a la falta de información válida de monitoreo de PM_{10} en el 2014. Por su parte, el estado de Tlaxcala es

evaluado a consecuencia de la influencia que tienen sobre algunos de sus municipios las estaciones del estado de Puebla.

Tabla 12 Mortalidad evitable promedio por escenario y causa a consecuencia de la reducción de PM_{10} en las entidades de la Región Centro

Entidades	Población total 2014	Cobertura de población (%)	General (>30a)		General (<1a)		Resp. (<1a)	
			NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS
Ciudad de México	8,904,558	100%	1,270	5,945	19	85	11	54
Estado de México	15,975,116	76%	1,067	4,382	21	90	18	62
Hidalgo	2,817,951	8%	0	36	0	0	0	1
Puebla	6,086,625	37%	293	1,153	7	28	5	16
Querétaro	1,993,536	61%	88	477	1	8	1	5
Tlaxcala	1,251,478	18%	38	95	1	2	1	2
Morelos	1,877,498	0%	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Total general	38,906,761	64%	2,756	12,089	49	212	35	140

* Escenarios de gestión: 1) NOM ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2) OMS ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

** NA: No evaluado por falta de información de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

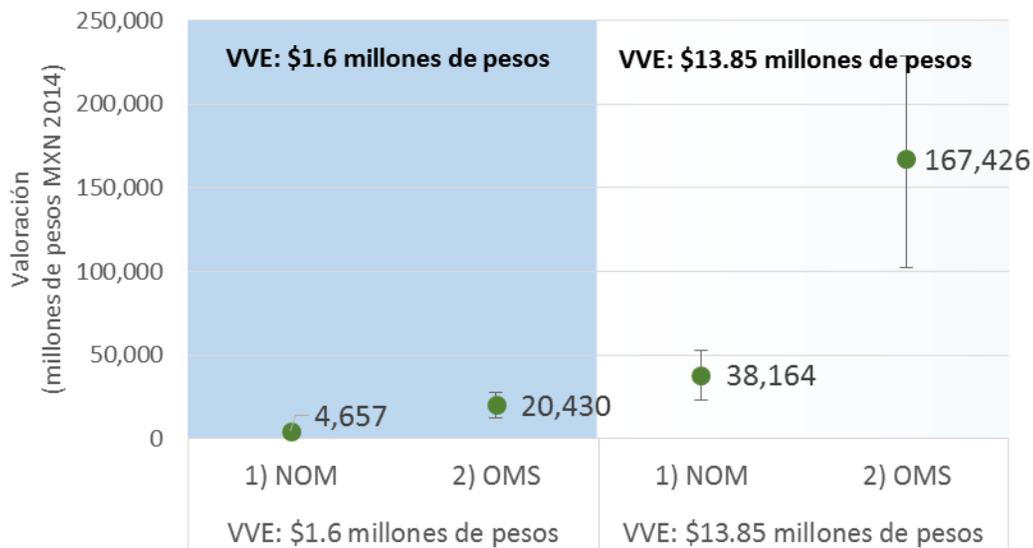
Valoración económica

La valoración económica de las muertes evitables por causas generales en la Región Centro correspondiente a la reducción de $PM_{2.5}$ se ilustra en la Figura 12. Aquí se muestra la valoración de los escenarios NOM y OMS con los dos VVE seleccionados para el estudio: 1.6 millones de pesos y 13.85 millones de pesos (MXN, 2014), respectivamente.

La valoración indica que los beneficios por reducir las PM_{10} en la Región Centro oscilaría a entre 5 y 20 mil millones de pesos (NOM y OMS, respectivamente) bajo el VVE más conservador (VVE: 1.6 millones de pesos). Asimismo, la valoración ascendería a entre 38 y 167 mil millones de pesos (NOM y OMS, respectivamente) bajo el VVE menos conservador (VVE: 13.85 millones de pesos); es decir, alrededor de 8 veces mayor que el primer supuesto.

Adicionalmente, en el escenario medio ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) los beneficios sociales serían de entre 12 y 103 mil millones de pesos, con respecto a cada uno de los VVE empleados.

Figura 12 Valoración económica de las muertes evitables por causas generales asociadas a la reducción de PM₁₀ en la Región Centro



Fuente: Elaboración propia.

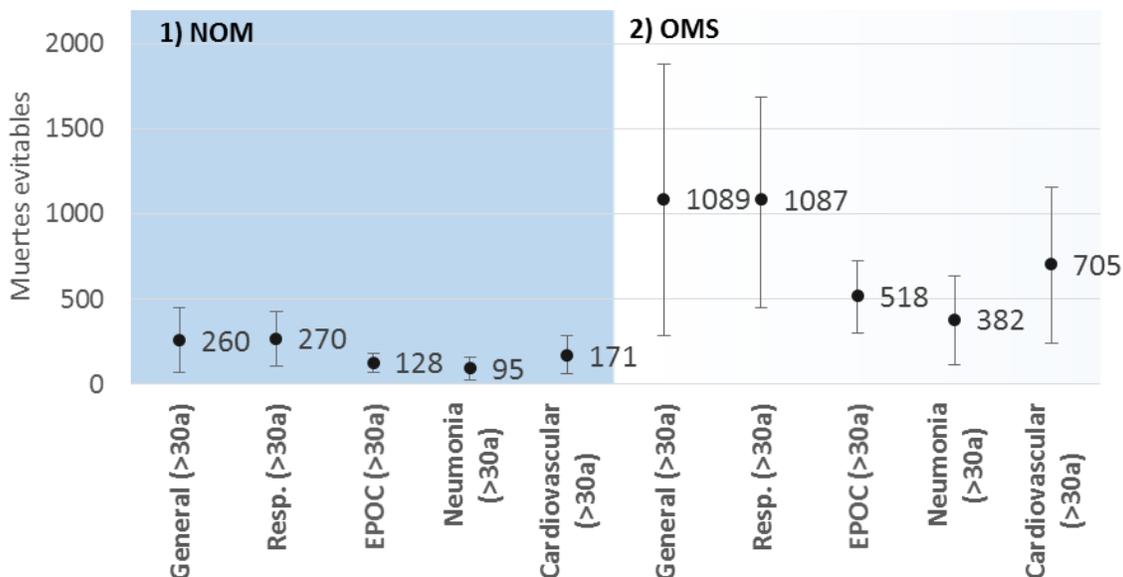
Reducción de O₃: mortalidad evitable y valoración económica

Mortalidad evitable

En la Figura 13 se presentan los resultados globales sobre caracterización de mortalidad evitable por causas generales (no externas) y específicas (cardiovasculares, EPOC, Neumonía y Respiratorias) en población mayor a 30 años en la Región Centro durante el 2014. Se muestran resultados para los escenarios de los estándares de referencias de 70 ppb (NOM) y 50 ppb (OMS). Se indican los estimadores medios (M.E. media) y los del intervalo de confianza al 95% (Percentiles 2.5 y 97.5) vinculados a la incertidumbre de las FCR utilizadas. Cabe señalarse que estos resultados reflejan un escenario hipotético en el que las normas de calidad del aire, con respecto a los promedios móviles de 8 horas, se cumplen todo el año; es decir, que el promedio de 8 horas máximo diario permanece por debajo de los valores de referencia.

Los resultados promedio de la evaluación por causas generales (no externas) en la Región Centro son de 260 y 1,089 M.E. para los escenarios NOM y OMS, respectivamente. Adicionalmente, en el escenario medio (60 ppb) se podrían evitar 674 muertes prematuras en la Región Centro durante el 2014.

Figura 13 Muertes evitables promedio (IC 95%) en el escenario OMS y por causa en adultos a consecuencia de la reducción de O₃ en la Región Centro (año base 2014)



* Escenario de gestión: 1) NOM (70 ppb) y 2) OMS (50 ppb).

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13 se presenta la caracterización de mortalidad evitable media por causas generales específicas en población mayor a 30 años en la Región Centro durante el 2014. Destaca que casi toda la contribución a la mortalidad evitable corresponde a la Ciudad de México y el estado de México. Los estados de Hidalgo, Puebla y Querétaro tienen una contribución casi nula e inclusive, en el caso de Querétaro escenario NOM, las M.E. son cero, en tanto que durante el año sólo ningún promedio de 8 horas rebasa los 70 ppb. Por su parte, en Tlaxcala y Morelos no fue posible realizar la evaluación debido a la falta de información válida de monitoreo de O₃ en el 2014.

Tabla 13 Mortalidad evitable promedio por escenario y causa a consecuencia de la reducción de O₃ en las entidades de la Región Centro

Entidad	Población total 2014	Cob. Pob. (%)	General (>30a)		Resp. (>30a)		EPOC (>30a)		Neumonía (>30a)		Cardiovascular (>30a)	
			NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS
Ciudad de México	8,904,558	100%	191	755	204	770	86	326	79	300	131	510
Estado de México	15,975,116	85%	68	330	66	312	41	189	16	80	40	193
Hidalgo	2,817,951	11%	<1	2	<1	2	<1	1	<1	1	<1	1
Puebla	6,086,625	31%	<1	2	<1	2	<1	1	<1	1	<1	1
Querétaro	1,993,536	61%	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1
Tlaxcala	1,251,478	0%	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Morelos	1,877,498	0%	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Total general	38,906,761	66%	260	1089	270	1087	128	518	95	382	171	705

* Escenario de gestión: 1) NOM (70 ppb) y 2) OMS (50 ppb).

** NA: No evaluado por falta de datos o insuficiencia de información mayor al 75%.

Fuente: Elaboración propia.

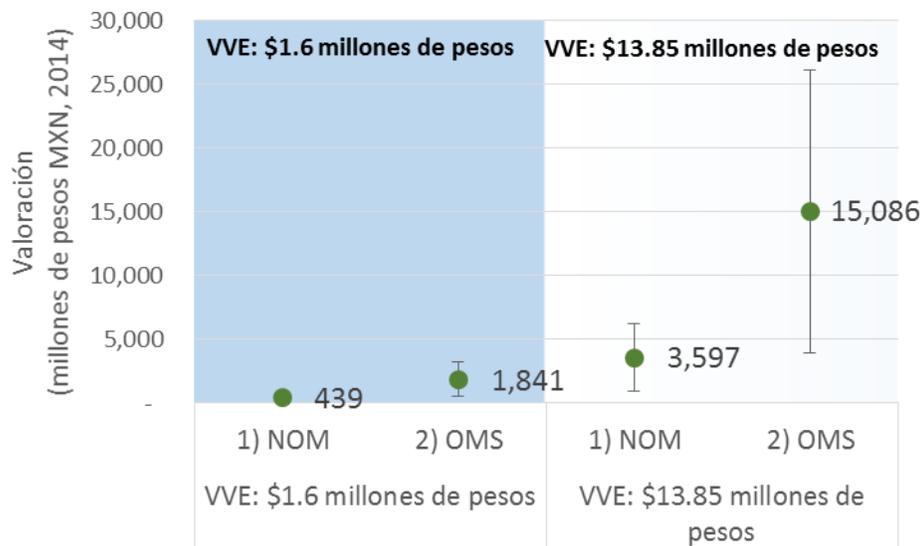
Valoración económica

La valoración económica de las muertes evitables por causas generales en la Región Centro correspondiente a la reducción de O₃ se ilustra en la Figura 14. Aquí se muestra la valoración de los escenarios NOM y OMS con los dos VVE seleccionados para el estudio: 1.6 millones de pesos y 13.85 millones de pesos (MXN, 2014), respectivamente.

La valoración indica que los beneficios por reducir las O₃ en la Región Centro sería de 0.4 y 1.8 mil millones de pesos en el escenario NOM y OMS, respectivamente, al utilizar el VVE más conservador (VVE: 1.6 millones de pesos). Asimismo, la valoración ascendería a entre 3.5 y 15 mil millones de pesos (escenario NOM y OMS, respectivamente) bajo el VVE menos conservador (VVE: 13.85 millones de pesos); es decir, alrededor de 8 veces mayor que el primer supuesto.

Adicionalmente, en el escenario medio (60 ppb) los beneficios sociales serían de entre mil y 9 mil millones de pesos, con respecto a cada uno de los VVE empleados.

Figura 14 Valoración económica de las muertes evitables por causas generales asociadas a la reducción de PM₁₀ en la Región Centro



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados

Comparación de resultados de mortalidad evitable

La comparación de la mortalidad evitable entre las entidades de la Región Centro es compleja debido principalmente a las diferencias de la población y municipios incluidos en la EIS (como resultado de la cobertura desigual de los sistemas de monitoreo). Para facilitar la comparación de resultados y poder analizar mejor el estado actual de los impactos de la calidad del aire se realiza una comparación de los mismos en términos relativos, al dividir las muertes evitables por causa entre la población incluida en la EIS de cada entidad. Las siguientes tablas muestran la mortalidad evitable media por cada 100,000 habitantes por la reducción de los tres contaminantes evaluados. Sólo se analizan los escenarios 1 y 2 (NOM y OMS) por ser los de mayor relevancia en el estudio.

En la comparación para PM_{2.5} (Tabla 14) sobresale el estado de Hidalgo con los mayores indicadores en prácticamente todas las causas analizadas. En el caso de cáncer de pulmón la Ciudad de México también presenta un indicador por encima de la media. El estado de Querétaro presentaría los indicadores más bajos en todos los casos.

En resumen se han determinado que podrían evitarse entre 36 y 41 muertes por causas generales por cada 100,000 habitantes (NOM y OMS, respectivamente) por causas generales en toda la Región Centro.

Tabla 14 Mortalidad evitable media por cada 100,000 habitantes por la reducción de PM_{2.5} en la Región Centro

Entidades	General (>15a)		Cardiopulmonar (>30a)		Cardiovascular (>15a)		Cáncer de Pulmón (25-74a)		Isquémicas del Corazón (>30a)	
	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS
Ciudad de México	46	54	25	30	24	27	2	2	20	23
Estado de México	27	31	14	16	13	15	1	1	10	12
Hidalgo	94	97	46	47	40	41	2	2	28	29
Puebla	50	56	24	27	23	25	1	1	16	17
Querétaro	4	8	2	4	2	4	<1	<1	1	3
Tlaxcala	32	36	15	17	14	15	1	1	9	10
Morelos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Región Centro	36	41	19	22	18	20	1	1	14	16

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la comparación relativa sobre PM₁₀ (Tabla 15) sobresale la Ciudad de México y el estado de Tlaxcala con los mayores indicadores para el análisis de mortalidad

general en adultos en el escenario NOM y OMS, respectivamente. No obstante, se debe resaltar que la Ciudad de México en el escenario NOM tienen un indicador sustancialmente menor, lo que denota que las concentraciones promedio anuales de sus estaciones están relativamente cercanas al estándar de la NOM ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Como se había anticipado anteriormente, los resultados para el estado de Tlaxcala son poco representativos para la totalidad de la entidad debido a la baja cobertura de monitoreo de sus municipios. Con respecto a la mortalidad infantil, las entidades con los mayores indicadores son Puebla y Tlaxcala en las diferentes causas y escenarios, como se observa en la tabla referida.

En resumen se han determinado que podrían evitarse entre 11 y 48 muertes por causas generales por cada 100,000 habitantes (NOM y OMS, respectivamente) por causas generales en adultos en toda la Región Centro. Similarmente, se podría evitar aproximadamente una muerte posneonatal por cada 100,000 habitantes.

Tabla 15 Mortalidad evitable media por cada 100,000 habitantes por la reducción de PM_{10} en la Región Centro

Entidades	General (>30a)		General (<1a)		Resp. (<1a)	
	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS
Ciudad de México	14	67	<1	1	<1	1
Estado de México	9	36	<1	1	<1	1
Hidalgo	<1	16	<1	<1	<1	<1
Puebla	13	51	0	1	<1	1
Querétaro	7	39	<1	1	<1	<1
Tlaxcala	17	42	<1	1	<1	1
Morelos	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Total general	11	48	<1	1	<1	1

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, con respecto al análisis de O_3 (Tabla 16) sobresale, como habría de esperarse, la Ciudad de México con los mayores indicadores en todas las causas analizadas.

En resumen se han determinado que podrían evitarse 1 y 4 muertes por causas generales por cada 100,000 habitantes con respecto a los escenarios NOM y OMS, respectivamente la Región Centro.

Tabla 16 Mortalidad evitable media por cada 100,000 habitantes por la reducción de O_3 en la Región Centro (escenario OMS)

Entidad	General (>30a)		Resp. (>30a)		EPOC (>30a)		Neumonía (>30a)		Cardiovascular (>30a)	
	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS	NOM	OMS
Ciudad de México	2	8	2	9	1	4	1	3	1	6

Estado de México	1	2	<1	2	<1	1	<1	1	<1	1
Hidalgo	<1	1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Puebla	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Querétaro	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1	0	<1
Tlaxcala	NA									
Morelos	NA									
Total general	1	4	1	4	0	2	0	1	1	3

Fuente: Elaboración propia.

Valoración económica

La valoración económica del presente estudio arrojó el beneficio social por mejorar la calidad del aire en la Región Centro podría ascender hasta cerca de 20 millones de MXN⁵, correspondiente a las muertes evitables por reducción de partículas suspendidas⁶ y al estimador primario de valoración⁷. Este indicador se considera una estimación conservadora de la valoración de muertes evitables.

Se analizó la sensibilidad del resultado primario a través de un estimador alternativo de valoración⁸, el cual además ha sido utilizado previamente en diversos estudios nacionales e internacionales (Kochi, et al., 2006; INECC, 2014b). Dicho análisis indica que los beneficios sociales podrían incrementarse hasta cerca de 170 millones de MXN; es decir, un incremento de 8 veces con respecto a la estimación primaria registrada.

Como se puede apreciar la incertidumbre de la valoración económica es sustancial, y por lo tanto sus resultados deben tomarse con cautela. No obstante, permiten corroborar que bajo cualquiera de los supuestos, los beneficios por mejorar la calidad del aire son sustanciales, como se verá a continuación.

Considerando que la Región Centro aportó alrededor del 35% del PIB nacional (ca 5,600,000 millones de MXN) a precios corrientes del 2014 (INEGI, 2016a), los resultados de la valoración económica indicarían que la mejora de la calidad del aire podría representar entre el 0.4% y 3.1% del PIB de la región, considerando el VVE primario y alternativo del estudio, respectivamente. Cabe señalar que esta cifra está subestimada en tanto que la presente EIS sólo incluyó poco más del 60% de la población de la Región Centro, como consecuencia de la limitada información de monitoreo de calidad del aire.

⁵ A precios del 2014.

⁶ En referencia al escenario 2) OMS ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para PM_{10} y causas generales de mortalidad.

⁷ En referencia a un VVE de 1.6 millones de MXN del 2014 (estimador primario) (Ver metodología).

⁸ En referencia a un VVE de 13.85 millones de MXN del 2014 (estimador alternativo) (Ver metodología).

Es apropiado señalar, no obstante la comparación anterior, que al tratarse de una valoración de costos en términos propiamente económicos, los indicadores no deben interpretarse directamente como un impacto directo en las cuentas nacionales (eg en el PIB). Como lo ha señalado reiteradamente la OECD, la valoración de mortalidad en términos económicos no debe confundirse con costos netamente financieros, como el gasto erogado por el sector salud en hospitalizaciones o el pago de un tratamiento o una consulta médica por parte de un individuo; por el contrario, el costo económico involucraría la cuantificación del valor que los individuos dan a la pérdida de aspectos que consideran *valiosos*, destacando la salud y la vida en sí misma (WHO - OECD, 2015). De tal manera que la comparación de la valoración de muertes evitables con el PIB debe entenderse sólo en términos referenciales. Efectivamente nos permite dimensionar mejor la magnitud de los costos sociales que ejerce este factor de riesgo, sin embargo deben evitarse comparaciones simplistas con costos financieros.

Factores de incertidumbre y limitaciones de la EIS

El análisis e interpretación de los resultados de este estudio requieren abordar las diversas fuentes de incertidumbre y limitaciones inherentes a la EIS. Los dos principales factores de incertidumbre son los relacionados con las FCR y los efectos a la salud, así como el método de asignación de exposición a contaminantes.

Debido a la escasez de literatura epidemiológica local sobre mortalidad a largo plazo por exposición a contaminantes, en este estudio se emplean FCR de estudios internacionales. Puesto que la población de estos estudios es distinta a la que aquí se estudia, esto puede generar un nivel de incertidumbre en las estimaciones que se explica, principalmente, a raíz de la variación de susceptibilidad de las diferentes poblaciones, la cual advierte las diferencias demográficas y del estado basal de la salud entre ciudades y a través del tiempo (Hubbell, et al., 2009). Factores tales como la prevalencia de enfermedades pulmonares y del corazón, el acceso a sistemas de salud, entre otros, podrían variar significativamente entre las poblaciones originales de la FCR y la mexicana. Medir estas diferencias es complejo y está fuera de los alcances del estudio.

Otro factor de incertidumbre ligado a las FCR utilizadas se refiere a su forma funcional. La FCR obtenida, por ejemplo, del meta-análisis de Hoek et al (2013), establece un coeficiente de riesgo relativo (RR) de mortalidad por todas las causas (naturales) por cada incremento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$. Este coeficiente es el resultado de un modelo de linearización, el cual es válido dentro del rango de concentraciones del meta-análisis (y de sus estudios originales) hasta aproximadamente 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Si se evalúan concentraciones

base mayores a esta, es posible que surjan discrepancias con respecto a los efectos esperados. En general se considera que, a mayores concentraciones base, la relación deja de aumentar proporcionalmente, por lo que los presentes resultados podrían estar moderadamente sobreestimados. Estudios como el de la carga global de enfermedad o Global Burden of Disease edición 2013 (Fournazaer et al, 2015), han recurrido a aproximaciones como la función de riesgo integrada no lineal desarrollada por Burnett et al (2014) la cual brinda estimadores más conservadores para concentraciones altas de $PM_{2.5}$.

Con respecto a la incertidumbre ligada al método de asignación de exposición se debe mencionar existen diversos factores que adicionan incertidumbre en la estimación de la exposición, entre ellos la calidad y suficiencia de información, su representatividad espacial y la asignación de exposición personal (INSP-CMM, 2015). Como se ha destacado a lo largo del estudio, en la presente EIS sólo fue posible incluir alrededor del 60% de la población de la Región Centro debido a la limitada cobertura de las redes de monitoreo de la región.

Recomendaciones

Derivado de los resultados que se presentan en este informe se recomienda realizar las siguientes acciones:

Complementar la estimación sobre los efectos en salud analizando la morbilidad evitable.

Si bien es cierto que las actuales bases de datos tienen limitaciones cuanto a los registros diarios de eventos relacionables o en cuya cadena causal intervienen los contaminantes atmosféricos, consideramos que un esfuerzo conjunto entre las entidades del centro del país haría posible una estimación de casos evitables tanto en la consulta externa como en los ingresos hospitalarios. Para realizar de manera adecuada esta estimación adicional, se requiere modificar aspectos específicos de la evaluación de impacto en salud toda vez que los efectos sobre la morbilidad son agudos (de un día hasta siete) y no de mayor plazo como en el caso de la mortalidad. Es decir, se tendría que usar de manera diferente la información de las redes de monitoreo de manera que en lugar de considerar los promedios anuales, se utilicen los promedios diarios o los máximos horarios. Por ejemplo es bien sabido que el incremento de las admisiones hospitalarias por crisis asmáticas ocurre cuando las partículas respirables o el ozono sobrepasan los límites recomendados por la norma o las guías internacionales en corto plazo. En la modificación de la metodología por tanto, se requiere realizar la estimación de exceso de casos por día y no por año. Esto se pueden sumar a lo largo de los 365 días del año base si se quiere obtener una suma total. De igual manera, se requiere considerar funciones concentración respuesta acorde a los eventos de morbilidad seleccionados. La literatura actual cuenta con suficiente evidencia para utilizar estimaciones de estudio de cohorte o de estudios de serie de tiempo para incluirlos en la estimación. En cuanto a la selección de eventos, cuando se hace este tipo de estimaciones se requiere casos que ocurren en población sensible, como es el caso del asma o el conjunto de enfermedades respiratorias. En cuanto a las bases de datos, y en nuestra experiencia con información proveniente del sistema de salud mexicano, consideramos que los datos más confiables de morbilidad provienen de la base de datos de egresos hospitalarios del sector salud. Si bien en estas bases de datos no se incluye al sector privado, si se cubre una proporción significativa de la población suficiente para realizar cálculos de morbilidad atribuible. En el paso final, la estimación de los costos incorpora las erogaciones ya conocidas en los hospitales por cada evento, una fracción de los cuales es relacionables con el incremento de los

contaminantes. Si bien en estudios previos se ha visto que los costos de morbilidad no son tan elevados como los de la mortalidad evitable, si permiten hacer visible la cantidad estimada en miles o millones de pesos que el sector salud eroga asociados con el incremento de los contaminantes dentro de los servicios médicos que otorga.

Sistema de Vigilancia en Salud Ambiental.

Consideramos que es necesario integrar un sistema de vigilancia ambiental que permita dar cuenta tanto de los riesgos como de los efectos inmediatos derivados del incremento en los contaminantes. Un sistema de este tipo se define como la recolección continua, integración, análisis, interpretación y diseminación de datos del monitoreo de peligros ambientales, exposición humana y vigilancia de efectos en salud. (CDC)

De esta manera el sistema se compondría de indicadores ambientales (estimación de concentraciones a nivel de Ageb), indicadores de salud (básicamente registro de casos diarios con enfermedades sensibles a los cambios en la calidad del aire) e indicadores de vulnerabilidad (incorporación de información sobre grupos etarios específicos a nivel de Ageb y de sitios de residencia con niveles históricos elevados).

En la región central de México el componente más desarrollado de este sistema, como en otras ciudades, los componen las redes de monitoreo que generan los datos que, una vez sistematizados, permiten estimar exposiciones en un radio de cinco o diez kilómetros. Un componente añadido significativo, sería el contar en toda la zona con los sistemas de predicción de concentraciones con al menos una ventana de tiempo de 24 horas tal y como se está desarrollando en la ciudad de México. Esto permite generar información para la población con mucho mayor oportunidad.

Con base en el monitoreo, se generan también los índices de calidad del aire. El IMECA se ha revisado y actualmente se encuentra en aprobación el Índice Nacional de Calidad del Aire y Salud. Este índice que deberá ser publicado este año, tendrá que incorporarse en los planes de gestión de calidad del aire a nivel de cada una de las ciudades y en la zona centro del país en general. En esta parte, la recomendación consiste en integrar a nivel de cada una de las ciudades un comité conjunto del sector salud y del sector ambiente para la implementación del índice. Si bien el índice nacional contiene los lineamientos generales para la comunicación de riesgos en salud asociado a las concentraciones de contaminantes en el aire, su aplicación es de nivel local. Los organismos regionales y los

que pertenecen a cada ciudad deberían definir un plan de trabajo para la implementación del índice.

El componente menos desarrollado del sistema es el que se refiere al de los efectos en salud y esto se debe a las siguientes razones: el sistema no ha sido adecuadamente planeado y desarrollado, requiere un periodo de prueba y validación y necesita de la información rutinaria del sector salud más cierta información adicional.

El desarrollo del sistema de indicadores de salud pasa por los siguientes procesos:

1. Definición de indicadores. En estos sistemas se seleccionan enfermedades cuya causalidad con la contaminación ambiental está bien establecida de tal forma que es suficientemente sensible. Los sistemas de salud ambiental en otros países incluyen indicadores tales como: Asma y enfermedades del corazón para contaminantes del aire, defectos al nacimiento para exposición a metales y otros tóxicos, intoxicación por monóxido de carbono, intoxicación por plomo, golpes de calor para temperaturas extremas y algunos tipos de cáncer para exposiciones de largo plazo. En el caso de la zona centro del país podrían utilizar asma y enfermedades del corazón (sobre todo urgencias hospitalarias) para monitorear los efectos de los contaminantes. También podrían incluirse las infecciones respiratorias agudas en niños.
2. Definición de tasas basales. Una vez seleccionados los eventos, se establecen las tasas basales con referencia a las cuales se pretende establecer si existen cambios significativos. En la práctica esto se traduce como un número esperado de casos bajo las condiciones en las que no existe ningún factor que las incremente. Las tasa basales se establecen utilizando los datos históricos de los registros en el sistema de salud. Posteriormente es necesario añadir al sistema un método estadístico que permita observar si los cambios son significativos, o sea si realmente el número de casos observados es mayor al esperado.
3. Selección de unidades centinela. Las unidades centinela son clínicas u hospitales que se seleccionan con base en un criterio geográfico de manera que la población de interés quede adecuadamente cubierto. En este sentido, se espera que sean sitios con la suficiente sensibilidad para captar exceso de caso ante una eventual exposición. También interesa que el tipo de población de interés quede incluida dentro de los servicios que brinda la unidad centinela. En este sentido probablemente sea recomendable comenzar el desarrollo de sistemas con

unidades que pertenecen al sector salud estatal y federal a donde acude población abierta.

4. Sistema de información. Si bien el sistema de información del sector salud genera información muy valiosa tal como la del conjunto de enfermedades de reporte obligatorio, un sistema de este tipo requeriría que esta información estuviera temporal y espacialmente desagregada de forma diaria y de preferencia con el domicilio de cada caso. Actualmente esta información se puede obtener agregada por semana o en el caso de los egresos hospitalarios un tiempo después de su ocurrencia. Es en ese sentido que recomendamos que las unidades centinela cuenten con un proceso adicional que permita conocer al día el número de casos de los eventos seleccionados y con información que permita ubicar espacialmente la ubicación predominante de la persona, al menos su domicilio. Es de esta forma que el análisis de los datos permitiría identificar un exceso temporal, espacial o espaciotemporal de los casos. En específico se propone iniciar el sistema utilizando los casos de asma como un indicador y en la medida de lo posible añadir otros como los eventos cardiovasculares.

Conclusiones

En el presente estudio se ha realizado una estimación estadística del número de muertes prematuras que podrían evitarse anualmente en la Región Centro si las concentraciones de los contaminantes atmosféricos $PM_{2.5}$, PM_{10} y O_3 se redujeran hasta alcanzar los límites máximos permisibles de las normas de calidad del aire mexicanas, así como los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud. Dichas estimaciones cuentan con un respaldo sólido puesto que se efectuaron a través de una metodología estandarizada como la Evaluación de Impactos a la Salud. Se empleó el software BenMAP-CE de la EPA, el cual es reconocido internacionalmente, y además, se basó en evidencia epidemiológica derivada de una rigurosa revisión de literatura nacional e internacional sobre los efectos a la salud por contaminación atmosférica.

Los resultados sobre mortalidad evitable y su valoración económica permitirán construir estrategias y medidas puntuales para la mejora de la calidad del aire en la Región Centro contando con una línea basal de impactos a la salud. Este estudio arroja que los beneficios por reducir los niveles de partículas suspendidas son cuantiosos, tanto en términos de muertes prematuras como por su valor económico.

Asimismo, debe señalarse que para mejorar los resultados de este estudio debe trabajarse en el incremento de la cobertura de población de las redes y sistemas de monitoreo de calidad del aire de la Región Centro. Especialmente en el caso de $PM_{2.5}$ es indispensable que se mejore la representatividad de las mediciones de manera prioritaria.

Finalmente, debe resaltarse que si bien la mortalidad evitable es uno de los principales beneficios por la reducción de contaminantes atmosféricos, aún deben de considerarse otro tipo de efectos agudos y de morbilidad, así como otros contaminantes, e inclusive compuestos específicos como el carbono negro o las nanopartículas.

Bibliografía

- Arthur, W. B., 1981. The Economics of Risks to Life. *The American Economic Review*, 71(1), pp. 54 - 64.
- Burnett, R. T., Arden Pope, C., Ezzati, M., Olives, C., Lim, S. S., Mehta, S., ... Cohen, A., 2014. An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure. *Environmental Health Perspectives*, 122(4), 397–403.
- CAM, 2011. *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*, s.l.: Comisión Ambiental Metropolitana.
- COFEPRIS, 2014a. *Propuesta de anteproyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación*, s.l.: Secretaría de Salud. Comisión Federal para la Prevención contra Riesgos Sanitarios.
- Dockery, D. y otros, 1993. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, 329(24), pp. 1753-1759.
- Forouzanfar, M. H., Alexander, L., Anderson, H. R., Bachman, V. F., Biryukov, S., Brauer, M., ... Murray, C. J., 2015. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet*.
- Hammit, J. & Robinson, L., 2011. The Income Elasticity of the Value per Statistical Life: Transferring Estimates between High and Low Income Populations. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 2(1).
- Hoek, G. y otros, 2013. Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. *Environmental Health*, 12(43), pp. 1-16.
- Hubbell, B. J., Fann, N. & Levy, J. I., 2009. Methodological considerations in developing local-scale health impact assessments: balance national, regional, and local data. *Air Quality, Atmosphere and Health*, Volumen 2, pp. 99-110.
- ICCT, 2014. *Cost-Benefit Analysis of Mexico's Heavy-duty Emission Standards (NOM 044)*, s.l.: The International Council on Clean Transportation.

- IHME, 2016. *GBD Compare*. [En línea]
Available at: <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>
- INECC, 2014a. *Informe Nacional de Calidad del Aire 2013*, s.l.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INECC, 2014b. *Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM_{2.5} en tres zonas metropolitanas mexicanas*, s.l.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INECC, 2014b. *Valoración económica de los beneficios a la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM_{2.5} en tres zonas metropolitanas mexicanas*, s.l.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INEGI, 2015. *Encuesta Intercensal 2015*. [En línea]
Available at:
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/>
[Último acceso: 14 noviembre 2016].
- INEGI, 2016a. *PIB - Entidad Federativa, anual*. [En línea]
Available at: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/pibe/>
[Último acceso: 12 diciembre 2016].
- INEGI, 2016b. *Mortalidad*. [En línea]
Available at:
<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/registros/vitales/mortalidad/>
[Último acceso: 14 octubre 2016].
- INSP-CMM, 2015. *Beneficios sociales por mejorar la calidad del aire en México: Impactos a la salud y su valoración económica*, s.l.: Instituto Nacional de Salud Pública y Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente.
- Kochi, I., Hubbel, B. & Kramer, R., 2006. An Empirical Bayes Approach to Combining and Comparing Estimates of the Value of Statistical Life for Environmental Policy Analysis. *Environmental & Resources Economics*, Volumen 34, pp. 385-406.
- Künzli, N. y otros, 2000. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *The Lancet*, Volumen 356, pp. 795-801.

- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D. & Schwartz, J., 2012. Chronic Exposure to Fine Particles and Mortality: An Extended Follow-up of the Harvard Six Cities Study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, 120(7), pp. 965-970.
- MMA, 2013. *Guía metodológica para la elaboración de un análisis general de impacto económico y social (AGIES) para instrumentos de gestión de calidad del aire*, s.l.: Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Chile.
- OECD, 2011. *Valuing Mortality Risk Reductions in Regulatory Analysis of Environmental, Health and Transport Policies: Policy Implications*, Paris: OECD.
- OECD, 2012. *Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies*. s.l.:OECD Publishing.
- OECD, 2014. *The Cost of Air Pollution. Health impacts of road transport*, s.l.: OECD.
- OECD, 2015. *Consumer prices - all items*. [En línea]
Available at: <https://stats.oecd.org>
[Último acceso: Septiembre 2015].
- Pope III, C. A. y otros, 2002. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*, 287(9), pp. 1132-1141.
- Pope III, C. A. y otros, 2004. Cardiovascular Mortality and Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution: Epidemiological Evidence of General Pathophysiological Pathways of Disease. *Circulation*, Volumen 109, pp. 71-77.
- Ready, R. & Navrud, S., 2006. International benefit transfer: Methods and validity tests. *Ecological Economics*, Volumen 60, pp. 429-434.
- Riojas-Rodríguez, H., Álamo-Hernández, U., Texcalac-Sangrador, J. L. & Romieu, I., 2014. Health impact assessment of decreases in PM₁₀ and ozone concentrations in the Mexico City Metropolitan Area. A basis for a new air quality management program. *Salud Pública de México*, 56(6), pp. 579-591.
- RTI International, 2015. *Environmental Benefits Mapping and Analysis Program - Community Edition. User's Manual*, s.l.: U.S Environmental Protection Agency.
- Texcalac-Sangrador, J. L. y otros, 2014. *Evaluación del Impacto en Salud por Exposición a Contaminantes Atmosféricos Criterio en 26 Ciudades de México Informe Final*, s.l.: Instituto Nacional de Salud Pública.

- Turner, M. C. y otros, 2016. Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(10), pp. 1134-1142.
- WHO - OECD, 2015. *Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: Clean air, health and wealth.*, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- WHO, 2006. *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment*, s.l.: s.n.
- WHO, 2016. *Health risk assessment of air pollution – general principles*, s.l.: Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- Woodruff, T. J., Darrow, L. A. & Parker, J. D., 2008. Air Pollution and Postneonatal Infant Mortality in the United States, 1999–2002. *Environmental Health Perspectives*, 116(1), pp. 110-115.
- 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), pp. 608-612.
- World Bank, 2015. *GNI per capita, PPP (constant 2011 International \$)*. [En línea] Available at: <http://data.worldbank.org/> [Último acceso: Septiembre 2015].

Anexo I. Resultados de mortalidad evitable por municipios seleccionados

Tabla 17 Mortalidad evitada por causas generales por municipios seleccionados de la Región Centro en los escenarios NOM y OMS

Clave de municipio (INEGI)	Entidad	Municipio***	Mortalidad evitada promedio (IC 95%) en el 2014*					
			PM _{2.5}		PM ₁₀		O ₃	
			NOM**	OMS**	NOM**	OMS**	NOM**	OMS**
9002	Ciudad de México	Azcapotzalco	345 (237 - 451)	390 (268 - 509)	156 (94 - 216)	471 (290 - 644)	8 (2 - 13)	39 (10 - 67)
9003	Ciudad de México	Coyoacán	202 (138 - 265)	238 (163 - 311)	0 (0 - 0)	209 (128 - 289)	17 (4 - 29)	56 (15 - 97)
9004	Ciudad de México	Cuajimalpa de Morelos	23 (16 - 30)	28 (19 - 37)	0 (0 - 0)	35 (22 - 49)	3 (1 - 5)	8 (2 - 14)
9005	Ciudad de México	Gustavo A. Madero	648 (444 - 849)	746 (512 - 976)	397 (241 - 550)	1081 (668 - 1477)	12 (3 - 21)	78 (20 - 134)
9006	Ciudad de México	Iztacalco	187 (128 - 246)	216 (148 - 283)	46 (28 - 65)	257 (158 - 353)	9 (2 - 16)	37 (10 - 64)
9007	Ciudad de México	Iztapalapa	647 (442 - 848)	753 (516 - 985)	250 (151 - 348)	1004 (618 - 1377)	34 (9 - 59)	138 (36 - 239)
9008	Ciudad de México	La Magdalena Contreras	39 (26 - 51)	47 (32 - 62)	0 (0 - 0)	59 (36 - 82)	4 (1 - 6)	12 (3 - 20)
9009	Ciudad de México	Milpa Alta	NA	NA	5 (3 - 7)	43 (26 - 59)	2 (0 - 3)	7 (2 - 12)
9010	Ciudad de México	Álvaro Obregón	204 (139 - 269)	258 (176 - 339)	0 (0 - 0)	338 (206 - 467)	21 (5 - 36)	67 (18 - 115)
9011	Ciudad de México	Tláhuac	63 (43 - 83)	76 (52 - 100)	6 (4 - 8)	97 (60 - 134)	5 (1 - 9)	18 (5 - 31)
9012	Ciudad de México	Tlalpan	231 (158 - 304)	280 (191 - 367)	0 (0 - 0)	331 (203 - 456)	15 (4 - 27)	49 (13 - 85)
9013	Ciudad de México	Xochimilco	55 (38 - 73)	68 (46 - 89)	1 (0 - 1)	91 (55 - 125)	5 (1 - 9)	19 (5 - 33)
9014	Ciudad de México	Benito Juárez	382 (261 - 501)	444 (304 - 581)	0 (0 - 0)	447 (274 - 616)	18 (5 - 32)	72 (19 - 124)
9015	Ciudad de México	Cuauhtémoc	603 (413 - 789)	691 (474 - 903)	249 (151 - 347)	858 (529 - 1175)	18 (5 - 32)	77 (20 - 134)
9016	Ciudad de México	Miguel Hidalgo	259 (177 - 339)	300 (205 - 392)	50 (30 - 70)	347 (213 - 478)	12 (3 - 21)	45 (12 - 78)
9017	Ciudad de México	Venustiano Carranza	150 (102 - 196)	174 (119 - 227)	110 (67 - 152)	277 (171 - 378)	8 (2 - 14)	32 (8 - 55)
13002	Hidalgo	Acaxochitlán	NA	NA	NA	NA	NA	NA
13004	Hidalgo	Agua Blanca de Iturbide	NA	NA	NA	NA	NA	NA
13005	Hidalgo	Ajacuba	12 (8 - 15)	12 (9 - 15)	0 (0 - 0)	3 (2 - 4)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
13008	Hidalgo	Apan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
13010	Hidalgo	Atitalaquia	17 (12 - 22)	18 (13 - 22)	0 (0 - 0)	4 (2 - 6)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
13012	Hidalgo	Atotonilco el Grande	NA	NA	NA	NA	NA	NA
13013	Hidalgo	Atotonilco de Tula	19 (13 - 24)	20 (14 - 25)	0 (0 - 0)	5 (3 - 7)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
13041	Hidalgo	Mixquiahuala de Juárez	NA	NA	0 (0 - 0)	11 (7 - 16)	NA	NA
13052	Hidalgo	San Agustín Tlaxiaca	NA	NA	0 (0 - 0)	5 (3 - 7)	NA	NA
13065	Hidalgo	Tetepango	8 (5 - 10)	8 (6 - 10)	0 (0 - 0)	2 (1 - 2)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
13067	Hidalgo	Tezontepec de Aldama	31 (22 - 40)	32 (23 - 41)	NA	NA	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
13070	Hidalgo	Tlahuelilpan	12 (9 - 15)	12 (9 - 16)	0 (0 - 0)	3 (2 - 4)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
13074	Hidalgo	Tlaxcoapan	17 (12 - 22)	18 (13 - 22)	0 (0 - 0)	4 (2 - 5)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
13076	Hidalgo	Tula de Allende	168 (119 - 213)	173 (123 - 219)	NA	NA	0 (0 - 0)	1 (0 - 2)

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

Clave de municipio (INEGI)	Entidad	Municipio***	Mortalidad evitada promedio (IC 95%) en el 2014*					
			PM _{2.5}		PM ₁₀		O ₃	
			NOM**	OMS**	NOM**	OMS**	NOM**	OMS**
15002	México	Acolman	21 (15 - 28)	25 (17 - 32)	0 (0 - 0)	10 (6 - 14)	0 (0 - 1)	2 (1 - 4)
15005	México	Almoloya de Juárez	43 (30 - 56)	47 (33 - 61)	35 (22 - 49)	61 (38 - 82)	0 (0 - 0)	2 (0 - 3)
15010	México	Apaxco	19 (13 - 24)	19 (14 - 24)	0 (0 - 0)	5 (3 - 6)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
15011	México	Atenco	6 (4 - 8)	7 (5 - 9)	1 (0 - 1)	8 (5 - 11)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)
15013	México	Atizapán de Zaragoza	109 (75 - 143)	124 (85 - 162)	26 (16 - 37)	132 (81 - 182)	4 (1 - 7)	13 (3 - 22)
15018	México	Calimaya	13 (9 - 16)	14 (10 - 18)	7 (5 - 10)	17 (11 - 24)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
15019	México	Capulhuac	9 (6 - 12)	10 (7 - 13)	5 (3 - 7)	13 (8 - 17)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
15020	México	Coacalco de Berriozábal	108 (74 - 141)	122 (84 - 160)	7 (4 - 10)	115 (71 - 158)	2 (1 - 4)	12 (3 - 21)
15022	México	Cocotitlán	NA	NA	2 (1 - 2)	4 (2 - 6)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)
15024	México	Cuautitlán	NA	NA	3 (2 - 4)	54 (33 - 74)	0 (0 - 1)	4 (1 - 6)
15025	México	Chalco	NA	NA	48 (29 - 67)	122 (75 - 167)	1 (0 - 2)	9 (2 - 15)
15027	México	Chapultepec	2 (2 - 3)	3 (2 - 4)	1 (1 - 2)	3 (2 - 5)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
15028	México	Chiautla	NA	NA	0 (0 - 0)	5 (3 - 7)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
15029	México	Chicoloapan	14 (10 - 19)	17 (12 - 22)	NA	NA	0 (0 - 1)	3 (1 - 5)
15030	México	Chiconcuac	NA	NA	0 (0 - 0)	4 (3 - 6)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
15031	México	Chimalhuacán	66 (45 - 87)	82 (56 - 107)	NA	NA	3 (1 - 6)	16 (4 - 27)
15033	México	Ecatepec de Morelos	431 (294 - 565)	505 (346 - 661)	154 (93 - 214)	679 (417 - 931)	0 (0 - 1)	9 (2 - 16)
15036	México	Hueypoxtla	NA	NA	0 (0 - 0)	11 (6 - 15)	NA	NA
15037	México	Huixquilucan	26 (18 - 34)	31 (21 - 40)	2 (1 - 3)	38 (23 - 52)	2 (1 - 4)	6 (2 - 10)
15038	México	Isidro Fabela	NA	NA	1 (0 - 1)	2 (1 - 3)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
15039	México	Ixtapaluca	NA	NA	41 (25 - 56)	114 (71 - 156)	1 (0 - 2)	9 (2 - 15)
15046	México	Jilotzingo	NA	NA	2 (1 - 2)	5 (3 - 7)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
15050	México	Juchitepec	NA	NA	2 (1 - 2)	7 (4 - 9)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
15051	México	Lerma	33 (22 - 42)	36 (25 - 46)	24 (14 - 33)	45 (28 - 62)	0 (0 - 1)	1 (0 - 2)
15054	México	Metepec	200 (138 - 260)	220 (152 - 287)	110 (67 - 153)	257 (159 - 350)	0 (0 - 0)	4 (1 - 6)
15055	México	Mexicaltzingo	3 (2 - 4)	3 (2 - 5)	2 (1 - 3)	4 (3 - 6)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
15057	México	Naucalpan de Juárez	253 (173 - 331)	289 (199 - 378)	5 (3 - 6)	274 (167 - 377)	12 (3 - 21)	39 (10 - 67)
15058	México	Nezahualcóyotl	176 (120 - 231)	218 (149 - 286)	135 (82 - 188)	426 (263 - 583)	15 (4 - 26)	51 (13 - 89)
15060	México	Nicolás Romero	NA	NA	16 (10 - 22)	70 (43 - 96)	2 (0 - 3)	6 (2 - 11)
15062	México	Ocoyoacac	15 (10 - 19)	16 (11 - 21)	8 (5 - 11)	20 (12 - 28)	0 (0 - 1)	1 (0 - 2)
15067	México	Otzolotepec	23 (16 - 29)	24 (17 - 32)	18 (11 - 24)	31 (19 - 42)	0 (0 - 0)	1 (0 - 2)
15069	México	Papalotla *	NA	NA	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
15070	México	La Paz	69 (47 - 90)	83 (57 - 109)	35 (21 - 48)	136 (84 - 186)	4 (1 - 7)	16 (4 - 27)
15073	México	San Antonio la Isla	3 (2 - 4)	4 (3 - 5)	2 (1 - 3)	5 (3 - 6)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
15075	México	San Martín de las Pirámides	NA	NA	0 (0 - 0)	3 (2 - 4)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)
15076	México	San Mateo Atenco	18 (12 - 23)	20 (14 - 26)	12 (7 - 16)	24 (15 - 33)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)
15081	México	Tecámac	106 (73 - 138)	118 (81 - 154)	0 (0 - 0)	64 (39 - 88)	1 (0 - 2)	8 (2 - 13)
15083	México	Temamatla	NA	NA	1 (1 - 1)	3 (2 - 3)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

Clave de municipio (INEGI)	Entidad	Municipio***	Mortalidad evitada promedio (IC 95%) en el 2014*					
			PM _{2.5}		PM ₁₀		O ₃	
			NOM**	OMS**	NOM**	OMS**	NOM**	OMS**
15087	México	Temoaya	29 (20 - 38)	32 (22 - 41)	23 (14 - 32)	40 (25 - 55)	0 (0 - 0)	1 (0 - 2)
15089	México	Tenango del Aire	NA	NA	1 (1 - 1)	3 (2 - 4)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
15092	México	Teotihuacán	NA	NA	0 (0 - 0)	5 (3 - 7)	0 (0 - 0)	1 (0 - 2)
15093	México	Tepetlaoxtoc	NA	NA	0 (0 - 0)	5 (3 - 7)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
15095	México	Tepotzotlán	NA	NA	4 (3 - 6)	20 (12 - 27)	0 (0 - 0)	1 (0 - 2)
15099	México	Texcoco	97 (66 - 128)	115 (79 - 150)	19 (12 - 27)	143 (88 - 197)	2 (0 - 3)	13 (4 - 23)
15100	México	Tezoyuca	4 (3 - 6)	5 (3 - 6)	0 (0 - 0)	3 (2 - 4)	0 (0 - 0)	0 (0 - 1)
15101	México	Tianguistenco	18 (13 - 24)	21 (14 - 27)	8 (5 - 12)	25 (15 - 34)	0 (0 - 1)	1 (0 - 3)
15103	México	Tlalmanalco	NA	NA	4 (3 - 6)	13 (8 - 18)	0 (0 - 0)	1 (0 - 2)
15104	México	Tlalnepantla de Baz	329 (225 - 430)	375 (257 - 490)	191 (116 - 265)	518 (320 - 707)	5 (1 - 8)	35 (9 - 61)
15106	México	Toluca	324 (222 - 424)	370 (254 - 483)	17 (10 - 24)	345 (212 - 475)	0 (0 - 0)	8 (2 - 14)
15108	México	Tultepec	NA	NA	1 (1 - 1)	16 (10 - 22)	0 (0 - 1)	2 (0 - 3)
15109	México	Tultitlán	124 (85 - 163)	141 (97 - 184)	10 (6 - 14)	133 (82 - 183)	2 (0 - 3)	11 (3 - 20)
15115	México	Xonacatlán	18 (13 - 24)	20 (14 - 26)	12 (8 - 17)	25 (15 - 33)	0 (0 - 1)	1 (0 - 2)
15118	México	Zinacantepec	32 (22 - 42)	36 (25 - 47)	23 (14 - 31)	46 (29 - 63)	0 (0 - 0)	2 (0 - 3)
15121	México	Cuautitlán Izcalli	187 (129 - 244)	208 (143 - 272)	22 (14 - 31)	179 (110 - 246)	3 (1 - 5)	14 (4 - 25)
15122	México	Valle de Chalco Solidaridad	49 (34 - 64)	59 (40 - 77)	26 (16 - 36)	93 (57 - 127)	3 (1 - 4)	11 (3 - 19)
17024	Morelos	Tlaltizapán de Zapata	NA	NA	NA	NA	NA	NA
17025	Morelos	Tlaquiltenango	NA	NA	NA	NA	NA	NA
17026	Morelos	Tlayacapan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
17027	Morelos	Totolapan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
17029	Morelos	Yautepec	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21015	Puebla	Amozoc	NA	NA	6 (4 - 9)	20 (12 - 27)	NA	NA
21034	Puebla	Coronango	8 (6 - 11)	9 (6 - 12)	7 (4 - 9)	13 (8 - 17)	NA	NA
21040	Puebla	Cuautinchán	NA	NA	1 (1 - 2)	5 (3 - 6)	NA	NA
21041	Puebla	Cuautlancingo	17 (12 - 22)	19 (13 - 25)	13 (8 - 18)	26 (16 - 35)	NA	NA
21074	Puebla	Huejotzingo	23 (16 - 30)	26 (18 - 34)	16 (10 - 22)	35 (22 - 47)	NA	NA
21090	Puebla	Juan C. Bonilla	6 (4 - 7)	6 (4 - 8)	5 (3 - 6)	9 (5 - 12)	NA	NA
21106	Puebla	Ocoyucan	NA	NA	4 (2 - 6)	11 (7 - 15)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
21114	Puebla	Puebla	891 (612 - 1162)	988 (681 - 1287)	190 (115 - 264)	900 (553 - 1235)	0 (0 - 0)	1 (0 - 2)
21119	Puebla	San Andrés Cholula	57 (39 - 74)	63 (44 - 83)	22 (13 - 30)	66 (41 - 91)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
21125	Puebla	San Gregorio Atzompa	NA	NA	1 (1 - 2)	3 (2 - 5)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
21133	Puebla	San Martín Totoltepec *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21134	Puebla	San Matías Tlalancaleca	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21135	Puebla	San Miguel Ixitlán *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21136	Puebla	San Miguel Xoxtla	3 (2 - 3)	3 (2 - 4)	2 (1 - 3)	4 (3 - 6)	NA	NA

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

Clave de municipio (INEGI)	Entidad	Municipio***	Mortalidad evitada promedio (IC 95%) en el 2014*					
			PM _{2.5}		PM ₁₀		O ₃	
			NOM**	OMS**	NOM**	OMS**	NOM**	OMS**
21137	Puebla	San Nicolás Buenos Aires	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21138	Puebla	San Nicolás de los Ranchos **	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21139	Puebla	San Pablo Anicano *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21140	Puebla	San Pedro Cholula	40 (28 - 53)	45 (31 - 58)	23 (14 - 32)	55 (34 - 74)	0 (0 - 0)	1 (0 - 1)
21141	Puebla	San Pedro Yeloixtlahuaca *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21142	Puebla	San Salvador el Seco	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21143	Puebla	San Salvador el Verde	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21144	Puebla	San Salvador Huixcolotla	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21145	Puebla	San Sebastián Tlacotepec	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21146	Puebla	Santa Catarina Tlaltempan *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21147	Puebla	Santa Inés Ahuatempan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21148	Puebla	Santa Isabel Cholula	NA	NA	2 (1 - 3)	5 (3 - 7)	NA	NA
21149	Puebla	Santiago Miahuatlán	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21150	Puebla	Huehuetlán el Grande	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21151	Puebla	Santo Tomás Hueyotlipan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21152	Puebla	Soltepec	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21153	Puebla	Tecali de Herrera	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21155	Puebla	Tecomatlán	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21156	Puebla	Tehuacán	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21157	Puebla	Tehuizingo	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21158	Puebla	Tenampulco	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21159	Puebla	Teopantlán *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21160	Puebla	Teotlalco *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21161	Puebla	Tepanco de López	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21162	Puebla	Tepango de Rodríguez *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21163	Puebla	Tepatlxco de Hidalgo	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21164	Puebla	Tepeaca	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21165	Puebla	Tepemaxalco *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21166	Puebla	Tepeojuma	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21167	Puebla	Tepetzintla	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21168	Puebla	Tepexco	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21169	Puebla	Tepexi de Rodríguez	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21170	Puebla	Tepeyahualco	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21171	Puebla	Tepeyahualco de Cuauhtémoc *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21172	Puebla	Tetela de Ocampo	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21173	Puebla	Teteles de Avila Castillo	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21174	Puebla	Teziutlán	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21175	Puebla	Tianguismanalco	NA	NA	NA	NA	NA	NA

COORDINACIÓN GENERAL DE CONTAMINACIÓN Y SALUD AMBIENTAL

Clave de municipio (INEGI)	Entidad	Municipio***	Mortalidad evitada promedio (IC 95%) en el 2014*					
			PM _{2.5}		PM ₁₀		O ₃	
			NOM**	OMS**	NOM**	OMS**	NOM**	OMS**
21176	Puebla	Tilapa	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21177	Puebla	Tlacotepec de Benito Juárez	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21178	Puebla	Tlacuilotepec	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21179	Puebla	Tlachichuca	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21180	Puebla	Tlahuapan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21181	Puebla	Tlaltenango	2 (1 - 2)	2 (1 - 3)	1 (1 - 2)	3 (2 - 4)	NA	NA
21182	Puebla	Tlanepantla *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21183	Puebla	Tlaola	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21184	Puebla	Tlapacoya	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21185	Puebla	Tlapanalá	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21186	Puebla	Tlatlauquitepec	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21187	Puebla	Tlaxco	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21188	Puebla	Tochimilco	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21189	Puebla	Tochtepec	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21190	Puebla	Totaltepec de Guerrero *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21191	Puebla	Tulcingo	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21192	Puebla	Tuzamapan de Galeana	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21193	Puebla	Tzicatlacoyan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21194	Puebla	Venustiano Carranza	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21195	Puebla	Vicente Guerrero *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21196	Puebla	Xayacatlán de Bravo *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21197	Puebla	Xicotepec	NA	NA	NA	NA	NA	NA
21198	Puebla	Xicotlán *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
22006	Querétaro	Corregidora	3 (2 - 3)	6 (4 - 8)	6 (4 - 8)	30 (18 - 41)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
22008	Querétaro	Huimilpan	2 (1 - 2)	3 (2 - 3)	2 (1 - 2)	8 (5 - 11)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
22011	Querétaro	El Marqués	3 (2 - 3)	5 (4 - 7)	4 (3 - 6)	24 (14 - 32)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
22014	Querétaro	Querétaro	37 (25 - 48)	88 (60 - 116)	76 (46 - 106)	416 (256 - 572)	0 (0 - 0)	0 (0 - 0)
29023	Tlaxcala	Nativitas	11 (8 - 15)	13 (9 - 16)	8 (5 - 11)	17 (10 - 22)	NA	NA
29025	Tlaxcala	San Pablo del Monte	21 (14 - 27)	23 (16 - 30)	7 (4 - 9)	23 (14 - 31)	NA	NA
29027	Tlaxcala	Tenancingo	5 (3 - 6)	5 (4 - 7)	2 (1 - 2)	6 (3 - 8)	NA	NA
29032	Tlaxcala	Tetlatlahuca	4 (3 - 5)	4 (3 - 5)	2 (1 - 3)	5 (3 - 7)	NA	NA
29041	Tlaxcala	Papalotla de Xicohténcatl	8 (6 - 11)	9 (6 - 12)	4 (2 - 5)	10 (6 - 14)	NA	NA
29042	Tlaxcala	Xicohtzinco	5 (3 - 6)	5 (4 - 7)	3 (2 - 4)	7 (4 - 9)	NA	NA
29044	Tlaxcala	Zacatelco	15 (11 - 20)	17 (12 - 22)	11 (7 - 15)	23 (14 - 31)	NA	NA
29049	Tlaxcala	San Damián Texóloc *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
29050	Tlaxcala	San Francisco Tetlanohcan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
29051	Tlaxcala	San Jerónimo Zacualpan *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
29054	Tlaxcala	San Lorenzo Axocomanitla *	1 (1 - 2)	2 (1 - 2)	1 (1 - 1)	2 (1 - 3)	NA	NA

Clave de municipio (INEGI)	Entidad	Municipio***	Mortalidad evitada promedio (IC 95%) en el 2014*					
			PM _{2.5}		PM ₁₀		O ₃	
			NOM**	OMS**	NOM**	OMS**	NOM**	OMS**
29055	Tlaxcala	San Lucas Tecopilco *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
29056	Tlaxcala	Santa Ana Nopalucan	NA	NA	NA	NA	NA	NA
29057	Tlaxcala	Santa Apolonia Teacalco *	NA	NA	NA	NA	NA	NA
29058	Tlaxcala	Santa Catarina Ayometla	3 (2 - 3)	3 (2 - 4)	1 (1 - 2)	3 (2 - 4)	NA	NA
29059	Tlaxcala	Santa Cruz Quilehtla	NA	NA	NA	NA	NA	NA
29060	Tlaxcala	Santa Isabel Xiloxotla *	NA	NA	NA	NA	NA	NA

* Mortalidad evitada promedio e intervalo de confianza (IC) al 95% por causas generales no externas (CIE-10: A00-R99) para los grupos de edad: PM_{2.5} ≥15 años; PM₁₀ ≥30 años; O₃ ≥30 años.

** Escenarios de gestión o reducción de concentraciones de contaminantes: PM_{2.5} (NOM = 12 µg/m³; OMS = 10 µg/m³), PM₁₀ (NOM = 40 µg/m³; OMS = 20 µg/m³), O₃ (NOM = 70 ppb; OMS = 50 ppb).

*** Se incluyen sólo los municipios seleccionados en la EIS; es decir, para los que se determinó que existía cobertura de monitoreo en un radio de 10 km de las estaciones.

NA: No evaluado por falta de información válida de calidad del aire. Esto puede ser resultado de la falta de una estación de monitoreo cercana al municipio con suficiencia de información (≥75%), o a que en un radio de 10 km no existe ninguna estación de monitoreo disponible para el municipio.

Fuente: Elaboración propia

