

# Reducción de emisiones generadas por el movimiento de bienes en el transporte marítimo en América del Norte

*Evaluación de los efectos de las  
emisiones de buques en México*



cec.org

Citar como:

CCA (2018). *Reducción de emisiones generadas por el movimiento de bienes en el transporte marítimo en América del Norte: Evaluación de los efectos de las emisiones de buques en México*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 70 pp.

El presente informe fue elaborado por el Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente (MCE2), en coordinación con Eastern Research Group, Inc. (ERG), para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. La información que contiene es responsabilidad de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Se permite la reproducción de este material sin previa autorización, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso no tenga fines comerciales y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental. La CCA apreciará que se le envíe una copia de toda publicación o material que utilice este trabajo como fuente.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo "Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada", de Creative Commons.



© Comisión para la Cooperación Ambiental, 2018

ISBN: 978-2-89700-243-5

*Available in English* – ISBN: 978-2-89700-242-8

*Disponible en français (sommaire de rapport)* – ISBN : 978-2-89700-244-2

Depósito legal — Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018

Depósito legal — Library and Archives Canada, 2018

#### Detalles de la publicación

*Categoría del documento:* Documento de apoyo

*Fecha de publicación:* junio de 2018

*Idioma original:* español

*Procedimientos de revisión y aseguramiento de la calidad:*

Revisión final de las Partes: mayo de 2018; QA2018.0333

*Proyecto:* Plan Operativo 2017-2018: Reducción de la contaminación generada por el transporte marítimo. Documento originalmente elaborado bajo los Planes Operativos 2013-14 y 2015-16.

Si desea más información sobre ésta y otras publicaciones de la CCA, dirijase a:

#### Comisión para la Cooperación Ambiental

393 rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montreal (Quebec), Canadá, H2Y 1N9

Tel.: 514.350.4300 fax: 514.350.4314

info@cec.org / www.cec.org



## Índice

<b>Siglas, acrónimos y abreviaturas.....</b>	<b>viii</b>
<b>Sinopsis .....</b>	<b>x</b>
<b>Resumen ejecutivo .....</b>	<b>x</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>xi</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>1</b>
La Organización Marítima Internacional y el Convenio Marpol .....	1
Anexo VI del Convenio Marpol y las zonas de control de emisiones .....	1
<i>Impactos de las emisiones de buques para México y esfuerzos de México para</i> <i>abordarlos .....</i>	<i>2</i>
<b>PARTE 1. MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE .....</b>	<b>4</b>
1.1. Introducción.....	4
1.2. Dominio espacial y periodos de simulación .....	5
1.3. Inventarios de emisiones .....	6
<i>Inventario nacional de emisiones de buques, 2011 y 2030.....</i>	<i>6</i>
<i>Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), 2011 .....</i>	<i>11</i>
<i>Inventario nacional de emisiones en puerto (INEP), 2011.....</i>	<i>13</i>
<i>Estimaciones de emisiones para los Estados Unidos (2011) y Centroamérica (2008)</i> <i>.....</i>	<i>15</i>
1.4 Escenarios de modelización.....	16
1.5 Configuración del modelo .....	16
1.6 Resultados.....	21
<i>Evaluación del modelo.....</i>	<i>21</i>
<i>Partículas finas PM<sub>2,5</sub>.....</i>	<i>22</i>
<i>Evaluación del modelo del ozono .....</i>	<i>24</i>
25	
<i>Deposición seca anual de SO<sub>2</sub>.....</i>	<i>26</i>
<b>PARTE 2. EVALUACIÓN DE LOS BENEFICIOS PARA LA SALUD.....</b>	<b>28</b>
2.1. Introducción.....	28
2.2. Vista general de los contaminantes y sus efectos en la salud .....	28
<i>Materia particulada (PM) .....</i>	<i>29</i>
<i>Ozono (O<sub>3</sub>).....</i>	<i>29</i>
2.3. Evaluación de costos y beneficios en la salud para México .....	30
<i>Descripción del modelo .....</i>	<i>30</i>
2.4 Configuración del modelo .....	31
<i>Dominio espacial.....</i>	<i>31</i>

<i>Datos de población</i> .....	32
2.5. Mejoras en la calidad del aire .....	33
<i>Reducciones en PM<sub>2.5</sub></i> .....	33
<i>Reducciones en O<sub>3</sub></i> .....	35
2.6 Efectos adversos en la salud del ozono y la materia particulada .....	36
2.7 Resultados.....	38
<i>Beneficios para la salud por reducciones de PM<sub>2.5</sub></i> .....	38
<i>Beneficios para la salud por reducciones en la concentración de ozono</i> .....	41
<b>Conclusiones</b> .....	<b>42</b>
<b>Apéndice I: Configuración del modelo</b> .....	<b>43</b>
<b>Apéndice II: Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS): comparación de resultados</b> .....	<b>46</b>
Diagramas y comparaciones entre lo previsto y lo observado .....	47
<i>Semana del 9 al 16 de febrero de 2011</i> .....	48
<i>Semana del 15 al 22 de mayo de 2011</i> .....	50
<i>Semana del 30 de agosto al 6 de septiembre de 2011</i> .....	53
<i>Semana del 20 al 27 de noviembre de 2011</i> .....	55
Análisis estadístico del ozono y PM <sub>2.5</sub> .....	61
<b>Apéndice III: Análisis de sensibilidad: emisiones portuarias y de buques</b> .....	<b>62</b>
Análisis de sensibilidad para emisiones portuarias .....	62
Análisis de sensibilidad para emisiones de los buques.....	64
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>67</b>

## **Lista de cuadros**

Cuadro 1. Anexos del Convenio Marpol 73/78 y su estado actual en México .....	1
Cuadro 3. Emisiones dentro de la ZCE-Méx .....	11
Cuadro 4. Total de emisiones para cada categoría de fuente, INEM 2011 .....	12
Cuadro 5. Tipos de equipo y fuentes considerados en cada uno de los puertos mexicanos incluidos en el INEP .....	13
Cuadro 6. Emisiones anuales, por contaminante, en cada puerto mexicano.....	14
Cuadro 7. Escenarios de emisiones para este proyecto.....	16
Cuadro 8. Datos meteorológicos y de calidad del aire utilizados para validar el modelo..	21
Cuadro 11. Criterios de valoración en salud y estudios epidemiológicos utilizados para cuantificar los impactos en el análisis principal – PM <sub>2.5</sub> .....	37
Cuadro 12. Criterios de valoración en salud y estudios epidemiológicos utilizados para cuantificar los impactos en el análisis principal – Ozono .....	38
Cuadro 13. Beneficios en la salud monetizados proyectados como resultado de la reducción de concentraciones de PM <sub>2.5</sub> con una ZCE mexicana.....	39
Cuadro 14. Beneficios en la salud monetizados proyectados como resultado de la reducción de concentraciones de O <sub>3</sub> con una ZCE mexicana .....	41
Cuadro 15. Resumen de las variables más importantes en la configuración del modelo WRF- Chem .....	43
Cuadro 16. Conversión de las especies químicas originales (NEI y ECA) para su uso en el modelo de deposición ácida regional RADM2.....	45
Cuadro 17. Resumen de las evaluaciones de escenarios de referencia 2011 .....	47
Cuadro 18. Descripción de las abreviaturas estadísticas.....	47
Cuadro 19. Comparación de resultados del modelo y de mediciones de boyas en el golfo de México.....	59
Cuadro 21. Comparación de resultados del modelo y observaciones de PM <sub>2.5</sub> .....	61
Cuadro 22. Comparación de resultados del modelo y observaciones de PM <sub>2.5</sub> durante mayo .....	61
Cuadro 23. Comparación de resultados del modelo y observaciones de ozono.....	61
Cuadro 24. Escenarios de sensibilidad.....	62

## Lista de gráficas

Gráfica 1. La ZCE de América del Norte a la fecha .....	2
Gráfica 2. Dominio de modelización de calidad del aire .....	5
Gráfica 3. Densidad del tráfico de buques en la ZCE propuesta; emisiones de CO <sub>2</sub> en 2011	7
Gráfica 4. Factores de emisión (EF) de NO <sub>x</sub> por tipo de buque para cada escenario.....	8
Gráfica 5. Factores de emisión (EF) de SO <sub>x</sub> por tipo de buque para cada escenario .....	8
Gráfica 6. Emisiones de contaminantes para cada escenario .....	9
Gráfica 11. Topografía del dominio de modelización.....	18
Gráfica 12. Emisiones de CO en el dominio de modelización, ubicadas en la primera capa vertical.....	18
Gráfica 13. Emisiones de CO en el dominio de modelización, en la segunda capa vertical	19
Gráfica 14b). Emisiones de NO en la primera capa vertical (izquierda*) y la segunda capa vertical (derecha) del dominio de modelización .....	20
Gráfica 14c). Emisiones de SO <sub>2</sub> en la primera (izquierda) y segunda (derecha) capas verticales del dominio de modelización .....	20
Gráfica 15. PM <sub>2.5</sub> promedio anual de 24 horas para los escenarios S1 y S2 .....	22
Gráfica 16. Reducciones estimadas en las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> como resultado de la reglamentación: contraste entre el escenario S1 (Marpol 2030) y el S2 (Marpol + ZCE 2030).....	23
Gráfica 17. Cociente S1/S2 de las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> : contraste entre el escenario S1 (Marpol 2030) y el S2 (Marpol + ZCE 2030) .....	23
Gráfica 18. Promedio anual de concentración de O <sub>3</sub> para los escenarios S1 (izquierda) y S2 (derecha).....	24
Gráfica 19. Reducciones proyectadas en las concentraciones de O <sub>3</sub> como resultado del establecimiento de una ZCE (S1 vs. S2).....	25
Gráfica 20. Cociente de las concentraciones de O <sub>3</sub> : contraste entre el S1 y el S2 .....	25
Gráfica 21. Deposición seca anual de SO <sub>2</sub> para los escenarios S1 (izquierda) y S2 (derecha) .....	26
Gráfica 22. Diferencia de la deposición seca anual de SO <sub>2</sub> entre los escenarios S1 y S2...	27
Gráfica 23. Cociente S1/S2 de la deposición seca anual de SO <sub>2</sub> : contraste entre los escenarios S1 y S2 .....	27
Gráfica 24. Diagrama de flujo del proceso de análisis y mapeo de BenMAP-CE v1.0.8..	30
Gráfica 25. Población proyectada para 2030 .....	32
Gráfica 26. Población de niños de 0-14 años de edad, prevista para 2030 .....	33
Gráfica 27. Reducciones previstas en el promedio anual de las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> (S1-S2) .....	34
Gráfica 28. Reducciones previstas en las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> para mayo (izquierda) y noviembre (derecha) ya establecida la ZCE-Méx (S1-S2).....	35
Gráfica 29. Reducciones previstas en las concentraciones de ozono con el establecimiento de la ZCE-Méx (S1-S2).....	35
Gráfica 30. Campo de vientos en el área del dominio de modelización para el 26 de noviembre de 2011 .....	44

Gráfica 31. Distribución geográfica de estaciones de monitoreo NCEP-ADP seleccionadas .....	46
Gráfica 32. Temperatura en la semana del 9 al 16 de febrero.....	48
Gráfica 33. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 9 al 16 de febrero.....	49
Gráfica 34. Componente meridional del viento ( $v$ ) en la semana del 9 al 16 de febrero ...	49
Gráfica 35. Humedad relativa en la semana del 9 al 16 de febrero.....	50
Gráfica 36. Temperatura en la semana del 15 al 22 de mayo .....	51
Gráfica 37. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 15 al 22 de mayo .....	51
Gráfica 38. Componente meridional del viento ( $v$ ) en la semana del 15 al 22 de mayo ....	52
Gráfica 39. Humedad relativa en la semana del 15 al 22 de mayo .....	52
Gráfica 40. Temperatura en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre.....	53
Gráfica 41. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre .....	54
Gráfica 42. Componente meridional del viento ( $v$ ) en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre .....	54
Gráfica 43. Humedad relativa en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre.....	55
Gráfica 44. Temperatura en la semana del 20 al 27 de noviembre .....	56
Gráfica 45. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 20 al 27 de noviembre ....	56
Gráfica 46. Componente meridional del viento ( $v$ ) en la semana del 20 al 27 de noviembre	57
Gráfica 47. Humedad relativa en la semana del 20 al 27 de noviembre .....	58
Gráfica 48. Diferencia en las concentraciones de $PM_{2.5}$ entre $(S1-S2)-(S1-S2)_{act}$ .....	63
Gráfica 49. Diferencia en las concentraciones de ozono entre $(S1-S2)-(S1-S2)_{act}$ .....	64
Gráfica 50. Diferencias de concentraciones ambientales de ozono .....	65
Gráfica 51. Diferencias en concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ .....	66

## Siglas, acrónimos y abreviaturas

BenMAP	programa de análisis y mapeo de beneficios ambientales ( <i>Environmental Benefits Mapping and Analysis Program</i> )
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CN	carbono negro
CO	monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
Conapo	Consejo Nacional de Población
COV	compuestos orgánicos volátiles
CPW	concentración ponderada por población (del inglés: <i>concentration population-weighted</i> )
CVC	contaminantes de vida corta que contribuyen al cambio climático
DGGCARETC	Dirección General de Gestión de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
ECA	estimaciones de emisiones de Centroamérica
ECM	error cuadrático medio
EDGAR	base de datos de emisiones para investigación atmosférica global ( <i>Emissions Database for Global Atmospheric Research</i> )
EERA	Asociados en Investigación de Energía y Medio Ambiente ( <i>Energy and Environmental Research Associates</i> )
EFS	estados finales de salud
EM	error medio
EMA	error medio absoluto
EPA	Agencia de Protección Ambiental ( <i>Environmental Protection Agency</i> ) de Estados Unidos
ERG	Eastern Research Group, Inc.
g/kWh	gramos sobre kilovatio-hora
GDAS	Sistema Global de Asimilación de Datos ( <i>Global Data Assimilation System</i> )
GEI	gases de efecto invernadero
HC	hidrocarburos
HC3	Alcanos con constante de reactividad al OH (298 K y 1 atm) entre $2.7 \times 10^{-13}$ y $3.4 \times 10^{-12}$
hnpm	hijos nacidos por mujer
INEB	inventario nacional de emisiones de buques
INEM	Inventario Nacional de Emisiones de México
INEP	inventario nacional de emisiones en puertos
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
Marpol	Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (Marpol, de la abreviatura en inglés de <i>marine pollution</i> : contaminación marina)
MCE2	Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y el Medio Ambiente ( <i>Molina Center for Energy and the Environment</i> )
NEI	Inventario Nacional de Emisiones ( <i>United States National Emissions Inventory</i> ), Estados Unidos
NCEP	Centros Nacionales de Predicción Ambiental ( <i>National Centers for Environmental Prediction</i> ), Estados Unidos
NetCDF	Network Common Data Form
NO <sub>2</sub>	dióxido de nitrógeno
NO <sub>x</sub>	óxidos de nitrógeno
O <sub>3</sub>	ozono
OMI	Organización Marítima Internacional
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM	partículas o materia particulada (del inglés: <i>particulate matter</i> )
PM <sub>2.5</sub>	partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a 2.5 micrómetros
PM <sub>10</sub>	partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a 10 micrómetros



ppmm	partes por mil millones
ppmm <sub>v</sub>	partes por mil millones en volumen
ppm	partes por millón
RADM2	modelo de deposición ácida regional ( <i>Regional Acid Deposition Model</i> ), segunda generación
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
RECM	raíz del error cuadrático medio
Ro-Ro	buques que transportan cargamento rodado, tanto automóviles como camiones; buques de carga rodante (por el acrónimo en inglés de: <i>roll on-roll off</i> )
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México
Semarnat	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México
SIG	sistemas de información geográfica
SMOKE	Núcleo del Operador de la Matriz Rala de Emisiones ( <i>Sparse Matrix Operator Kernel Emissions</i> )
SO <sub>2</sub>	dióxido de azufre
SO <sub>x</sub>	óxido de azufre
STEEM	Modelo de Tráfico de Buques, Energía y Medio Ambiente ( <i>Ship Traffic, Energy, and Environmental Model</i> )
TI	tasa de incidencia
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
WRF-Chem	modelo de investigación del pronóstico de la calidad del aire y el clima
ZCE	zona de control de emisiones

## Sinopsis

Con el modelo de calidad del aire WRF-Chem se evaluaron la influencia de las emisiones de embarcaciones marítimas en la calidad del aire en México, las mejoras potenciales resultado de la ratificación del Anexo VI del Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (Convenio Marpol) y el establecimiento de una zona de control de emisiones (ZCE) en el país. El desempeño del modelo para el año de referencia (2011) se evaluó con datos de mediciones ambientales de calidad del aire provenientes de estaciones de monitoreo, así como a partir de parámetros meteorológicos. Los resultados de la modelización de escenarios proyectados para 2030 se emplearon para alimentar el programa de mapeo y análisis de beneficios ambientales (BenMAP). Se seleccionaron dos contaminantes importantes (ozono y partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a 2.5 micrómetros) para evaluar los impactos en la salud y el beneficio económico derivados de una mejor calidad del aire resultante de reducciones en las concentraciones de esos contaminantes. Las emisiones de los buques en la ZCE mexicana propuesta contribuyen, en un número significativo de casos, a los efectos adversos en la salud, especialmente en áreas costeras densamente pobladas. Se espera que la instrumentación de una ZCE en México redunde en beneficios importantes para la salud de sus habitantes.

## Resumen ejecutivo

Las emisiones de las embarcaciones marítimas influyen de manera importante en la calidad del aire de las áreas costeras y, en algunos casos, tierra adentro. Los objetivos de los estudios de modelización presentados en este documento fueron: a) evaluar la influencia de las emisiones de las grandes embarcaciones en la calidad del aire de México, y b) identificar las posibles mejoras en la calidad del aire resultantes de la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol y del establecimiento de una zona de control de emisiones para México (ZCE-Méx).

Los objetivos se alcanzaron con el cumplimiento de diversas tareas, a saber:

- Reunir y preparar los inventarios de emisiones para la modelización.
- Configurar y evaluar el modelo de calidad del aire.
- Ejecutar la modelización de calidad del aire para los probables escenarios en 2030.
- Generar mapas de calidad del aire, con concentraciones de ozono y partículas finas, así como de deposición de dióxido de azufre.
- Estimar los beneficios en salud resultantes de la reducción en los niveles de concentración de ozono y las emisiones de partículas finas. .

Los estudios de modelización de calidad del aire se basaron en los últimos inventarios de emisiones disponibles relativos a México. Los datos de emisiones en tierra para el año 2011 se tomaron del Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM). Los inventarios de emisiones marítimas y en puerto también corresponden a 2011; además, se hicieron proyecciones de emisiones marítimas para el año 2030. El estudio de modelización incluyó tres escenarios: a) escenario base (2011), b) escenario S1 (Marpol 2030), que considera sólo la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol, c) escenario S2 (Marpol + ZCE 2030), que incluye la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol más el establecimiento de una ZCE en México. Los datos de emisiones se tradujeron en datos de entrada para el modelo *Weather Research Forecast Chemistry* (WRF-Chem). Los resultados de la modelización se evaluaron conforme a los datos de estaciones de monitoreo de calidad del aire disponibles. Los resultados de la modelización de escenarios probables para 2030 se usaron como datos de entrada para el programa de mapeo y análisis de beneficios ambientales (BenMAP). Dos de los contaminantes principales —el ozono (O<sub>3</sub>) y las partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>)— se

eligieron para evaluar, mediante BenMAP, los impactos en la salud y los beneficios económicos que se obtendrían mediante mejoras en la calidad del aire. Este programa también se configuró por medio de una selección de parámetros basados en recientes estudios epidemiológicos de México y otras partes del mundo.

Los resultados de la evaluación de beneficios indican que el establecimiento de una ZCE en México podría evitar entre 4,000 y 35,000 muertes prematuras, así como entre 3.3 y 4.4 millones de diferentes casos de efectos adversos en la salud (ingresos a hospital, bronquitis crónica, días de actividad restringida, asma, ausentismo escolar). Los beneficios económicos por mejoras en la salud oscilarían entre los 18 y los 97 mil millones de dólares estadounidenses (\$EU), debido principalmente a las muertes prematuras que se evitarían por una reducción en las emisiones de buques, que se traducirían en un descenso de los niveles de concentración de PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> en el ambiente.

Este informe se divide en dos partes. En la parte I se presentan los detalles de la modelización de la calidad del aire y las posibles mejoras en la calidad del aire que resultarían de la ratificación del Anexo VI de Marpol y el establecimiento de una ZCE en México. En la parte II se presentan los posibles beneficios en términos de salud para los habitantes de México y los ahorros económicos que supondría la adopción de una zona de control de emisiones.

## **Agradecimientos**

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) desea manifestar su agradecimiento a investigadores y autores principales de esta publicación, del Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente (*Molina Center for Energy and the Environment, MCE2*), por la diligencia y ardua labor con que llevaron a cabo el estudio de modelización de calidad del aire y análisis de beneficios ambientales: Luisa T. Molina, Agustín García, Sergio Duarte, Marco Mora, Magdalena Armenta, Víctor Almanza, Miguel Zavala, Rodrigo González, Wenfang Lei y Gilberto Maldonado. La CCA también da las gracias a Eastern Research Group, Inc. por haber coordinado las aportaciones de expertos de los tres países de América del Norte durante la elaboración de esta publicación.

Los miembros del comité directivo del proyecto de la CCA —el Ministerio de Transporte de Canadá (*Transport Canada*), la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency, EPA*) de Estados Unidos, y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) de México— proporcionaron valiosa orientación durante este proceso y contribuyeron con su revisión de expertos.

Por último, la CCA extiende su reconocimiento a los miembros del personal del Secretariado de la Comisión cuya participación permitió llevar este proyecto a buen puerto: Orlando Cabrera Rivera, titular de la unidad de *Calidad ambiental*; y Danielle Vallée y Catherine Hallmich, líderes de proyecto.

## Antecedentes

### La Organización Marítima Internacional y el Convenio Marpol

La Organización Marítima Internacional (OMI) es la oficina especial de la Organización de las Naciones Unidas responsable de crear un marco reglamentario para la industria del transporte marítimo que sea justo y efectivo, y cuya adopción e instrumentación sean universales.<sup>1</sup> En respuesta al creciente interés mundial por proteger los océanos de la contaminación causada por buques; los accidentes de petroleros; las enormes cantidades de basura tirada al mar y que acaba en un giro oceánico, y la constante contaminación de playas y aguas costeras, en 1973 se adoptó el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (Convenio Marpol), modificado en 1978 [Marpol es la abreviatura en inglés de *marine pollution*: contaminación marina]. Desde mayo de 2013, un total de 152 países eran ya signatarios del convenio, lo que representaba aproximadamente 99% de la carga transportada por vía marítima en todo el mundo. Toda embarcación marítima perteneciente a algún país integrante del Convenio Marpol está sujeta a los requerimientos de éste, independientemente de su zona de navegación. Las naciones miembros son responsables de los buques registrados con sus respectivas nacionalidades.

El Convenio Marpol contiene seis anexos (véase el cuadro 1), cuyo propósito es controlar las descargas y derrames de buques de cualquier sustancia peligrosa que pueda causar daños a la salud humana, la flora y fauna o los recursos bióticos del medio ambiente marino. En el convenio se establecen reglas para prevenir la contaminación por combustibles, sustancias líquidas nocivas transportadas a granel, sustancias peligrosas transportadas en bultos, aguas residuales y basura procedentes de los buques, así como reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por éstos.

**Cuadro 1. Anexos del Convenio Marpol 73/78 y su estado actual en México**

Anexo	Reglamentación	Ratificación de México	Año
I	Prevención de la contaminación por hidrocarburos	Sí	1992
II	Prevención de la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel	Sí	1992
III	Prevención de la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos	No	–
IV	Prevención de la contaminación por aguas residuales descargadas por buques	No	–
V	Prevención de la contaminación por basura descargada por buques	Sí	1998
VI	Prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por buques	En desarrollo	

### Anexo VI del Convenio Marpol y las zonas de control de emisiones

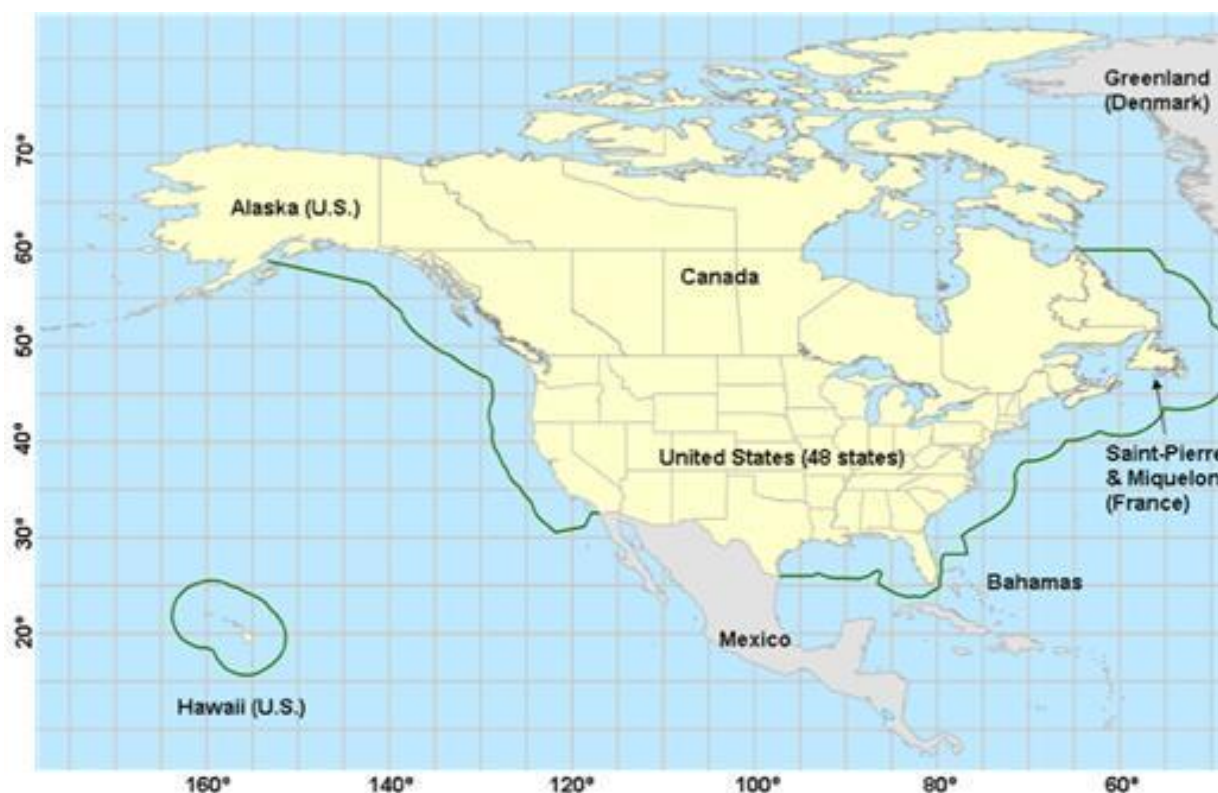
El Anexo VI del Convenio Marpol aborda el problema de la contaminación atmosférica ocasionada por buques e incluye requisitos aplicables a la manufactura, certificación y operación de buques y motores,

<sup>1</sup> Véase: <[www.imo.org/](http://www.imo.org/)>.

así como a la calidad del combustible utilizado en buques que atraviesan aguas sujetas al dicho convenio. Los requisitos internacionales sobre contaminación atmosférica del Anexo VI establecen límites a las emisiones de óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y exigen el uso de combustible de ultra bajo azufre (que reduce la producción de ozono contaminante) con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente. El  $\text{NO}_x$  causa smog y éste agrava los problemas de asma y síntomas respiratorios, e incrementa la mortalidad y los ingresos al hospital debidos a la mala calidad del aire.

De acuerdo con los estatutos de la OMI, los países que han ratificado el Anexo VI del Convenio Marpol pueden optar por establecer una zona de control de emisiones (ZCE) con estándares más rigurosos respecto del control de emisiones de  $\text{NO}_x$ , óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y partículas (PM). En este contexto, Canadá y Estados Unidos propusieron al comité de la OMI establecer una ZCE para buques en operación en aguas canadienses y estadounidenses, así como para los que operen dentro de las 200 millas náuticas de sus costas (véase la gráfica 1 – contorno verde). La ZCE de América del Norte entró en vigor en agosto de 2011 y los requisitos empezaron a aplicarse un año después. Desde entonces, todos los buques que operen dentro de la ZCE deben usar combustible cuyo contenido de azufre no supere 1% en peso (10,000 ppm). Después de enero de 2015, el contenido de azufre no deberá superar 0.1% en peso del combustible (1,000 ppm).

**Gráfica 1. La ZCE de América del Norte a la fecha**



*Fuente:* Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos.

### **Impactos de las emisiones de buques para México y esfuerzos de México para abordarlos**

Las emisiones de las embarcaciones marítimas tienen una influencia importante en la calidad del aire de las zonas costeras y, en algunos casos, en la calidad del aire tierra adentro. Las sustancias más importantes emitidas por los buques son dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de azufre

(SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y partículas. Se trata de contaminantes atmosféricos dañinos que impactan la calidad del aire, la salud humana y el clima a escalas local, regional y global.

En este momento, México forma parte de los anexos I, II y V del Convenio Marpol (cuadro 1). En octubre de 2014, los representantes del gobierno mexicano se reunieron con el secretario general de la OMI, Koji Sekimizu, y anunciaron que México firmaría los anexos III, IV y VI del Convenio Marpol.

Por medio de una labor conjunta con la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*, EPA) de Estados Unidos y el Ministerio de Transporte de Canadá (*Transport Canada*), a través de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), el gobierno mexicano ha ido evaluando las acciones internacionales necesarias para reducir la contaminación atmosférica que las embarcaciones marítimas ocasionan a las comunidades cercanas a las costas. Este informe presenta los resultados de esta colaboración trilateral para cuantificar el impacto de la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol y el establecimiento de una ZCE de México.

Este informe se divide en dos partes. En los apéndices se proporciona material complementario.

**Parte I.** Se presentan los detalles de la modelización de calidad del aire, así como las mejoras en la calidad del aire que se esperarían como resultado de la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol y el establecimiento de una ZCE en México. El estudio de modelización incluye tres escenarios: a) escenario base (2011), b) escenario Marpol (2030), que considera sólo la ratificación por México del Anexo VI del Convenio Marpol, y c) escenario Marpol + ZCE (2030), que incluye la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol más el establecimiento de una ZCE en México. Cada escenario se simuló mediante un modelo de calidad del aire para un periodo de simulación de un año, y se evaluaron y analizaron los resultados.

**Parte II.** Se demuestran los beneficios potenciales en salud para los habitantes de México y los ahorros que supondría la posible puesta en marcha de una ZCE. Los impactos de la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol y el establecimiento de una ZCE se calcularon con base en: a) los resultados de la modelización de la calidad del aire para diferentes escenarios, y b) información sobre la tasa de incidencia (TI) de enfermedades respiratorias a escala nacional y los costos en salud. Los posibles beneficios económicos se relacionan con cambios de indicadores, tales como muertes prematuras, ingresos a hospital, días de actividad restringida y su impacto económico, resultantes de modificaciones en las concentraciones de ozono y PM<sub>2.5</sub>. A partir de ello, es posible determinar el beneficio-costado de la reglamentación ZCE. Como referencia, el estudio preparado para la ZCE de América del Norte muestra que la relación es 90:1, lo que significa que es 90 veces más barato establecer una ZCE que el costo que supondría no tomar medida alguna, principalmente a causa de los efectos en la salud pública por la exposición a la mala calidad del aire causada por embarcaciones marítimas.

Los resultados de los ejercicios de modelización descritos en este documento proporcionan al gobierno mexicano la información necesaria para cumplir con los criterios requeridos para la designación de una ZCE después de la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol. Es necesario tener en cuenta que, además de los requisitos del Anexo VI, la OMI establece pautas específicas que deben contener las propuestas de una nueva ZCE, las cuales entran en vigor un año después de su adopción por la Organización Marítima Internacional.



## PARTE 1. MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

### 1.1. Introducción

Los objetivos de los estudios de modelización fueron: a) evaluar la influencia, en alcance y magnitud, de las emisiones de las embarcaciones de gran tamaño en la calidad del aire de México, y b) identificar las mejoras en la calidad del aire que resultarían de la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol y del establecimiento de una zona de control de emisiones (ZCE) en México. Los objetivos se alcanzaron con el cumplimiento de diversas tareas, a saber:

- Reunir y preparar los inventarios de emisiones para la modelización.
- Configurar y evaluar el modelo de calidad del aire.
- Ejecutar la modelización de calidad del aire para los probables escenarios en 2030.
- Generar mapas de calidad del aire, con concentraciones de ozono y partículas finas, así como de deposición de dióxido de azufre.
- Estimar los beneficios en salud resultantes de la reducción en los niveles de concentración de ozono y las emisiones de partículas finas.

El Inventario nacional de emisiones de buques (INEB) de México correspondiente a 2011 fue elaborado por James Corbett con el apoyo de la EPA de Estados Unidos, en coordinación con la Dirección General de Gestión de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (DGGCARETC) de la Semarnat (Corbett, 2012). El INEB incluye datos sobre emisiones provenientes de buques que navegan en aguas cercanas a México y los cataloga en tres grupos: la base correspondiente a 2011, más dos proyecciones de emisiones (escenarios) para 2030. El primer escenario para 2030 (S1) tomaba en consideración la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol, mientras que el segundo escenario (S2) contemplaba la ratificación del mismo anexo junto con el establecimiento de una ZCE en México.

Las emisiones para estos dos escenarios se estimaron con base en el Modelo de Tráfico de Buques, Energía y Medio Ambiente (*Ship Traffic, Energy, and Environment Model*, STEEM). El INEB incluye datos para gases de efecto invernadero (GEI), contaminantes de vida corta (CVC) y otros contaminantes, a saber: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), partículas o materia particulada (PM), hidrocarburos no-metano (NMHC, por sus siglas en inglés), monóxido de carbono (CO) y carbono negro (CN).

El equipo de modelización del Centro Molina para la Energía y el Medio Ambiente (MCE2) analizó y procesó los datos del INEB y otros inventarios de emisiones para la modelización de la calidad del aire. Posteriormente, MCE2 identificó los posibles beneficios en calidad del aire y reducciones en el depósito de sustancias reactivas. El equipo del MCE2 llevó a cabo el estudio de modelización de calidad del aire en varias etapas, a saber:

- Seleccionar los dominios espacial y temporal.
- Adquirir y procesar datos de entrada para la modelización.
  - Inventarios de emisiones: recabar datos y procesar las emisiones con el fin de construir los escenarios para la modelización.
  - Reunir y procesar datos meteorológicos y de calidad del aire.
- Configurar los parámetros del modelo conforme al área de estudio.
- Ejecutar el modelo para el escenario base con el fin de evaluar los datos.

- Ejecutar el modelo para los escenarios de 2030 -es decir, el S1 (sin ZCE) y el S2 (con ZCE).
- Generar mapas de calidad del aire para concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ , y deposición seca de  $SO_2$ .

Las diferencias entre los escenarios S1 y S2 en las concentraciones ambientales de los contaminantes, obtenidas del modelo, se utilizaron como insumos para la evaluación del costo-beneficio (se presentan en la segunda parte de este informe).

Los siguientes apartados presentan los detalles técnicos de cada una de dichas actividades.

## 1.2. Dominio espacial y periodos de simulación

Se definió un área de estudio (o dominio de modelización) con el fin de estimar las emisiones y el consumo de combustible en una posible ZCE en México, que contempla 200 millas náuticas desde la costa, similar a la ZCE de América del Norte. El dominio espacial integra una amplia zona de mar y tierra que incluye al territorio mexicano, así como partes de Estados Unidos y Centroamérica. El área de estudio se refiere a la región limitada por el cuadro azul en la gráfica 2 y abarca todo el territorio mexicano junto con una porción de Estados Unidos y Centroamérica, así como una considerable extensión marítima. La ZCE propuesta en este informe considera el mar territorial, cuya jurisdicción corresponde a México.

Las ejecuciones del modelo incluyen una simulación para cada año, el escenario base (2011) y los dos posibles escenarios en 2030, que fueron simulados utilizando el modelo WRF-Chem (Grell et al. 2005).

Gráfica 2. Dominio de modelización de calidad del aire



*Nota:* El rectángulo muestra el dominio espacial de las emisiones que se abordan en el presente estudio (lat. 10° N a 35° N y lon. -130° a -80°), las cuales abarcan aproximadamente 15 millones de  $km^2$ . El área color verde oscuro representa una posible zona de control de emisiones de México.



### 1.3. Inventarios de emisiones

#### Inventario nacional de emisiones de buques, 2011 y 2030

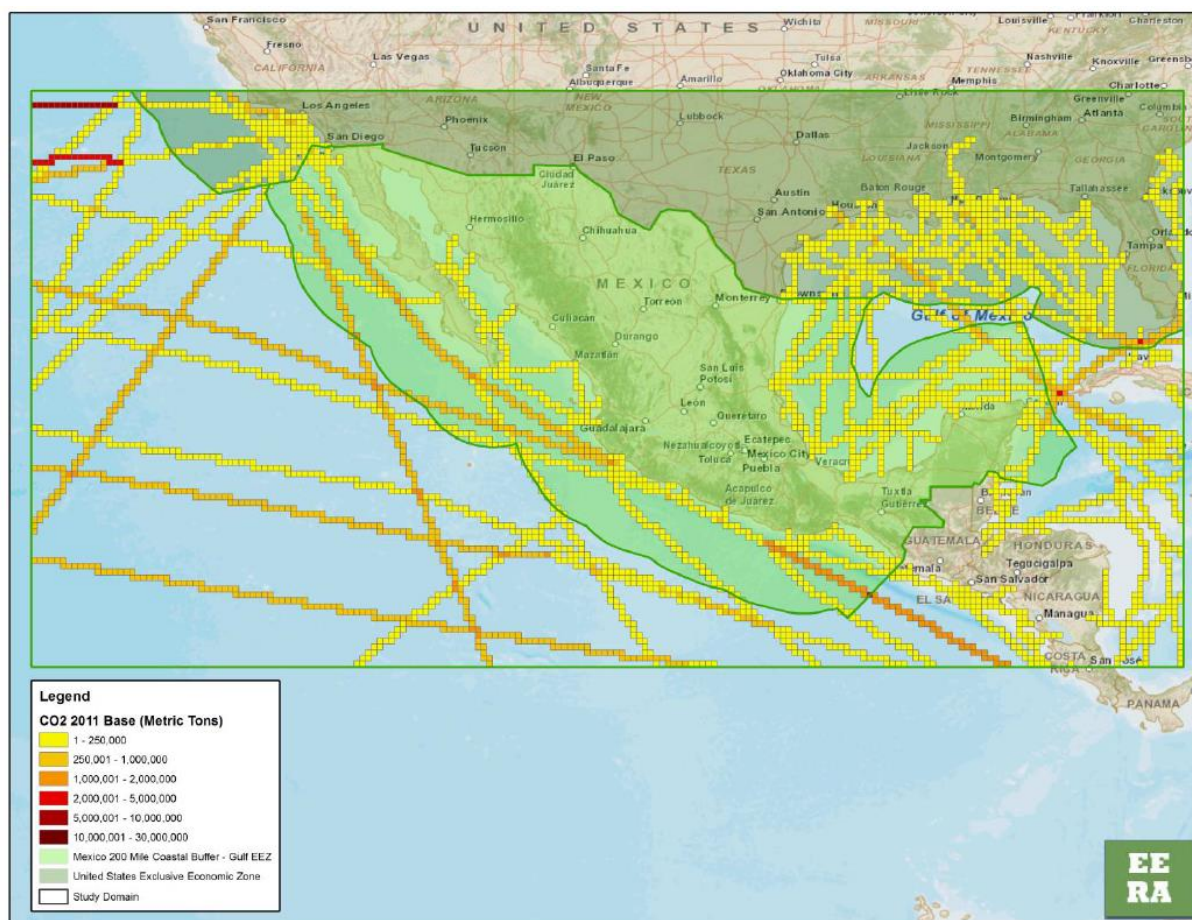
El inventario nacional de emisiones de buques (INEB) de México, en el que se apoya este proyecto, fue proporcionado por la Semarnat y producido por Asociados en Investigación de Energía y Medio Ambiente (*Energy and Environmental Research Associates, EERA*) con base en el modelo de red de hidrovías STEEM (*Ship Traffic, Energy, and Environmental Model*) (Wang, Corbett y Firestone, 2007 y 2008).

El Battelle Memorial Institute contrató a EERA con el propósito de estimar las emisiones en el dominio mexicano correspondientes a 2011 y 2030. El año de referencia o base (2011) representa el estimado de emisiones para el año “en curso” antes de la posible adopción del Anexo VI del Convenio Marpol. Los estimados de comercio marítimo para el futuro (2030) permiten a México comparar dos escenarios: S1 (sin ZCE-Méx), en donde se aplicarán los límites máximos de azufre del Anexo VI del Convenio Marpol; y S2 (con ZCE-Méx), en donde habrá reducciones de azufre adicionales correspondientes a la zona de control de emisiones en México (EPA, 2015).

El STEEM, modelo creado para cuantificar y representar geográficamente el tráfico marítimo interportuario y sus emisiones, aplica tecnología avanzada de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y determina automáticamente las rutas a escala global siguiendo las actuales rutas de comercio marítimo. El modelo ha servido para caracterizar el uso de la energía y las emisiones del movimiento interportuario de embarcaciones en toda la región de América del Norte: Canadá, Estados Unidos y México (Wang, Corbett y Firestone, 2007 y 2008; Corbett, 2010). El modelo STEEM emplea un conjunto de datos sobre características de embarcaciones que incluye un identificador único del buque, tipo de buque, tonelaje de arqueo, potencia instalada y velocidad del buque. Para este estudio, las embarcaciones se agruparon en nueve tipos principales: buques contenedores, buques graneleros, petroleros, buques de carga general, buques de carga rodante (Ro-Ro, por el acrónimo en inglés de: *roll on-roll off*), buques de pasajeros, buques de carga refrigerada (frigoríficos), buques de pesca y otros tipos de buques. Las emisiones de contaminantes y el uso de combustible se estimaron al multiplicar la potencia en kilovatio-hora (kWh) por la tasa de emisión o la tasa de consumo de combustible en gramos por kilovatio-hora (g/kWh).

El INEB incluye emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM, HC, CO y CN de buques situados cerca de México (dominio espacial) y de buques que operan en la zona de control de emisiones propuesta. En la gráfica 3 se muestran las emisiones de CO<sub>2</sub> para el escenario base.

Gráfica 3. Densidad del tráfico de buques en la ZCE propuesta; emisiones de CO<sub>2</sub> en 2011



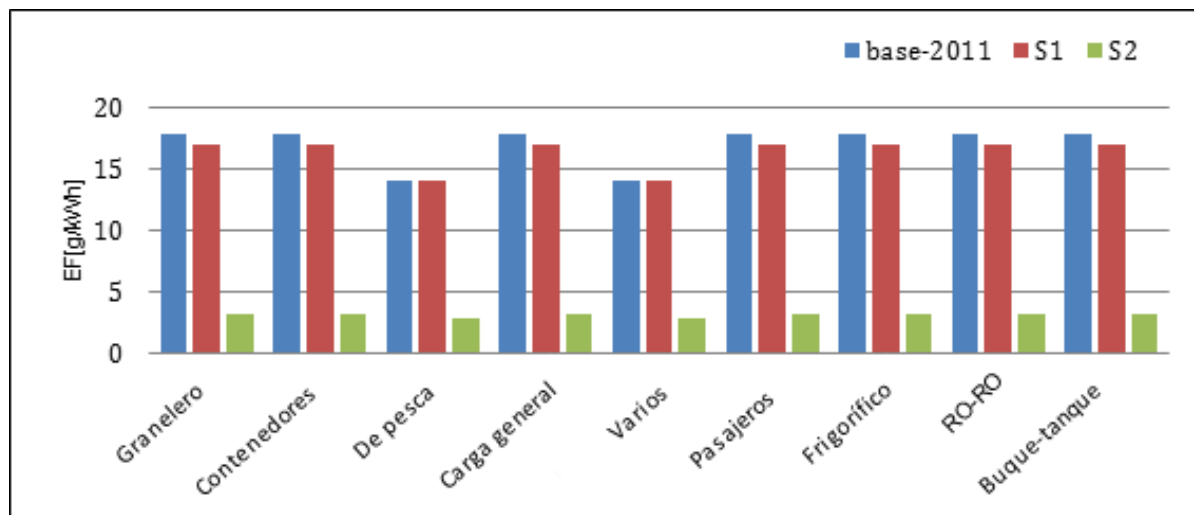
Fuente: STEEM, 2011.

El modelo STEEM se utilizó con anterioridad en los análisis técnicos en que se apoya la propuesta de Canadá-Estados Unidos de designar una zona de control de emisiones en América del Norte, y también lo utilizó el estado de California para respaldar la creación de normas de control de emisiones marítimas para buques que naveguen en aguas californianas. EERA utilizó la información obtenida del trabajo anterior como punto de partida para generar el inventario específico de la región de México. Las tasas de emisiones en 2011 se tomaron directamente del trabajo previo resultante de la aplicación de la ZCE en América del Norte y se utilizaron para estimar el inventario para México en 2011. La tasa de emisión de carbono negro es proporcional a la tasa total de partículas o materia particulada (PM). Para los buques que aún no tienen un control sobre sus emisiones de PM, se utilizó una relación CN:PM de aproximadamente 3% (EPA, 2012). En cuanto al consumo de combustible, los supuestos específicos de los distintos buques relativos a tipo de combustible y a las tasas de consumo se obtuvieron a partir de los resultados del modelo STEEM del trabajo anterior sobre la ZCE de América del Norte, que se actualizó en 2010 (Corbett, 2010). Ningún cambio se hizo a estos datos básicos del modelo STEEM para describir las características de demanda de energía del transporte marítimo. Las emisiones en 2030, en las condiciones de la línea base, se ajustan para representar los límites de emisión de azufre a 0.5%. Las emisiones en 2030, de acuerdo con las condiciones potenciales de la ZCE, se ajustaron a fin de representar los límites de azufre de 0.1 por ciento.

En la gráfica 4 se muestra el factor de emisión de NO<sub>x</sub> por tipo de buque para cada escenario. Con la adopción de nueva tecnología se podrían lograr reducciones de NO<sub>x</sub>, pero tales medidas se consideran estrategias a largo plazo. Por lo tanto, los factores de emisión de NO<sub>x</sub> no muestran un cambio significativo  
Comisión para la Cooperación Ambiental

entre el escenario base de 2011 y el escenario S1 de 2030. Sin embargo, es requisito que dentro de la ZCE (escenario S2) se alcance una reducción significativa de emisiones de NO<sub>x</sub>.

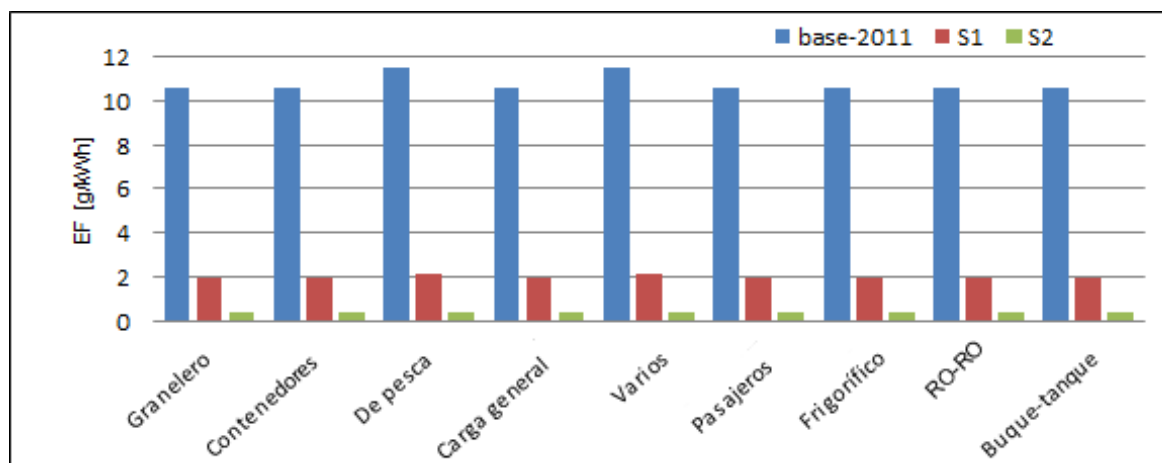
**Gráfica 4. Factores de emisión (EF) de NO<sub>x</sub> por tipo de buque para cada escenario**



Fuente: Corbett, 2012.

En el caso del SO<sub>x</sub>, la reducción de emisiones depende del mejoramiento de la calidad del combustible. La gráfica 5 muestra con claridad una reducción considerable de los factores de emisión de SO<sub>x</sub> desde el escenario base de 2011 hasta los escenarios S1 y S2.

**Gráfica 5. Factores de emisión (EF) de SO<sub>x</sub> por tipo de buque para cada escenario**



Fuente: Corbett, 2012.

La diferencia entre seguir la tendencia mundial (Marpol Annex VI) y la adopción de una reglamentación más estricta (Marpol + ZCE) en 2030 implica reducciones en las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM y CN. El Comisión para la Cooperación Ambiental

cuadro 2 muestra el total de las emisiones estimadas para los contaminantes que aparecen en el INEB en el dominio de modelización de cada escenario.

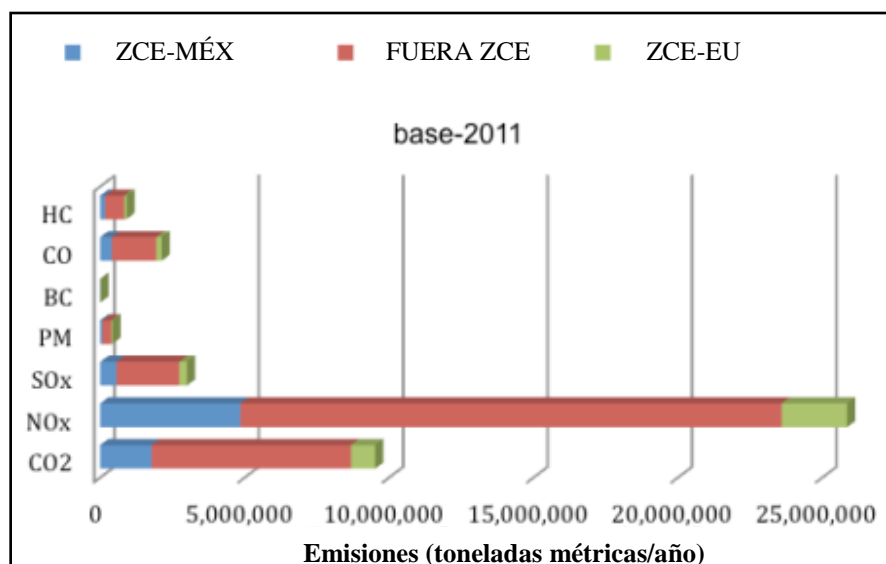
**Cuadro 2. Total de emisiones de buques por contaminante**

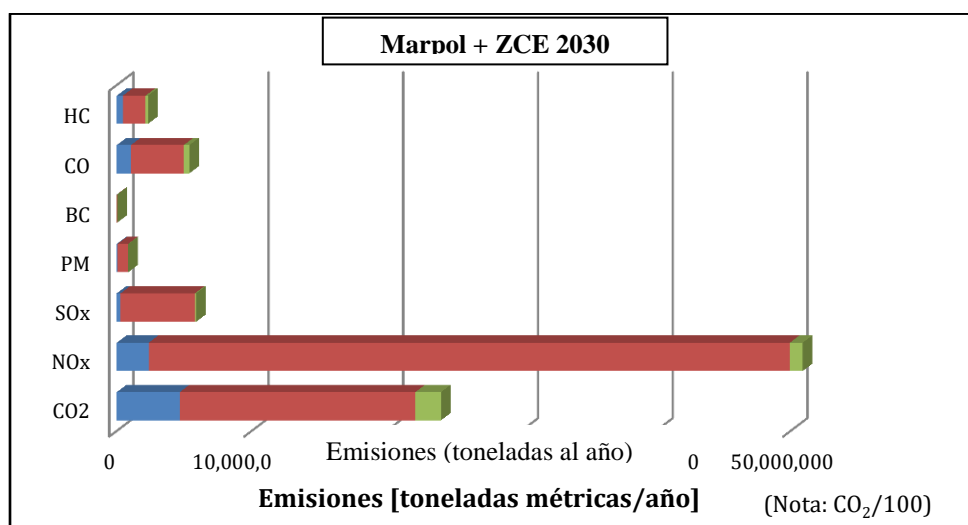
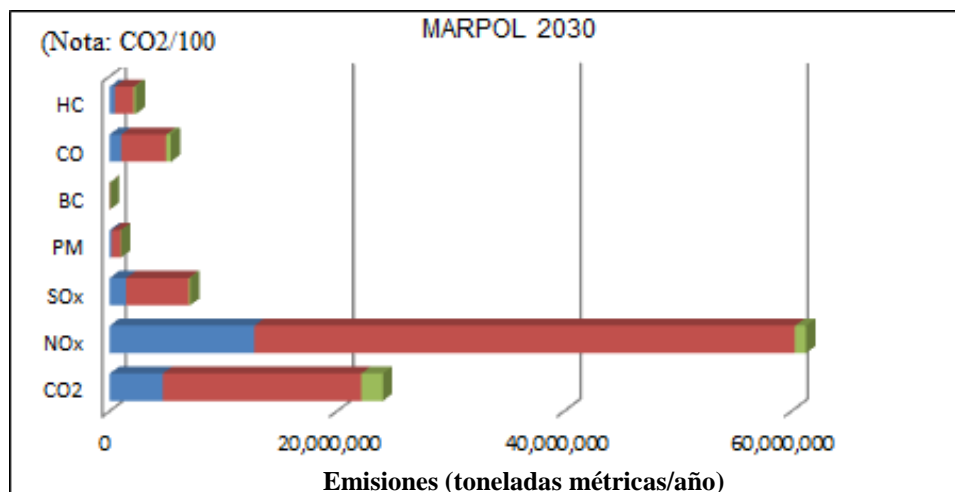
Contaminante	Emisiones (toneladas/año)		
	Base 2011	Marpol 2030	Marpol + ZCE 2030
CO <sub>2</sub>	952,170,000	2,404,353,000	2,404,353,000
NO <sub>x</sub>	25,865,000	61,273,000	50,907,000
SO <sub>x</sub>	3,000,000	7,095,000	5,911,000
PM	424,000	1,011,000	863,000
CN	13,000	30,000	26,000
CO	2,129,000	5,392,000	5,392,000
HC	913,000	2,312,000	2,312,000

Fuente: Corbett, 2012.

Los tres paneles de la gráfica 6 muestran las emisiones dentro de diferentes áreas (ZCE-Méx, Fuera-ZCE, ZCE-EU) del dominio espacial para cada escenario.

**Gráfica 6. Emisiones de contaminantes para cada escenario**





Fuente: Corbett, 2012.

Hay varios puntos que conviene recalcar respecto del INEB:

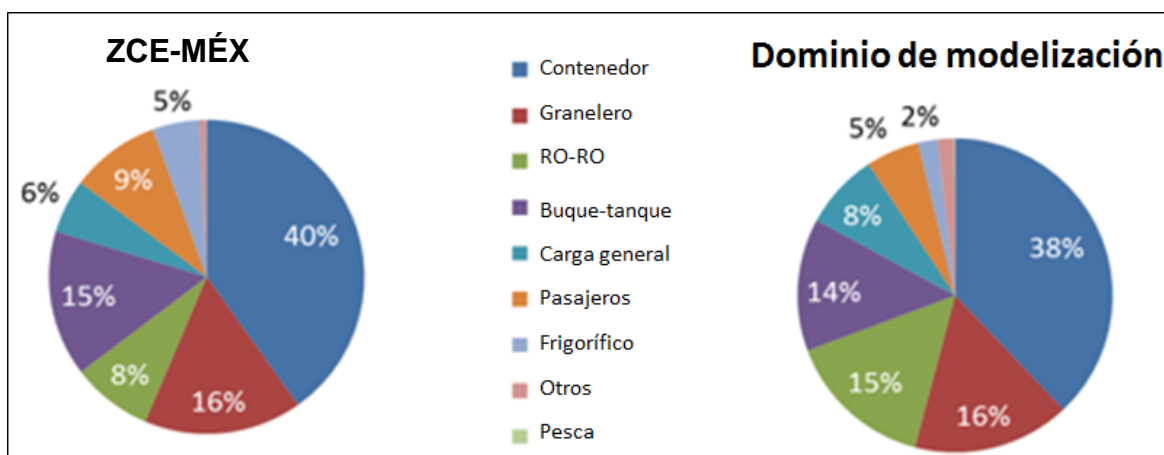
- Las reducciones de contaminantes dentro de la ZCE-Méx oscilan entre 70 y 80 por ciento al comparar los escenarios S1 y S2 (véase cuadro 3).
- Los buques con bandera internacional generan cerca de 95% de las emisiones en todo el dominio de modelización.
- Las emisiones de SO<sub>x</sub> de buques con bandera mexicana son menos de 1% en el dominio de modelización y cerca de 28% dentro de la ZCE mexicana.
- Las emisiones de los buques en la ZCE-Méx equivalen a 17% de las emisiones de carbono negro provenientes de fuentes móviles en tierra (INEM, 2011).
- Las mayores emisiones están asociadas con buques contenedores, buques graneleros, buques Ro-Ro y petroleros (buque-tanque) (véase gráfica 7).

**Cuadro 2. Emisiones dentro de la ZCE-Méx**

Escenario	Año	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM	CN	CO	HC
Base 2011	2011	178,229,000	4,855,000	562,000	79,000	2,000	400,000	171,000
2030 Marpol (S1)	2030	467,106,000	12,738,000	1,472,000	208,000	6,200	1,049,000	450,000
2030 Marpol + ZCE (S2)	2030	467,106,000	2,372,000	289,000	60,000	1,800	1,049,000	450,000
Reducción (S1-S2)		–	81%	80%	71%	71%	–	–

Nota: Emisiones en toneladas/año.

**Gráfica 7. Emisiones de contaminantes por tipo de buque**



### Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), 2011

Proporcionado por la Semarnat para el presente estudio, el Inventario nacional de emisiones (INEM) de 2011 muestra las emisiones generadas en los 32 estados del país; se basa en las proyecciones para el año 2011, con datos de 2008, última versión oficial publicada.<sup>2</sup> Debido a que el INEM 2011 se elaboró específicamente para este proyecto, la versión oficial aún no se publicaba al redactarse el presente informe.

En el INEM 2011, las fuentes de emisiones se clasifican en las categorías siguientes:

- puntuales o estacionarias (instalaciones industriales),
- móviles (vehículos que circulan por carreteras y todo terreno),

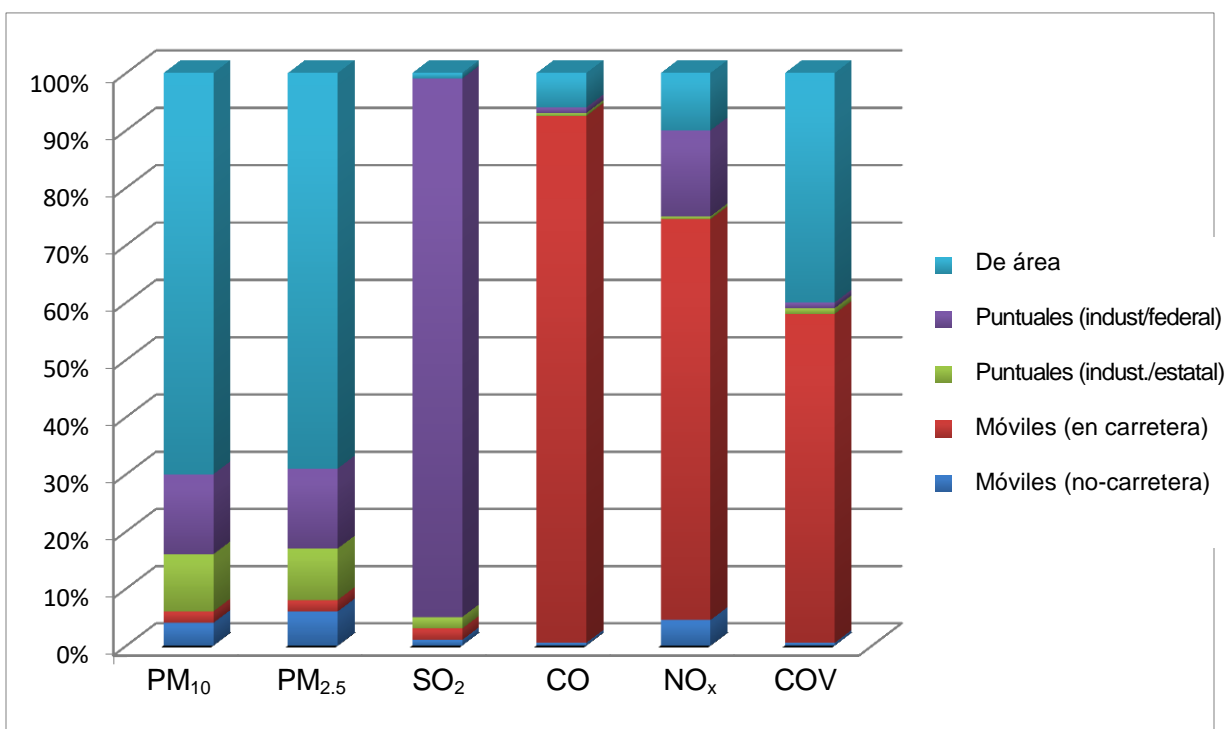
<sup>2</sup> Véase: Semarnat, en: <<http://sinea.semarnat.gob.mx>>.



- de área (tintorerías y combustión residencial) y
- biogénicas (fuentes naturales, como suelos y vegetación).

Las fuentes puntuales se desglosaron en 17 sectores; las fuentes de área, en siete sectores y 31 categorías; y las fuentes móviles, en dos grupos (vehículos automotores y fuentes móviles que no circulan por carretera) – y éstos, a su vez, en 15 subcategorías. El INEM 2011 incluye datos para COV y NO<sub>x</sub> sólo de fuentes biogénicas; sin embargo, el equipo de modelización del MCE2 incluyó posteriormente emisiones de SO<sub>2</sub> del volcán Popocatepetl y otras fuentes importantes. La gráfica 8 muestra el porcentaje de emisiones de contaminantes agrupados por categoría de fuente. Por ejemplo – como era de esperarse – la materia particulada proviene sobre todo de fuentes de área, mientras que las emisiones de dióxido de azufre provienen predominantemente de fuentes puntuales industriales bajo jurisdicción federal. El total de las emisiones para cada categoría de fuente se presenta en el cuadro 4.

**Gráfica 8. Porcentaje de emisiones por categoría de fuente en el INEM 2011**



Nota: Proyecciones de emisiones por categoría de fuente reagrupadas por la CCA con base en datos del INEM 2011.

**Cuadro 3. Total de emisiones para cada categoría de fuente, INEM 2011**

	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	COV	NH <sub>3</sub>	CN
<b>Puntuales</b>	221,125	139,580	2,516,007	1,045,559	550,389	297,592	23,794	13,905
<b>De área</b>	683,044	481,874	31,140	3,613,412	331,982	3,301,921	1,049,201	51,902
<b>Móviles</b>	57,206	48,541	73,017	54,765,437	2,982,866	4,949,249	40,009	11,863
<b>Total</b>	<b>961,376</b>	<b>669,997</b>	<b>2,620,165</b>	<b>59,424,408</b>	<b>3,865,238</b>	<b>8,548,763</b>	<b>1,113,006</b>	<b>77,671</b>

Nota: Toneladas/año.

## Inventario nacional de emisiones en puerto (INEP), 2011

El INEB 2011 no incluía datos de emisiones en puertos mexicanos. El equipo de modelización del MCE2 utilizó el Inventario nacional de emisiones en puerto (INEP), con datos de emisiones en puerto a escala nacional para el año 2011, y proporcionado por ERG en julio de 2014 (CCA, 2018). Este inventario se basa en datos sobre emisiones y actividad de puertos emanados de un informe inédito de la CCA:

*Inventario nacional de emisiones de fuentes de área, 2008*, preparado para un proyecto de la CCA en apoyo de la actualización del Inventario Nacional de Emisiones de México para con datos correspondientes a 2008 (CCA, 2011). Asimismo, ERG identificó datos más recientes sobre emisiones de motores marinos y equipo de manejo de carga que se sumaron a datos sobre buques y equipo de manejo de carga en México, proporcionados por la Semarnat, a fin de generar un conjunto de datos de emisiones en puerto más completo y actualizado. Con ello, se creó un inventario revisado de emisiones portuarias en México para 2011. Las fuentes de emisión se clasificaron en:

- Emisiones de equipos de manejo de carga en tierra (motores, plataformas, etcétera).
- Emisiones de buques que se aproximan al puerto (motores auxiliares, barcos de arrastre, etcétera).
- Emisiones en puerto durante carga y descarga de mercancía o reparación de buques.

Las emisiones en puerto generadas por actividades de carga y descarga de mercancía son las más importantes de este inventario. A los puertos mexicanos más grandes se les asignó la categoría T1, lo cual significa que su actividad es similar a la de un puerto equivalente de Estados Unidos, y por lo tanto se les asignó el equipo y los factores de emisión de acuerdo con la clasificación IPCC 2006. Además, este inventario incluye puertos que se consideran menos activos, a los cuales se les adjudicó la categoría T2 y cuyas emisiones se calcularon con base en inventarios de equipos y factores de emisión proporcionados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Estos detalles se resumen en el cuadro 5.

**Cuadro 4. Tipos de equipo y fuentes considerados en cada uno de los puertos mexicanos incluidos en el INEP**

Puerto	Clase	Categoría	Equipo	Área de embarque	Manejo de carga
Cayo Arcas, Camp.	Puerto de altura	T1	x		
Manzanillo, Col.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Veracruz, Ver.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Altamira, Tamps.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Isla Cedros, B.C.	Puerto de altura	T1	x		
Salina Cruz, Oax.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Tuxpan, Ver.	Puerto de altura	T1	x		
Dos Bocas, Tab.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Lázaro Cárdenas, Mich.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Guerrero Negro, B.C.S.	Puerto de altura	T1	x		
Guaymas, Son.	Puerto de altura	T1	x		
Topolobampo, Sin.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Ensenada, B.C.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Coatzacoalcos, Ver.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Progreso, Yuc.	Puerto de altura	T1	x		
Tampico, Tamps.	Puerto de altura	T1	x	x	x
La Paz, B.C.S.	Puerto de altura	T1	x		
Mazatlán, Sin.	Puerto de altura	T1	x	x	x
Rosarito, B.C.	Puerto de altura	T1	x		
Isla San Marcos, B.C.S.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		
Cozumel, Q. Roo	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		



Acapulco, Gro.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		
Puerto Libertad, Son.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		
El Sauzal, B.C.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x	x	x
San Carlos, B.C.S.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		
Puerto Morelos, Q. Roo	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		
Puerto Chiapas, Chis.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		x
Santa Rosalía, B.C.S.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		
Ciudad del Carmen, Camp.	Puerto de altura y cabotaje	T2	x		
Frontera, Tab.	Puerto de cabotaje	T2	x		
Punta Santa María, B.C.S.	Puerto de cabotaje	T2	x		
Puerto Vallarta, Jalisco	Puerto de cabotaje	T2		x	x

*Nota:* T1, equipo sugerido por ERG; T2, equipo sugerido por la SCT.

En el cuadro 6 se muestran las emisiones de contaminantes para cada puerto.

**Cuadro 5. Emisiones anuales, por contaminante, en cada puerto mexicano**

Puerto	COV	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Cayo Arcas, Camp.	114.4	2,573.0	736.1	75.4	61.0	6.8
Manzanillo, Col.	252.3	1,665.0	6,342.6	3,445.7	499.1	437.3
Veracruz, Ver.	2,538.0	6,822.8	75,501.0	42,788.9	5,924.5	5,446.3
Altamira, Tamps.	114.1	854.9	2,749.1	1,475.3	216.5	187.1
Isla Cedros, B.C.	28.7	645.6	184.7	18.9	15.3	1.7
Salina Cruz, Oax.	131.6	989.3	3,167.1	1,699.1	249.4	215.5
Tuxpan, Ver.	34.3	772.0	220.8	22.6	18.3	2.0
Dos Bocas, Tab.	493.4	1,439.9	14,543.0	8,224.9	1,141.3	1,046.7
Lázaro Cárdenas, Mich.	63.0	1,406.7	415.6	48.9	34.4	4.7
Guerrero Negro, B.C.S.	15.2	342.2	97.9	10.0	8.1	0.9
Guaymas, Son.	14.0	314.4	90.0	9.2	7.5	0.8
Topolobampo, Sin.	135.8	542.3	3,830.9	2,144.4	300.9	272.7
Ensenada, B.C.	301.3	766.9	9,013.2	5,114.6	707.2	651.0
Coatzacoalcos, Ver.	139.9	1,614.5	2,702.7	1,344.9	213.8	169.6
Progreso, Yuc.	8.4	189.4	54.2	5.6	4.5	0.5
Tampico, Tamps.	451.6	1,440.1	13,168.7	7,429.1	1,033.7	945.3
La Paz, B.C.S.	4.3	96.6	27.6	2.8	2.3	0.3
Mazatlán, Sin.	57.6	256.5	1,592.7	887.3	125.1	112.8
Rosarito, B.C.	4.1	93.2	26.6	2.7	2.2	0.2
Isla San Marcos, B.C.S.	1.8	40.3	11.4	1.2	0.9	0.1
Cozumel, Q. Roo	0.6	3.4	7.8	1.0	0.8	0.1
Acapulco, Gro.	0.5	2.8	6.5	0.8	0.7	0.1
Puerto Libertad, Son.	0.9	4.7	10.8	1.4	1.1	0.1
El Sauzal, B.C.	448.8	1,049.6	13,537.2	7,695.7	1,062.0	979.7
San Carlos, B.C.S.	0.2	5.4	1.6	0.2	0.1	0.0
Puerto Morelos, Q. Roo	0.0	1.1	0.3	0.0	0.0	0.0
Puerto Chiapas, Chis.	18.5	44.1	558.1	317.2	43.8	40.4
Santa Rosalía, B.C.S.	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0
Ciudad del Carmen, Camp.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Frontera, Tab.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Punta Santa María, B.C.S.	2.4	53.9	15.3	1.6	1.3	0.1
Puerto Vallarta, Jalisco	8.5	19.9	256.6	145.9	20.1	18.6
<b>Total</b>	<b>5,384.3</b>	<b>24,051.0</b>	<b>148,870.6</b>	<b>82,915.2</b>	<b>11,696.1</b>	<b>10,541.6</b>

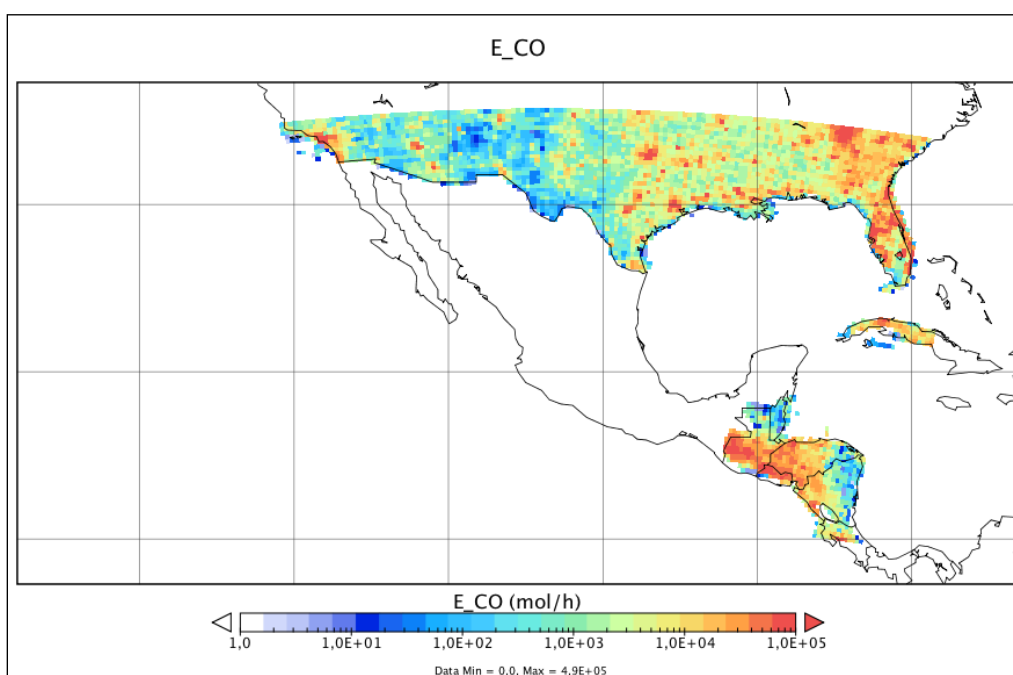
Nota: Toneladas/año.

Debe señalarse que ERG actualizó los datos de emisión en puertos (ERG, 2014); sin embargo, por cuestiones de limitación en los tiempos, tales datos no se utilizaron en la modelización principal de calidad del aire efectuada para el presente estudio. El análisis de sensibilidad realizado a fin de evaluar los efectos de la inclusión de los datos de puerto actualizados se incluye en el apéndice III.

### Estimaciones de emisiones para los Estados Unidos (2011) y Centroamérica (2008)

Para completar los datos para las emisiones en tierra del dominio de modelización, el equipo MCE2, en acuerdo con la Semarnat, tomó en consideración las emisiones del sur de Estados Unidos y de Centroamérica. Los datos para los Estados Unidos se obtuvieron del Inventario Nacional de Emisiones (*National Emissions Inventory*, NEI) oficial de la EPA, correspondiente a 2011, y se procesaron utilizando el modelo *Sparse Matrix Operator Kernel Emissions* (SMOKE). Del mismo modo, las estimaciones de emisiones de Centroamérica (ECA, 2008) se obtuvieron a partir del modelo *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR), v4.2 para 2008 (Janssens-Maenhout *et al.*, 2012). Estas emisiones se distribuyeron utilizando mapas de densidad de población para la región (véase las emisiones de CO en la gráfica 9). Posteriormente, estas emisiones se procesaron con el fin de usarlas en el modelo de calidad del aire WRF-Chem (Grell *et al.*, 2005). Para este proyecto se aplicó el mecanismo químico del modelo de deposición ácida regional RADM2 (Stockwell *et al.*, 1990).

**Gráfica 9. Emisiones de CO para el sur de Estados Unidos y Centroamérica**



## 1.4 Escenarios de modelización

Los inventarios descritos en las secciones anteriores se emplearon para construir tres escenarios. El **escenario base de 2011** incluye datos de emisiones provenientes de:

- Inventario nacional de emisiones de buques (INEB 2011)
- Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM 2011)
- Inventario nacional de emisiones en puerto (INEP 2011)
- Inventario Nacional de Emisiones de Estados Unidos (NEI 2011)
- Estimaciones de emisiones de Centroamérica (ECA 2008).

Como se mencionó, el año de referencia (2011) representa la estimación de emisiones para un año “en curso” antes de la ratificación por México del Anexo VI del Convenio Marpol. Para las proyecciones de 2030, el escenario S1 representa una situación en donde se aplicarán los límites máximos de azufre del Anexo VI del Convenio Marpol; y el escenario S2 representa la situación “Marpol + ZCE” – es decir, en donde se aplicarán límites de azufre adicionales correspondientes a la zona de control de emisiones de México. En el cuadro 7 se muestran las fuentes de información y de datos considerados para cada escenario.

**Cuadro 6. Escenarios de emisiones para este proyecto**

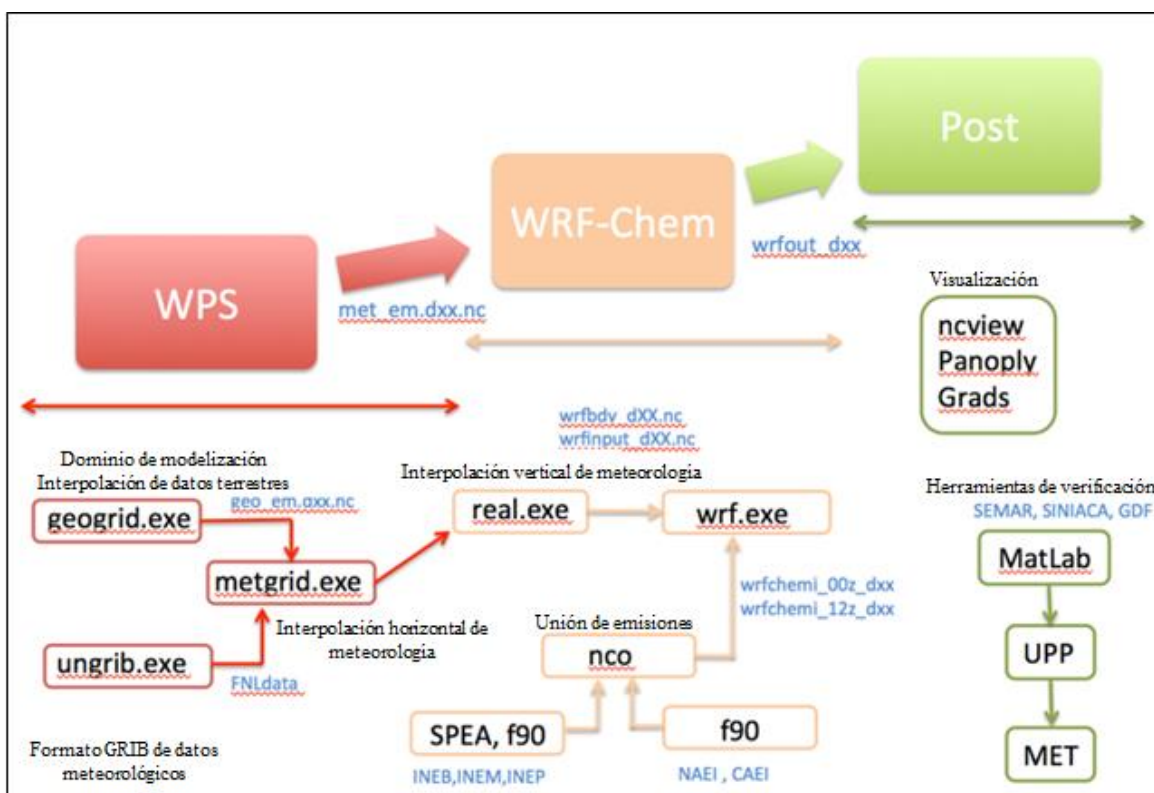
Escenario	Inventario	Fuente
<b>Base-2011</b>	INEB 2011	Semarnat y EERA
	INEM 2011	Semarnat
	NEI 2011	MCE2 y EPA
	ECA 2008	MCE2 y EDGAR
	INEP 2011	ERG, Semarnat y MCE2
<b>S1</b>	INEB 2030 (Marpol) + emisiones en tierra*	Semarnat y EERA
<b>S2</b>	INEB 2030 (Marpol + ZCE) + emisiones en tierra*	Semarnat y EERA

\* Nota: Las emisiones en tierra en los dos escenarios proyectados para 2030 provienen de INEM 2011, NEI 2011, ECA 2008 e INEP 2011.

## 1.5 Configuración del modelo

En este proyecto se utilizó el modelo de calidad Weather Research and Forecasting (WRF), en su modalidad de análisis químico (WRF-Chem) (Grell *et al.*, 2005). El proceso de modelización fue dividido en tres partes: preprocesamiento (WPS), ejecución (WRF-Chem) y posprocesamiento (Post) (véase la gráfica 10). Los apartados siguientes describen con mayor detalle estas etapas.

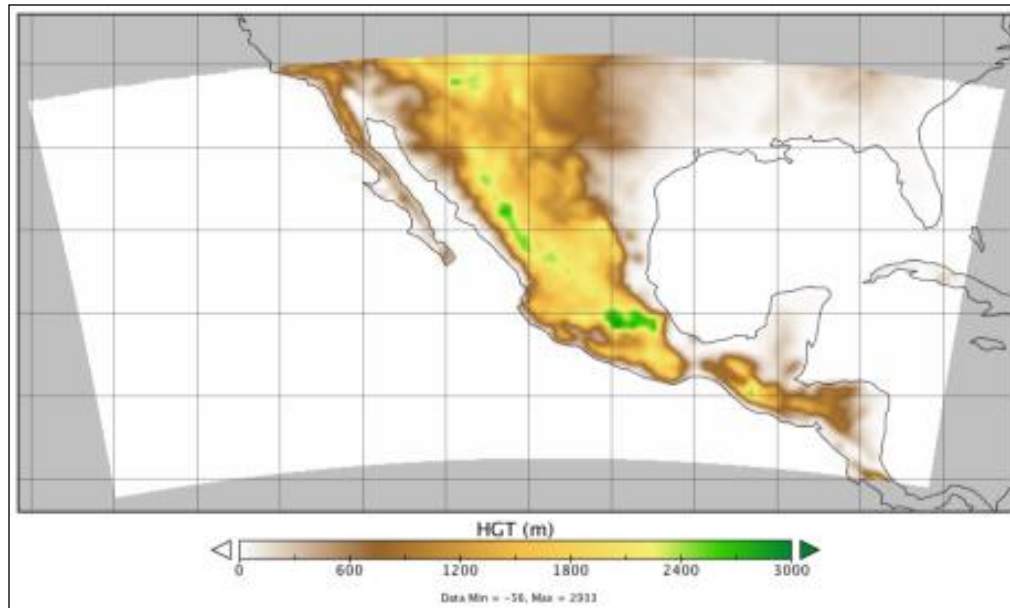
Gráfica 10. Esquema de modelización de calidad del aire mediante WRF-Chem



Notas: 1) WPS: Dominio espacial y temporal, preprocesamiento de datos para topografía, uso de suelo y meteorología global; 2) WRF-Chem: Procesos de emisión, química, física, y se generan condiciones iniciales de frontera, así como datos resultantes de calidad del aire, y 3) Post: Visualización y evaluación de los resultados de la modelización.

El dominio del modelo se definió con una proyección Lambert Conformal, centrado a una latitud y longitud de 22.25 N y 105.12 O, respectivamente. Se consideró una resolución espacial de 0.25 x 0.25 grados (aproximadamente 28 x 28 km). El dominio que se muestra en la gráfica 11 contiene 20,000 celdas que abarcan alrededor de 15 millones de km<sup>2</sup>, que equivalen a México y partes de Centroamérica y del sur de Estados Unidos, así como una gran extensión de mar. En el modelo se utilizaron 35 capas verticales; los datos de uso de suelo provienen del Servicio de Estudios Geológicos de Estados Unidos (*United States Geological Survey*, USGS; [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)), y se tomaron en cuenta 24 categorías.

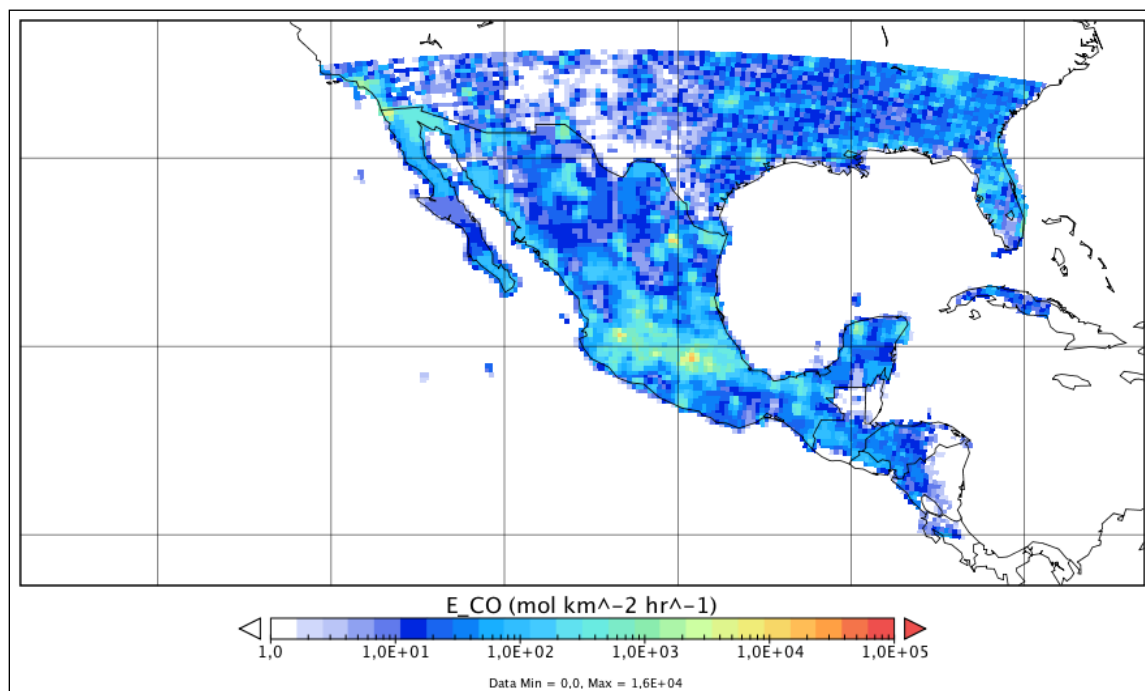
**Gráfica 7. Topografía del dominio de modelización**



Fuente: Archivo de entrada de WRF.

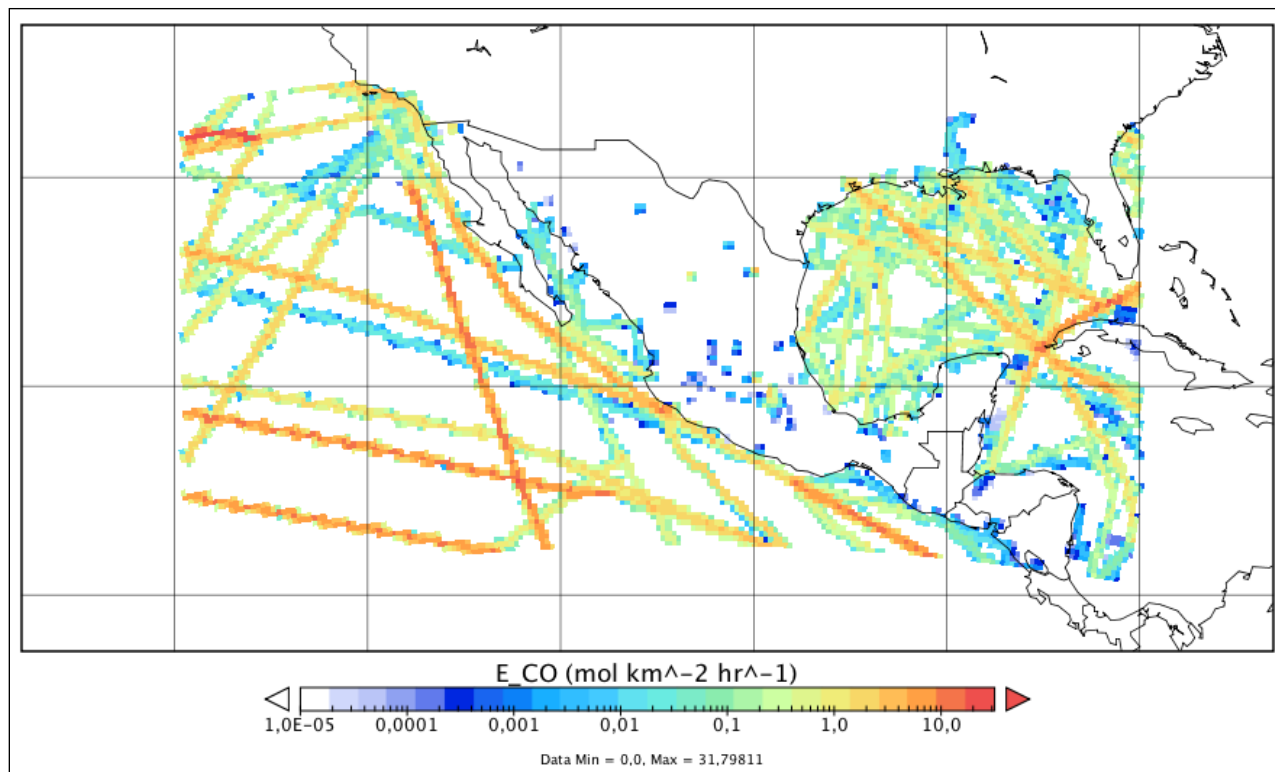
En el caso de fuentes puntuales, las emisiones se encuentran en el nivel o capa que corresponde a su altura efectiva. La gráfica 12 muestra las emisiones de CO en el dominio de modelización en la primera capa vertical, cerca de la superficie. Las emisiones de los buques se consideraron en alrededor de 16 metros sobre el nivel del mar, por lo que aparecen en la segunda capa de la modelización.

**Gráfica 8. Emisiones de CO en el dominio de modelización, ubicadas en la primera capa vertical**



La gráfica 13 muestra las emisiones de CO en el dominio de modelización y en la segunda capa, a una altura de entre 16 y 22 metros sobre el nivel del mar. Además, algunas emisiones provenientes de fuentes puntuales aparecen en la segunda capa. Cabe destacar que todas las emisiones de Centroamérica y del sur de Estados Unidos se colocaron en la primera capa vertical.

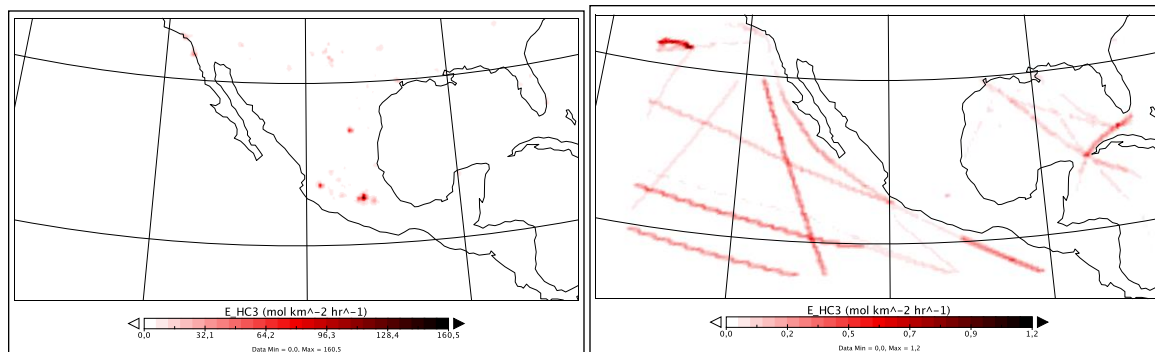
**Gráfica 9. Emisiones de CO en el dominio de modelización, en la segunda capa vertical**



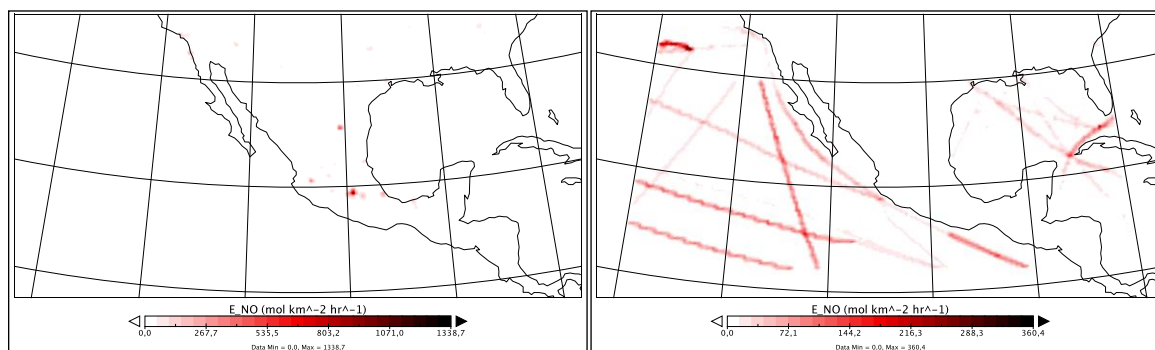
*Nota:* Se muestran emisiones de buques y algunas fuentes puntuales de México.

Las gráficas 14 (a, b, y c) muestran la distribución en la primera y segunda capa de las emisiones de HC<sub>3</sub>, NO y SO<sub>2</sub>. Es posible observar las emisiones de las principales ciudades de México y las rutas marítimas.

**Gráfica 14a). Emisiones de HC3 en la primera capa vertical (izquierda\*) y la segunda capa vertical (derecha) del dominio de modelización**



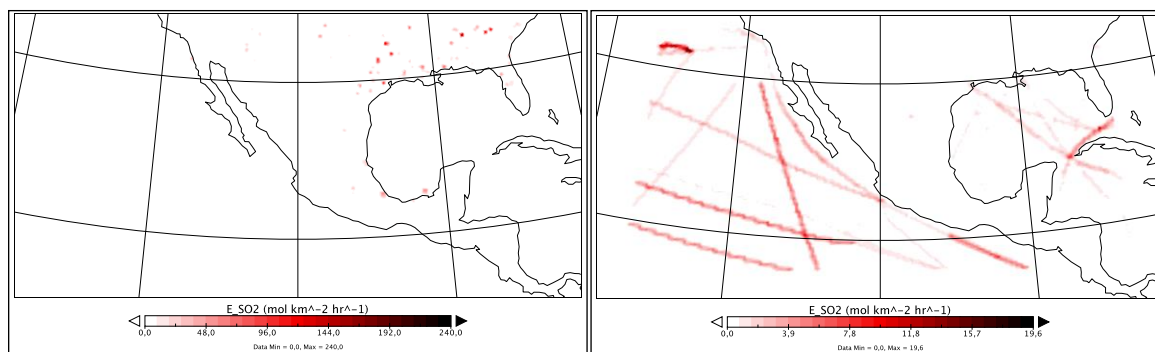
**Gráfica 10b). Emisiones de NO en la primera capa vertical (izquierda\*) y la segunda capa vertical (derecha) del dominio de modelización**



\* Del lado izquierdo se muestran las emisiones de buques y de algunas fuentes puntuales de México.

Nota: Emisiones en mol/km<sup>2</sup>/h.

**Gráfica 11c). Emisiones de SO<sub>2</sub> en la primera (izquierda) y segunda (derecha) capas verticales del dominio de modelización**



Nota: Emisiones en mol/km<sup>2</sup>/h.



## 1.6 Resultados

En este apartado se contrastan los resultados de la modelización con los datos obtenidos de estaciones de monitoreo. El objetivo es evaluar el modelo WRF-Chem en la simulación de variables meteorológicas, así como las principales especies químicas de este proyecto. Se utilizaron índices estadísticos para medir la relación entre simulaciones y mediciones. Además, se presentan los mapas de concentraciones correspondientes a las principales especies químicas (O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y la deposición seca de SO<sub>2</sub> para cada escenario.

### Evaluación del modelo

Se evaluó el desempeño del modelo utilizando datos provenientes de estaciones de monitoreo en superficie y datos de asimilación provenientes del Sistema Global de Asimilación de Datos (*Global Data Assimilation System*, GDAS), como se muestra en el cuadro 8.

**Cuadro 7. Datos meteorológicos y de calidad del aire utilizados para validar el modelo**

Número de estaciones	Alias	Fuente	Variabes	Cobertura
32	Semar	Secretaría de Marina	Meteorología (costa)	Costa
44	RAMA	SMAGDF	Meteorología y datos de calidad del aire	Zona centro de México
132	GDAS	NOAA	Meteorología	Global

Se procesaron los datos de las estaciones de monitoreo en tierra, y más tarde se analizaron con el programa de posprocesamiento unificado *Unified Post Processor* (UPP) y la herramienta de evaluación de modelos *Model Evaluation Tools* MET (DTC, 2014; Mora Ramírez *et al.*, 2012), que permiten la comparación sistemática de los resultados de la modelización (meteorología y calidad del aire) con datos de estaciones de monitoreo. Con base en estudios previos (Conagua, 2011; Sesma, 2012), se seleccionaron cuatro periodos para el escenario de referencia o base de 2011, con datos suficientes para validar los resultados de la modelización (cuadro 9).

**Cuadro 9. Periodos para el escenario de base 2011**

Periodo	Mes	Días
1	Febrero	10-16
2	Mayo	16-22
3	Ago-sept	31-06
4	Nov	21-27

Se observó una buena correlación entre los resultados del monitoreo y la modelización. Sin embargo, para las variables de calidad del aire, la comparación fue difícil, pues los datos proporcionados por las estaciones de monitoreo de calidad del aire provienen principalmente de zonas urbanas, y la malla utilizada para la modelización cubre un área de 27.7 x 27.7 km. Por otro lado, las concentraciones de contaminantes en las ciudades son mayores que las de las zonas circundantes: las celdas grandes de la malla abarcan áreas rurales y urbanas en las que el gradiente de concentraciones en el ambiente es



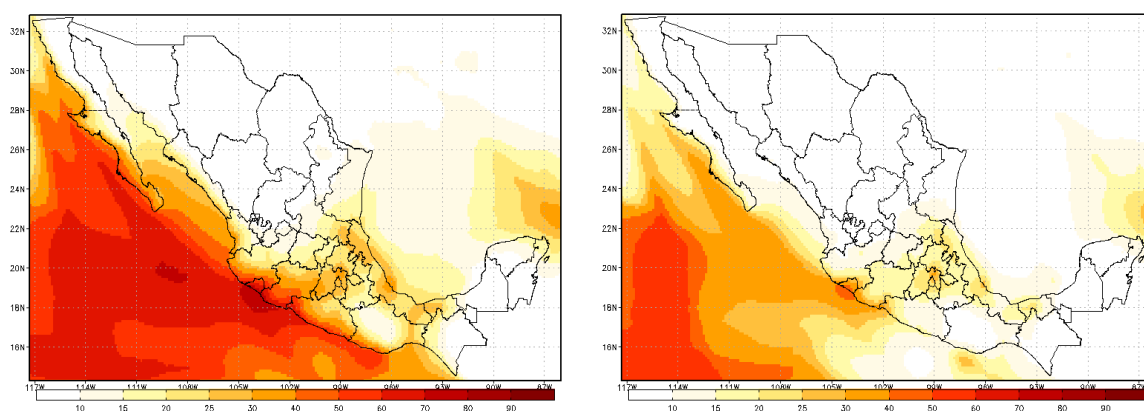
elevado y, por lo tanto, las concentraciones promedio dentro de la malla son menores que las concentraciones medidas en estaciones de monitoreo. Los detalles de estos resultados se presentan en el apéndice II de este documento.

Tras la evaluación del modelo se generaron mapas de concentraciones para  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ , así como para la deposición seca de  $SO_2$ .

### Partículas finas $PM_{2.5}$

La gráfica 15 muestra los mapas de concentraciones de  $PM_{2.5}$  para los escenarios S1 y S2. Hay reducciones significativas en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  después de la reglamentación en el S2 (Marpol+ZCE 2030).

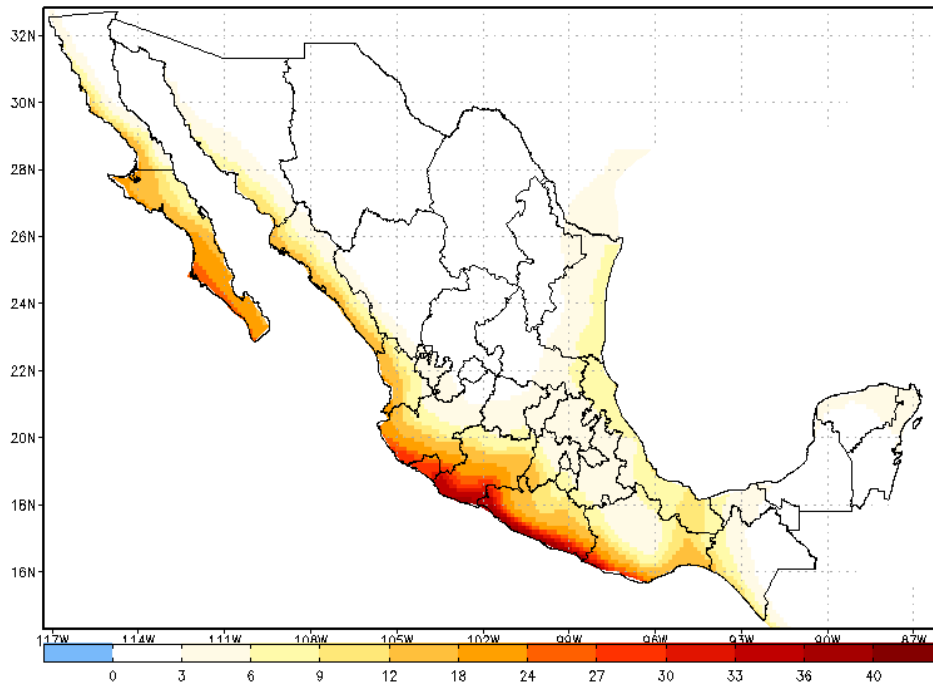
**Gráfica 12.  $PM_{2.5}$  promedio anual de 24 horas para los escenarios S1 y S2**



*Nota:* Intervalo de 0 a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . S1 (izquierda) y S2 (derecha).

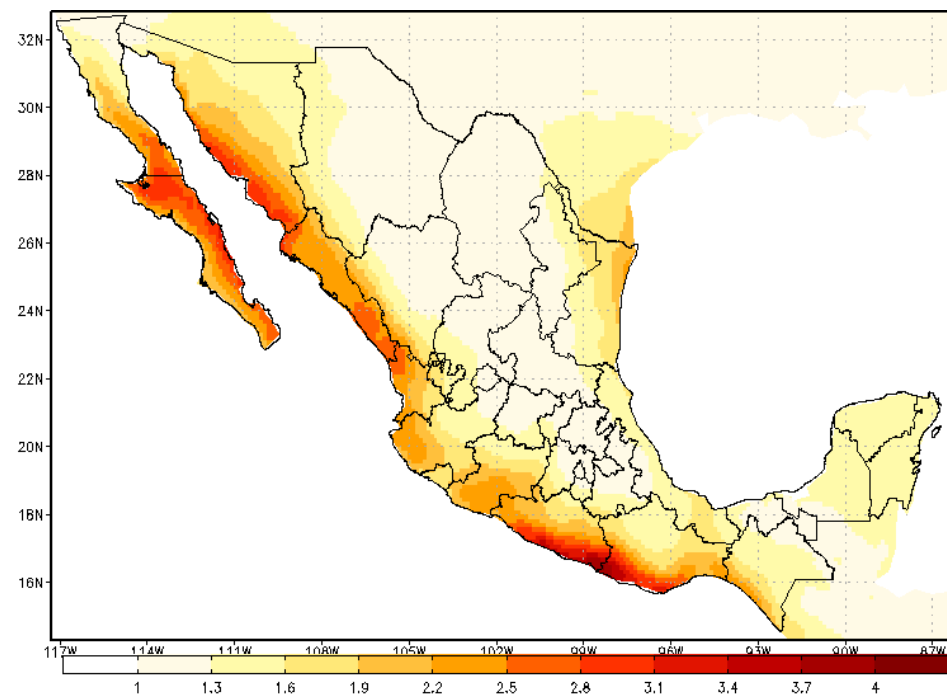
Los detalles de estas reducciones se pueden ver en la gráfica 16, que presenta la diferencia en las concentraciones entre los dos escenarios (S1-S2). Las reducciones más marcadas ( $5\text{-}40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ocurren en áreas costeras. En otras palabras, habría tres veces menos concentración de  $PM_{2.5}$  (en algunas zonas costeras y periodos) como resultado de la reglamentación (véase la gráfica 17). Los beneficios en salud resultantes de las mejoras en la calidad del aire se analizan y evalúan en la segunda parte de este documento.

**Gráfica 13. Reducciones estimadas en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  como resultado de la reglamentación: contraste entre el escenario S1 (Marpol 2030) y el S2 (Marpol + ZCE 2030)**



Nota: Concentraciones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Gráfica 14. Cociente S1/S2 de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ : contraste entre el escenario S1 (Marpol 2030) y el S2 (Marpol + ZCE 2030)**



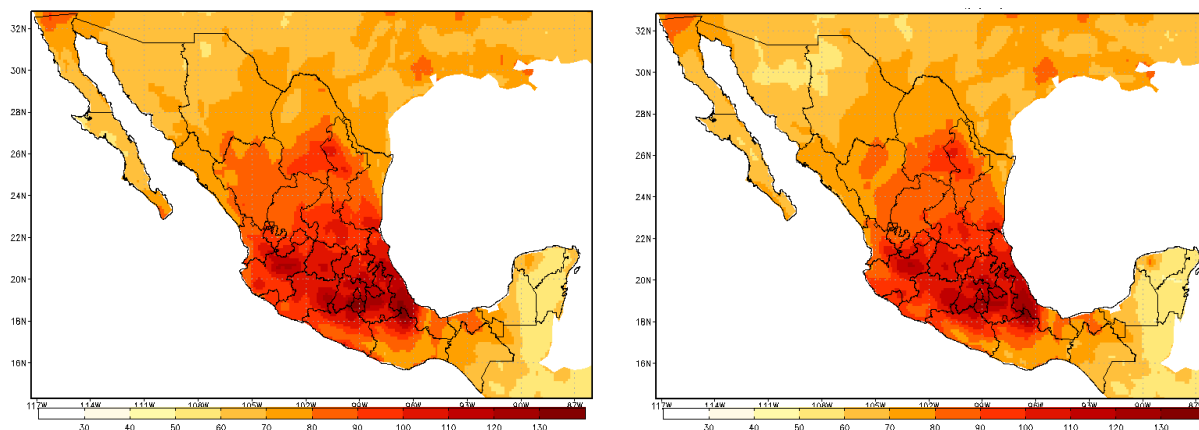
Nota: A mayor cociente, mayor reducción.

## Evaluación del modelo del ozono

Los resultados de la modelización del ozono se obtuvieron hora por hora. Posteriormente se generaron 8,760 valores, que representan el número de horas en un año. Esos valores se extrajeron para estimar los beneficios en salud. El ozono es un contaminante secundario formado por reacciones fotoquímicas de gases precursores, como los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Sin embargo, la producción de ozono no es una función en absoluto lineal de los gases precursores, lo cual influye de manera importante en las estrategias de control del ozono. Por ejemplo, en el área metropolitana de la Ciudad de México se encontró que la formación de ozono era limitada por los COV en el área urbana, pero podía verse limitada por éstos o por óxidos de nitrógeno, dependiendo de las condiciones meteorológicas (Song *et al.*, 2010).

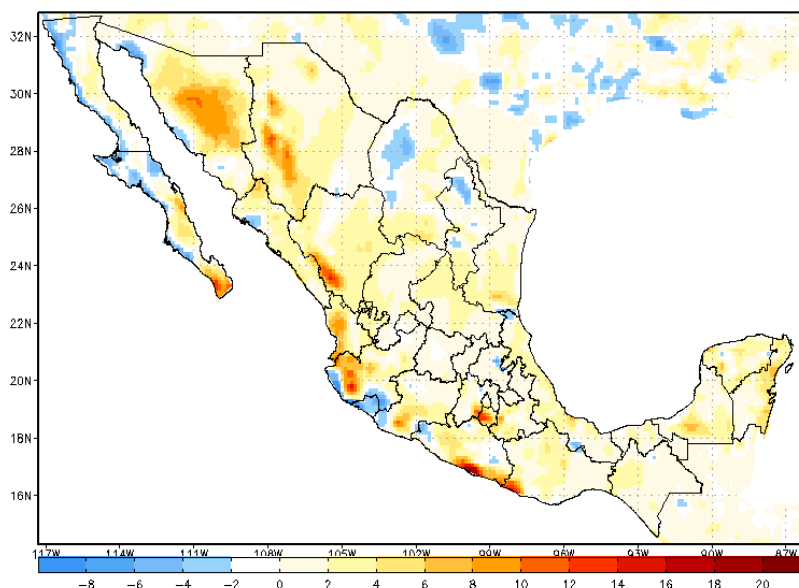
Las emisiones de embarcaciones marítimas son la principal fuente local de precursores de ozono. La gráfica 18 muestra los mapas de concentración de  $\text{O}_3$  para los escenarios S1 y S2. Debido a que los precursores en el proceso de formación de ozono se caracterizan por una alta no-linealidad, se prevé que las concentraciones disminuirán en algunas áreas costeras, pero en otras áreas mostrarán un ligero incremento después de la instrumentación del Convenio Marpol y el establecimiento de la ZCE propuesta. En la gráfica 19 se muestra la diferencia en las concentraciones de ozono entre los escenarios S1 y S2, y algunas áreas del dominio de modelización muestran diferencias negativas (-10 ppmm<sub>v</sub>). Estas regiones representan incrementos en las concentraciones de  $\text{O}_3$  como resultado de la reglamentación. Del mismo modo, en otras regiones las diferencias son positivas, lo que indica una reducción en las concentraciones de  $\text{O}_3$  (de 0 - 22 ppmm<sub>v</sub>).

**Gráfica 15. Promedio anual de concentración de  $\text{O}_3$  para los escenarios S1 (izquierda) y S2 (derecha)**



Nota: Concentraciones en ppmm<sub>v</sub>.

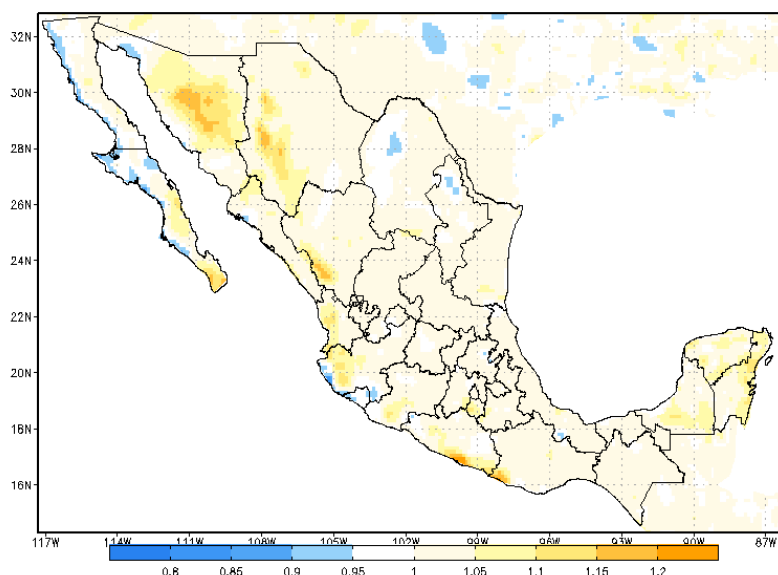
**Gráfica 16. Reducciones proyectadas en las concentraciones de  $O_3$  como resultado del establecimiento de una ZCE (S1 vs. S2)**



*Nota:* Reducciones en concentraciones en ppmm.

Para analizar con más claridad los impactos sobre la calidad del aire, la gráfica 20 muestra la relación entre los escenarios S1 y S2. Las mejoras en la calidad del aire son hasta 1.5 veces menores en el escenario ZCE, sujeto a reglamentación adicional (S2), que en el escenario no sujeto a ella, en donde se aplica el anexo VI de Marpol (S1). Debido a la relación no lineal entre emisiones y concentraciones de ozono, algunas áreas tendrán un incremento de 0.5 veces en la concentración de  $O_3$ . Vale la pena destacar que, en el caso del deterioro de la calidad del aire, el incremento en las concentraciones de  $O_3$  sucede principalmente a lo largo de las áreas costeras.

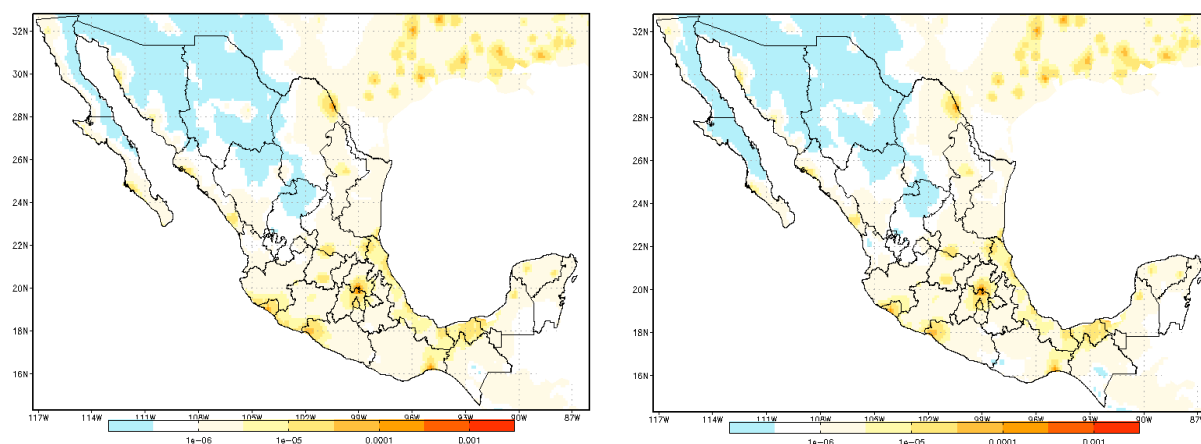
**Gráfica 17. Cociente de las concentraciones de  $O_3$ : contraste entre el S1 y el S2**



## Deposición seca anual de SO<sub>2</sub>

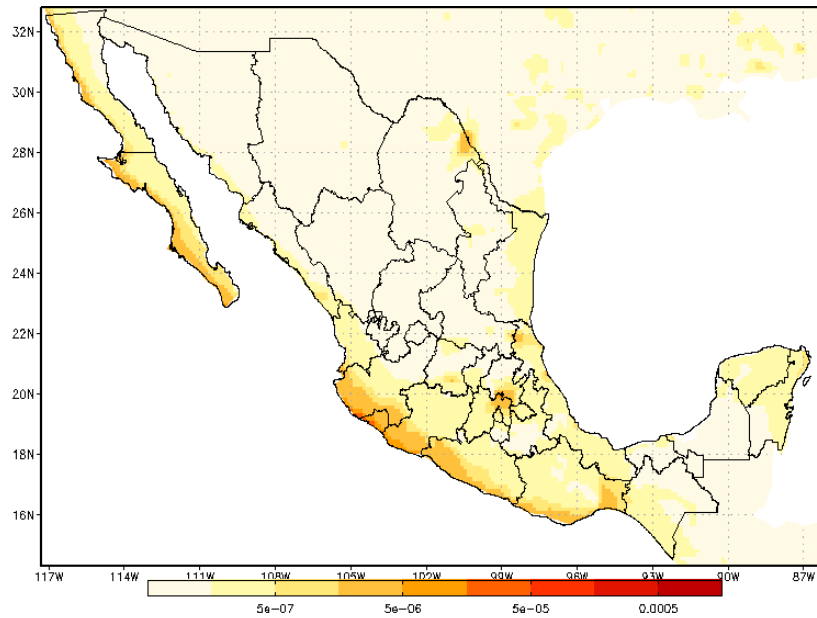
El modelo WRF-Chem se configuró para calcular la deposición seca de SO<sub>2</sub>. El modelo calculó los flujos de deposición cada hora (mol/m<sup>2</sup>/h) y generó un valor de deposición acumulada por hora. En una modelización mensual, el último valor contuvo la deposición seca mensual acumulada. Para calcular la deposición anual, se sumaron los valores mensuales obtenidos y se convirtieron a kilogramos por hectárea (kg/ha). Los escenarios de deposición seca anual se muestran en la gráfica 21. Los resultados demuestran que una política de reglamentación (Marpol + ZCE) reduciría la deposición seca de SO<sub>2</sub> en áreas costeras. Las posibles reducciones se calcularon tomando la diferencia entre los escenarios S1 y S2, y el resultado se muestra en la gráfica 22. Las reducciones son considerables: una deposición de SO<sub>2</sub> entre 10 y 20 por ciento menor en general para el territorio del golfo de México (tierra), y entre 10 y 450 por ciento menor en áreas costeras del Pacífico (véase la gráfica 23).

**Gráfica 18. Deposición seca anual de SO<sub>2</sub> para los escenarios S1 (izquierda) y S2 (derecha)**



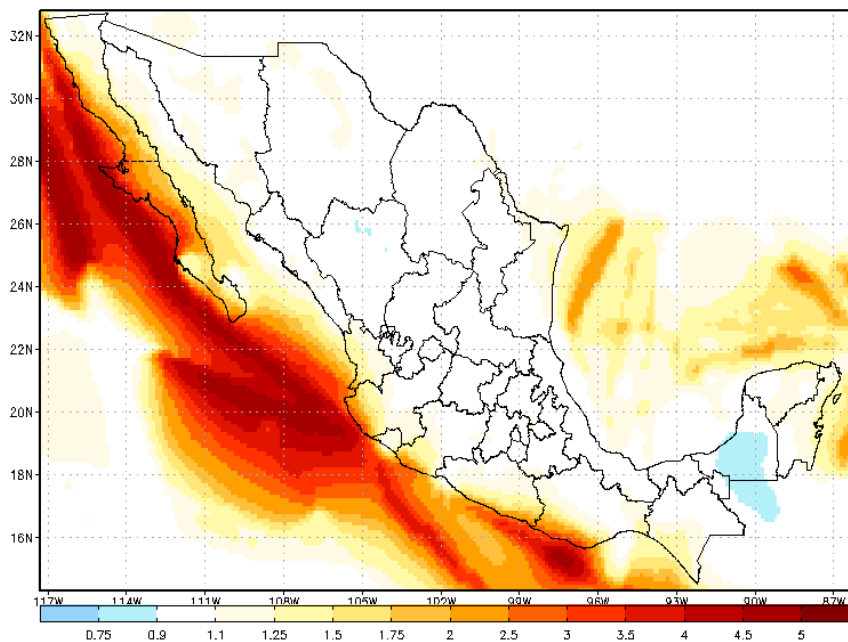
*Nota:* Deposición en kg/ha.

**Gráfica 19. Diferencia de la deposición seca anual de SO<sub>2</sub> entre los escenarios S1 y S2**



Nota: Deposición en kg/ha.

**Gráfica 20. Cociente S1/S2 de la deposición seca anual de SO<sub>2</sub>: contraste entre los escenarios S1 y S2**



## PARTE 2. EVALUACIÓN DE LOS BENEFICIOS PARA LA SALUD

### 2.1. Introducción

Las embarcaciones marítimas pueden ser uno de los medios de transporte más eficientes. Actualmente, los buques comerciales transportan entre 75 y 90 por ciento de la carga en el mundo. Se espera que este tipo de transporte crezca de 150 a 300 por ciento para 2050 (Rothengatter *et al.*, 2011; Grossmann *et al.*, 2013), en particular por la actividad de transporte de contenedores, cuyo aumento se prevé en 425-800% para ese año (Buhaug *et al.*, 2008), así como también por el incremento esperado de la población mundial.

Sin embargo, como suele suceder con todo medio de transporte basado en combustibles fósiles, las embarcaciones marítimas emiten cantidades sustanciales de contaminantes que afectan no sólo a la población cercana a costas y puertos, sino también a quienes viven cientos de kilómetros tierra adentro (Bailey y Solomon, 2004; Corbett, 2007; Friedrich *et al.*, 2007; OMI, 2010; Winnes, 2010).

El objetivo de esta segunda parte consiste en estimar los beneficios para la salud que se obtendrían a raíz de la ratificación por México del Anexo VI del Convenio Marpol y el establecimiento de la zona de control de emisiones de México (ZCE-Méx); más específicamente, cuantificar los efectos en la salud asociados con la exposición de la población a ozono y partículas finas.

### 2.2. Vista general de los contaminantes y sus efectos en la salud

El ozono troposférico y las partículas de materia fina aerotransportadas (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) son los dos contaminantes que suponen la mayor amenaza a la salud humana. A estos dos contaminantes de criterio se les ha adjudicado un límite máximo permisible para proteger la salud pública. Los límites máximos permisibles de PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> para México, así como los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y los estándares aplicables en Canadá y Estados Unidos, se encuentran listados en el cuadro 10.

**Cuadro 10. Límites máximos permisibles de exposición a O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub>**

Contaminante	Periodo	OMS <sup>a</sup>	México <sup>b</sup>	Estados Unidos <sup>c</sup>	Canadá <sup>d</sup>
O <sub>3</sub>	1 h	–	0.095 ppm		
	8 h	0.0473 ppm	0.070 ppm	0.075 ppm	0.063 ppm
PM <sub>2.5</sub>	Anual	10 µg/m <sup>3</sup>	12 µg/m <sup>3</sup>	12 µg/m <sup>3</sup>	10.0 µg/m <sup>3</sup>
	24 h	25 µg/m <sup>3</sup>	45 µg/m <sup>3</sup>	35 µg/m <sup>3</sup>	28 µg/m <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub>	Anual	20 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>		
	24 h	50 µg/m <sup>3</sup>	75 µg/m <sup>3</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>	

Fuentes:

<sup>a</sup> OMS, *Guías de calidad del aire relativas al material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre*: actualización global 2005, resumen de la evaluación de riesgos, Organización Mundial de la Salud; disponible en: <[http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)>.

<sup>b</sup> Adaptado de las normas mexicanas, en: <[www.cofepriis.gob.mx/](http://www.cofepriis.gob.mx/)>.

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, *Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas de materia fina PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación*.

Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, *Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de ozono en el aire ambiente y criterios para su evaluación*.

<sup>c</sup> Véase: <[www.epa.gov/air/criteria.html](http://www.epa.gov/air/criteria.html)>.

<sup>d</sup> Véase: <[www.ccme.ca/en/current\\_priorities/air/caaqs.html](http://www.ccme.ca/en/current_priorities/air/caaqs.html)>.



## Materia particulada (PM)

La materia particulada (a la que también se hace referencia como “material particulado” o “partículas suspendidas” y que suele abreviarse “PM”, del inglés: *particulate matter*) representa una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas presentes en el aire e incluye elementos (como carbón y metales), compuestos (sustancias químicas orgánicas, nitratos y sulfatos) y mezclas complejas (por ejemplo, emisiones de diésel, tierra, polvo). Algunas partículas son emitidas directamente a la atmósfera por fuentes naturales o antropogénicas mientras que otras (partículas secundarias) resultan de gases que se transforman en partículas debido a procesos físicos y químicos que ocurren en la atmósfera. Estas partículas líquidas y sólidas se presentan en un rango muy variado de tamaños, los cuales determinan su potencial para causar problemas de salud. Las partículas menores a 10 micrómetros de diámetro son las que revisten mayor peligro, ya que pueden penetrar profundamente en los pulmones y en algunos casos llegar al torrente sanguíneo.<sup>3</sup>

Las partículas a su vez se subdividen en dos grandes categorías: a) las partículas inhalables denominadas PM<sub>10</sub>, es decir, partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micrómetros, y b) las partículas más finas denominadas PM<sub>2.5</sub>, o partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetros. Las PM<sub>10</sub> son generadas principalmente por la agricultura, la minería y el tráfico carretero, mientras que las PM<sub>2.5</sub> resultan de la combustión o se forman como contaminantes secundarios por la reacción de gases emitidos a la atmósfera por plantas de energía, industrias y automóviles (escape de vehículos).

Las PM<sub>2.5</sub> son tan pequeñas que pueden penetrar profundamente en los pulmones y causar serios problemas en la salud, incluidas muertes prematuras por enfermedades del corazón o los pulmonares, ataques al corazón no fatales, arritmias, agravación de asma, disminución de la función pulmonar e incremento de afecciones respiratorias como tos o respiración dificultosa (Wong *et al.*, 1999; Pope *et al.*, 2002; Nel, 2005; Kaiser, 2005, y Laden *et al.*, 2006). Las partículas finas también son las principales responsables de la reducción en la visibilidad (neblina).

En su mayor parte, las emisiones de PM procedentes de buques consisten en la fracción fina de las partículas y contienen cantidades sustanciales de sulfatos debido al alto contenido de azufre de los combustibles. Las PM<sub>2.5</sub> secundarias pueden formarse a partir de emisiones en fase gaseosa de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>. Los buques emiten una gran cantidad de estos compuestos, que forman sulfatos y nitratos particulados en las regiones costeras y en zonas tierra adentro. Por lo tanto, el control de las emisiones de buques mejorará la calidad del aire y protegerá la salud de la población.

## Ozono (O<sub>3</sub>)

El ozono (O<sub>3</sub>) troposférico es un contaminante secundario producto de una reacción entre NO<sub>x</sub> y COV en presencia de radiación solar. Las concentraciones de ozono muestran claros patrones diarios y estacionales. El ozono es susceptible de transportarse a lo largo de cientos de kilómetros y, por tanto, se le puede detectar en lugares en los que hay pocas emisiones de NO<sub>x</sub> y CO, como se muestra en un estudio realizado en la Ciudad de México (Molina *et al.*, 2010).

El ozono es un fuerte oxidante que afecta la salud y causa serios daños a la vegetación y otros cultivos. Respirar ozono troposférico puede ocasionar diversos efectos adversos en la salud, que se han observado en amplios sectores de la población y que incluyen la inducción de síntomas respiratorios (tos, irritación de la garganta, opresión en el pecho, sibilancias o dificultad para respirar), reducción de la función

---

<sup>3</sup> Véase la página de la EPA de EU: <[www.epa.gov/pm/health.html](http://www.epa.gov/pm/health.html)>.



pulmonar e inflamación de las vías respiratorias. Además, los resultados de estudios empíricos indican que un alto nivel de concentración de ozono troposférico se relaciona con un repunte en ataques de asma, y un incremento en ingresos a hospitales, así como en mortalidad diaria y otros marcadores de morbilidad.

Los buques son fuente importante de emisiones de NO<sub>x</sub> y COV, perjudiciales de por sí para la salud humana y, también, precursoras del ozono. Por ende, una reducción en tales emisiones mejoraría la calidad del aire y, consecuentemente, reduciría los efectos adversos en la salud.

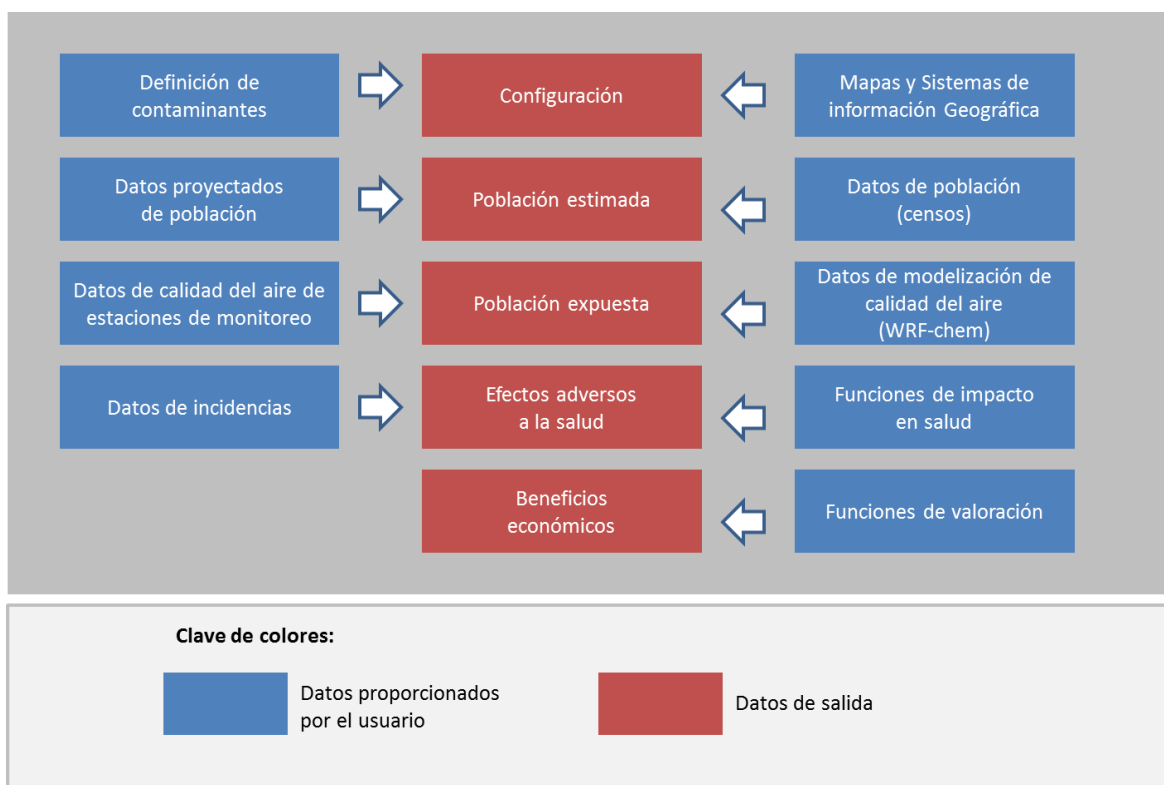
### 2.3. Evaluación de costos y beneficios en la salud para México

#### Descripción del modelo

En este estudio se utilizó la versión v1.0.8 del programa de análisis y mapeo de beneficios ambientales BenMAP-CE<sup>4</sup> (*Environmental Benefits Mapping and Analysis Program*) para estimar las muertes y enfermedades que se evitarían con la mejora de la calidad del aire como resultado de la ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol y el establecimiento de una ZCE en México. Este modelo incluye un sistema de información geográfica que permite calcular el impacto en la salud con un alto grado de detalle y, a su vez, facilita el procesamiento sistemático de entrada y salida de datos (Fann, 2012).

La metodología para estimar los beneficios en salud se muestra esquemáticamente en la gráfica 24. El primer paso consistió en definir los contaminantes a evaluar y luego generar los mapas pertinentes (por ejemplo, división política, municipio) para utilización con el modelo del BenMAP-CE.

**Gráfica 21. Diagrama de flujo del proceso de análisis y mapeo de BenMAP-CE v1.0.8**



<sup>4</sup> Véase: <[www2.epa.gov/benmap/benmap-community-edition](http://www2.epa.gov/benmap/benmap-community-edition)>.

En la segunda etapa, se calculó la fracción de la población que existe en cada celda del dominio espacial (**Pob**), para lo cual se recopilaron los datos de población y procesaron a fin de representarlos de acuerdo con el dominio espacial del modelo. Antes de determinar la población expuesta, fue necesario calcular las mejoras en la calidad del aire ( $\Delta C$ ); éstas se obtuvieron mediante la evaluación de la diferencia de concentración entre los escenarios S1 y S2 para un contaminante específico ( $O_3$  o  $PM_{2.5}$ ). Los datos de calidad del aire pueden ser el resultado de una modelización numérica, de datos de estaciones de monitoreo o de ambas. En este caso, los valores  $\Delta C$  procedieron de los resultados de la modelización numérica con el modelo WRF-Chem descrito en la primera parte del presente documento. El paso siguiente consistió en estimar la relación entre las emisiones de los contaminantes y los efectos adversos en la salud (mortalidad, ingresos al hospital, días de trabajo perdidos, etc.), conocidos como “estados finales de salud” (EFS). Los efectos en la salud se calcularon mediante funciones de impacto en salud:

$$ES_{EFS} = \text{Pob} * \text{TI} [1 - \exp(-\beta * \Delta C)] \quad \text{Eq. (1)}$$

Donde:

$ES_{EFS}$  = Efectos en la salud para cada EFS (casos, ingresos, días).

$\Delta C$  = Mejoras en la calidad del aire (ppm o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**Pob** = Población expuesta, género/edad/raza (personas).

**TI** = Tasas de incidencia (casos o personas).

$\beta$  = Tasa estimada de casos asociados con cambios en concentración (casos/ppm o casos/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Como se dijo antes, se obtuvieron valores de calidad del aire ( $\Delta C$ ) y datos de población (**Pob**) para cada celda de la malla del modelo. Por consiguiente, el efecto en la salud (número de casos) de cada celda se calculó para cada EFS. Posteriormente, el programa BenMAP calculó la fracción de  $ES_{EFS}$  por unidad geográfica (ciudad, estado, delegación, etc.). Para llevar a cabo esta tarea, el procesamiento de datos geográficos basado en SIG utilizó la información definida con anterioridad en la fase de configuración.

Por último, el valor económico estimado como resultado de la reducción de enfermedades asociadas mediante la mejora de la calidad del aire se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$VE = ES_{EFS} * VES \quad \text{Eq. (2)}$$

Donde:

**VE** = Valor económico (dólares).

$ES_{EFS}$  = Efecto en la salud por cada EFS (casos, ingresos, días).

**VES** = Valor económico dependiendo de cada EFS (dólares/casos, ingresos, días).

## 2.4 Configuración del modelo

### Dominio espacial

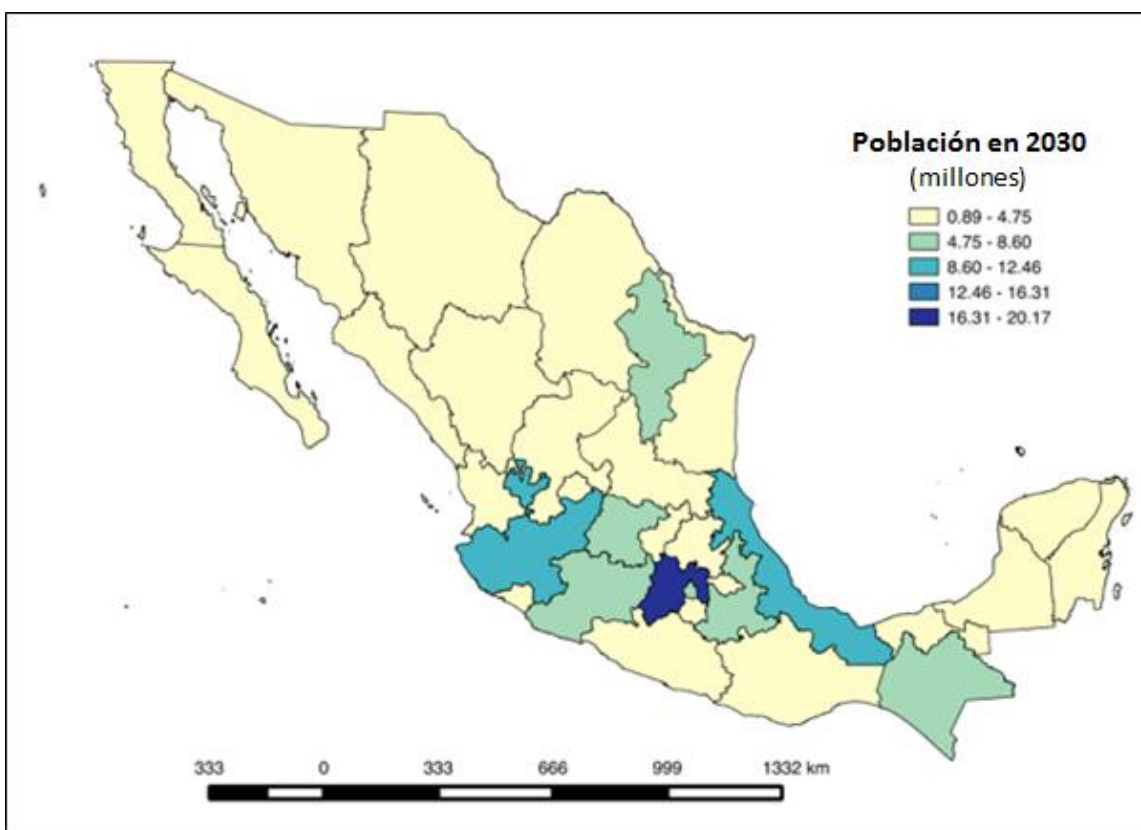
El dominio para este modelo se derivó del dominio usado para la modelización de la calidad del aire. Éste se definió en una proyección Lambert Conformal con un centro en -105.12 longitud oeste y 22.25 latitud norte, con una resolución espacial de 0.25 x 0.25 grados (28 x 28 km aproximadamente). El dominio contiene 20,000 celdas que abarcan un área aproximada de 15 millones de  $\text{km}^2$ , lo que incluye el territorio Comisión para la Cooperación Ambiental

nacional y una gran área de mar internacional. La ZCE se situó a 200 millas náuticas (370 km) a partir de la costa, en concordancia con la ZCE de América del Norte.

## Datos de población

La población para 2030 se obtuvo con base al censo de población de 2010 y proyecciones del Consejo Nacional de Población (Conapo, 2013). Los datos de población reunidos se desglosaron por estado, municipio, sexo y edad. La transición demográfica de 2012 a 2030 pasó de elevados niveles de mortalidad y fecundidad a cifras menores, siguiendo la tendencia registrada desde los años setenta: de 6.1 hijos nacidos por mujer (hnpm) en la década de 1970, la fertilidad descendió a 2.24 hnpm en 2012; y se espera que para 2030 sea de 2.08 hnpm. La población proyectada para 2030 toma en consideración los flujos migratorios. Las entidades con mayor población para 2030 serían el Estado de México, Veracruz, Jalisco, Nuevo León, Puebla y Chiapas (véase la gráfica 25).

**Gráfica 22. Población proyectada para 2030**

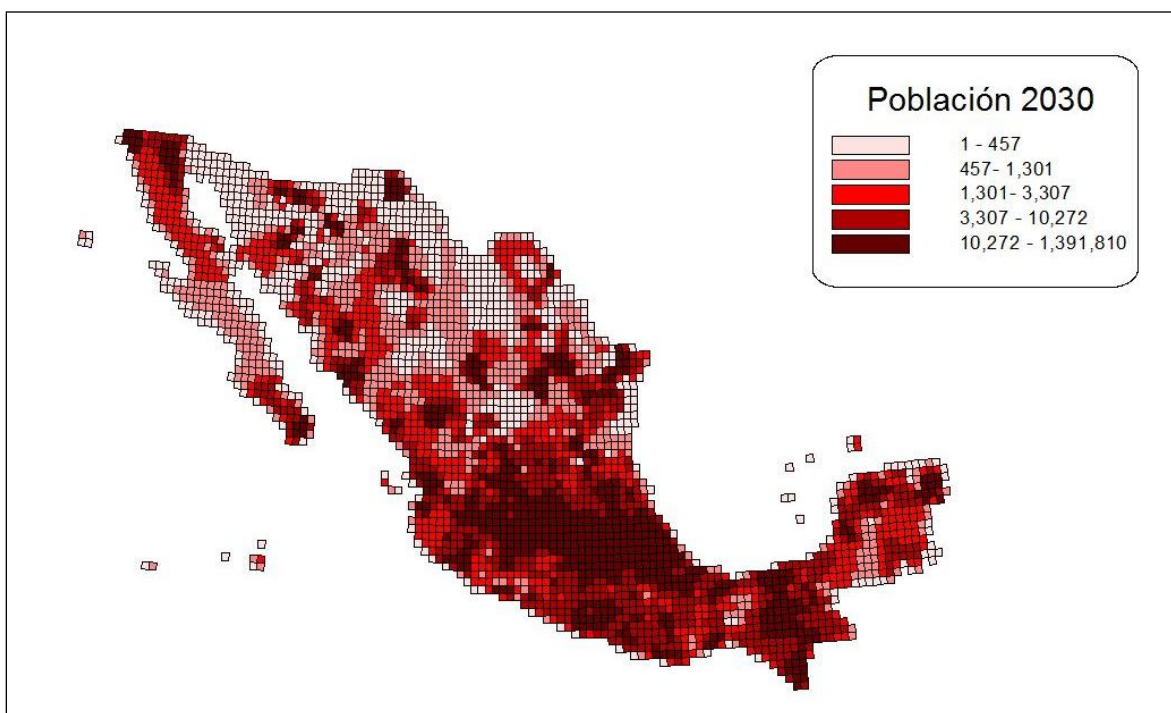


Fuente: <[www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/proyecciones](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/proyecciones)>.

Del mismo modo, los archivos de datos geográficos pertinentes (\*.shp, \*.shx, \*.prj, \*.dbf) se procesaron para representar el país y los estados en el programa BenMAP. Los datos de población se procesaron y se separaron por edad y sexo mediante herramientas de geoprocetamiento (QGIS, <[www.qgis.org](http://www.qgis.org)>) para su inclusión en el modelo.

Se calculó la fracción de población por cada categoría para cada celda del dominio del estudio. La gráfica 26, por ejemplo, muestra la población por celda de un sector vulnerable de la población (niños) correspondiente a la edad de 0-14 años.

**Gráfica 23. Población de niños de 0-14 años de edad, prevista para 2030**



*Nota:* Datos procesados para el modelo BenMAP, incluidas proyecciones poblacionales para 2030 (con base en datos de la Conapo, 2013).

## 2.5. Mejoras en la calidad del aire

Se consideraron dos escenarios para 2030: el primero (S1) supuso que para 2030 la mayoría de los países —México incluido— ya habrían ratificado el Anexo VI del Convenio Marpol; en el segundo (S2) —el escenario control— se asume que para 2030 México ya ha ratificado el Anexo VI del Convenio Marpol y, además, ha establecido una zona de control de emisiones (ZCE).

S1	S2
Marpol 2030	Marpol + ZCE 2030

El modelo de calidad del aire, ejecutado sobre una base anual, generó valores de concentraciones de ozono y  $PM_{2.5}$  para cada hora. Se utilizaron las siguientes métricas en la evaluación de los beneficios:

- Para  $PM_{2.5}$ : promedio anual basado en valores por hora.
- Para ozono: valor máximo en una hora diario.

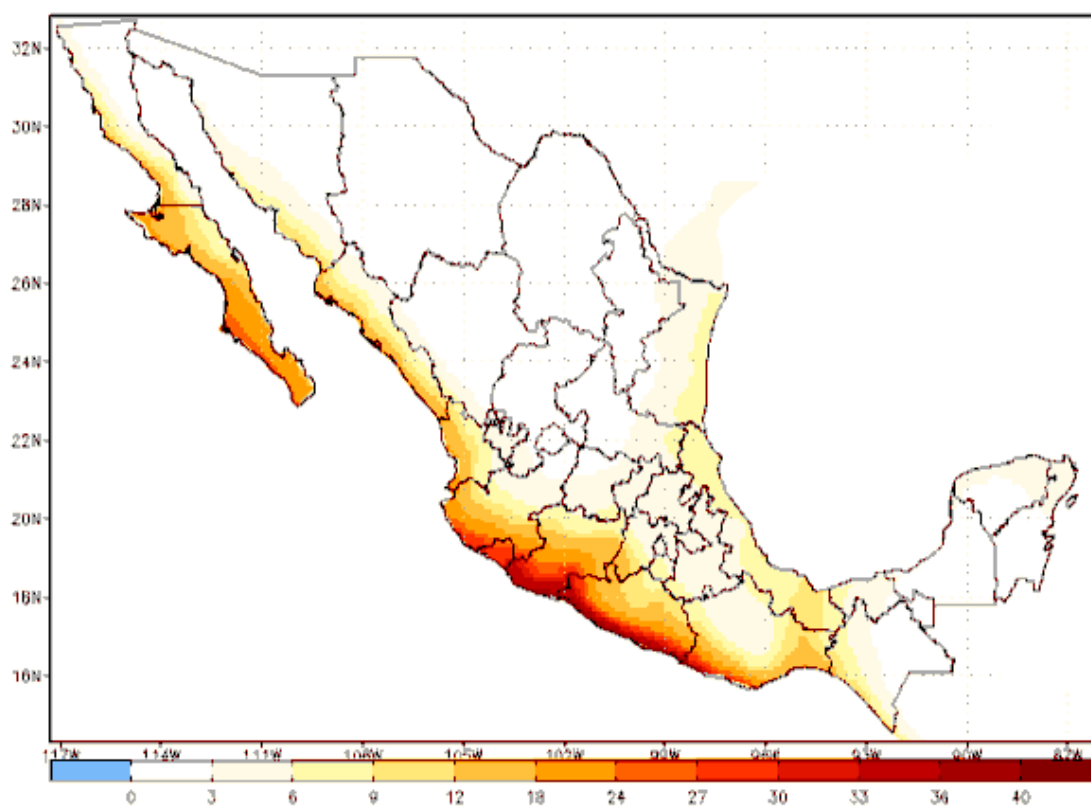
Estos datos se procesaron para incluirse en el modelo BenMAP, y se calcularon las posibles reducciones en contaminantes una vez establecida una ZCE en México (S1-S2).

### Reducciones en $PM_{2.5}$

Las gráficas 27 y 28 muestran las mejoras en las concentraciones ambientales de  $PM_{2.5}$  anualmente y en mayo y noviembre, respectivamente, luego de haberse establecido una ZCE en México. Los promedios

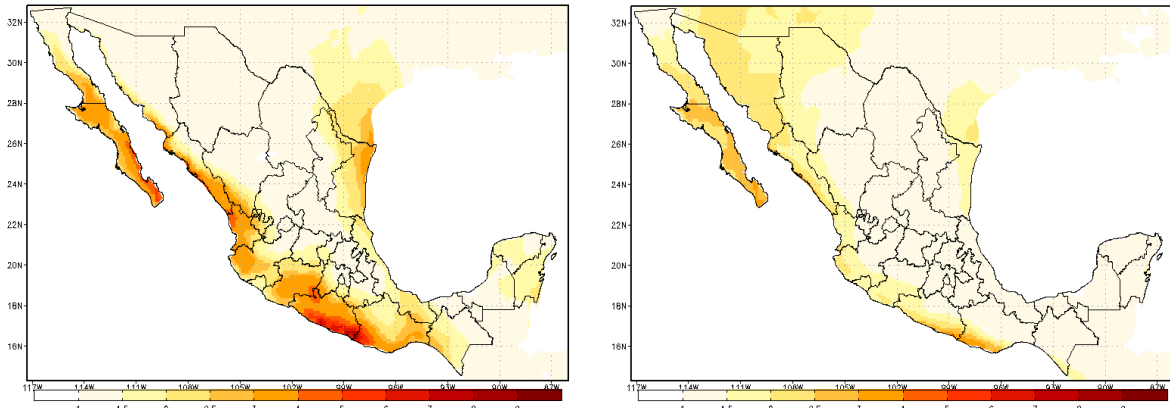
anuales muestran que las mayores reducciones en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en el ambiente se registrarían en las zonas costeras del Pacífico. En particular, los resultados que emplean la concentración máxima mensual muestran que en mayo existe una mayor reducción en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  atribuibles a emisiones de buques. Con base en el promedio anual, se proyecta que el establecimiento de una ZCE reduciría en mayo las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en el ambiente hasta nueve veces en algunas áreas costeras y cerca de 1.5 a 2.5 veces en algunas zonas del centro del país. En contraste, dicha reducción es menor en noviembre. Sin embargo, aun menores, las reducciones de  $PM_{2.5}$  benefician a un gran número de personas, incluidos grupos vulnerables como niños y ancianos, así como personas con enfermedades pulmonares o cardíacas, todos altamente susceptibles a un incremento en problemas de salud debidos a la exposición a altas concentraciones de  $PM_{2.5}$  (Nel, 2005).

**Gráfica 24. Reducciones previstas en el promedio anual de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  (S1-S2)**



*Nota:* Concentraciones en  $\mu g/m^3$ .

**Gráfica 25. Reducciones previstas en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  para mayo (izquierda) y noviembre (derecha) ya establecida la ZCE-Méx (S1-S2)**

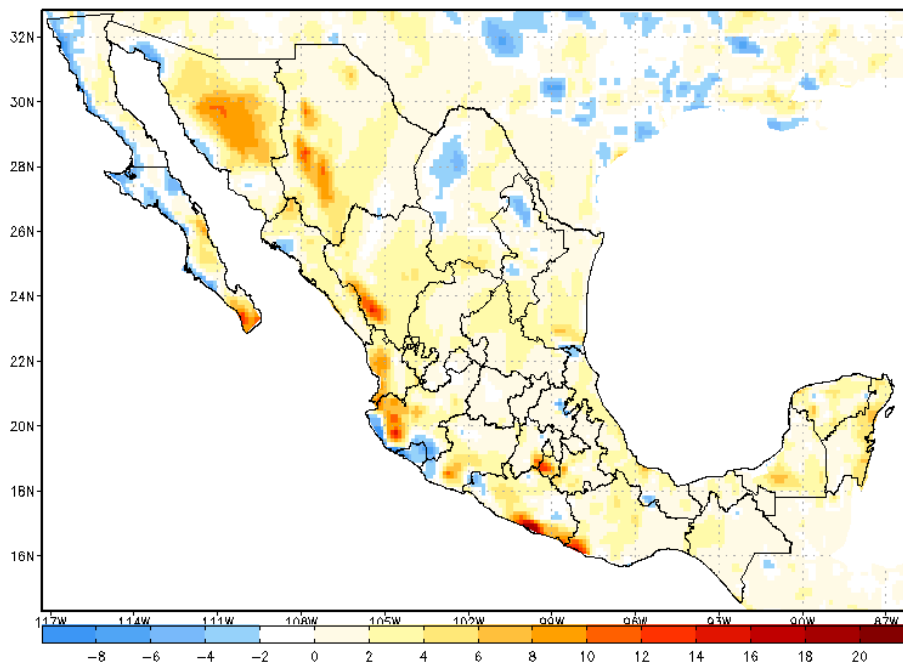


Nota: Concentraciones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### Reducciones en $O_3$

Los resultados de la modelización de la calidad del aire mostraron reducciones en el nivel de concentración de ozono en diversas zonas del país con la adopción de una ZCE en México. La gráfica 29 muestra las reducciones en concentraciones máximas de ozono para cada hora; se espera que, como resultado de la reglamentación, la concentración de ozono se reduzca en 20 ppmm (20%).

**Gráfica 26. Reducciones previstas en las concentraciones de ozono con el establecimiento de la ZCE-Méx (S1-S2)**



Nota: Concentraciones en ppmm.

Los resultados de la modelización del ozono mostraron lugares con reducciones en la concentración ambiental de ozono (valores positivos), como áreas costeras y tierra adentro, mientras que en otras no se observan reducciones cuando se les contrasta con el caso de referencia (escenario S1). Lo anterior se debe a la relación no lineal entre el ozono y sus precursores. Las diferencias más grandes en zonas con alta densidad de población podrían ocasionar grandes cambios en la evaluación de beneficios (y ésta puede ser positiva o negativa).

## **2.6 Efectos adversos en la salud del ozono y la materia particulada**

Para este estudio se tomaron en consideración los siguientes efectos finales de salud (EFS) y enfermedades específicas (EE):

- Muertes prematuras
  - Mortalidad a largo plazo por todas las causas
  - Mortalidad a corto plazo por todas las causas
  - Enfermedad respiratoria en niños
  - Síndrome de la muerte súbita del lactante
- Ingresos al hospital
  - Asma
  - Bronquitis crónica
  - Todas las enfermedades respiratorias
  - Enfermedades cardiovasculares (menos los infartos al miocardio)
- Efectos menores
  - Días de actividad restringida
  - Días de trabajo perdidos.

Se reunieron valores para cada parámetro Beta, datos de incidencia y costos para PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> basados en estudios epidemiológicos y estudios en salud disponibles (Pope *et al.*, 2002; Woodruff *et al.*, 1997; Moolgavkar., 2000; Zanobetti y Franklin, 2009; Abbey *et al.*, 1995; Sheppard., 2003; Ostro y Rothschild, 1989; Ostro, 1987; Levy *et al.*, 2005; Burnett *et al.*, 2001). Los cuadros 11 y 12 muestran los estados finales en salud y los estudios epidemiológicos utilizados para cuantificar los impactos en la salud en el análisis central, para PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>, respectivamente.



**Cuadro 8. Criterios de valoración en salud y estudios epidemiológicos utilizados para cuantificar los impactos en el análisis principal – PM<sub>2.5</sub>**

Estado final	Estudio	Edad de población estudiada	Riesgo estimado (intervalo de confianza percentil 95)
Mortalidad por todas las causas	Pope <i>et al.</i> , 2002	30-99	$\beta = 0.005827$ RR = 1.06 (1.02-1.11) por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mortalidad por enfermedad infantil respiratoria	Woodruff <i>et al.</i> , 1997	<1	$\beta = 0.006765865$ OR = 1.04 (1.02-1.07) por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Mortalidad por síndrome de muerte súbita en lactantes	Woodruff <i>et al.</i> , 1997	<1	$\beta = 0.003922071$ OR = 1.04 (1.02-1.07) por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ingresos al hospital, por enfermedades cardiovasculares (menos infartos al miocardio)	Moolgavkar, 2000	18-64	$\beta = 0.0014$ RR = 1.020 (0.001980) por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ingresos al hospital por enfermedades respiratorias (todas)	Zanobetti y Franklin, 2009	65-99	$\beta = 0.00207$ RR = 2.07 (1.20-2.95) por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Bronquitis crónica	Abbey <i>et al.</i> , 1995	27-99	$\beta = 0.013185$ RR = 1.81(0.98-3.25) por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ingresos al hospital por asma	Sheppard, 2003	0-64	$\beta = 0.003324$ RR=1.04(1.01-1.06) por 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Efectos menores, días de actividad restringida	Ostro y Rothschild, 1989	18-64	$\beta = 0.00741$ error estándar = 0.00036
Efectos menores, días de trabajo perdidos	Ostro, 1987	18-68	$\beta = 0.0046$ error estándar = 0.00036

**Cuadro 9. Criterios de valoración en salud y estudios epidemiológicos utilizados para cuantificar los impactos en el análisis principal – Ozono**

Estado final	Estudio	Edad de población estudiada	Riesgo estimado (intervalo de confianza percentil 95)
Mortalidad a corto plazo por todas las causas	Levy <i>et al.</i> , 2005	Todas las edades	$\beta = 0.000841$ RR= 0.43 (0.29-0.56) por 10 ppmm
Ingresos al hospital por enfermedades respiratorias	Burnett <i>et al.</i> , 2001	<1	$\beta = 0.007301$ error estándar = 0.002122
Efectos menores, días de actividad restringida	Ostro y Rothschild, 1989	18-64	$\beta = 0.0022$ error estándar = 0.000658
Efectos menores, días de escuela perdidos	Chen <i>et al.</i> , 2000	5-17	$\beta = 0.013247$ error estándar = 0.004985

## 2.7 Resultados

Con el fin de estimar los beneficios en salud se utilizaron la concentración promedio anual de  $PM_{2.5}$  y la concentración diaria máxima en una hora de  $O_3$ . Se evaluaron los efectos en salud ( $ES_{EFS}$ ) para cada estado final de salud.

En conjunto, los resultados indicaron que los descensos en la concentración de contaminantes atmosféricos se relacionan con un aumento en los casos de efectos en salud que se evitan. Se separaron los efectos en salud y los beneficios económicos por contaminante. (Los resultados se muestran en los siguientes apartados.)

### Beneficios para la salud por reducciones de $PM_{2.5}$

Los posibles beneficios en la salud para México, a partir del establecimiento de una ZCE y la consiguiente reducción de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la atmósfera, se estimaron mediante el programa BenMAP y se muestran en el cuadro 13. Cabe destacar que esta estimación de los beneficios para la salud depende de los parámetros de efectos en la salud seleccionados, y esto es en especial importante en el caso de la “mortalidad por todas las causas” (destacado en el cuadro). Como se ilustra en el cuadro, al utilizar el estudio de Laden *et al.* (2006) para la “mortalidad por todas las causas” se genera un incremento de alrededor de 26 mil millones de dólares estadounidenses (\$EU) en la estimación de beneficios económicos, en comparación con la estimación que se basa en el estudio de Pope *et al.* (2002). El total de beneficios económicos estará en el rango de entre 34 y 97 mil millones de dólares (\$EU). De esta manera, al establecerse la ZCE podrían evitarse entre 4,000 y 35,000 muertes prematuras y entre 3.3 y 4.4 millones de otros casos adversos (ingresos al hospital, bronquitis crónica, días de actividad restringida, asma, días de trabajo perdidos). Los beneficios económicos por casos de salud evitados se ubican entre 18 y 97 mil millones de dólares (\$EU).

**Cuadro 10. Beneficios en la salud monetizados proyectados como resultado de la reducción de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> con una ZCE mexicana**

Grupos de estado final de salud	Estado final de salud	Beta (casos/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Rango de edad	Autor	Población expuesta (millones)	Población beneficiada	Tasa de incidencia (casos/pob)	Valor económico del problema en salud (\$EU)	Beneficios económicos (millones de \$EU)
Ingresos al hospital	Todas las enfermedades cardiovasculares (menos infartos de miocardio)	0.000341	18 a 64	Moolgavkar (2000)	85	4,500	0.008807	11,882	54
						(2000-6000)			(32-74)
Ingresos al hospital	Todas las enfermedades respiratorias	0.0021	65 a 99	Zanobetti y Franklin (2009)	14	800	0.005966	2,669	2
						(490-1,000)			(1-3)
Ingresos al hospital	Asma	0.013185	27 a 99	Abbey <i>et al.</i> (1995)	123	120,000	0.1274	99,256	11,800
						(58,000-180,000)			(5,700-18,000)
Enfermedades crónicas	Bronquitis crónica	0.003324	0 a 64	Sheppard (2003)	80	25,000	0.007	443	11,200
						(3,900-44,000)			(5,400-17,000)
Mortalidad	Todas las causas	0.005827	30 a 99	Pope <i>et al.</i> (2009)	73	10,400	0.0057	1,679,507	17,400
						(4,000-16,000)			(6,900-28,000)
Mortalidad	Enfermedad infantil respiratoria	0.18	0 a 1	Woodruff <i>et al.</i> (1997)	4	300	0.00231	1,300,000	370
						(-237-767)			(-310-1,000)
Mortalidad	Síndrome de la muerte súbita en lactantes	0.11	0 a 1	Woodruff <i>et al.</i> (1997)	4	9	0.00012	1,300,000	11
						(4-13)			(5-17)
Efectos menores	Días de actividad restringida	0.00741	18 a 64	Ostro y Rothschild (1989)	85	57,000	6.46	38	2
						(48,000-65,000)			(1-)

*Reducción de emisiones generadas por el movimiento de bienes en el transporte marítimo en América del Norte:  
Evaluación de los efectos de las emisiones de buques en México*

Efectos menores	Días de escuela perdidos	0.0046	18 a 64	Ostro (1987)	85	3,600,000	2.17	15	54
						(3,200,000-4,100,000)			(47-60)
					Total	3,800,000		Total	41,000
						(3.3 M-4.4 M)			(18,000-64,000)

**Resultados para concentraciones de PM<sub>2.5</sub> mediante los parámetros del estudio de Laden *et al.* para “mortalidad por todas las causas”**

Grupos de estado final de salud	Estado final de salud	Beta (casos/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Rango de edad	Autor	Población expuesta (millones)	Población beneficiada	Tasa de incidencia (casos/pob)	Valor económico del problema en salud (\$EU)	Beneficios económicos (millones de \$EU)
Mortalidad	Todas las causas	0.01484	25-99	Laden <i>et al.</i> (2006)	84	25,000	0.0057	1,679,507	43,000
						(14,000-36,000)			(23,000-61,000)
					Total	3,800,000		Total	67,000
						(3.3 M-4.4 M)			(34,000-97,000)

*Nota:* Los valores de tasa de incidencia se tomaron de: Semarnat, CEPAL, ONU (2007), *Evaluación de externalidades ambientales del sector energía en las zonas críticas de Tula y Salamanca*. Los valores económicos fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP).

## Beneficios para la salud por reducciones en la concentración de ozono

En el caso del ozono, el máximo diario en una hora se utilizó para calcular el beneficio; los resultados se resumen en el cuadro 14.

**Cuadro 11. Beneficios en la salud monetizados proyectados como resultado de la reducción de concentraciones de O<sub>3</sub> con una ZCE mexicana**

Grupo de estado final de salud	Estado final de salud	Beta (casos/ppmm)	Rango de edad	Autor	Población expuesta (millones)	Población beneficiada	Tasa de incidencia (casos/pob.)	Valor económico del problema en salud (\$EU)	Beneficios económicos (\$EU)
Ingresos al hospital	Enfermedades respiratorias	0.007301	0 a 1	Burnett <i>et al.</i> (2001)	4	0	0.0000063	2,669	1,200
						(0-1)			(610-1,800)
Efectos menores	Días de actividad restringida	0.0022	18 a 64	Ostro y Rothschild (1989)	85	5,800	0.01369863	38	220,000
						(2,900-8,600)			(110,000-330,000)
Efectos menores	Días de escuela perdidos	0.013247	5 a 17	Chen <i>et al.</i> (2000)	28	11,000	0.01369863	15	170,000
						(4,300-18,000)			(62,000-270,000)
Mortalidad	Todas las causas a corto plazo	0.000841	0 a 99	Levy <i>et al.</i> (2005)	137	6	0.000023	1,679,507	10 millones
						(4-8)			(7M-12M)
					<b>Total</b>	<b>17,000</b>		<b>Total</b>	<b>10.4 millones</b>
						(7,300-27,000)			(7.1M-12.6M)

*Nota:* Los valores de la tasa de incidencia se extrajeron de Stevens *et al.* (2005), y el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) proporcionó los valores económicos. Para los beneficios en la población se utilizó un intervalo de confianza del percentil 90, mientras que para los beneficios económicos se utilizó el intervalo de confianza del percentil 95.

## Conclusiones

Se integraron los datos de inventarios de emisiones para modelización correspondientes a los años 2011 y 2030, tomando en consideración las emisiones terrestres y marinas para todo México y porciones de Estados Unidos y Centroamérica. Con el propósito de analizar los posibles impactos en la calidad del aire de los dos escenarios de emisiones para 2030, se empleó el modelo WRF-Chem. Primero se evaluaron las simulaciones para el año de referencia 2011 con respecto a datos de estaciones de monitoreo de calidad del aire. Las variables meteorológicas medidas en tierra y mar (temperatura, humedad relativa y viento) mostraron una buena correspondencia con el pronóstico de la modelización. Esto se ilustra mediante el coeficiente de correlación y otros parámetros que se muestran en el apéndice II. La validación del pronóstico de las concentraciones de las especies químicas ( $O_3$  y  $PM_{2.5}$ ) fue difícil, dado que los datos disponibles de las estaciones de monitoreo muestran muchas anomalías (se hizo una comparación sólo para estaciones de la RAMA en la Ciudad de México). En general, los resultados de la comparación, —en los casos en que ésta pudo hacerse— mostraron un buen acuerdo.

Los resultados de la modelización para los escenarios proyectados indicaron que las emisiones de los buques que navegan cerca de la costa del país producen un impacto sustancial en la composición de la atmósfera. Las emisiones de los buques influyen principalmente en áreas costeras; sin embargo, muchas regiones centrales, tierra adentro, de México también resultan afectadas.

Los resultados de la modelización mostraron que:

- En el escenario de una ratificación del Anexo VI del Convenio Marpol y el establecimiento de una ZCE (S2), las concentraciones de  $PM_{2.5}$  se reducirían, en términos generales, en todo el país (y hasta tres veces en zonas costeras).
- En este mismo escenario, se observarían aumentos y disminuciones en la concentración de  $O_3$ , dependiendo de la zona geográfica; esto se atribuye a la relación no lineal entre el ozono y sus precursores.

La integración de los resultados de simulación de la calidad del aire y la cuantificación de los beneficios económicos y en salud se llevó a cabo con el modelo BenMAP. Las emisiones de buques en la región de la ZCE —según lo modelado— contribuyen con un número significativo de casos adversos a la salud, especialmente en áreas costeras muy pobladas. Se espera que la ZCE de México produzca un beneficio significativo en salud; podrían evitarse de 3.3 a 4.4 millones de casos de muertes prematuras, ingresos al hospital y días de trabajo o escuela perdidos, entre otros. Se prevé que los beneficios económicos en salud para 2030, resultado de la puesta en marcha de una ZCE en México, vayan de \$EU18 a 97 mil millones por reducciones en  $PM_{2.5}$ , y de \$EU7 a 13 millones por reducciones en ozono.

Por todas las indicaciones, se anticipa un incremento en el comercio marítimo mexicano e internacional y, por lo tanto, más emisiones a la atmósfera. Se requerirá una actualización en el inventario de emisiones contaminantes lo mismo marítimas que en puertos, incluidas las emisiones de maquinaria, vehículos y motores portuarios.

## Apéndice I: Configuración del modelo

El cuadro 15 resume el conjunto de parámetros que se emplearon para configurar el modelo de acuerdo con las características del proyecto. La selección de los parámetros se basó en la experiencia del grupo de modelización del MCE2. Por ejemplo, SST\_UPDATE = 1 se empleó para representar las variaciones de la temperatura del mar, ya que el dominio objeto de estudio consideraba una región ubicada justo por encima de la superficie del océano con simulaciones para periodos largos. También se incluyó la asimilación en cuatro dimensiones GRID\_FDDA = 1 para obtener una mejor representatividad de las variables meteorológicas, en especial cuando el modelo se aplicó a periodos largos (por ejemplo, una semana). Esto fue importante a fin de asegurar la representatividad tanto de los datos meteorológicos como de su influencia en las transformaciones químicas durante la modelización y, por lo tanto, en el pronóstico de la calidad del aire.

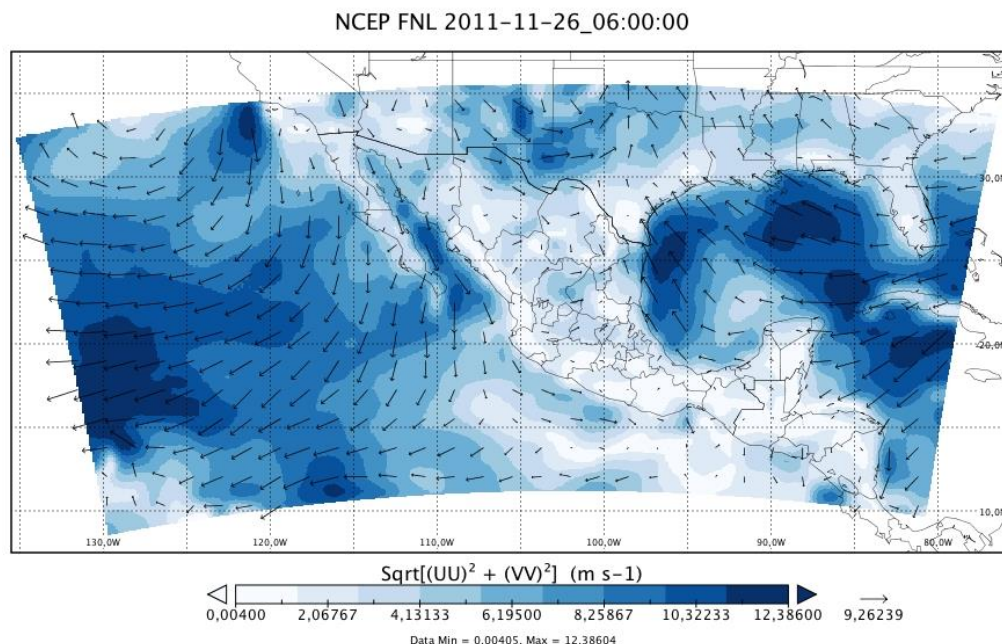
**Cuadro 12. Resumen de las variables más importantes en la configuración del modelo WRF-Chem**

Variable y valor	Descripción
MP_PHYSICS = 4	<i>Esquema de WRF de cinco clases de momento simple</i> : Versión un poco más sofisticada del esquema de tres clases de momento simple que permite el procesamiento de fase-mixta y agua supercongelada.
RA_LW_PHYSICS = 1	<i>Modelo de Transferencia Radiativa Rápida</i> : Esquema preciso que emplea tablas de búsqueda para mejorar la eficiencia; considera diferentes bandas de gases traza y especies.
RA_SW_PHYSICS = 2	<i>Onda corta Goddard</i> : Esquema de dos flujos multibanda con ozono a partir de efectos climatológicos y de nubes.
SF_SFCLAY_PHYSICS = 1	Basada en Monin-Obukhov con la subcapa viscosa de Carlson-Boland y las funciones de similitud estándar de las tablas de consulta.
SF_SURFACE_PHYSICS = 2	<i>Modelo de Superficie Noah</i> : Esquema unificado NCEP/NCAR/AFWA con temperatura y humedad de suelo en cuatro capas, fracción de cobertura de nieve y física de suelo congelado.
BL_PBL_PHYSICS = 1	<i>Esquema de la Universidad de Yonsei</i> : Esquema K no-local con una capa de arrastre explícita y un perfil parabólico K en una capa mezclada inestable.
CU_PHYSICS = 5	Grell 3D es una versión mejorada del esquema de conjunto Grell-Devenyi (GD) que también se puede utilizar en alta resolución (además de las resoluciones más gruesas) si la difusión por hundimiento (opción <i>cugd_avedx</i> ) está activada.
SURFACE_INPUT_SOURCE = 1	Los datos sobre el uso y la categoría del suelo provienen de WPS/geomalla, pero con categorías dominantes recalculadas en REAL.
SST_UPDATE = 1	Temperatura superficial del mar variable en el tiempo, el hielo marino, la fracción de la vegetación y el albedo durante una simulación de modelización, recomendada para un tiempo de simulación mayor que cinco días.
GRID_FDDA = 1	Asimilación de los datos observados y forzamiento o relajación newtoniana de los resultados del análisis de malla ( <i>grid analysis nudging</i> ).
HYSOMETRIC_OPT = 2	Calcula la altura en real.exe y la presión del programa en el modelo (ARW solamente) mediante el uso de un método alternativo (menos sesgada cuando se compara con los datos de entrada).
SF_URBAN_PHYSICS = 0	El modelo de dosel urbano desactivado a fin de representar mejor los procesos físicos que intervienen en el intercambio de calor, impulso y vapor de agua en el entorno urbano. Aplicable principalmente a simulaciones de muy alta resolución (DX < 3 kilómetros) en zonas urbanas.



Para alimentar datos meteorológicos al modelo se consideraron los datos del análisis global operacional NCEP FNL, con una resolución de 1 x 1 grados disponibles cada seis horas. Estos datos provienen del Sistema Global de Asimilación de Datos (*Global Data Assimilation System, GDAS*) que recoge prácticamente en forma permanente los datos del Sistema Global de Telecomunicaciones (*Global Telecommunications System, GTS*) y otras fuentes para diversos análisis. En la gráfica 30 se muestra un ejemplo del campo de vientos (correspondiente al 26 de noviembre de 2011) procesado para la modelización (obtenido a partir de datos del análisis NCEP FNL).

**Gráfica 27. Campo de vientos en el área del dominio de modelización para el 26 de noviembre de 2011**



En el modelo WRF-Chem se seleccionó la opción `chem_opt_chem = 1` para el uso del mecanismo químico del modelo de deposición ácida regional RADM2 (Stockwell *et al.*, 1990). La opción de fotólisis Madronich (Madrónich, 1987) y el módulo de aerosol MADE/SORGAM también se habilitaron. Los datos sobre las emisiones para cada escenario (véase el cuadro 6) se procesaron con base en estas configuraciones, considerando:

- distribución espacial (horizontal y vertical);
- distribución temporal;
- distribución en especies químicas;
- agrupamiento en especies químicas de acuerdo con el mecanismo RADM2;
- generación de archivos en formato adecuado para el mecanismo químico NetCDF.

Este procedimiento se siguió para los inventarios INEM, INEB e INEP. Se utilizó el programa del Sistema de Procesamiento de Emisiones Atmosféricas (SPEA) v1.0.0 (Ortiz, 2005), y los resultados se procesaron posteriormente en programas de lenguaje Fortran para generar dos archivos con datos de las emisiones por hora correspondientes a cada contaminante en dos periodos de 12 horas cada cual: uno diurno y otro nocturno. Sin embargo, como ya se comentó, a pesar de que para la modelización de emisiones de Estados Unidos y Centroamérica (NEI y ECA) se siguió un procedimiento similar, los archivos de modelización de emisiones finales se desarrollaron para otro modelo (CAMx) y otro Comisión para la Cooperación Ambiental

mecanismo químico (CBMZ); por lo que fue necesario transformar estos archivos a un formato WRF-Chem (RADM2). Esta conversión la realizó el equipo de modelización del MCE2 con base en estudios anteriores (Zaveri, 1999), como se muestra en el cuadro 16.

**Cuadro 13. Conversión de las especies químicas originales (NEI y ECA) para su uso en el modelo de deposición ácida regional RADM2**

Especie en RADM2	Especie en CBMZ
HC3	= 0.4020 CH3OH
HC3	= 1.198 C2H5OH
HC3	= 0.0804 PAR
HC5	= 0.05395 PAR
HC8	= 0.0384 PAR

*Nota:* Equivalencias de la especie PAR en CBMZ respecto de HC3, HC5 y HC8 en RADM2.

Por último, se utilizaron herramientas de NCO (*NetCDF Operators*) (<http://nco.sourceforge.net/>) y algunos programas en Fortran 90 para integrar los inventarios de emisiones (procesados con fines de modelización), con lo que se obtuvieron dos archivos NetCDF (wrfchemi\_00z\_d01.nc y wrfchemi\_12z\_d01.nc). Estos archivos incluyeron datos de las emisiones por hora para el día y la noche, respectivamente. Los datos sobre las emisiones se distribuyeron espacialmente en la horizontal y la vertical.

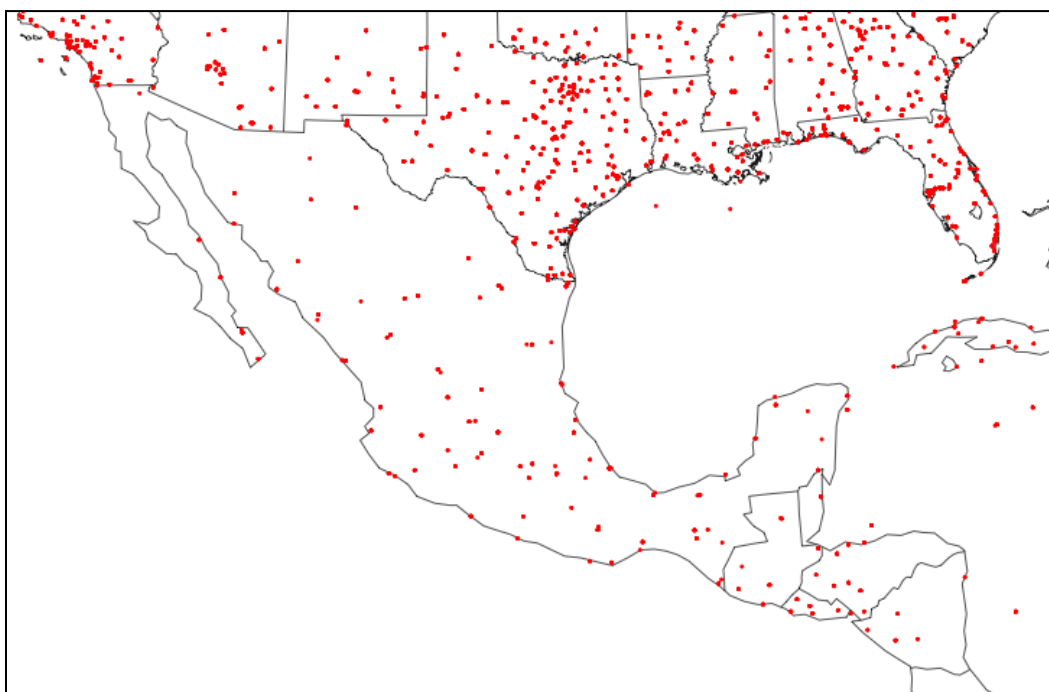
Asimismo, se modificó el modelo WRF-Chem a fin de desplegar la deposición seca de SO<sub>2</sub> (SO2\_dry\_dep), para lo cual se modificaron varias líneas en el código fuente del modelo: Registry.chem, chem\_driver.F, dry\_dep\_driver.F y namelist.input, según se describe en el sitio web del proyecto, AQMEII-2 (<http://aqmeii-eu.wikidot.com/models:wrf-chem-here#toc1>).

## **Apéndice II: Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS): comparación de resultados**

Las estaciones de monitoreo de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP-ADP) se encuentran en todo el dominio del modelo (véase la gráfica 31); sin embargo, para el proceso de verificación, sólo se consideraron las 132 estaciones terrestres localizadas en territorio mexicano.

Es importante resaltar que la salida del modelo corresponde a  $27.7 \times 27.7$  km y que se contrasta con los registros de las estaciones. En el caso de variables como la humedad y la intensidad del viento es posible obtener diferencias más marcadas entre el modelo y las mediciones, en comparación con la temperatura y la dirección del viento en las estaciones que miden variables sinópticas. En las estaciones cercanas a ciudades no será este el caso, y también habrá mayores diferencias entre los valores modelados y los observados.

**Gráfica 28. Distribución geográfica de estaciones de monitoreo NCEP-ADP seleccionadas**



Para los siguientes cuadros se consideró que el modelo tuvo un buen desempeño cuando las desviaciones estándar del modelo (FSTDEV) y las observaciones (OSTDEV) fueron similares; el coeficiente de correlación de Pearson (PR\_corr) y el coeficiente de correlación de Spearman (SP\_corr) pueden oscilar entre  $-1$  y  $1$  (un índice de correlación perfecta es igual a  $1$ , y un valor de  $-1$  indica una correlación negativa perfecta). Los valores y las observaciones modeladas no tuvieron correlación cuando se obtuvo un valor  $0$ . Una correlación perfecta entre el modelo y las observaciones se presentó cuando el error medio (EM), el error medio absoluto (EMA), el error cuadrático medio (ECM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) fueron iguales a  $0$ .

**Cuadro 14. Resumen de las evaluaciones de escenarios de referencia 2011**

	9-16 de febrero	15-22 de mayo	30 ago-6 sept	20-27 noviembre
<b>Temperatura</b>				
<b>FBAR</b>	289.62	295.08	295.06	291.68
<b>FSTDEV</b>	6.18	5.05	6.49	5.26
<b>OBAR</b>	291.17	298.07	297.41	293.87
<b>OSTDEV</b>	7.53	6.60	6.38	6.46
<b>PR_CORR</b>	0.81	0.85	0.90	0.84
<b>SP_CORR</b>	0.80	0.84	0.89	0.85
<b>EM</b>	1.55	-3.00	-2.38	-2.18
<b>ESTDEV</b>	4.38	3.55	2.98	3.53
<b>EMA</b>	3.68	3.79	3.04	3.34
<b>ECM</b>	21.59	21.59	14.53	17.20
<b>RECM</b>	4.65	4.64	3.77	4.15
<b>Humedad relativa</b>				
<b>FBAR</b>	55.68	55.62	75.14	66.86
<b>FSTDEV</b>	25.17	27.13	20.03	20.30
<b>OBAR</b>	57.73	59.75	77.91	68.71
<b>OSTDEV</b>	25.15	26.29	18.70	21.30
<b>PR_CORR</b>	0.72	0.81	0.66	0.67
<b>SP_CORR</b>	0.72	0.80	0.59	0.65
<b>EM</b>	-2.05	-4.13	-2.50	-1.78
<b>ESTDEV</b>	18.75	16.38	16.30	17.06
<b>EMA</b>	14.01	12.74	12.03	12.77
<b>ECM</b>	355.64	285.28	265.39	291.27
<b>RECM</b>	18.86	16.89	16.29	17.07
<b>Dirección del viento</b>				
<b>FBAR</b>	16.87	231.98	122.36	33.43
<b>OBAR</b>	7.38	166.37	115.26	92.92
<b>EM</b>	9.20	32.20	7.50	-6.33
<b>EMA</b>	21.22	52.34	48.73	54.91

**Cuadro 15. Descripción de las abreviaturas estadísticas**

Variable	Descripción	Variable	Descripción
<b>FBAR</b>	Promedio de los pronósticos	<b>EM</b>	Error medio
<b>FSTDEV</b>	Desviación estándar de los pronósticos	<b>ESTDEV</b>	Desviación estándar del error
<b>OBAR</b>	Promedio de las observaciones	<b>EMA</b>	Error medio absoluto
<b>OSTDEV</b>	Desviación estándar de las observaciones	<b>ECM</b>	Error cuadrático medio
<b>PR_CORR</b>	Coefficiente de correlación de Pearson	<b>RECM</b>	Raíz del error cuadrático medio
<b>SP_CORR</b>	Coefficiente de correlación de Spearman		

## Diagramas y comparaciones entre lo previsto y lo observado

Los siguientes histogramas y diagramas de dispersión para la temperatura muestran una subestimación de los valores modelados. Sin embargo, en términos generales, los datos se agregaron alrededor de la línea 1:1, lo que indica que el modelo puede reproducir los valores de temperatura. Para los componentes

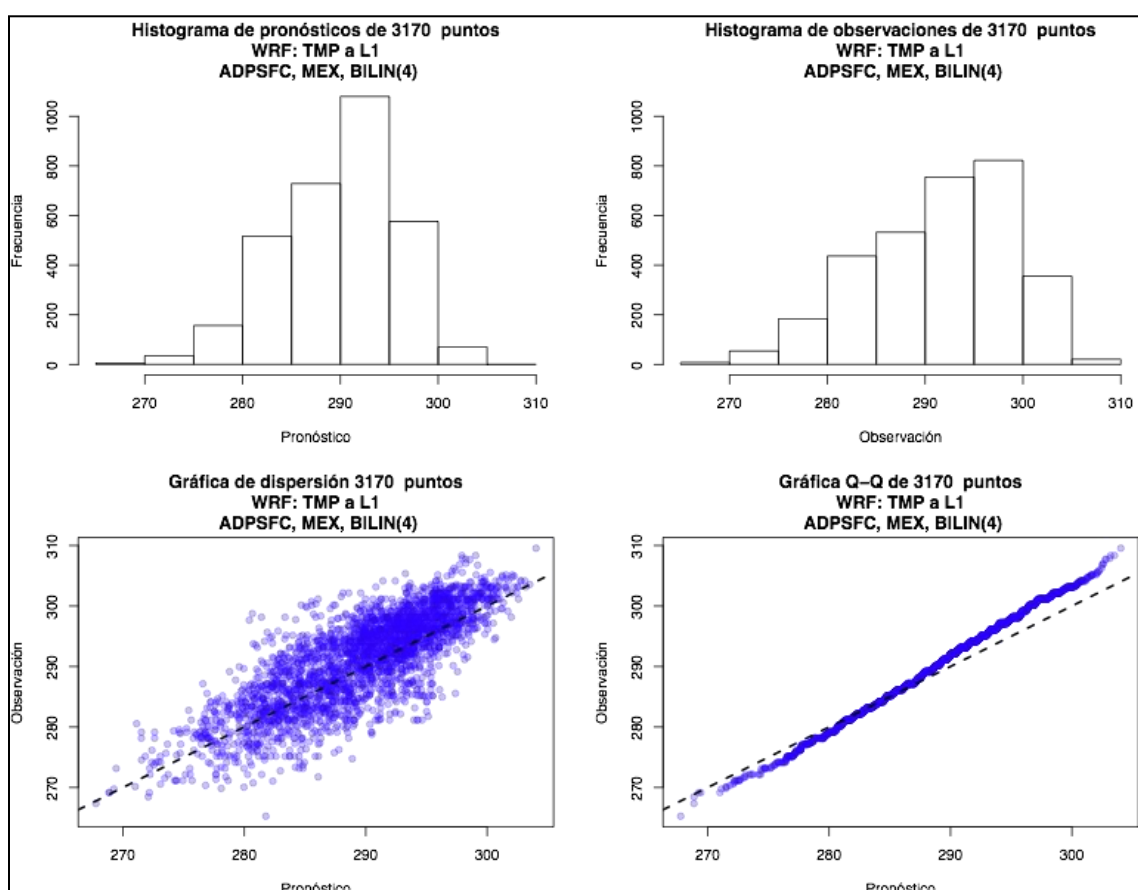
Comisión para la Cooperación Ambiental

del viento  $u$  y  $v$ , el modelo sobreestimó los valores observados; no obstante, los puntos obtenidos empleando los valores observados y los medidos se agrupan alrededor de la línea 1:1. Ello indica que el modelo puede tener campos de viento similares alrededor de los sitios de estaciones. La humedad relativa tuvo una distribución similar mayor entre los pronósticos modelados y las mediciones observadas, y los valores también se ubicaron alrededor de la línea 1:1.

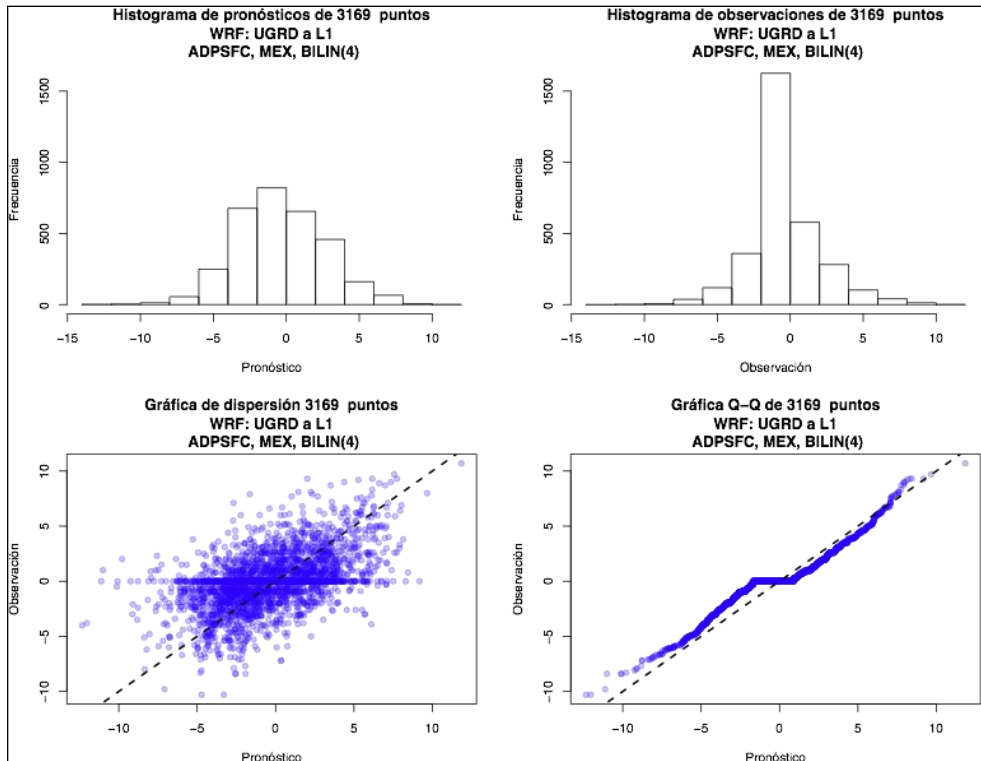
### Semana del 9 al 16 de febrero de 2011

Los análisis de lo pronosticado y las observaciones por cuanto a temperatura, componentes de viento  $u$  y  $v$ , y humedad relativa para la semana del 9 al 16 de febrero de 2011 se presentan en las siguientes gráficas.

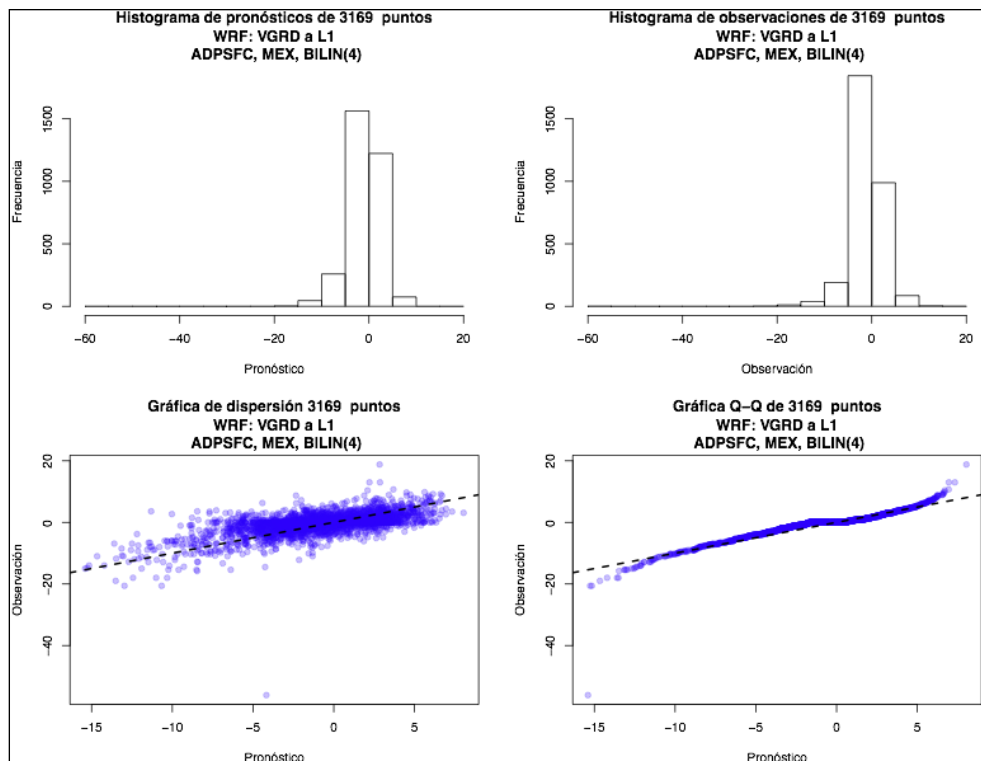
**Gráfica 29. Temperatura en la semana del 9 al 16 de febrero**



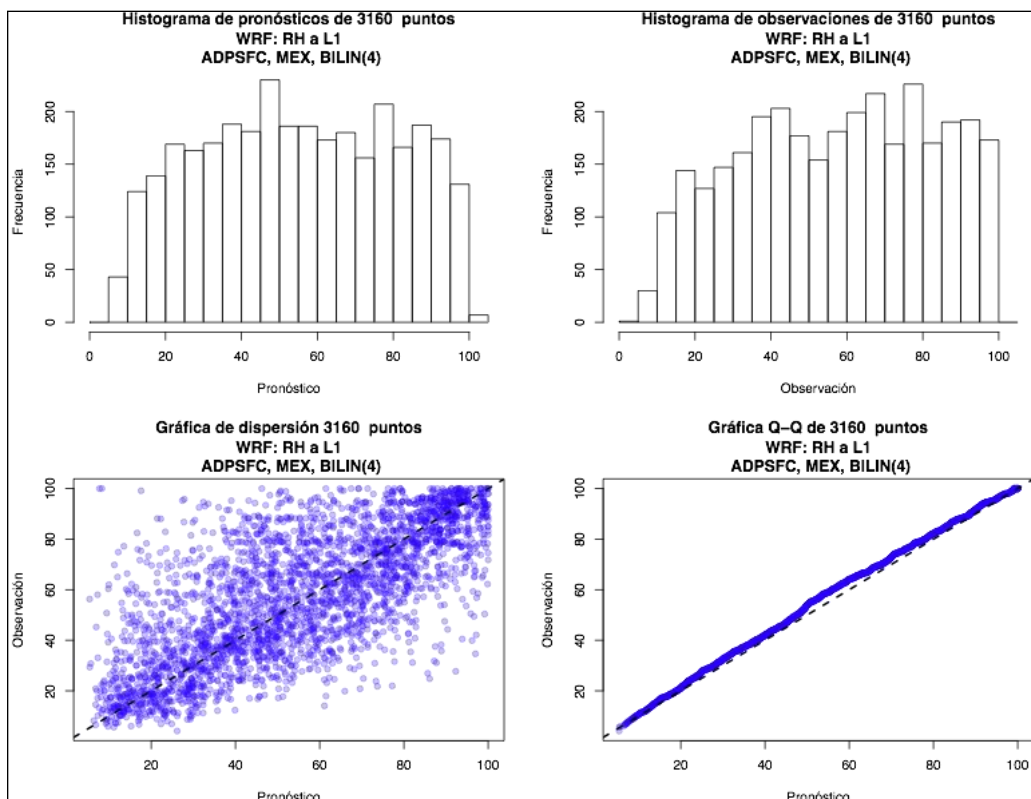
**Gráfica 30. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 9 al 16 de febrero**



**Gráfica 31. Componente meridional del viento ( $v$ ) en la semana del 9 al 16 de febrero**



**Gráfica 32. Humedad relativa en la semana del 9 al 16 de febrero**

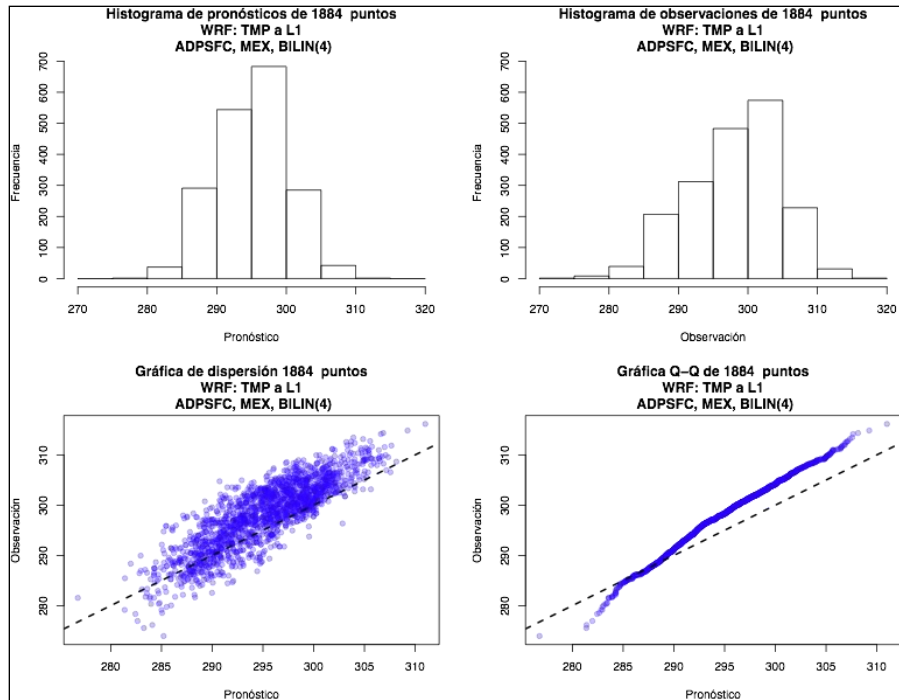


### Semana del 15 al 22 de mayo de 2011

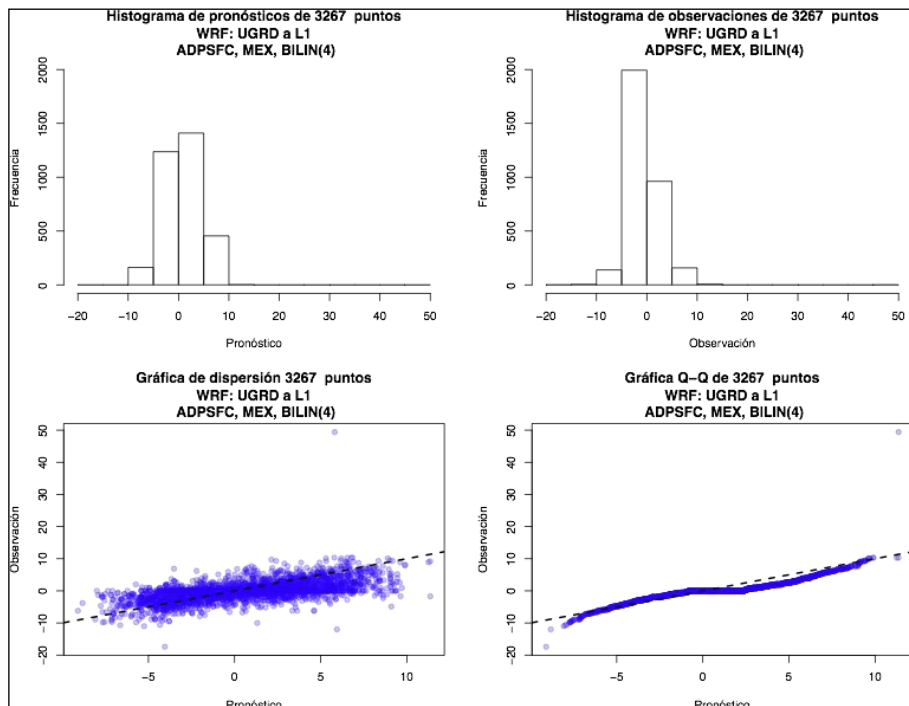
Los análisis de los pronósticos y las observaciones de temperatura, componentes del viento  $u$  y  $v$ , y humedad relativa en la semana del 15 al 22 mayo de 2011 se presentan en las siguientes gráficas.



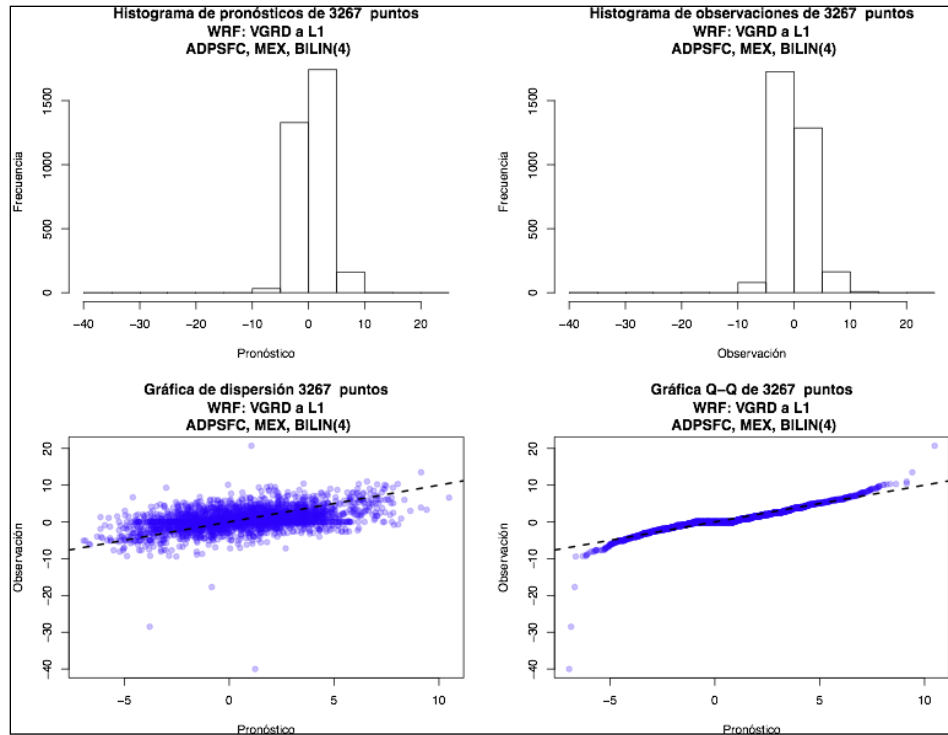
**Gráfica 33. Temperatura en la semana del 15 al 22 de mayo**



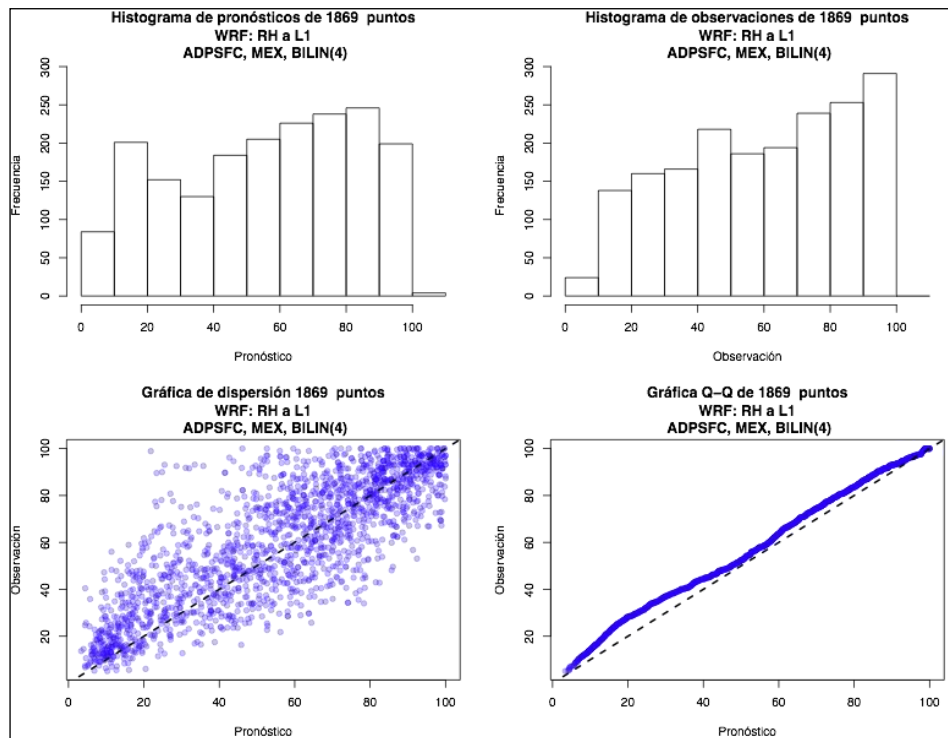
**Gráfica 34. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 15 al 22 de mayo**



**Gráfica 35. Componente meridional del viento (v) en la semana del 15 al 22 de mayo**



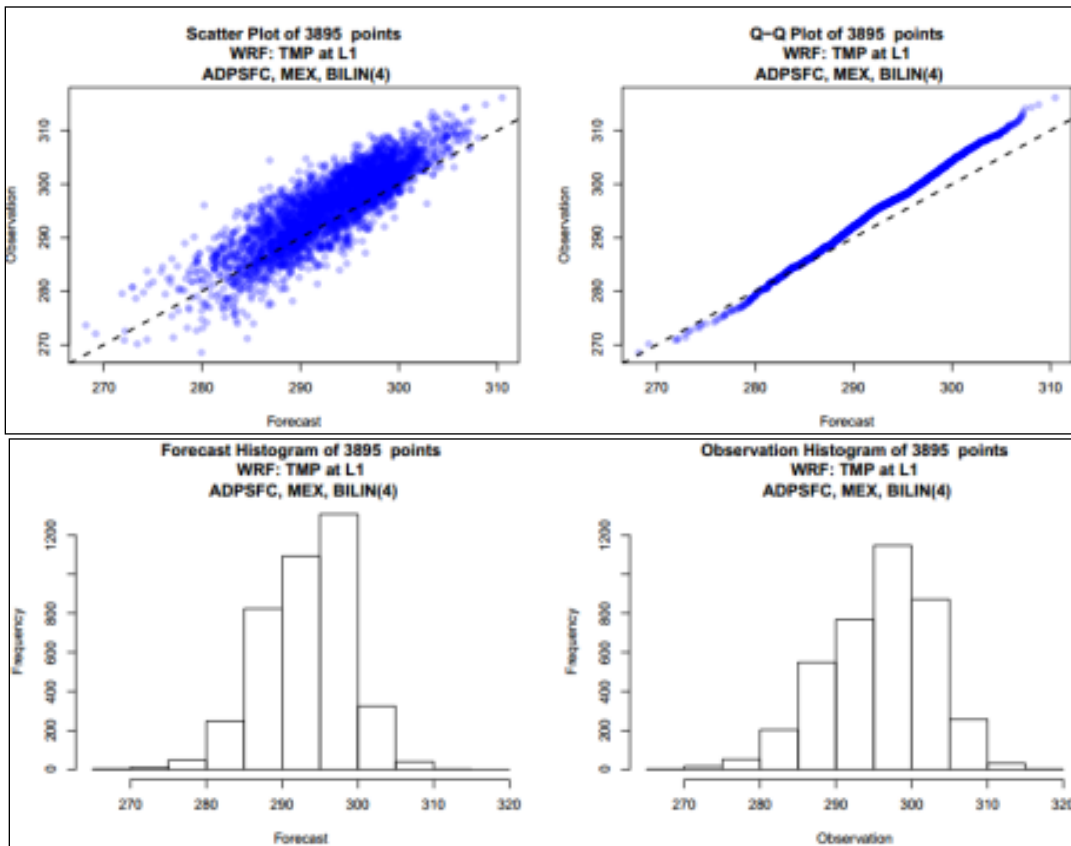
**Gráfica 36. Humedad relativa en la semana del 15 al 22 de mayo**



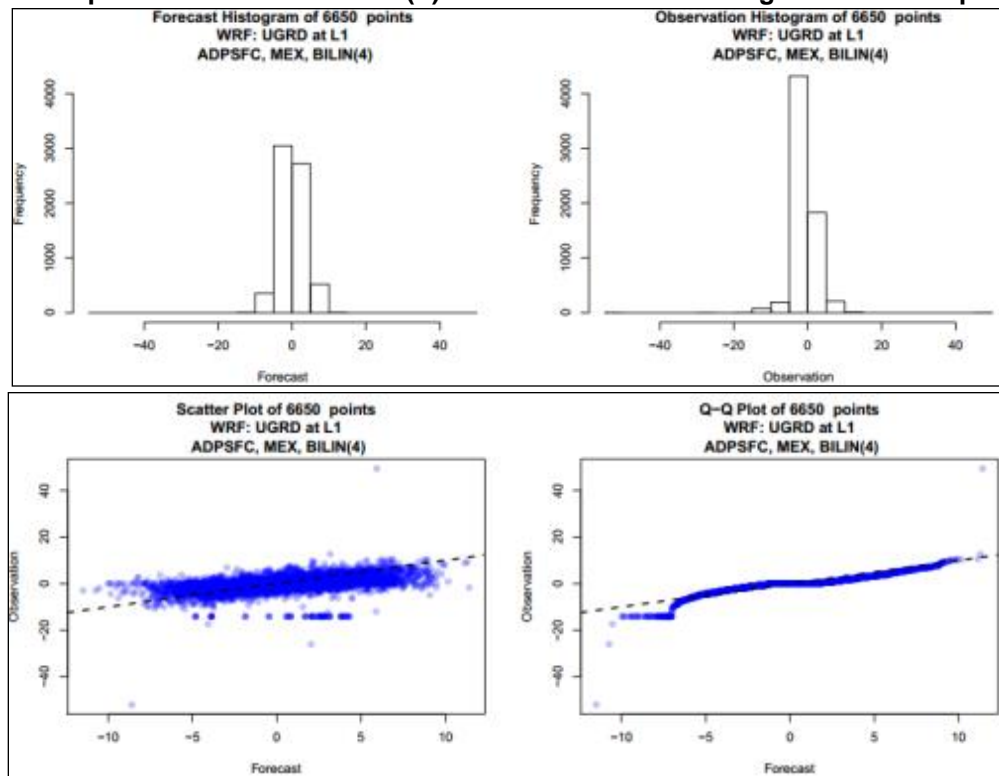
### Semana del 30 de agosto al 6 de septiembre de 2011

Los análisis de los pronósticos y las observaciones de temperatura, así como los componentes del viento  $u$  y  $v$ , y la humedad relativa en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre de 2011 se presentan en las siguientes gráficas.

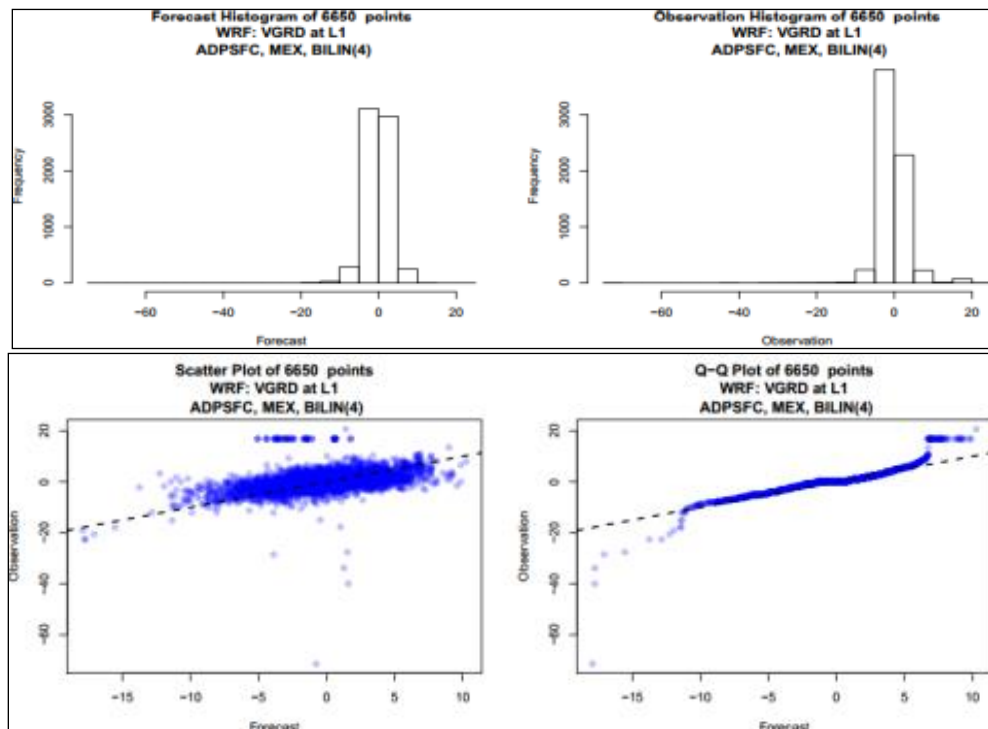
Gráfica 37. Temperatura en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre



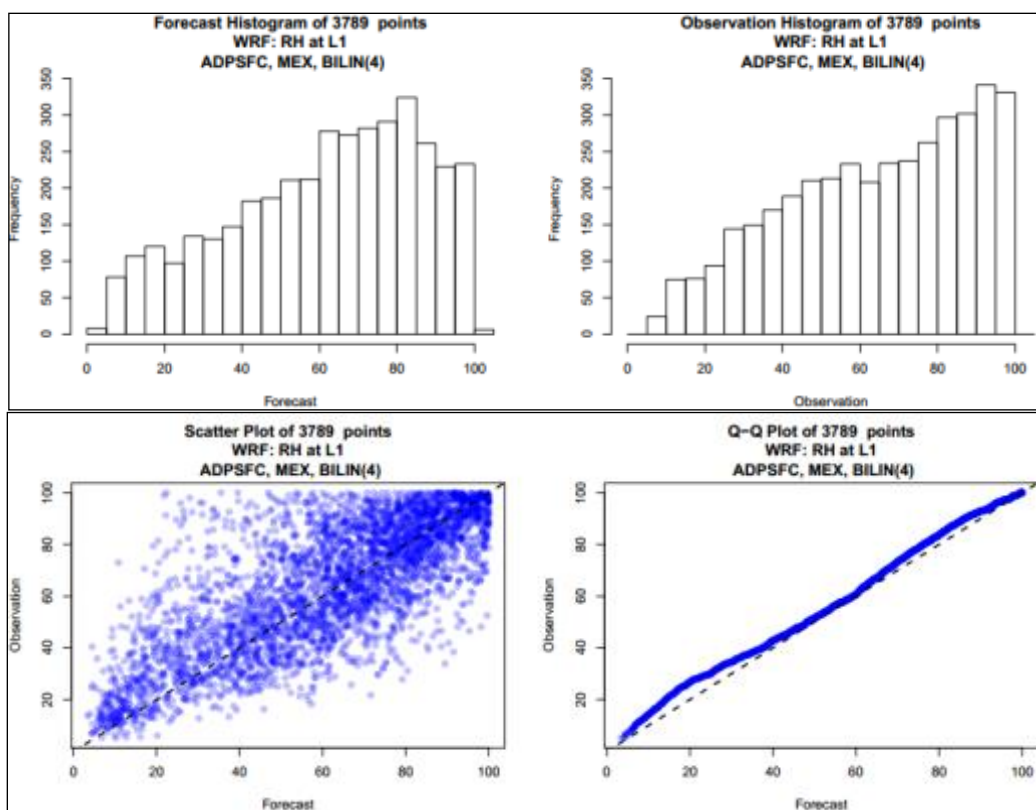
Gráfica 38. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre



Gráfica 39. Componente meridional del viento ( $v$ ) en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre



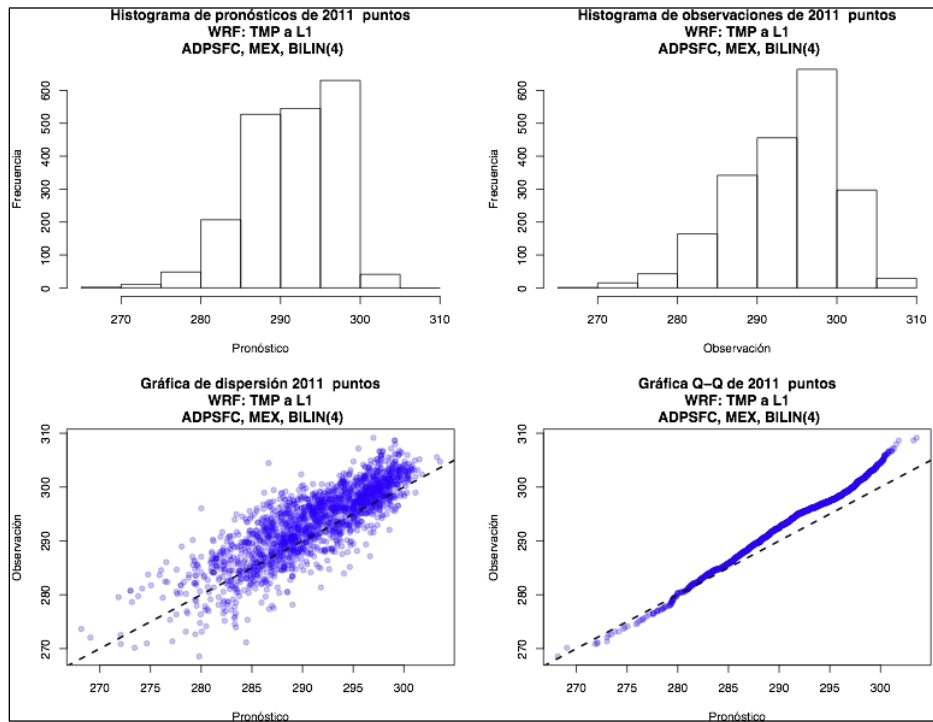
Gráfica 40. Humedad relativa en la semana del 30 de agosto al 6 de septiembre



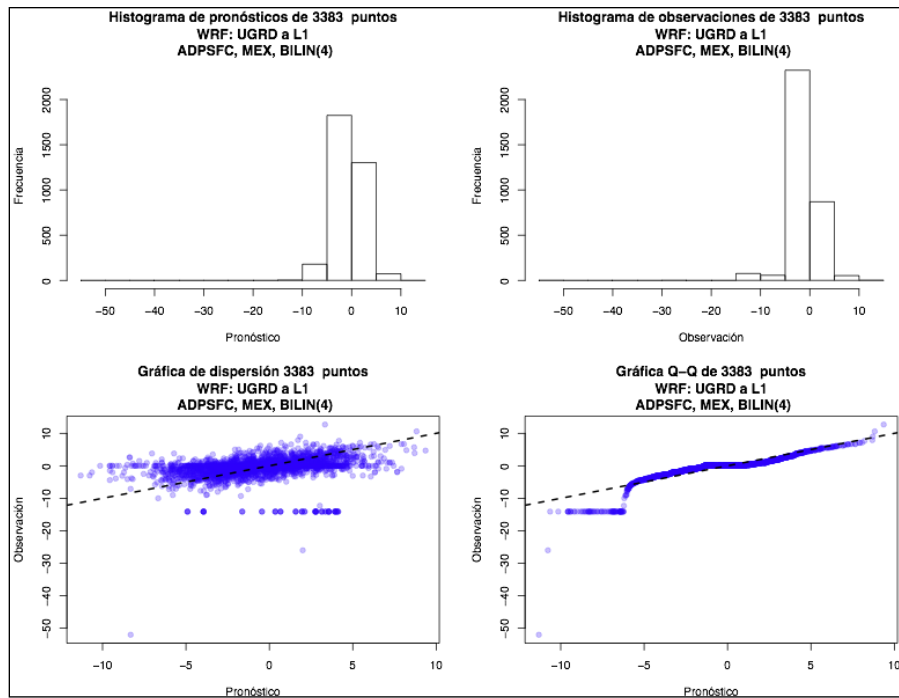
### Semana del 20 al 27 de noviembre de 2011

Los análisis de los pronósticos y observaciones sobre temperatura, así como los componentes del viento  $u$  y  $v$ , y la humedad relativa en la semana del 20 al 27 de noviembre de 2011 se presentan en las siguientes gráficas. *Dirección del viento*: en este caso, la media del pronóstico y la de observación fueron 33.4 y 92.9 grados, respectivamente.

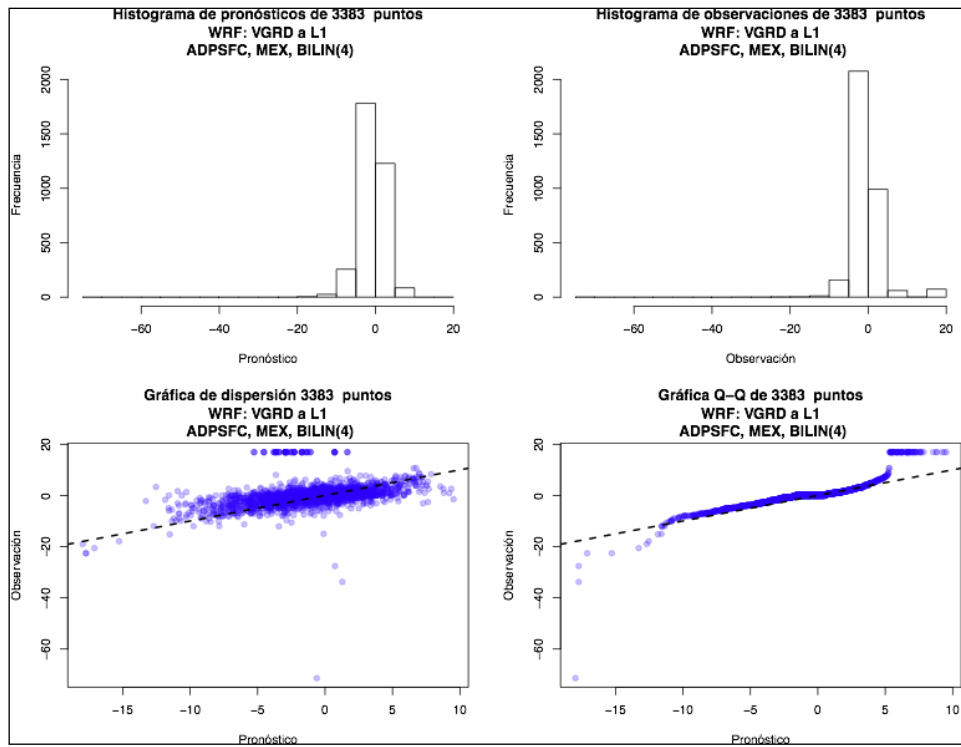
**Gráfica 41. Temperatura en la semana del 20 al 27 de noviembre**



**Gráfica 42. Componente zonal del viento ( $u$ ) en la semana del 20 al 27 de noviembre**

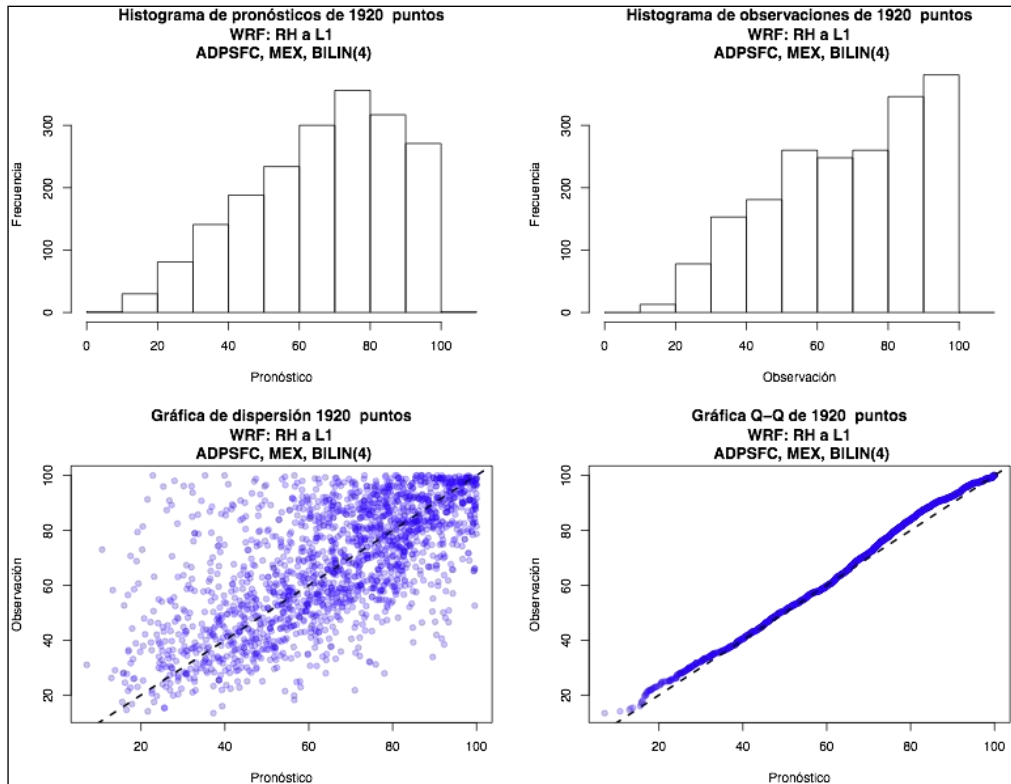


**Gráfica 43. Componente meridional del viento (v) en la semana del 20 al 27 de noviembre**

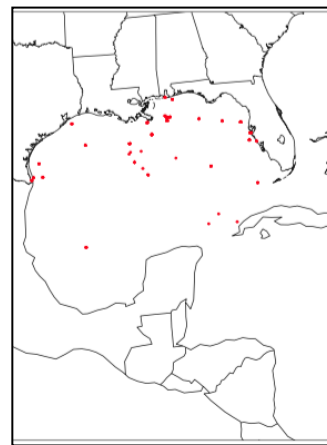
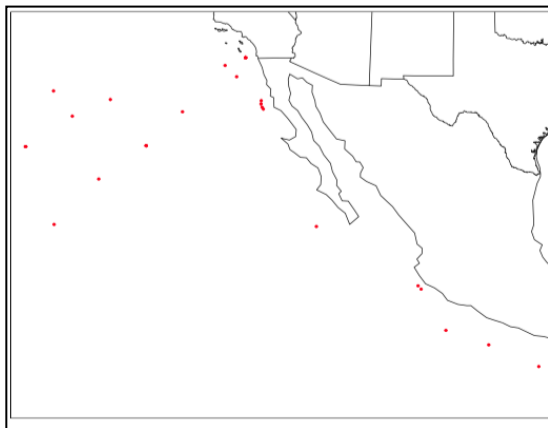




**Gráfica 44. Humedad relativa en la semana del 20 al 27 de noviembre**



Una comparación entre los resultados del modelo y los registros de boyas en el golfo de México muestra un coeficiente de correlación de Pearson por arriba de 0.66 para la temperatura y los vientos, según se observa en el cuadro 18. En el periodo agosto-septiembre, la concordancia fue más baja, debido tal vez a la temporada de huracanes.



Pacífico (izquierda) y golfo de México (derecha): boyas consideradas para la comparación entre el modelo y las mediciones.

**Cuadro 16. Comparación de resultados del modelo y de mediciones de boyas en el golfo de México**

	9 al 16 de febrero	15 al 22 de mayo	30 ago al 6 sep	20 al 27 de noviembre
<b>Temperatura</b>				
<b>FBAR</b>	289.59	297.16	302.31	296.23
<b>FSTDEV</b>	3.10	1.79	1.04	1.47
<b>OBAR</b>	287.98	297.01	301.78	296.36
<b>OSTDEV</b>	4.28	2.67	1.89	2.57
<b>PR_CORR</b>	0.90	0.80	0.41	0.80
<b>RMSE</b>	2.58	1.63	1.82	1.64
<b>Humedad relativa</b>				
<b>FBAR</b>	74.90	76.05	80.93	82.90
<b>FSTDEV</b>	11.94	11.19	7.58	7.69
<b>OBAR</b>	69.29	71.53	77.34	78.61
<b>OSTDEV</b>	15.51	15.55	10.69	10.93
<b>PR_CORR</b>	0.77	0.74	0.38	0.66
<b>RMSE</b>	11.39	11.32	11.07	9.27
<b>Componente del viento (u)</b>				
<b>FBAR</b>	-1.29	-1.64	-2.73	-3.56
<b>FSTDEV</b>	3.33	3.68	6.59	3.39
<b>OBAR</b>	-1.57	-2.30	-2.73	-3.50
<b>OSTDEV</b>	3.85	4.42	6.11	3.44
<b>PR_CORR</b>	0.70	0.85	0.66	0.78
<b>RMSE</b>	2.86	2.43	5.23	2.25
<b>Componente del viento (v)</b>				
<b>FBAR</b>	-2.23	1.04	3.63	1.84
<b>FSTDEV</b>	5.20	5.03	8.70	4.81
<b>OBAR</b>	-1.98	0.88	2.43	1.54
<b>OSTDEV</b>	5.71	5.31	6.25	5.00
<b>PR_CORR</b>	0.77	0.78	0.61	0.81
<b>RMSE</b>	3.70	3.42	7.04	3.04

Para el océano Pacífico la comparación entre las predicciones del modelo y las mediciones de las boyas también muestra un coeficiente de correlación de Pearson mayor que 0.66 para los meses de febrero, mayo y noviembre.

**Cuadro 20. Comparación de resultados del modelo y de mediciones de boyas en el Pacífico**

	9 al 16 de febrero	15 al 22 de mayo	30 ago al 6 sep	20 al 27 de noviembre
<b>Temperatura</b>				
<b>FBAR</b>	291.42	294.46	296.79	294.80
<b>FSTDEV</b>	3.95	5.73	4.71	4.55
<b>OBAR</b>	291.54	294.95	296.85	294.82
<b>OSTDEV</b>	4.14	5.75	4.05	4.21
<b>PR_CORR</b>	0.90	0.94	0.91	0.94
<b>RMSE</b>	1.80	2.11	1.95	1.55
<b>Humedad relativa</b>				
<b>FBAR</b>	78.23	80.50	86.06	78.46
<b>FSTDEV</b>	7.76	7.93	7.64	6.07
<b>OBAR</b>	77.21	77.19	80.47	78.63
<b>OSTDEV</b>	10.46	10.18	10.37	11.61
<b>PR_CORR</b>	0.25	0.28	0.01	0.22
<b>RMSE</b>	11.38	11.47	13.95	11.83
<b>Componente del viento (u)</b>				
<b>FBAR</b>	-1.13	3.14	2.69	-1.33
<b>FSTDEV</b>	3.33	2.72	3.77	4.29
<b>OBAR</b>	-0.50	3.92	2.89	-0.26
<b>OSTDEV</b>	4.16	3.48	3.98	4.71
<b>PR_CORR</b>	0.73	0.63	0.48	0.73
<b>RMSE</b>	2.90	2.86	3.95	3.48
<b>Componente del viento (v)</b>				
<b>FBAR</b>	-2.39	-2.82	-2.15	-2.92
<b>FSTDEV</b>	3.24	3.58	4.67	3.55
<b>OBAR</b>	-2.64	-3.19	-2.46	-3.62
<b>OSTDEV</b>	4.63	4.45	5.48	4.74
<b>PR_CORR</b>	0.76	0.71	0.64	0.75
<b>RMSE</b>	3.04	3.18	4.36	3.21

## Análisis estadístico del ozono y PM<sub>2.5</sub>

La comparación entre el modelo y los datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Ciudad de México se realizó utilizando datos observados en la RAMA para los cuatro periodos de evaluación, y específicamente para el mes de mayo sólo por lo que toca a PM<sub>2.5</sub>, toda vez que los valores correspondientes a ese mes se usaron para el análisis de sensibilidad.

Con el propósito de obtener las concentraciones ambientales simuladas, se extrajeron datos de los resultados del modelo mediante el uso de bibliotecas NetCDF. Debido al tamaño de las celdas de la malla, sólo se usó el valor más cercano a la estación. El análisis se hizo, pues, para los cuatro periodos de 2011 seleccionados, y para el mes de mayo (con fines de análisis de sensibilidad).

**Cuadro 17. Comparación de resultados del modelo y observaciones de PM<sub>2.5</sub>**

PM <sub>2.5</sub> (promedio de 24 horas)							
Periodo	Promedio observaciones	Promedio modelo	Desv. estándar modelo	Desv. estándar observaciones	RMSE	Máximo observaciones	Máximo modelo
15 al 22 de febrero	29.0	36.7	15.9	5.5	16.2	33.4	69.8
9 al 16 de mayo	31.6	22.3	11.9	3.4	17.1	41.0	46.5
30 ago al 6 sep	16.1	16.7	7.9	6.2	10.2	26.8	32.0
Noviembre	23.7	36.3	12.1	5.5	15.7	32.8	52.2

**Cuadro 18. Comparación de resultados del modelo y observaciones de PM<sub>2.5</sub> durante mayo**

Promedio de 24 horas para todo el mes de mayo							
Promedio observaciones	Promedio modelo	r	Desv. estándar modelo	Desv. estándar observaciones	RMSE	Máx. observ.	Máx. modelo
33.58	33.10	0.08	11.51	7.35	12.95	50.63	55.34

Nota: Concentraciones en µg/m<sup>3</sup>.

**Cuadro 19. Comparación de resultados del modelo y observaciones de ozono**

Ozono (valor máximo en una hora)							
Periodo	Promedio observaciones	Promedio modelo	Desv. estándar modelo	Desv. estándar observaciones	RMSE	Máx. observ.	Máx. modelo
15 al 22 de febrero	70.7	68.1	9.8	12.3	13.0	89.2	83.3
9 al 16 de mayo	99.9	87.6	15.4	12.0	20.0	116.7	106.7
30 ago al 6 sep	56.1	55.0	14.1	20.4	24.4	95.2	74.5
Noviembre	62.4	65.7	13.0	20.7	28.8	89.0	88.4

Nota: Valores observados y modelados en ppm.

## Apéndice III: Análisis de sensibilidad: emisiones portuarias y de buques

### Análisis de sensibilidad para emisiones portuarias

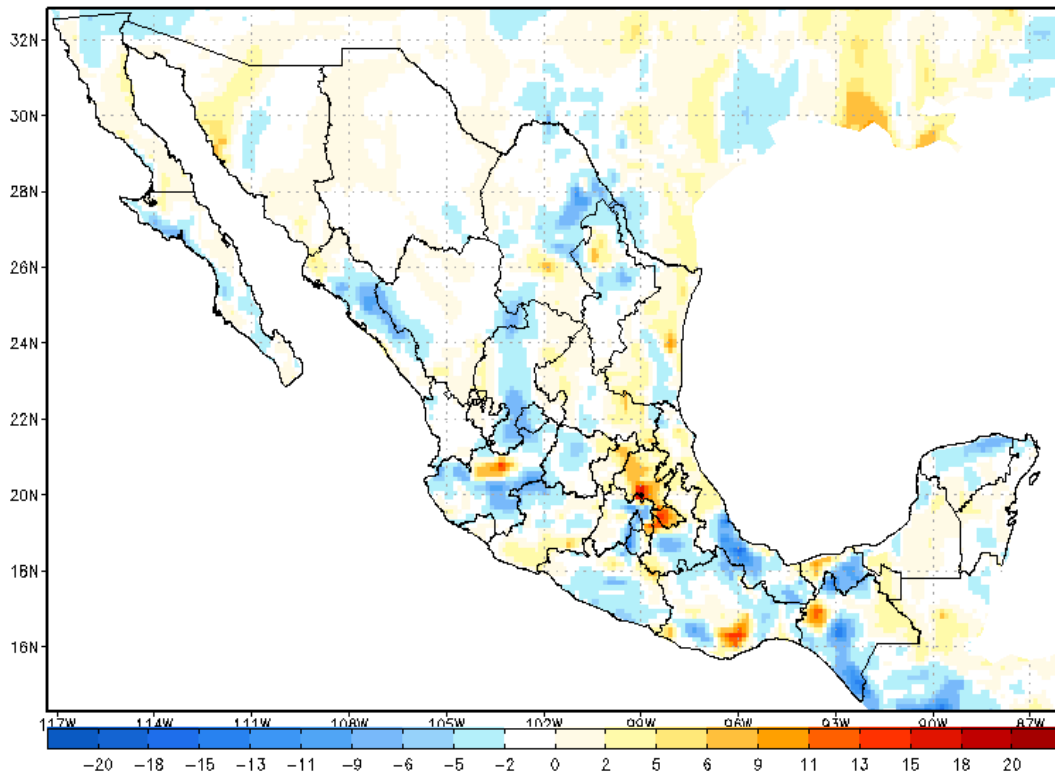
Con el fin de evaluar el impacto de las emisiones portuarias en la calidad del aire, se llevaron a cabo varias simulaciones para los escenarios de emisiones Marpol 2030 (S1) y Marpol + ZCE 2030 (S2), a partir de los datos de emisiones portuarias provistos por Eastern Research Group, Inc. (ERG) en julio de 2014. La diferencia (Dif1) entre las concentraciones ambientales de  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  para ambos escenarios (S1-S2) se calculó con base en dichos datos de emisiones; y el mismo procedimiento se siguió para estimar la diferencia Dif2 correspondiente a las emisiones de puerto actualizadas ((S1-S2)*act*).

**Cuadro 20. Escenarios de sensibilidad**

Escenario	Descripción
S1	Emisiones Marpol, 2030
S2	Emisiones Marpol + ZCE, 2030
S1 <i>act</i>	Emisiones Marpol + emisiones portuarias actualizadas
S2 <i>act</i>	Emisiones Marpol + ZCE + emisiones portuarias actualizadas
(S1-S2)-(S1-S2) <i>act</i>	Diferencias entre escenarios con emisiones actualizadas

La gráfica 48 muestra la diferencia entre los escenarios (Dif1 y Dif2) para los valores promedio de 24 horas de  $PM_{2.5}$ . A partir de los resultados, se desprende que las emisiones portuarias pueden inducir cambios en las concentraciones de alrededor de (+/-)  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tal cambio varía en distintos puntos del país; algunos lugares como la Ciudad de México y Monterrey muestran una variación negativa en la concentración de  $PM_{2.5}$ ; sin embargo, zonas como Guadalajara, Querétaro, Tlaxcala y Pachuca muestran un cambio positivo. Un valor negativo implica que Dif2 es mayor que Dif1. El beneficio se calcula mediante la diferencia de concentraciones ambientales, usando  $I = T_b (\beta) (\Delta C)$  (Población). En este caso,  $\Delta C = \text{Dif1}$  o  $\text{Dif2}$ . En principio, si hubiera diferencias más grandes en  $\Delta C$ , tendrían lugar mayores beneficios. Un valor positivo implica lo contrario.

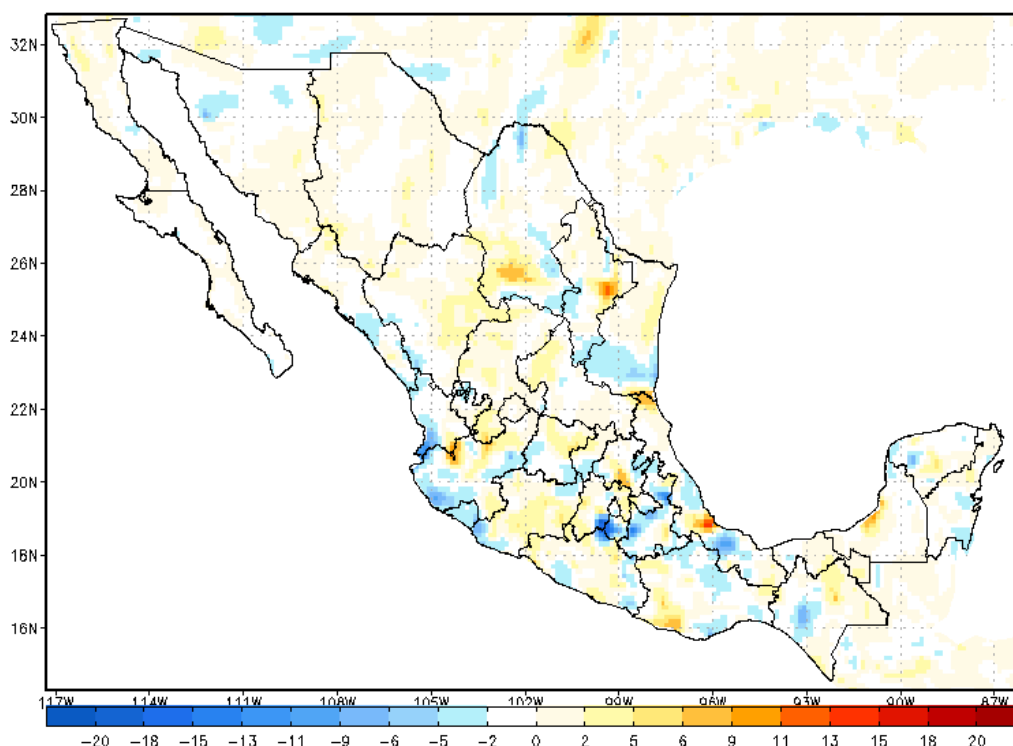
**Gráfica 45. Diferencia en las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> entre (S1-S2)-(S1-S2)act**



Nota: Concentraciones en µg/m<sup>3</sup>.

La gráfica 49 muestra la diferencia entre los escenarios (Dif1 y Dif2) para la concentración máxima de ozono en una hora (O<sub>3</sub> máx 1-hr), misma que varió alrededor de +/- 10 ppmm. Las ciudades de Cuernavaca, Puebla, Tlaxcala y Querétaro registraron mayores beneficios en comparación con Guadalajara y Monterrey, donde el beneficio proyectado fue menos marcado.

**Gráfica 46. Diferencia en las concentraciones de ozono entre (S1-S2)-(S1-S2)<sub>act</sub>**



Nota: Concentraciones en ppmm.

### Conclusiones:

- La actualización de los datos sobre las emisiones portuarias dará como resultado que algunas regiones en México tengan una mejor calidad de aire y otras una mala calidad de aire.
- Los beneficios económicos calculados con datos sobre emisiones portuarias actualizadas fueron menores que aquellos calculados mediante el uso de los datos de las emisiones de puertos originales.
- Se obtuvieron beneficios aproximadamente 14% menores utilizando emisiones portuarias actualizadas sólo para el mes de mayo de 2011. Esta diferencia se encuentra dentro del intervalo de confianza.

### Análisis de sensibilidad para emisiones de los buques

Con el fin de evaluar el impacto de las emisiones de los buques en la calidad del aire, se realizó una serie de simulaciones a partir de los datos de emisiones del escenario de referencia, S1 (Marpol 2030) incluidos en el cuadro 2 *supra*. En estas simulaciones se emplearon también datos para las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y ozono, conforme a los siguientes escenarios:

- CP Emisiones portuarias actualizadas + 100% emisiones de buques
- BR5 Emisiones portuarias actualizadas + 50% emisiones de buques
- BR Emisiones portuarias actualizadas + 10% emisiones de buques
- N Emisiones portuarias actualizadas + 0% emisiones de buques

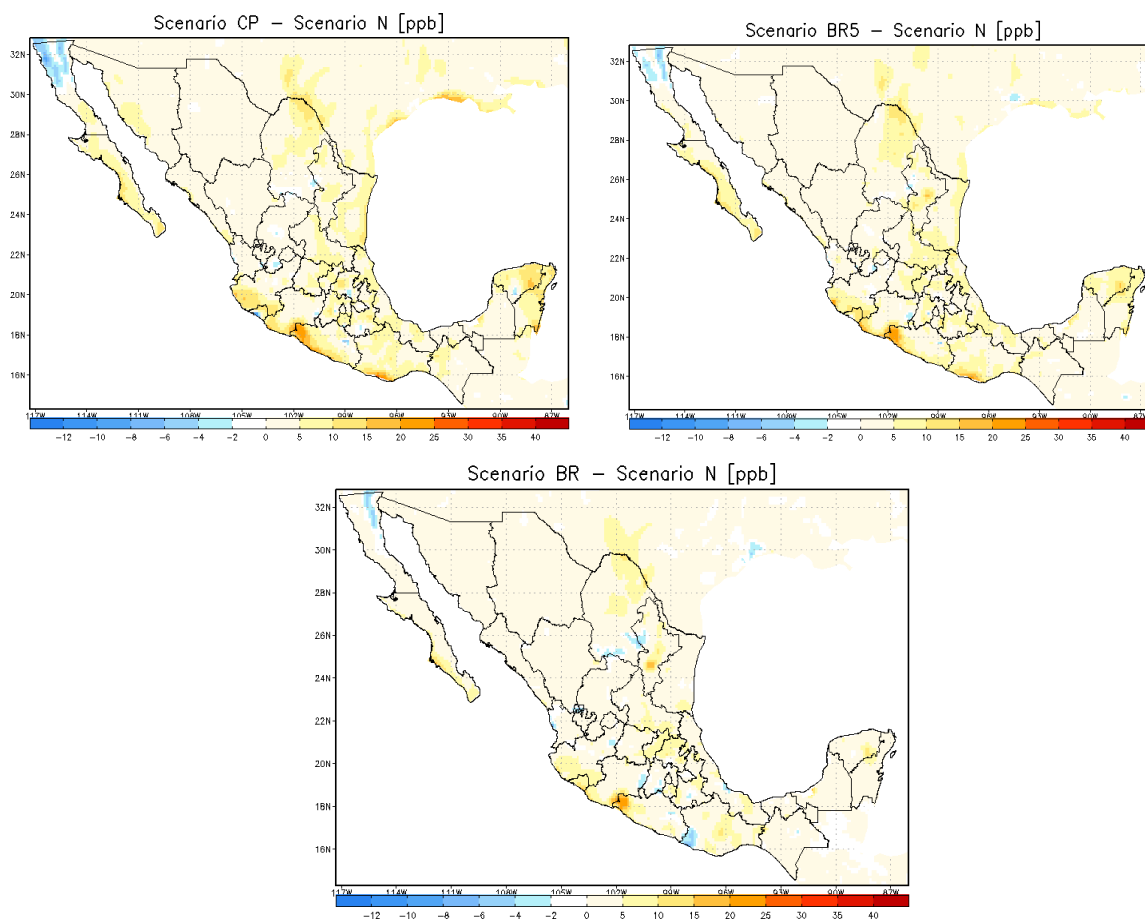
Para comparar los escenarios se recurrió a la concentración ponderada por población (CPW, por sus siglas en inglés) utilizando los resultados de los modelos de calidad del aire y los datos poblacionales. Se

encontró que una disminución de 50% en las emisiones de los buques impulsó una reducción de 25% en la CPW, mientras que una reducción de 90% de las emisiones puede impulsar hasta 50% de reducción en la CPW. Si bien hay lugares donde la reducción de la concentración ambiental resulta mayor, no se les tomó en cuenta para la CPW por no haber población alguna en esas áreas.

Cabe observar, por otro lado, que una evaluación de ecosistemas —marinos, forestales e incluso de cultivos agrícolas— podría llevar a un aumento en los beneficios registrados como resultado de una reducción en las concentraciones de contaminantes en el ambiente; sin embargo, esto rebasaría los objetivos del presente proyecto.

Los resultados correspondientes a las concentraciones de ozono y  $PM_{2.5}$  se presentan en las gráficas 50 y 51, respectivamente. Se observa que la reducción en las emisiones de las embarcaciones marítimas tiene un impacto notable en las concentraciones en tierra; de ahí la importancia de actuar al respecto.

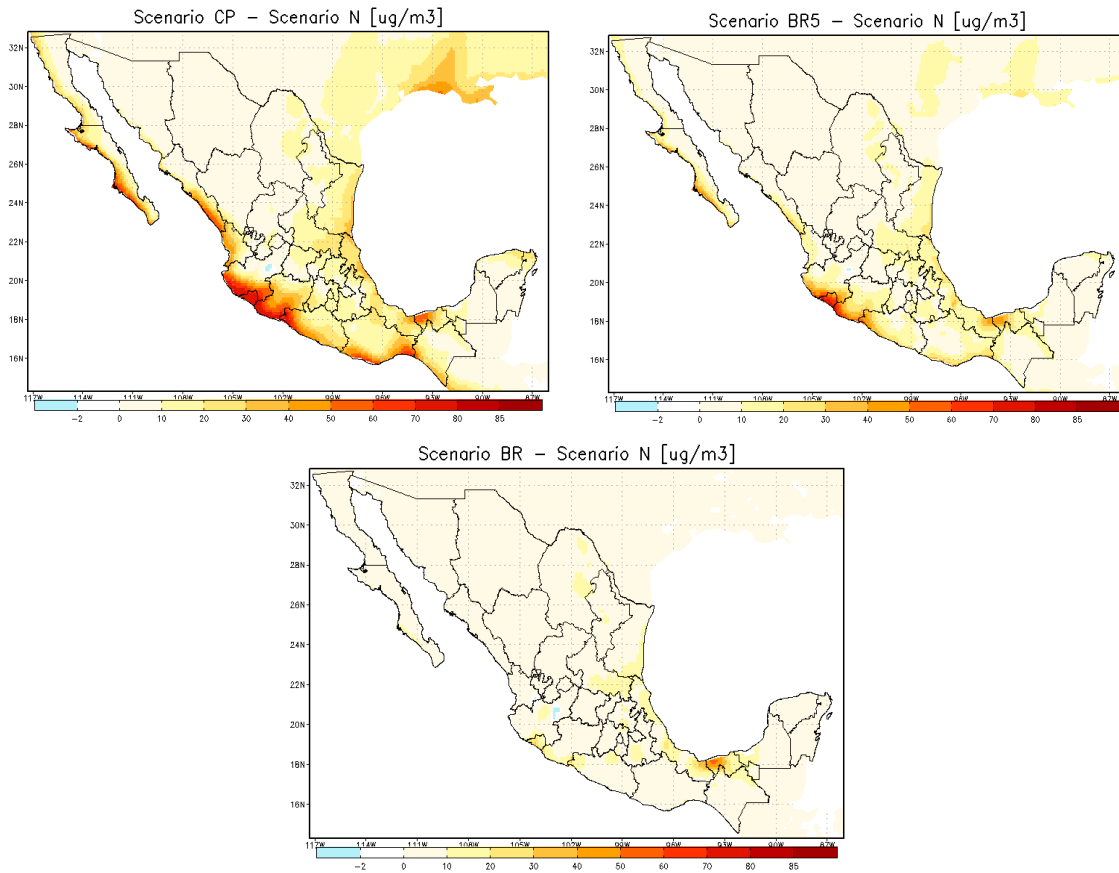
**Gráfica 47. Diferencias de concentraciones ambientales de ozono**



*Nota:* Las mayores reducciones se observan en los paneles superiores: izquierdo (CP-N) y derecho (BR5-N), y una menor reducci3n en el panel inferior (BR-N). Concentraciones en ppm.



**Gráfica 48. Diferencias en concentraciones ambientales de PM<sub>2.5</sub>**



*Nota:* Las mayores reducciones se observan los paneles superiores: izquierdo (CP-N) y derecho (BR5-N), y una menor reducción en el panel inferior (BR-N). Concentraciones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## Referencias bibliográficas

- Abbey, D. E., B. E. Ostro, F. Petersen y R. J. Burchette (1995), “Chronic respiratory symptoms associated with estimated long-term ambient concentrations of fine particulates less than 2.5 microns in aerodynamic diameter (PM<sub>2.5</sub>) and Other Air Pollutants”, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, núm. 5, 1995, pp. 137-159.
- Bailey, D. y G. Solomon (2004), “Pollution prevention at ports: Clearing the air”, *Environmental Impact Assessment Review*, núm. 24, pp. 749-774.
- Buhaug, Ø. et al. (2009), *Second IMO GHG study*, International Maritime Organization (IMO) [Organización Marítima Internacional], Londres, abril.
- Burnett, R. T., M. Smith-Doiron, D. Stieb, M. E. Raizenne, J. R. Brook, R. E. Dales, J. A. Leech, S. Cakmak y D. Krewski (2001), “Association between ozone and hospitalization for acute respiratory diseases in children less than 2 years of age”, *American Journal of Epidemiology*, núm. 153, pp. 444-452.
- CCA (2011), *Inventario Nacional de Emisiones de Fuentes de Área, 2008*, anexo 2: “Fuentes móviles no carreteras” y anexo 3: “Fuentes naturales” (sin publicar). Comisión para la Cooperación Ambiental., Montreal.
- CEC (2018), *Reducción de emisiones generadas por el movimiento de bienes en el transporte marítimo en América del Norte: actualización de datos de emisiones en puertos mexicanos*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal.
- Chen, L., B. L. Jennison, W. Yang y S. T. Omaye (2000), “Elementary school absenteeism and air pollution”, *Inhalation Toxicology*, núm. 12, pp. 997-1016.
- Conagua (2011), *Reporte del clima en México 2011*; disponible en: <http://201.116.60.100/climatologia/analisis/reportes/Anual2011.pdf> (consulta realizada el 15 de mayo de 2015).
- Conapo (2013), *Proyecciones de la población 2010-2050*, Consejo Nacional de Población, México, en: [www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones).
- Corbett, J. J. (2012), “Ship Emissions Inventory Scenarios for US-Mexico Technical Exchange on Reducing Shipping Emissions”, memorando de EERA preparado para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, diciembre.
- Corbett, J. J. (2010), *Improved geospatial scenarios for commercial marine vessels*, preparado para la Junta de Recursos del Aire de California y la Agencia de Protección Ambiental de California, 31 de marzo de 2010.
- Corbett, J. J. (2007), “Mortality from ship emissions: A global assessment”, *Environmental Science and Technology*, núm. 41, pp. 8512-8518.
- Corbett, J. J. y C. Wang (2012), “Estimation, Validation, and Forecasts of Regional Commercial Marine Vessel Inventories Task 3 and 4: Forecast Inventories for 2010 and 2020 Final Report”, diciembre.
- Corbett, J. J. y C. Wang (2006), “Commercial Marine Vessel Inventories; Tasks 3 and 4: Forecast Inventories for 2010 and 2020”, informe final, contrato 04-346, Junta de Recursos del Aire de California, Agencia de Protección Ambiental de California, 29 pp.; disponible en: [http://coast.cms.udel.edu/NorthAmericanSTEEM/ARBCEC\\_SECA\\_task3-4Report.pdf](http://coast.cms.udel.edu/NorthAmericanSTEEM/ARBCEC_SECA_task3-4Report.pdf).
- Corbett, J. J., C. Wang y J. Firestone (2006), “Estimation, Validation, and Forecasts of Regional Commercial Marine Vessel Inventories; Tasks 1 and 2: Baseline Inventory and Ports Comparison Final Report”, Junta de Recursos del Aire de California, contrato 04-346, y Comisión para la Cooperación Ambiental, contrato 113.111; disponible en: [http://coast.cms.udel.edu/NorthAmericanSTEEM/ARBCEC\\_SECA\\_task1-2ReportMay2006.pdf](http://coast.cms.udel.edu/NorthAmericanSTEEM/ARBCEC_SECA_task1-2ReportMay2006.pdf).

- DOE (2013), *The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model*, US Department of Energy, Argonne National Laboratory [Departamento de Energía de Estados Unidos, Laboratorio Nacional de Argonne], octubre, en: <https://greet.es.anl.gov>.
- DTC, “Model Evaluation Tools” [Herramientas para la evaluación de modelos], Developmental Testbed Center, en: [www.dtcenter.org/met/users/docs/overview.php](http://www.dtcenter.org/met/users/docs/overview.php).
- EPA (2002), *Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data*, US Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, Oficina de Transporte y Calidad del Aire], febrero.
- EPA (2011), “2011 National Emissions Inventory Data”, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos]; disponible en: [www.epa.gov/air-emissions-inventories/2011-national-emissions-inventory-nei-data](http://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2011-national-emissions-inventory-nei-data).
- EPA (2012), *Report to Congress on Black Carbon*, US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos], EPA-450/R-12-001, 2012; disponible en: [www.epa.gov/blackcarbon/](http://www.epa.gov/blackcarbon/).
- EPA (2015), *US-Mexico cooperation on reducing emissions from ships through a Mexican Emission Control Area: Development of the first national Mexican emission inventories for ships using the Waterway Network Ship Traffic, Energy, and Environmental Model (STEEM)*, informe EPA-160-R-15-001, mayo de 2015, Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos].
- Fann, N. (2012), *BenMap User's Manual*, Office of Air Quality Planning and Standards, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, octubre.
- Friedrich, A., F. Heinen, F. Kamakate y D. Kodjak (2007), *Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions from Ocean-going Ships: Impacts, Mitigation Options and Opportunities for Managing Growth*, The International Council on Clean Transportation.
- Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock y B. Eder (2005), “Fully coupled online chemistry within the WRF model,” *Atmospheric Environment*, núm. 39, pp. 6957-6975.
- Grossmann, H., A. Alkis, S. Stiller, J. Wedemeier, C. Koeller, W. Pfluger y A. Roestel (2013), *Maritime trade and transport logistics*, Berenberg Bank.
- ICF International y US EPA (2009), *Final Report: Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories, 2009*, ICF International and US Environmental Protection Agency [Agencia de Protección Ambiental de EU]; disponible en: <http://epa.gov/cleandiesel/documents/ports-emission-inv-april09.pdf>.
- IPCC (2006), *Tier 3 Methods Recommended by the 2006 IPCC Guidelines for GHG Inventories*; disponible en: [www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf).
- Janssens Maenhout, G., F. Dentener, J. van Aardenne, S. Monni, V. Pagliari, L. Orlandini, Z. Klimont, J. Kurokawa, H. Akimoto, T. Ohara, R. Wankmueller, B. Battye, D. Grano, A. Zuber y T. Keating, EDGAR-HTAP (2012), *A harmonized gridded air pollution emission dataset based on national inventories*, European Commission Publications Office, Ispra, Italia.
- Kaiser J. (2005), “Mounting evidence indicts fine-particle pollution”, *Science*, núm. 307, pp. 1858-1861.
- Laden, F., J. Schwartz, F. E. Speizer y D. W. Dockery (2006), “Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality: Extended follow-up of the Harvard Six Cities Study”, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, núm. 173, pp. 667-672.

- Levy, J. I., S. M. Chemerynski y J. A. Sarnat (2005), “Ozone exposure and mortality: an empiric bayes metaregression analysis”, *Epidemiology*, núm. 16, pp. 458-468.
- Madronich, S. (1987), “Photodissociation in the atmosphere actinic flux and the effects of ground reflections and clouds”, *Journal of Geophysical Research*, núm. 92, pp. 9740-9752.
- Molina, L. T., S. Madronich, J. S. Gaffney, E. Apel, B. de Foy, J. Fast, R. Ferrare, S. Herndon, J. L. Jimenez, B. Lamb, A. R. Osornio Vargas, P. Russell, J. J. Schauer, P. S. Stevens, R. Volkamer y M. Zavala (2010), “An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, núm. 10, pp. 8697-8760.
- Moolgavkar, S. H. (2000), “Air pollution and hospital admissions for diseases of the circulatory system in three U.S. metropolitan areas”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, núm. 50, pp. 1199-206.
- Mora Ramirez, M. A. y A. R. García (2012), “Evaluation of WRF-Chem simulations with the Unified Post Processor (UPP) and Model Evaluation Tools (MET)”, 11th Annual CMAS Conference, Chapel Hill, 15-17 de octubre.
- Nel, A. (2005), “Atmosphere: Air Pollution-Related Illness: Effects of Particles”, *Science*, vol. 308 (5723), pp. 804-806.
- Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, “Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación”.
- Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, “Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente y criterios para su evaluación”.
- OMI (2010), *Information Resources on Climate Change and Maritime Industry (air pollution from ships, Marpol Annex VI and other issues)*, Organización Marítima Internacional, Centro de Conocimientos Marítimos.
- OMI (2007), *Review of Marpol Annex VI and the NOx Technical Code: Report on the outcome of the Informal Cross Government/Industry Scientific Group of Experts established to evaluate the effects of the different fuel options proposed under the revision of Marpol Annex VI*, Organización Marítima Internacional, Subcomité de Transporte de Líquidos y Gases a Granel.
- OMS (2013), *Health effects of particulate matter, policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and central Asia*, Organización Mundial de la Salud, Ciudad de la ONU, Copenhague, Dinamarca.
- Ortiz, L.M. (2005), *Manual del programa: Sistema para el procesamiento de emisiones atmosféricas (SPEA ver. 1.0.0)*, Instituto Mexicano del Petróleo.
- Ostro, B. D. y S. Rothschild (1989), “Air Pollution and Acute Respiratory Morbidity —an Observational Study of Multiple Pollutants”, *Environmental Research*, núm. 50, pp. 238-247.
- Ostro, B. D. (1987), “Air Pollution and Morbidity Revisited: A Specification Test”, *Journal of Environmental Economics and Management*, núm. 14, pp. 87-98.
- Pope, C. A., M. Ezzati y D. W. Dockery (2009), “Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States”, *The New England Journal of Medicine*, núm. 360, pp. 376-386.
- Pope, C. A., R. T. Burnett, M. J. Thun, E. E. Calle, D. Krewski, K. Ito y G. D. Thurston (2002), “Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution”, *Journal of the American Medical Association*, núm. 287, pp. 1132-1141.
- Quantum GIS Development Team (2014), Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, en: <<http://qgis.osgeo.org>>.

- Rothengatter, W., Y. Hayashi y W. Schade (comps.) (2011), “Transport Moving to Climate Intelligence: New Chances for Controlling Climate Impacts of Transport after the Economic Crisis”, *Transportation Research, Economics and Policy*, Springer, ISBN 1441976434, 9781441976437.
- Sesma, A. P. (2012), “Delimitación de cuencas atmosféricas mediante el porcentaje de concentración que genera una fuente de emisión Q”, informe de la Subdirección de Modelación de Calidad del Aire, DGCARETC-Semarnat.
- Sheppard, L. (2003), “Ambient Air Pollution and Nonelderly Asthma Hospital Admissions in Seattle, Washington, 1987-1994”, *Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health*, Health Effects Institute, Boston, mayo.
- Song, J., W. Lei, N. Bei, M. Zavala, B. de Foy, R. Volkamer, B. Cardenas, J. Zheng, R. Zhang y L. T. Molina (2010), “Ozone response to emission changes: a modeling study during the MCMA-2006/MILAGRO Campaign”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, núm. 10, pp. 3827-3846.
- Stevens, G., M. Zuk, L. Rojas y R. Iniestra (2005), *The Benefits and Costs of a Bus Rapid Transit System in Mexico City*, informe final del Instituto Nacional de Ecología, disponible en: [www.inecc.gob.mx/descargas/cal aire/metrobus\\_bca.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cal aire/metrobus_bca.pdf).
- Stockwell, W. R., P. Middleton, J. S. Chang y X. Tang (1990), “The second-generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling”, *Journal of Geophysical Research*, núm. 95, pp. 16343-16367.
- Wang, C. y J. J. Corbett (2007), “The Costs and Benefits of Reducing SO<sub>2</sub> Emissions from Ships in the US West Coastal Waters”, *Transportation Research Part D*, vol. 12, núm. 8, pp. 577-588.
- Wang, C., J. J. Corbett y J. Firestone (2008), “Improving Spatial Representation of Global Ship Emissions Inventories”, *Environmental Science and Technology*, vol. 42 núm. 1, pp. 193-199.
- Wang, C., J. J. Corbett y J. Firestone (2007), “Modeling energy use and emissions from North American shipping: Application of the ship traffic, energy, and environment model”, *Environmental Science and Technology*, vol. 41, núm. 9, pp. 3226-3232; disponible en: <http://coast.cms.udel.edu/NorthAmericanSTEEM/>.
- Wang, C., J. J. Corbett y J. J. Winebrake (2007), “Cost-effectiveness of Reducing Ship Sulfur Emissions”, *Environmental Science and Technology*, vol. 41, núm. 24, pp. 8233-8239.
- Winnes, H. (2010), “Air pollution from ships, emission measurements and impact assessments”, tesis de doctorado, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suecia.
- Wong, T. W., T. S. Lau, T. S. Yu, A. Neller, S. L. Wong, W. Tam y S. W. Pang (1999), “Air pollution and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases in Hong Kong”, *Occupational and Environmental Medicine*, núm. 56, pp. 679-683.
- Woodruff, T. J., J. Grillo y K. C. Schoendorf (1997), “The relationship between selected causes of postneonatal infant mortality and particulate air pollution in the United States”, *Environmental Health Perspectives*, núm. 105, pp. 608-612.
- Zanobetti, A., M. Franklin *et al.* (2009), “Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions”, *Environmental Health*, núm. 8, pp. 58-60.
- Zaveri, R. A. (1999), “A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications”, *Journal of Geophysical Research*, núm. 104 (D23), pp. 30387-30415.