

EVALUACIÓN DE EXTERNALIDADES AMBIENTALES DEL SECTOR ENERGÍA EN LAS ZONAS CRÍTICAS DE TULA Y SALAMANCA



NACIONES UNIDAS
CEPAL



SUBSECRETARÍA DE FOMENTO Y
NORMATIVIDAD AMBIENTAL

Distr.
Limitada

LC/MEX/L
26 de junio de 2007

ORIGINAL: ESPAÑOL

EVALUACIÓN DE EXTERNALIDADES AMBIENTALES DEL SECTOR ENERGÍA EN LAS ZONAS CRÍTICAS DE TULA Y SALAMANCA

Este estudio fue realizado en el Marco de un Convenio de Colaboración entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de la Organización de Naciones Unidas (ONU). Participaron la Dirección General de Energía y Actividades Extractivas de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de SEMARNAT y la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Sede Subregional de la CEPAL en México. Las opiniones contenidas en el estudio son de la responsabilidad de los especialistas que participaron en su elaboración y pueden no coincidir con las de las instituciones involucradas.



NACIONES UNIDAS
CEPAL



SUBSECRETARÍA DE FOMENTO Y
NORMATIVIDAD AMBIENTAL

ÍNDICE

	<u>Página</u>
PRESENTACIÓN.....	1
RESUMEN	3
I. ASPECTOS METODOLÓGICOS	5
A. METODOLOGÍAS VÍAS DE IMPACTO.....	6
1. Primera etapa: Caracterización de las fuentes emisoras	7
2. Segunda etapa: Dispersión de los contaminantes	7
3. Tercera etapa: Evaluación de los impactos.....	10
4. Cuarta etapa: Evaluación monetaria	13
B. NUEVO PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE EXTERNALIDADES	15
C. INCERTIDUMBRES	16
II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS	18
A. INSTALACIONES DEL SECTOR ENERGÍA.....	18
1. Selección de las fuentes fijas de emisión.....	18
2. Datos técnicos de las fuentes seleccionadas.....	20
3. Dominio local de modelación.....	22
4. Dominio regional de modelación.....	24
B. DATOS METEOROLÓGICOS	25
1. Datos meteorológicos para la dispersión local	25
2. Datos para dispersión regional.....	26
C. INVENTARIO DE EMISIONES DE MÉXICO.....	28
D. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS	29
1. Tasas de incremento de riesgo relativo.....	30
2. Tasas de incidencia y de mortalidad	31
3. Funciones exposición respuesta para mortalidad estimadas con el enfoque de pérdida de expectativa de vida	31
4. Resumen de FER aplicadas en el estudio.....	33
E. COSTOS ECONÓMICOS... ..	33

1. Morbilidad	33
2. Mortalidad.....	35
3. Otros impactos.....	36
III. RESULTADOS.....	38
A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES	38
1. Calidad del aire en el dominio local..	38
2. Calidad del aire en el dominio regional	43
3. Deposición	48
B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES	48
C. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	52
IV. CONCLUSIONES	53
ACRÓNIMOS.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	57

Cuadros:

Cuadro 1	Proceso de crudo por refinería.....	18
Cuadro 2	Tula: Datos técnicos de las fuentes consideradas	21
Cuadro 3	Salamanca: Datos técnicos de las fuentes consideradas	22
Cuadro 4	Correspondencia entre las categorías de la capa de uso de suelo de México y las del AERMET Y AERMOD	24
Cuadro 5	Incremento de riesgo relativo (IRR)	30
Cuadro 6	Tasa de incidencia y fracciones de población.....	31
Cuadro 7	Funciones exposición respuesta.....	33
Cuadro 8	Costos unitarios para casos de morbilidad.....	34
Cuadro 9	Valor estadístico de la vida para México (VEV).....	35
Cuadro 10	Valor de un año de vida perdido para México (VAVP)	36
Cuadro 11	Emisiones de CO ₂ del sector energía en las zonas de Tula y Salamanca ...	37
Cuadro 12	Valores normados para contaminantes del aire en México	39
Cuadro 13	Emisión de contaminantes considerados para la dispersión	39
Cuadro 14	Casos de estudio, datos de emisiones y concentraciones obtenidas	44
Cuadro 15	Costos externos por zona y contaminante.....	48
Cuadro 16	Externalidades de la refinación del petróleo.....	51
Cuadro 17	Externalidad en la generación de electricidad	51
Cuadro 18	Análisis de sensibilidad en la evaluación de la mortalidad	52

Gráficos:

Gráfico 1	Etapas de la metodología Vías de Impacto	6
Gráfico 2	Ciclos de vida de los contaminantes atmosféricos.....	9
Gráfico 3	Generación de energía eléctrica en México, 2004.....	19
Gráfico 4	Emisiones altas de SO ₂ y NO _x sobre México actualizadas a la base de datos	29
Gráfico 5	Emisiones bajas de SO ₂ y NO _x sobre México actualizadas a la base de datos	29
Gráfico 6	Isolíneas de concentración promedio anual de SO ₂ (µg/m ³),TULA	41
Gráfico 7	Isolíneas de concentración promedio anual de SO ₂ (µg/m ³),SALAMANCA	42
Gráfico 8	TULA, Incremento en la concentración de	45
Gráfico 9	TULA, incremento en la concentración de NO _x (µg/m ³).....	45
Gráfico 10	TULA, incremento en la concentración de PST (µg/m ³)	46
Gráfico 11	TULA, incremento en la concentración de sulfatos (µg/m ³)	46
Gráfico 12	TULA, variación en la concentración de nitratos (µg/m ³)	47
Gráfico 13	TULA, incremento en la concentración de pNO ₃ (□g/m ³)	47
Gráfico 14	Contribución por contaminante al total de las externalidades	49
Gráfico 15	Contribución por tipo de impacto al total de las externalidades.....	50
Mapa 1	Ubicación de las instalaciones seleccionadas en el estudio.....	20

PRESENTACIÓN

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales identifica la “valoración de los recursos naturales” como uno de los pilares de la política ambiental y establece como uno de sus objetivos estratégicos el detener y revertir la contaminación y la degradación de los recursos. La valoración de las externalidades ambientales de la producción de energía es necesaria para formular y aplicar la política ambiental y alcanzar los objetivos referidos. Las externalidades representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado que distorsionan la toma de decisiones económicas.

La producción y el consumo de energía conllevan impactos locales, regionales y globales sobre el medio ambiente; sus emisiones constituyen la principal fuente de contaminación del aire en el país y de emisión de gases de efecto invernadero. La regulación de sus impactos se basa en la definición de niveles máximos permisibles de emisión, que consideren los costos ambientales y fomenten la aplicación de tecnologías que reduzcan las emisiones. La elaboración y revisión de normas oficiales mexicanas para regular los procesos del sector energía requiere por lo tanto, evaluar la calidad del aire en las zonas aledañas a sus instalaciones y valorar los costos externos de la contaminación.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar las externalidades del sector energía en base a la concentración estimada de los contaminantes que se emiten en dos Zonas Críticas: Tula en el estado de Hidalgo y Salamanca en el estado de Guanajuato. En ambas zonas se tienen instalaciones para la refinación de petróleo y la generación de electricidad. El conocimiento de los costos externos de sus impactos dará bases a la Secretaría para formular un conjunto de disposiciones que coadyuven a su mitigación.

El informe comprende cuatro capítulos. En el primero se expone la metodología utilizada para evaluar las externalidades ambientales en cada uno de los dos sitios. En el segundo se analiza la información utilizada, correspondiente al año 2004, de carácter técnico, ambiental y económico, así como de salud. En el capítulo III se presentan los resultados de los niveles de concentración de contaminantes, tanto en el dominio local como regional, sus efectos en la salud, y la estimación del costo de los daños, denominados costos externos o externalidades. Las conclusiones se exponen en el capítulo IV.

El estudio se complementa con el que se publicó en el año 2004, con el título “Evaluación de externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México”, el cual evaluó las externalidades de las mayores plantas termoeléctricas del país, empleando metodologías simplificadas propuestas por el Organismo Internacional de Energía Atómica. Entre las conclusiones de dicho estudio se planteó la necesidad de considerar las emisiones de otras grandes instalaciones, en particular las refinerías de petróleo, para estimar los niveles de contaminación en las zonas críticas.

Para el presente estudio se implementaron modelos robustos para simular la dispersión de contaminantes a nivel local y regional y para la estimación de las externalidades. Su aplicación en el país fue posible gracias al esfuerzo de expertos internacionales, coordinado por la CEPAL, para actualizar las bases de datos necesarias y realizar las adecuaciones a los programas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y de la Unión Europea, para su aplicación en México. Constituye la primera aplicación de metodologías complejas para la estimación de externalidades en Latinoamérica, con modelos que se encuentran en el estado del arte del conocimiento.

Su elaboración estuvo a cargo de un grupo interdisciplinario constituido por funcionarios de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT y la Sede Subregional de la CEPAL en México. Por lo que respecta a la Subsecretaría, los integrantes fueron Ramón Carlos Torres, Director General de Energía y Actividades Extractivas, Carlos García-Moreno, Director de Emisiones a la Atmósfera, y Claudia Octaviano, Subdirectora de Refinación y Electricidad. Por parte de la CEPAL participaron Fernando Cuevas, Jefe de la Unidad de Energía y Recursos Naturales, Manuel Eugenio Rojas, Asistente de Investigación, así como las consultoras Leonor Turtos, Madeleine Sánchez y Elieza Meneses. Particular mención a Joseph V. Spadaro, de la Ecole de Mines de Paris, especialista en la metodología de Vías de Impacto, quien como consultor revisó el trabajo y aportó comentarios y sugerencias importantes. Juan Carlos Moreno, Coordinador de Investigación de la CEPAL, revisó el informe y aportó valiosos comentarios. Las opiniones y puntos de vista contenidos en el estudio no reflejan necesariamente los de las instituciones que participaron y colaboraron en su elaboración.

La realización de este estudio requirió de un esfuerzo conjunto de varias instituciones que aportaron valiosa información, conceptos, recomendaciones y sugerencias. Se extiende un reconocimiento a la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía, a la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios de la Secretaría de Salud, a la Dirección de Operación de la Comisión Federal de Electricidad y a PEMEX Refinación por sus valiosas contribuciones; al Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua por sus recomendaciones para el uso de la información meteorológica; y a las áreas de SEMARNAT que colaboraron en su realización: Dirección General de Estadística e Información Ambiental, Gestión de la Calidad del Aire y RETC e Investigación de la Contaminación Urbana y Regional esta última adscrita al Instituto Nacional de Ecología. Se extiende un agradecimiento a dichas instituciones.

Las opiniones contenidas en el estudio son de la responsabilidad de los especialistas que participaron en su elaboración y pueden no coincidir con las de las instituciones involucradas.

Jorge Máttar
Oficial a cargo y Director Adjunto de la Subsede
de la CEPAL en México
NACIONES UNIDAS

Ing. Sandra Denisse Herrera Flores
Subsecretaria de Fomento y Normatividad
Ambiental
SEMARNAT

RESUMEN

El propósito de este trabajo es estimar las externalidades de la operación de las instalaciones del sector energía en dos Zonas consideradas críticas desde el punto de vista ambiental: Tula, en Hidalgo, y Salamanca, en Guanajuato. Estas zonas cuentan cada una con una central termoeléctrica y una refinería de petróleo.

A fin de evaluar dichas externalidades, se utilizó la Metodología de Vías de Impacto, pero con programas computacionales diferentes a estudios previos. Estos modelos dan una mayor capacidad de simulación, así como una mejorada flexibilidad en las opciones ofrecidas. Las principales mejoras fueron las siguientes: i) uso del sistema de modelos AERMOD de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos de América para simular la dispersión local; ii) uso del modelo Windrose Model Interpreter (WMI) para la modelación del dominio regional; iii) utilización de una base de datos de CEPAL con información regional de meteorología y de contaminantes, que cubre la zona de México, Centroamérica y el Caribe; iv) un conjunto actualizado de Funciones Exposición-Respuesta para estimar los impactos en la salud humana; v) la aplicación de la metodología de pérdida de expectativa de vida en México para evaluar el impacto de la mortalidad y para su valoración económica, y vi) uso de un nuevo programa computacional que implementa las mejoras anteriormente mencionadas.

La aplicación de la metodología seleccionada requirió una serie de datos técnicos, económicos y de salud, por lo que fue necesario considerar el año 2004 para el cual se dispuso de la información requerida. Se obtuvo información geográfica y meteorológica de las dos zonas críticas estudiadas, así como las características técnicas de las plantas termoeléctricas y las refinerías, incluyendo el inventario de los contaminantes emitidos. El análisis se limitó a considerar las emisiones de partículas, SO_2 y NO_x , sin incluir las emisiones “corriente arriba”. Se incluyó una estimación del costo asociado a la emisión de gases de efecto invernadero.

Para estimar el impacto en la salud se utilizaron dos meta-análisis y un estudio independiente. El primero de ellos es el meta-análisis realizado en el marco del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México. El segundo meta-análisis, elaborado por Stieb y otros, 2002 se utilizó para obtener el IRR para evaluar la mortalidad aguda por SO_2 . Para el caso de las admisiones hospitalarias por SO_2 , se ocupó un estudio independiente, Spix y otros, 1998, al no contar con un meta-análisis. En el marco de este estudio se aplicó por primera vez en México la metodología propuesta por Leskell y Rabl en Europa para la estimación de las pendientes exposición–respuesta asociadas a la mortalidad en años de vida perdidos.

Se actualizó también la información sobre costos de morbilidad y mortalidad. El costo directo de enfermedad utilizado corresponde al nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), estimado por el Instituto Nacional de Ecología y el Instituto Nacional de Salud Pública. La pérdida de productividad se calculó considerando la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares y el salario mínimo general promedio nacional para 2004. Finalmente al no contar con estimados de Voluntad a Pagar para efectos de morbilidad se transfirieron los valores de ExternE (2005) ajustando por relación de ingresos entre México y la Unión Europea.

Para valorar la mortalidad se utilizó el Valor Estadístico de la Vida (VEV) estimado para México por Hammit e Ibararán, en un documento publicado en agosto de 2006 y con dicho valor se determinó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP) con la metodología propuesta por Spadaro.

La concentración estimada para SO_2 en el dominio local excede el valor establecido por la norma de calidad del aire en un número alto de receptores en ambas zonas. Por su parte, las concentraciones promedio estimadas para PM_{10} y NO_x en el dominio local están, en lo general, dentro de la norma de salud de referencia.

Las externalidades ambientales del sector energía, para el año 2004, se estimaron en 868 y 204 millones de dólares en las zonas de Tula y Salamanca, respectivamente. Estos costos incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, o en el calentamiento global. Si se considera el impacto por cambio climático, las externalidades ambientales se incrementan en 266 millones de dólares, considerando el estimado medio de costos de mitigación en México, de 18 dólares por tonelada de CO_2 .

El contaminante de mayor impacto es el SO_2 ; su aporte, como contaminante primario y secundario en forma de sulfatos, constituye el 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 Km.) es mayor pues los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Considerando el costo externo de cada refinería, de 418,6 y 114,4 millones de dólares, respectivamente, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo procesado para Tula y de 1,58 para Salamanca. Como referencia, si se considera un precio de 33 dólares por barril de petróleo crudo, la externalidad representaría un 11,9% y 4,8%, respectivamente para Tula y Salamanca.

Para la generación de electricidad en las dos zonas, durante el año 2004, se estimó un costo externo de 402,5 y 85,9 millones de dólares para Tula y Salamanca, respectivamente. La externalidad es de 3,63 y 2,70 centavos de dólar por kWh generado, para Tula y Salamanca, respectivamente; si se considera un valor de referencia de 5,8 centavos de dólar por kWh, como costo de producción en las centrales termoeléctricas de vapor, los costos externos representarían un 62,6% y 46,6% del costo de generación. Estos resultados son consistentes con la estimación de externalidades de la generación de electricidad en el principal estudio de referencia de Europa, el Proyecto ExternE.

La estimación de los costos externos conlleva un nivel de incertidumbre alto, debido a la cantidad de variables involucradas y a los diferentes supuestos, particularmente con respecto a los efectos de los contaminantes en la salud y a los costos para la valoración. Los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre de la metodología, lo que implica que el valor real podría ser tres a cinco veces menor o mayor que el valor estimado. A pesar de las incertidumbres asociadas en la valoración de externalidades, el presente estudio ratifica que los beneficios ambientales que se obtendrán de la reducción de emisiones son contundentes.

I. ASPECTOS METODOLOGICOS

Las externalidades representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado que distorsionan las decisiones económicas óptimas. En el sector energético, la actividad de refinación de petróleo así como la producción de electricidad con base a combustibles fósiles, produce diferentes impactos. Entre ellos se puede mencionar, a nivel local, la contaminación de áreas urbano-industriales, a nivel regional, la lluvia o deposición ácida, y a nivel global, el cambio climático. El valor de estos impactos de la actividad energética no se incorpora al precio del bien producido, por su efecto económico.

Para la valoración de las externalidades existen diferentes metodologías, incluso algunas que aplican sólo un tratamiento cualitativo. La metodología más aceptada es la de “Vías de Impacto”, la cual fue utilizada por la Unión Europea en su proyecto ExternE. Para su aplicación se han desarrollado diferentes modelos computacionales, algunos muy detallados con altos requerimientos de información, otros más simplificados que requieren menos información, pero que en contrapartida, recurren a una serie de aproximaciones para las diversas estimaciones. Entre estos últimos se encuentra el modelo SIMPACTS¹ del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA.

Dicho modelo se utilizó en el estudio previo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), titulado: “Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México”² publicado en noviembre de 2004. En el mencionado estudio se encuentra una exposición detallada de la Metodología de Vías de Impacto, así como los supuestos y aproximaciones que utiliza el modelo SIMPACTS para obtener una evaluación de externalidades.

El presente estudio evalúa las externalidades sin considerar los supuestos de la metodología simplificada ya que se emplearon modelos más detallados para el análisis de la dispersión de contaminantes y se utilizó información real sobre la distribución de la población en el dominio regional. Las principales mejoras respecto al modelo simplificado serán descritas en este capítulo.

La selección de un modelo simplificado o de modelos más detallados depende del alcance del estudio que se pretende realizar. La primera evaluación de externalidades mencionada anteriormente se realizó con el modelo simplificado, considerando un número amplio de fuentes y zonas de estudio. Derivado de esos análisis, se decidió aplicar modelos más detallados de dispersión en dos zonas críticas, en el presente estudio.

¹ OIEA, 2003, SIMPACTS.

² Disponible en la página Web de la SEMARNAT, www.semarnat.gob.mx



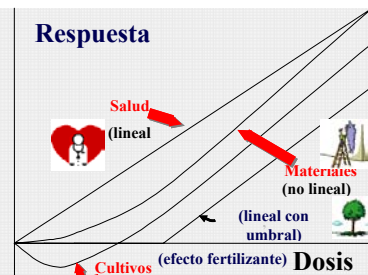

A. METODOLOGIA DE VIAS DE IMPACTO

La metodología de Vías de Impacto comprende cuatro etapas (véase el gráfico 1):

- 1) Caracterización de la fuente emisora: localización, datos de la chimenea, flujos de contaminantes emitidos, entre otros.
- 2) Dispersión: cálculo del incremento de las concentraciones de los contaminantes emitidos en las regiones afectadas (dominio local y regional), utilizando modelos de dispersión atmosférica.
- 3) Evaluación de impactos: selección de las funciones exposición-respuesta, las cuales relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud con una exposición dada a un contaminante.
- 4) Costos: evaluación monetaria de los impactos en la salud, tanto de morbilidad como de mortalidad.

Gráfico 1

ETAPAS DE LA METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO

1. Caracterización de la fuente	2. Dispersión de contaminantes	3. Evaluación de impactos	4. Valoración económica
 <ul style="list-style-type: none"> -Localización -Tipo de chimenea -Parámetros de emisión 	 <ul style="list-style-type: none"> -Meteorología -Modelos de dispersión 	 <ul style="list-style-type: none"> -Elección de las funciones exposición-respuesta 	 <ul style="list-style-type: none"> -Métodos de valoración -Costo de los daños

En el presente análisis se utilizó también la Metodología de Vías de Impacto, pero con modelos computacionales diferentes al estudio anteriormente mencionado, los cuales dan una mejor capacidad de simulación y mayor flexibilidad en las opciones ofrecidas. Los cambios pueden resumirse de la siguiente forma:

- 1) La dispersión local se resuelve con el sistema de modelos AERMOD, en lugar del modelo ISCLT2, ambos de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos de América. El primero tiene en cuenta la topografía del terreno, el uso de los suelos, la deposición seca y húmeda de los contaminantes, entre otros aspectos importantes.
- 2) Para la dispersión regional se utiliza el modelo Windrose Model Interpreter (WMI), en sustitución del enfoque simplificado considerado en el UWM (Uniform World Model)

que utiliza el modelo SIMPACTS del OIEA. Se utilizó una base de datos con información regional, recientemente integrada por la CEPAL, la cual cubre la región de México, Centroamérica y el Caribe.

- 3) Se seleccionó un conjunto actualizado de Funciones Exposición-Respuesta para estimar los impactos en la salud humana.
- 4) Se utilizó un nuevo programa computacional que implementa todas las mejoras anteriormente mencionadas, llamado: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas, SEIA, el cual permite integrar los resultados de los modelos de dispersión AERMOD y el WTM con la información georeferenciada de población y salud en México para aplicar la ecuación de función del daño y la valoración de externalidades.

El programa³ y la base de datos mencionados fueron desarrollados por especialistas de Cuba Energía dentro de un proyecto de investigación entre el Instituto Nacional de Ecología (INE) de la SEMARNAT, Cuba Energía y la sede subregional de la CEPAL en México.

A continuación se describe cada una de las etapas de la metodología utilizada:

1. Caracterización de las fuentes emisoras

El primer paso consiste en obtener los datos técnicos de las fuentes de emisión, tanto de la refinería como de la central de generación eléctrica, incluyendo sus coordenadas geográficas, características físicas y un inventario detallado de los contaminantes emitidos. En el caso de la refinería existen numerosos puntos de emisión (calderas, quemadores elevados, quemadores de fosa, etc.), mientras que en la central termoeléctrica se tienen calderas y turbinas de combustión.

2. Dispersión de contaminantes atmosféricos

a) Dispersión local

Para analizar la dispersión local de contaminantes se implementó el Sistema AERMOD de la EPA, el cual cuenta con tres componentes el AERMAP, el AERMET y el AERMOD. Se usaron los programas de la EPA⁴ haciendo las adecuaciones pertinentes para las condiciones de México, y desarrollando algunas herramientas de cálculo complementarias.

La EPA estableció el AERMOD como el modelo de uso recomendado para el análisis de la dispersión de contaminantes a escala local, a finales de 2005, en sustitución del ISCST3 (Industrial Source Complex Short-Term 3), hasta ese momento usado.⁵ El AERMOD representa

³ El programa se encuentra en fase de desarrollo, en particular la interfase con el usuario, el tratamiento de errores, la ayuda en línea, entre otros. Será puesto a disposición de los países de la región por la CEPAL cuando esté concluido.

⁴ Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric, http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm#aermod

⁵ United States Environmental Protection Agency (2005)

un sólido y significativo avance respecto al ISCST3. Incorpora las técnicas más avanzadas de parametrización de la capa límite planetaria, dispersión convectiva, formulación de la elevación de la pluma e interacciones complejas del terreno con la pluma. En comparación con el ISCST3, AERMOD contiene nuevos o mejorados algoritmos para: i) la dispersión tanto en la capa límite estable como convectiva; ii) flotabilidad y elevación de la pluma; iii) penetración de la pluma dentro de la inversión elevada; iv) tratamiento de fuentes elevadas y bajas; v) perfiles verticales de viento, temperatura y turbulencia y vi) tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos. Una de las ventajas fundamentales del AERMOD es la modelación de terrenos complejos, lo cual es muy conveniente para las zonas que son estudiadas en el presente trabajo.

El sistema de modelos AERMOD⁶ incluye dos pre-procesadores de datos de entrada: el AERMAP⁷, para los datos del terreno, y el AERMET⁸, para los datos meteorológicos. Con el primero, a partir de un Modelo Digital de Elevación de la zona a estudiar, se obtiene la altura respecto al nivel del mar de cada fuente y receptor considerados. Para los receptores se requiere adicionalmente la configuración topográfica entre la fuente y los receptores, con el objetivo de confirmar si hay elevaciones intermedias superiores a la altura del receptor. Por su parte, el AERMET usa las mediciones meteorológicas representativas de la zona en estudio para calcular ciertos parámetros de la capa límite que se utilizan para estimar los perfiles de viento, turbulencia y temperaturas. Finalmente, el procesamiento de las capas de uso de suelo se realizó con un Sistema de Información Geográfica, ArcGIS y la información georeferenciada proporcionada por el INEGI bajo convenio institucional con SEMARNAT.

b) Dispersión regional

Para evaluar la dispersión en el dominio regional se utilizó el Windrose Model Interpreter (WMI) que se basa en el Windrose Trajectory Model (WTM).⁹ Este es un modelo lagrangeano, climatológico, receptor-orientado y de tipo rosa de los vientos en 24 sectores, de 15° cada uno. El tope de la capa de mezcla se considera de una altura promedio anual de 800 m.

El comportamiento de los contaminantes es descrito usando una representación a largo plazo de los procesos relevantes: emisión, dispersión, transformaciones físico químicas y deposición. Se obtiene sumando los resultados de las 24 trayectorias que arriban al mismo, ponderadas por las frecuencias de los vientos en cada sector. Cada trayectoria es seguida durante 96 horas antes de arribar a cada sitio receptor. Este procedimiento del WMI, en comparación con los modelos fuente-orientados, tiene la ventaja de que para cada sitio receptor se considera simultáneamente el efecto de todas las fuentes y no cada una por separado, lo cual puede ser significativo en estudios donde las reacciones que dan lugar a contaminantes secundarios son importantes y dependen de las concentraciones de contaminantes primarios existentes.

Los procesos químicos que considera el modelo se muestran en el gráfico 2, en el cual PM identifica al material particulado, NA a los aerosoles de nitrato no especificados (también identificado como pNO₃ en este informe). El aerosol de nitrato total (recuadro con líneas

⁶ United States Environmental Protection Agency (2004b)

⁷ United States Environmental Protection Agency (2004c)

⁸ United States Environmental Protection Agency (2004a)

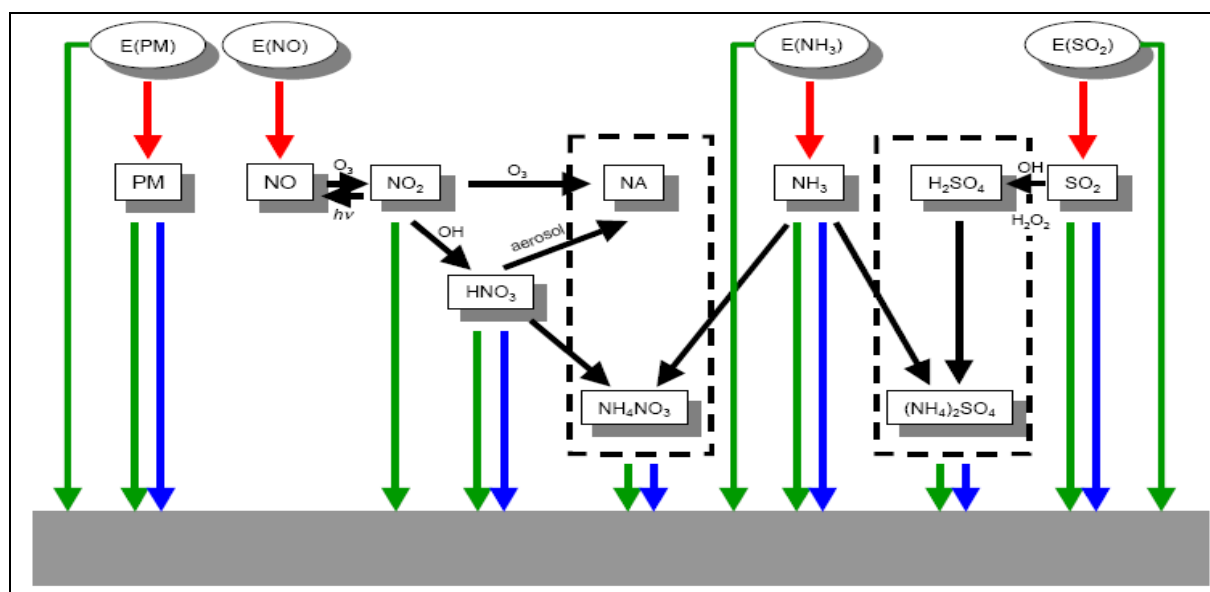
⁹ Trukenmüller, A and R Friedrich 1995.

discontinuas a la izquierda) incluye NA y NH_4NO_3 y el aerosol de sulfato total (recuadro con líneas discontinuas a la derecha) incluye H_2SO_4 y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. El proceso de emisión está indicado por flechas rojas, las transformaciones químicas por flechas negras, la deposición seca y la deposición húmeda están indicadas por flechas verdes y azules respectivamente.

Al ejecutar el WMI para un escenario de emisiones dado se consideran las emisiones de cada celda como una fuente, que a su vez interactúan con las emisiones provenientes de las celdas restantes. Es por esto que para evaluar una fuente en particular se “corre” el WMI dos veces: a) el “caso base”, sin tener en cuenta las emisiones de la fuente (o fuentes) que se desea estudiar, b) el “caso real” que incluye las emisiones del “caso base” más las emisiones de la fuente que se estudia.

Gráfico 2

CICLOS DE VIDA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS



Fuente: Trukenmuller y otros, 2001.

Finalmente se restan las concentraciones obtenidas para cada contaminante en el caso base respecto al real, obteniéndose generalmente un incremento en las concentraciones de los contaminantes estudiados, aunque pueden obtenerse decrementos para alguno de los contaminantes secundarios, en circunstancias que desfavorezcan la formación del mismo con respecto a las condiciones del caso base.

El modelo WTM requiere una base de datos meteorológicos y de emisiones que cubre el dominio regional, y que incluye para cada una de las celdas la información siguiente: i) rosa de los vientos representada por 49 valores: 24 valores que representan la probabilidad de que el viento sople en 24 direcciones de 15 grados cada una y otros 24 valores de velocidad media del viento (m/s) en cada una de las direcciones, además de un valor medio único para la velocidad del viento sobre la celda; ii) precipitaciones promedio anuales; iii) emisiones altas y bajas de

NO_x y SO₂; iv) emisiones de NH₃; v) altura del punto medio de la celda sobre el nivel del terreno, y vi) población total.

c) Características de los diferentes modelos

Algunas características de los modelos se listan a continuación:

i) Tanto el AERMOD como el WMI consideran una sola capa en la estructura vertical de la atmósfera, que se extiende desde el nivel del terreno hasta la altura de la capa límite planetaria.

ii) El modelo WMI es del tipo climatológico lo que implica que todos los datos y por supuesto los resultados son valores promedios anuales, en celdas de 55 x 55 km. Los datos de emisiones, precipitaciones y vientos son obtenidos de bases de datos internacionales.

iii) El AERMOD no considera la formación de especies secundarias, por lo que en el estudio no se evalúa el impacto de sulfatos y nitratos en el dominio local. El WMI sí estima una concentración de sulfatos y nitratos en la celda en la que se encuentran las fuentes de emisión, pero no se considera en este estudio porque en general, los modelos empleados para el análisis de la dispersión regional sobreestiman las concentraciones en el dominio local.

3. Evaluación de impactos

La tercera etapa de la metodología Vías de Impacto tiene por objeto cuantificar los impactos, en este caso de las instalaciones del sector energía sobre el medio ambiente. A continuación se describe la metodología de evaluación de impactos en salud y se explica el tratamiento de otros impactos, como el cambio climático, entre otros.

a) Impacto en salud

El elemento central de la metodología para evaluar el impacto en salud son las funciones exposición-respuesta (FER) que relacionan la exposición a un contaminante con una respuesta o efecto negativo en la salud. La exposición depende fundamentalmente de la concentración¹⁰ de los contaminantes en el ambiente, determinada previamente. La respuesta se cuantifica mediante estudios toxicológicos, clínicos y epidemiológicos, los cuales relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud de un grupo poblacional con la exposición dada a un contaminante.

El estudio considera que las funciones exposición-respuesta para la evaluación de los impactos en salud son lineales y sin umbral y obedecen a la siguiente ecuación:

¹⁰ Se emplea en la literatura internacional también el término función concentración-respuesta. En rigor debería considerarse la dosis de exposición; es decir, la concentración de contaminante que es inhalada, medida en cada sujeto receptor; sin embargo, cuando no es posible su determinación se emplean las concentraciones en el ambiente.

$$I_i = \sum_j S_{FERi} * \Delta C_j * POB_j \quad [1]$$

donde: I_i : impacto en salud i ; se expresa en número de casos

S_{FERi} : pendiente de la función exposición-respuesta de un efecto i ; se expresa en número de casos / (persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ΔC_j : incremento en la concentración de un contaminante en la localización j ; se expresa en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

POB_j : población en riesgo en la localización j ; se expresa en número de personas

La pendiente de la función, S_{FER} , se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{FER} = IRR * I_{ref}, \quad [2]$$

donde: IRR ; es el incremento de riesgo relativo, se expresa en porcentaje de incremento en el número de casos para un efecto en salud específico por cada $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de contaminante.

I_{ref} ; es la tasa natural de incidencia (tasa basal); se expresa en número de casos por persona al año.

El incremento de riesgo relativo, IRR , coeficiente estimado a partir de los estudios epidemiológicos, es el cambio en la tasa natural de incidencia por unidad de cambio en la concentración ambiente ($\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3$). La tasa natural de incidencia es el número de nuevos casos de una enfermedad o número de defunciones, en un año, en un grupo de riesgo con respecto a la población total (porcentaje de adultos mayores, niños, etc.). En consecuencia, la pendiente de la función se expresa en casos anuales de enfermedad o muerte, por grupo de riesgo, por unidad de concentración de contaminante en el aire (casos/(año-persona- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)).

Al igual que en el estudio anterior, la evaluación del impacto en la salud se circunscribió al daño por la exposición a los contaminantes en el aire que son críticos, por su potencial impacto en la salud: las partículas (PM_{10}), sulfatos y nitratos y el dióxido de azufre. A fin de evaluar los efectos de los sulfatos y nitratos, contaminantes secundarios formados a partir de sus precursores primarios SO_2 y NO_2 , se siguieron los nuevos criterios de ExternE¹¹ publicados en el 2005, que consideran las siguientes relaciones de toxicidad para estimar las pendientes de las funciones para los sulfatos y nitratos:

- toxicidad de sulfatos igual a la de PM_{10} ($S_{FER} \text{ sulfatos} = S_{FER} \text{ PM}_{10}$),
- toxicidad de nitratos igual a la mitad de PM_{10} ($S_{FER} \text{ nitratos} = 0.5 S_{FER} \text{ PM}_{10}$).

El impacto en salud estimado en el estudio anterior tuvo como componente principal la mortalidad crónica,¹² resultado consistente con estudios realizados a nivel internacional. Se aplicó

¹¹ European Commission, ExternE (2005).

¹² El término mortalidad crónica se aplica a los casos de muerte ocasionados por la exposición prolongada a la contaminación. Para determinar el valor del IRR correspondiente es necesario realizar estudios muy complejos, de largo plazo, denominados “estudios cohortes”. Requieren el monitoreo de la exposición a la contaminación de poblaciones de estudio y del control de variables tales como edad, sexo,

el enfoque de años de vida perdidos y, al no disponer de información para el país, se asumió que una muerte estadística equivale a 10 años de vida perdidos, valor promedio entre los obtenidos para Europa y Estados Unidos, de 11 y 9 años respectivamente.¹³ Por la relevancia de este impacto, el presente estudio profundizó en el análisis de la mortalidad crónica con el fin de afinar los estimados y utilizar las estadísticas del país en la determinación de la pérdida de expectativa de vida.

Existen dos enfoques para determinar la pendiente de la función exposición- respuesta que expresa el impacto de la contaminación atmosférica en la mortalidad: i) casos de mortalidad evitados y ii) pérdida de expectativa de vida. El primer enfoque estima las FER directamente a partir de los IRR determinados en los estudios epidemiológicos y utiliza como unidad de medida el número de muertes que estadísticamente se correlacionan con incrementos en la contaminación. El segundo enfoque, estima la pérdida de expectativa de vida asociada a la exposición, aplicando una metodología alterna para expresar las FER en años de vida perdidos (AVP), en lugar de estimar el número de muertes.

En este estudio se aplicó el segundo enfoque de pérdida de expectativa de vida al igual que en el proyecto ExternE; la pendiente de la función exposición respuesta, S_{FER} , en AVP/(persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se obtuvo a partir del riesgo relativo calculado en los estudios de cohorte y la pérdida de la expectativa de vida asociada a un incremento de dicho riesgo.¹⁴

Finalmente por lo que hace a la mortalidad aguda,¹⁵ bajo el enfoque de pérdida de expectativa de vida, se considera que una muerte aguda equivale a 0,5 años de vida perdidos. Solamente se utiliza una FER de mortalidad aguda con el fin de valorar el impacto del SO_2 . En el caso de las partículas se evalúa únicamente la mortalidad por la exposición de largo plazo (mortalidad crónica) para evitar el doble conteo.

b) Otros impactos

Además de los efectos en la salud, los contaminantes atmosféricos tienen impacto en el cambio climático, en los ecosistemas y en los materiales en general.

Por lo que hace al impacto en el cambio climático las metodologías para su evaluación se basan en dos enfoques: i) cuantificación del daño y ii) costos de evitar el daño. Bajo el primer enfoque se cuantifican algunos de los impactos atribuibles al cambio climático tales como el impacto en: zonas costeras, agrícolas y forestales, en recursos hídricos y ecosistemas naturales, y en la salud de la población (por ejemplo casos de defunción por estrés de calor y frío y malaria). El proyecto ExternE utiliza la última versión del Modelo FUND (Climate Framework for

peso, estatura, dieta, hábitos (tabaco, alcohol), entre otros. Por los recursos que implica su realización hay pocos estudios, principalmente en Estados Unidos.

¹³ Estos valores fueron estimados por Spadaro.

¹⁴ Leksell y Rabl (2001)

¹⁵ Se denomina “mortalidad aguda” a aquella que se asocia estadísticamente a episodios de exposición a la contaminación en estudios de “series de tiempo”, y “mortalidad crónica”, a la derivada de la exposición a la contaminación en tiempos largos en estudios de “cohorte”.

Uncertainty, Negotiation and Distribution) que evalúa estos impactos en 16 regiones del mundo.¹⁶

El segundo enfoque se basa en la estimación de los costos de mitigación de emisiones, pues a pesar de los esfuerzos por evaluar el daño, éste aún no ha sido considerado en su totalidad. Este enfoque considera una meta de reducción de emisiones (por ejemplo, las metas establecidas por país en el Protocolo de Kyoto) y define las opciones tecnológicas posibles para reducir emisiones a dicho nivel. La valuación económica asigna un costo de reducción por tonelada a cada opción.

El daño a los ecosistemas se puede evaluar a partir de la carga crítica de un contaminante que puede afectar el equilibrio del ecosistema. La carga crítica se define como “la máxima deposición de compuestos acidificantes que no provoca cambios químicos en los suelos, y que por tanto, no provoca efectos negativos en la estructura y en el funcionamiento de los ecosistemas”.¹⁷ La deposición de compuestos de azufre y nitrógeno causa acidificación de los ecosistemas acuáticos y terrestres que se traduce, entre otros impactos, en suelos menos fértiles y en afectaciones a los organismos acuáticos que no pueden tolerar las condiciones de acidez. Estos efectos, pueden pasar inadvertidos por algún tiempo hasta que el umbral de carga crítica es sobrepasado y el deterioro es visible, con los costos económicos y sociales derivados. Para cuantificar el daño en ecosistemas se considera la superficie que rebasa las cargas críticas por la deposición de contaminantes (SO₂ y NO_x) proveniente de las emisiones generadas en la producción de energía.

Para valorar el impacto en materiales existen algunas funciones exposición-respuesta que determinan por ejemplo, la corrosión adicional inducida por la deposición de SO₂ en materiales de construcción. Este estudio no considera este impacto.

4. Evaluación monetaria

La cuarta y última etapa de la metodología Vías de impacto tiene por objeto estimar el costo económico de los impactos, utilizando la ecuación siguiente:

$$D_i = I_i \cdot CU_i \quad [3]$$

donde: D_i , costo estimado del daño para un impacto i , se expresa en dólares por año

I_i , impacto en salud i calculado por la ecuación [1]; se expresa en casos por año

CU_i , costo unitario de un impacto i , se expresa en dólares por año (por ejemplo, costo por cada caso).

Con este fin, se aplica la teoría económica para determinar la pérdida de bienestar en que incurre la sociedad, en términos de su valor monetario. El supuesto fundamental que subyace a esta valoración es que los individuos son capaces de determinar el beneficio que reciben del

¹⁶ Véase European Commission, ExternE (2005), *Methodology Update, 2005*, p.p. 181-188.

¹⁷ WHO (2000)

consumo de un bien o servicio, y que por tanto, están dispuestos a intercambiar su valor monetario en la medida que se mantenga su nivel de bienestar.

a) Valoración de impactos en la salud

El valor total para la sociedad relacionado con un efecto adverso en salud tiene dos componentes: el primero el costo de la enfermedad para el paciente, que incluye el valor total de los recursos para su tratamiento (medicamentos, honorarios, etc.) y la pérdida de productividad por el tiempo que se está enfermo y el segundo componente, que se refiere al valor que asigna una persona a la posibilidad de evitar el dolor y el sufrimiento y en términos generales a estar sano (voluntad a pagar, VAP)¹⁸. El primer componente puede valorarse con precios de mercado mientras que el segundo no tiene precios de mercado que puedan servir como referencia directa.

El estudio anterior de SEMARNAT y CEPAL utilizó los dos tipos de valoración en dependencia del impacto analizado. En el caso de la morbilidad, se consideraron únicamente los costos directos de la enfermedad y la pérdida de productividad (a través de precios de mercado en México). Para el caso de la mortalidad se utilizaron valores de voluntad a pagar (transferidos de Europa). En el presente estudio, se decidió homogeneizar las técnicas de valoración e incluir también la voluntad a pagar en los costos asociados a la morbilidad.¹⁹ Cuando no se contó con valores de VAP de estudios nacionales, se utilizó la técnica de transferencia de costos en base a las relaciones de ingreso, entre Europa y México.

Se hicieron también mejoras a la valoración de la mortalidad en este estudio, por tener el mayor peso en las externalidades. Se tomó como referencia un estudio reciente que determina el Valor Estadístico de la Vida, VEV²⁰ para el caso de México a partir de compensaciones salariales.²¹ A partir de dicho valor, se estimó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP), en base a la metodología propuesta por Leksell y Rabl, 2001 a fin de estimar el costo de la pérdida de vida por exposición prolongada a la contaminación atmosférica (mortalidad crónica).

En el estudio de sensibilidad se presentan los resultados obtenidos al considerar otros enfoques para valorar la mortalidad, por su importante contribución al total de los costos externos. Se analizó la mortalidad bajo el enfoque de número de casos en lugar de años de vida perdidos, para lo cual se utilizó el valor estadístico de la vida estimado para México en un primer análisis, y en el segundo, los resultados de transferir el VEV de Estados Unidos, valor que proviene del análisis de 26 estudios, que utilizan tanto la técnica de precios hedónicos como la valoración contingente.

¹⁸ Por la naturaleza del bien, este segundo componente es altamente subjetivo, y está evidentemente limitado por el ingreso disponible del individuo. Sin embargo, es la técnica recomendada a nivel internacional para valorar este tipo de “bienes”.

¹⁹ El estudio anterior omitió la VAP por impactos en morbilidad, con el fin de obtener un estimado conservador. Sin embargo, expertos en la materia han sugerido que es necesario sumar la VAP, con el fin de tener un estimado completo de la pérdida de bienestar social.

²⁰ El Valor Estadístico de la Vida (VEV) es el valor que una comunidad está dispuesta a pagar (VAP) para reducir el riesgo de que ocurra una muerte. Por ejemplo, si en una comunidad cada persona está dispuesta a pagar 50 dólares por medidas para evitar una muerte por cada 10.000 habitantes, el VEV sería \$50 dividido entre 1/10.000, o sea, 500.000 dólares.

²¹ Hammit e Ibarrarán (2006)

b) Valoración de otros impactos

La metodología de vías de impacto requiere estimar la magnitud del impacto en términos físicos y después la valoración de esos impactos. Este enfoque ha sido aplicado para valorar los impactos en salud, pero no ha sido posible su aplicación para valorar los impactos en los ecosistemas o en el cambio climático, porque la estimación de los impactos físicos es aún limitada.

El proyecto ExternE, estimó los daños en el cambio climático a través de modelos, en el orden de nueve euros por tonelada de CO₂, estimado conservador, en el sentido de que únicamente se incluyeron en la valoración los daños que fue posible cuantificar con un grado de confianza razonable. Para la valoración de los impactos en el cambio climático ExternE consideró en lugar del costo del daño, el costo de reducir emisiones para Europa, tomando como meta las establecidas por el Protocolo de Kyoto. Dicho costo se encuentra en un rango de entre cinco y 20 euros por tonelada de CO₂. En adición, como referencia utiliza el precio que tiene una tonelada de CO₂ en el mercado derivado del Protocolo de Kyoto, que en octubre de 2005 fue de 24 euros por tonelada de CO₂.²² ExternE considera un valor de 19 euros por ton de CO₂, el cual corresponde a un precio sombra, basado en los costos de mitigar emisiones en los países europeos para alcanzar un 8% de reducción respecto a su línea base del año 1990, de conformidad con las metas establecidas en el Protocolo de Kyoto para el periodo 2008-2012.

Por lo que hace a la valoración de ecosistemas ExternE determinó a través de precios sombra el valor de mantener una hectárea de ecosistema no afectado (una hectárea en la que no se rebasen las cargas críticas de contaminante). Dicho estudio considera que la voluntad a pagar por mantener una hectárea de ecosistema inalterado se encuentra en el rango de 63 a 350 euros/ha para Europa y entre 338 a 674 euros para la Unión Europea (EU15).

B. NUEVO PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS EXTERNALIDADES

Para la estimación de las externalidades se utilizó el programa denominado Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas, basado en la metodología de Vías de Impacto. Está integrado por dos módulos:

- 1) ExtLocal para el cálculo de las externalidades en el dominio local, a partir de los resultados de estudios de dispersión detallados, usando el ISCST3 o el AERMOD. En el caso de que el usuario no cuente con la información necesaria para modelar la dispersión, el modelo permite, al igual que el modelo SIMPACTS, utilizar los supuestos del modelo simplificado.
- 2) ExtRegional para el cálculo de las externalidades en el dominio regional, a partir de los resultados del WMI.

²² Última fecha de actualización de ExternE. Cabe señalar que posteriormente han habido fluctuaciones importantes del precio de una tonelada de CO₂ en Europa.

El Programa tiene varias ventajas, entre las más importantes se encuentran las siguientes: es flexible en lo que se refiere a la modelación de la dispersión en el dominio local, pues permite utilizar modelos que están en el estado del arte, definir las dimensiones del dominio local y de sus celdas sin sujetarse a la rejilla regional así como evaluar varias fuentes que se encuentren dentro del dominio local; por lo que hace a la dispersión regional permite evaluarla al detalle que hace ExternE, adaptando la meteorología, la población y las emisiones de fondo al dominio de la región de México, Centroamérica y el Caribe.

El sistema también permite comparar los resultados de análisis simplificados y detallados. El usuario puede identificar el aporte a las externalidades de los contaminantes primarios, desglosado en el dominio local y regional. Finalmente, permite analizar la aportación de los contaminantes secundarios en el dominio regional, y contar con información sobre las estimaciones de los impactos de los contaminantes secundarios en el dominio local, aunque éstos últimos no son sumados al total de externalidades, toda vez que el aporte de dichos contaminantes en un rango de 50 km. requiere de modelos de dispersión más complejos.

C. INCERTIDUMBRES ²³

La función general de los costos externos en la Metodología Vías de Impacto es un proceso multiplicativo que comprende cuatro variables independientes aleatorias: el incremento de la concentración, la función exposición–respuesta, la densidad de la población y el costo económico. Para este tipo de función general, de acuerdo con el teorema del límite central de estadísticas, la distribución natural es lognormal, la cual se define por la media geométrica μ_g y la desviación geométrica standard σ_g . El intervalo de confiabilidad del 68% se expresa como: $[\mu_g/\sigma_g, \mu_g*\sigma_g]$.

Por lo tanto, la incertidumbre en la evaluación de los costos externos es muy grande, con valores típicos de desviación geométrica estándar entre 3 y 5. Esto significa que el valor real podría ser 3 a 5 veces menor o mayor que el estimado de la media geométrica, de forma que el intervalo entre el valor superior y el valor inferior de los costos varía por un orden de magnitud. En el caso de los contaminantes primarios (PM_{10} , SO_2 y NO_x), dicha desviación se ubica alrededor de 3, siendo mayor en los contaminantes secundarios, particularmente el ozono. Sin embargo, tal como lo expresan Rabl y Spadaro: “...un estimado con una incertidumbre muy alta es mejor que no tener ninguno”.

La incertidumbre en la evaluación de los costos externos se debe a la variabilidad inherente a los parámetros o procesos involucrados en la Metodología de Vías de Impacto. Se pueden mencionar las siguientes:

- 1) Incertidumbre en los datos, por ejemplo, la ausencia de información meteorológica detallada, la complejidad del terreno, la velocidad de remoción de los contaminantes, la

²³ Rabl y Spadaro (1999). Los autores son reconocidos expertos en la Metodología de Vías de Impacto, participantes en el Proyecto ExternE por la Escuela de Minas de París.

pendiente de las funciones exposición–respuesta, el costo de un día de actividad restringida, entre otros. Los análisis técnicos y los datos disponibles sobre las emisiones de los principales contaminantes (CO_2 , PM_{10} , SO_2 y NO_x) sugieren que la incertidumbre es baja. La fiabilidad de los datos recopilados por los operadores y los equipos de las estaciones meteorológicas, en cambio, no siempre es alta.

- 2) Incertidumbre en los modelos de simulación de la dispersión atmosférica y de las transformaciones químicas, las suposiciones acerca de las relaciones causales entre un contaminante y su impacto en la salud, las suposiciones sobre la forma de la función exposición–respuesta (con o sin umbral), la transferencia de dicha función de un sitio geográfico a otro, la falta de consideración de algunos efectos por falta de conocimiento, entre otras.
- 3) Incertidumbre en el proceso de selección de variables de carácter político o ético, por ejemplo, tasa de descuento intergeneracional, variación del valor de la vida por edad o ubicación geográfica, valor estadístico de la vida y aversión al riesgo, entre otros.
- 4) Incertidumbre acerca del futuro, por ejemplo los avances en el tratamiento de enfermedades, el desarrollo de variedades agrícolas genéticamente más resistentes, cambios en los estilos de vida, y otros.
- 5) Idiosincrasia del analista, por ejemplo, interpretaciones diferentes de información ambigua o incompleta, errores humanos, fallas al no reconocer la importancia de la incertidumbre en ciertas áreas, entre otros.

II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS

La aplicación de la Metodología de Vías de Impacto para la evaluación de externalidades requirió una serie de datos técnicos, económicos y de salud. La información utilizada corresponde al año 2004, salvo cuando se aclare expresamente.

A. INSTALACIONES DEL SECTOR ENERGÍA

Con base en la información estadística del sector energía para el año 2004 y el potencial impacto ambiental de las instalaciones se seleccionaron los sitios cuyas externalidades serían evaluadas. En el caso del sitio de Tula, en el estado de Hidalgo, se consideraron la Refinería Miguel Hidalgo y las Centrales Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y Ciclo Combinado Tula. Para la zona de Salamanca, en el estado de Guanajuato, se incluyeron la Termoeléctrica de Salamanca y la Refinería Ing. Antonio M. Amor.

1. Selección de las fuentes fijas de emisión

El Sistema Nacional de Refinación procesó durante el año 2004 un total de 1.303.000 barriles diarios de crudo²⁴ y emitió a la atmósfera un total de 501.530 toneladas de contaminantes y 16,12 millones de toneladas de gases de efecto invernadero.²⁵ Del total de emisiones, 413.839 toneladas corresponden a SO₂, 34 312 a NO_x y 17.732 a partículas totales.

Cuadro 1

PROCESO DE CRUDO POR REFINERÍA (Miles de barriles diarios)

Refinería	Crudo Procesado
Cadereyta	212,8
Madero	145,3
Minatitlán	167,0
Salamanca	198,6
Salina Cruz	287,9
Tula	291,9
Total	1 303,4

Fuente: PEMEX, *Anuario Estadístico 2005*.

Las refinerías evaluadas en este estudio, ubicadas en Tula y Salamanca, procesaron 38% del crudo, y emitieron 41% del volumen de SO₂, 6% de NO_x, 27% de las partículas y 36% de las

²⁴ PEMEX (2006)

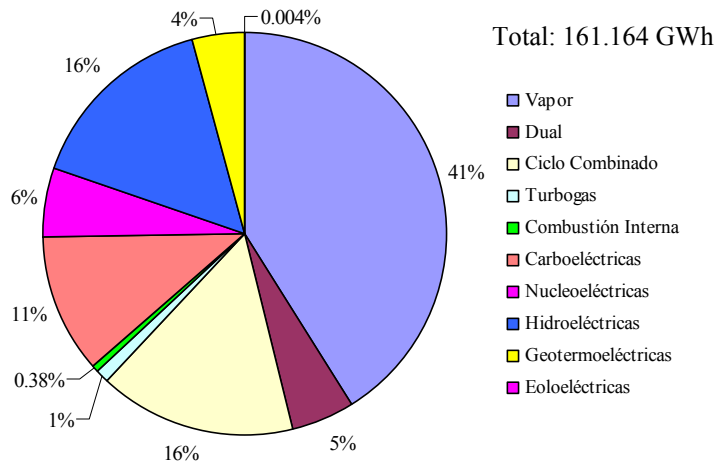
²⁵ PEMEX (2005a)

emisiones de gases de efecto invernadero del total emitido por el Sistema Nacional de Refinación.

Por lo que hace al sector eléctrico, en el 2004 la Comisión Federal de Electricidad (CFE)²⁶ generó 129.504 GWh en centrales termoeléctricas, que representa el 80% del total de la electricidad generada por la Comisión y Luz y Fuerza del Centro (LFC). Las termoeléctricas seleccionadas aportaron el 21% del total generado en centrales de vapor. La electricidad generada en Tula, por sí misma, representa cerca del 7% del total de la generación nacional.

Gráfico 3

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO, 2004
(GWh)**



Fuente: CFE Informe de Operación 2004.
No incluye Productores Independientes

El Sistema Eléctrico Nacional emitió en el año 2004 un total de 1.229.039 toneladas de SO₂, 163 759 de NO_x, 114.071 de partículas y 84,5 millones de toneladas de gases de efecto invernadero. Las centrales seleccionadas aportaron al total nacional 11% del SO₂, 13% de las partículas, 7% de los NO_x, y alrededor del 11% de los gases de efecto invernadero.²⁷

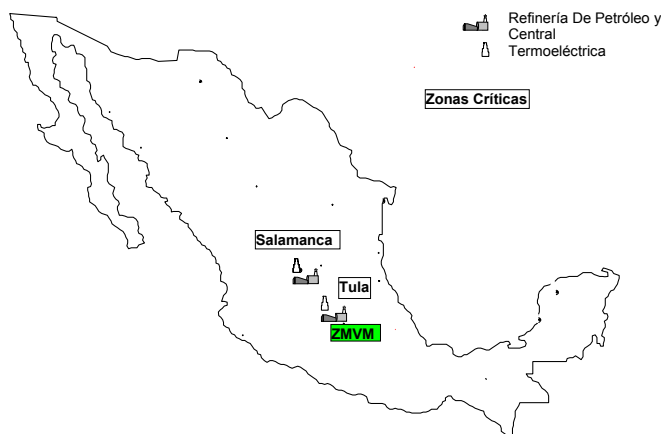
Los sitios seleccionados se ubican en Zonas que la NOM-085 considera como Zonas Críticas, por el volumen de emisiones y por su proximidad a centros de población: el corredor industrial Irapuato-Celaya-Salamanca en el Estado de Guanajuato y el corredor industrial Tula-Vito-Asasco en los estados de Hidalgo y de México.

²⁶ CFE (2005b)

²⁷ SENER (2004), www.sener.gob.mx

Mapa 1

UBICACIÓN DE LAS INSTALACIONES SELECCIONADAS EN EL ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

2. Datos técnicos de las fuentes seleccionadas

Las emisiones totales se estimaron a partir del consumo de combustibles en el año 2004 de cada una de las plantas del sector energía, aplicando los factores de emisión de la EPA (AP-42). En Tula, en el caso de la Central Termoeléctrica se consideraron las emisiones de un total de nueve puntos de emisión: cuatro turbinas de gas y cinco calderas de combustión que utilizan combustóleo con un contenido de azufre de 3,6%. Para las turbinas que utilizan gas natural sólo se consideraron las emisiones de NO_x y no las de SO_2 y PM_{10} por ser mucho menores éstas últimas que las derivadas del uso de combustóleo.

En el caso de la refinería se consideraron los puntos de mayor emisión, responsables del 98% de las emisiones, constituidas por cinco puntos asociados a equipos de procesos, siete calderas, tres quemadores elevados (QE_i) y un quemador de fosa (QF) que agrupa a todos los existentes. Las emisiones totales de los tres quemadores elevados se repartieron de acuerdo al flujo reportado para cada uno de ellos respecto al total, y se modelaron como fuentes puntuales. Conviene mencionar que no se tomaron en cuenta las emisiones de SO_2 para los quemadores de fosa, ni las emisiones contaminantes de los equipos que queman gas de refinería, por no conocerse su composición, pero es necesario señalar que podrían ser muy significativas. Los datos técnicos de las fuentes consideradas para el análisis de dispersión en Tula y los promedios de emisión derivados de la emisión anual se resumen en el cuadro 2.

En el caso de Salamanca se evaluaron cuatro calderas de combustión de la termoeléctrica que utilizan combustóleo con contenido de azufre igual al 3,6%. En la Refinería Ing. Antonio M. Amor se consideraron sólo los puntos de mayor emisión, responsables de 98% de las emisiones, constituidos por siete puntos asociados a procesos, seis calderas y un quemador que agrupa a todos los existentes. El quemador se modeló como una fuente puntual. Las emisiones se estimaron también en base a los factores de emisión de la EPA (AP-42) y al consumo de

combustible durante el año 2004, excepto para los quemadores, para los cuales se consideró la información proporcionada por PEMEX Refinación. Al igual que en Tula, no se consideraron las emisiones fugitivas desde los tanques de almacenamiento ni las emisiones resultantes de la quema de gas de refinación.

Cuadro 2

TULA: DATOS TÉCNICOS DE LAS FUENTES CONSIDERADAS

Clave Punto de emisión COA	Altura m	Temperatura °K	Velocidad m/s	Diámetro m	SO ₂ g/s	NO _x g/s	PST g/s
CFE Turbinas							
CC1.6	25,9	419	14,3	5,1		31	0
CC1.7	25,9	429	14,6	5,1		29	0
CC2.5	25,9	407	20,2	5,1		30	0
CC2.6	25,9	419	16,1	5,1		30	0
CFE Calderas							
CTE1	65	436	29,7	6,9	622	73	40
CTE2	65	449	31,0	6,9	815	113	52
CTE3	65	449	31,0	6,9	614	95	39
CTE4	65	449	31,0	6,9	802	114	51
CTE5	65	449	31,0	6,9	583	128	37
Total central termoeléctrica					3 436	643	219
PEMEX Refinería							
BA101A	65,2	588	6,5	2,8	83	7	5
BA101B	65,2	585	6,9	2,8	83	7	5
ABA1/2	73,5	596	4,4	4,2	278	22	18
BA201	55	599	7,9	2,1	47	4	3
VBA1/2	72,5	575	1,9	3,1	47	4	3
CB1	30,8	430	13,5	3,4	155	12	10
CB2	30,8	426	12,8	3,4	155	12	10
CB3	30	424	16,2	3,4	155	12	10
CB4	29	438	6,5	3,4	155	12	10
CB5	45	661	14,5	3,8	155	12	10
CB6	45	442	14,0	4,0	155	12	10
CB7	45	433	17,9	3,8	155	12	10
QE1	71,2	1273	2,2	2,2	605	2	35
QE2	64,4	1273	0,9	2,5	303	1	17
QE3	64	1273	5,5	2,1	983	3	75
QF	0,5	1273	0,0	55,4		22	18
Total refinería					3 514	156	249
Total Tula					6 950	799	468

Fuente: Elaboración propia en base a datos de PEMEX y de CFE de emisiones y en sus Cédulas de Operación Anual (COA).

Los datos técnicos de las fuentes, usados en los cálculos de dispersión en la Zona de Salamanca se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3

SALAMANCA: DATOS TECNICOS DE LAS FUENTES CONSIDERADAS

Clave Punto de emisión COA	Altura m	Temperatura °K	Velocidad m/s	Diámetro m	Emisiones, g/s		
					SO ₂	NO _x	PST
Central termoeléctrica							
CFE1	51,2	425	28,9	3,9	126	23	10
CFE2	51,2	423	31,5	3,9	127	22	10
CFE3	64,6	438	20,1	2,7	586	47	46
CFE4	49,7	417	29,2	3,4	376	33	29
Total termoeléctrica					1 215	125	95
Refinería							
LGH301	2,9	592	19,2	1,2	9	1	1
LBH1	34,2	565	4,2	2,0	30	2	2
LBH5	17,3	473	5,5	2,7	8	1	1
LBH9	16,0	473	4,1	3,1	8	1	1
U5F	48,7	705	3,8	2,3	24	2	2
RDBA	60,8	757	1,5	2,6	181	12	14
ASBA	77,0	590	11,1	2,1	62	4	5
CB3	25,0	480	7,9	2,5	98	6	8
CB4	25,0	459	6,6	2,5	101	6	8
CB5	25,0	463	6,2	2,5	101	6	8
CB6	43,0	420	6,8	2,7	6	0	1
CB7	43,0	426	8,1	2,7	31	2	2
CB9	40,0	514	5,7	2,5	85	5	7
QE1	61,5	1,273	3,0	0,9	720	60	48
Total Refinería					1 462	107	106
Total Salamanca					2 677	232	201

Fuente: Elaboración propia en base a datos de PEMEX y de CFE de emisiones y en sus Cédulas de Operación Anual (COA).

3. Dominio local de modelación

Para la zona de Tula se consideró como dominio local un cuadrado de 100 x 100 km dividido en celdas de 2x2 km centrado en las coordenadas²⁸ X=472 500, Y=2 157 500 lo que da un total de 2.500 puntos receptores. El punto receptor más al sur y al oeste se ubica en las coordenadas

²⁸ Las coordenadas se refieren al sistema de referencia UTM Zona 14.

X=423 500, Y=2 157 500. En Salamanca se consideraron también un total de 2 500 puntos receptores, representados en los puntos centrales del mismo número de celdas de 2x2 km en que se seccionó un dominio de 100 x 100 km, centrado en las coordenadas X= 273 000, Y= 2 277 000. El receptor más al sur y al oeste se ubica en las coordenadas X=224 000, Y=2 228 000.

Para obtener la población en cada celda del dominio local, se interceptaron con un Sistema de Información Geográfico (SIG) la capa de población original de México y las rejillas de 100 x 100 km con celdas de 2 x 2 km como capas que representan los dominios locales, tanto en Tula como en Salamanca; mediante una suma pesada se obtuvo la población en cada celda. La población total del dominio local en Tula es de 6.369.906 habitantes, lo que implica una densidad promedio de 579 habitantes/km²; la de Salamanca es de 2.254.138 habitantes y 225 habitantes/km².

Para obtener la información topográfica se usó el Modelo Digital de Elevación de México.²⁹ Además, se procesó la capa de usos del suelo de México³⁰ utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el fin determinar el porcentaje de cada una de las categorías en cada sector y por tanto la categoría de uso de suelos más representativa para cada uno de los 36 sectores de 10° en un plano de coordenadas polares del dominio, con un radio de 50 km, con centro en la refinería. Esta información se requiere para considerar la influencia del tipo de suelo en la dispersión. Una vez definida la categoría predominante para cada sector se alimentó al modelo considerando la correspondencia entre las categorías definidas en la capa de uso de suelos de México y las categorías en el AERMET y el AERMOD, que se muestra en el cuadro 4.

En Tula, para la mayoría de los sectores la categoría predominante es la de terreno agrícola, excepto en dos sectores donde predominan los pastizales y en uno los bosques. En Salamanca, la categoría predominante es también el terreno agrícola, excepto en dos sectores donde predominan los bosques y tres sectores donde predominan los pastizales.

²⁹ INEGI, Licencia DGAD-0111/2005. Perfiles de uso de suelo, versión 1.2

³⁰ INEGI, Licencia DGAD-0111/2005. Perfiles de uso de suelo, versión 1.2

Cuadro 4

**CORRESPONDENCIA ENTRE LAS CATEGORÍAS DE LA CAPA DE USO
DE SUELO DE MÉXICO Y LAS DEL AERMET Y AERMOD**

Capa de Uso de Suelos	Categorías AERMET	Categorías AERMOD
Asentamiento humano		Área sub-urbana, con vegetación
Zona urbana	Zona urbana	Zona urbana sin vegetación
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
Agricultura de riego		
Agricultura de temporal	Terreno agrícola	Terreno agrícola
Bosque cultivado		
Bosque de coníferas		
Bosque de encino	Bosque de coníferas	
Selva caducifolia	Bosque caducifolio	Bosques
Desprovisto de vegetación		
Especial (otros tipos)		
Matorral xerófilo		
Sin vegetación aparente	Desierto	Terreno árido, principalmente desierto
Vegetación hidrófila	Pantano	Terreno húmedo no boscoso
Pastizal		
Vegetación inducida	Pradera	Terreno de pastizal

Fuente: Elaboración propia en base a las categorías de uso de suelo definidas por el INEGI para México y las categorías establecidas en las guías de la EPA para la implementación de los modelos AERMET Y AERMOD.

4. Dominio regional de modelación

La base de datos regional cubre el área de México, el Caribe, América Central y la Península de la Florida. Contiene datos en una resolución de 55x55 km, en una rejilla con origen³¹ en 120 Oeste, 5 Norte, que contiene 120 x 60 celdas. Los receptores evaluados en el dominio regional se definieron como las celdas que se encuentran a menos de 1.500 km. de la refinería de petróleo en cada caso, rango típico de los estudios de dispersión regional.

Para obtener los datos de población por celdas del dominio regional se procedió en forma similar al dominio local: con un SIG se interceptó la capa de población que cubre todo el dominio regional con la capa que representa dicho dominio.

También se determinó la población total en un área de 1.000 km. de radio centrada en el mismo punto que el dominio local, tanto para Tula como para Salamanca, con el fin determinar el impacto regional usando metodologías simplificadas a efectos de comparar con los resultados del estudio del 2004. En Tula la población total asciende a 89.777.703 habitantes, con una densidad regional de 28,6 habitantes/km² y en Salamanca asciende a 86.596.984 habitantes, con una densidad regional de 27,6 habitantes/km².

³¹ Se utilizó la proyección Cónica de Lambert.

B. DATOS METEOROLÓGICOS

1. Datos meteorológicos para la dispersión local

Para la zona de Tula se utilizaron como datos meteorológicos básicos los medidos por la estación in situ de la Central Termoeléctrica, localizada en las coordenadas 20,050N y 99,340W. La estación registra dirección y velocidad del viento, desviación estándar de la dirección horizontal del viento, temperatura, presión, radiación solar y humedad relativa. Los datos de cada 15 minutos (4 por hora) para el año 2004 se procesaron para obtener los datos horarios.

Se escogió como estación de superficie representativa la de Huichapan, localizada en 20,39N y 99,66W, unos 47 km al noroeste de Tula. Registra cada 10 minutos la dirección y velocidad del viento, temperatura, presión, radiación solar, humedad relativa y tasa de precipitación; registra además el valor máximo de la dirección y velocidad del viento en ese mismo período. De 52.704 datos que debían ser procesados para obtener los datos horarios, estuvieron disponibles 50.534, un 95,9% del total.

Como estación de aire superior representativa se escogió la del Aeropuerto de la ciudad de México, pues es la que registra los datos de aire superior más cercano a la zona de estudio. Se localiza en 19,417N y 99,067W, a unos 83 km de Tula en dirección sur-sureste. Procesa la información de dirección y velocidad del viento, temperatura y presión a diferentes alturas, generalmente dos veces al día. Del total de 732 datos que debían ser procesados se contó con 624, un 85,2% del total. El código fuente de la EPA fue modificado para poder procesar datos de presión barométrica de superficie inferiores a 800 mbar que prevalecen en el dominio local.

En el caso de la zona de Salamanca, se escogió como estación in situ la de Nativitas, perteneciente a la Red Ambiental de Monitoreo de Salamanca. Esta estación registra datos horarios de dirección y velocidad del viento, desviación estándar de la dirección horizontal del viento, temperatura, presión, radiación solar y humedad relativa. La estación se localiza en 20,57N, 101,19W.

La estación de superficie representativa fue la de la Presa Allende, la cual registra cada 10 minutos la dirección y velocidad del viento, la temperatura, presión, radiación solar, humedad relativa y tasa de precipitación. De 52.704 datos que debían ser procesados, están disponibles 51.973, un 98,6% del total. La estación se localiza en 20,84N, 100,82W. En esta zona no se utilizaron datos de aire superior por considerarse que ninguna de las estaciones que los registran es representativa del dominio local. En este caso se aplicaron criterios para la determinación de la altura de capa de mezcla por métodos indirectos.

Para estimar la deposición de gases en el AERMOD se utilizaron los parámetros recomendados en la literatura internacional, adecuados, en su caso, a las condiciones del país.

2. Datos para dispersión regional

El modelo utilizado WTM requiere de una base de datos meteorológicos y de emisiones que cubran el dominio regional. Una parte considerable de la información requerida se encuentra disponible en la base de datos que ha integrado la Sede Subregional de la CEPAL en México. Dicha base de datos fue elaborada con anterioridad a este estudio, como parte de un proyecto de investigación entre el Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAT, CubaEnergía y la CEPAL. La base cuenta con casi 400.000 datos, para lo cual se procesaron casi 158 millones de datos de las diferentes fuentes de información. La definición de las principales variables se presenta a continuación.

a) Rosa de los vientos

Para la creación de las rosas de vientos se partió de la base de datos NCEP/NCAR Reanalysis Data³² (United States of America, National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research). Para obtener promedios anuales más representativos fueron procesados cinco años de datos (2000-2004).

En el procesamiento de los datos de viento para el WTM se seleccionan los componentes del viento a 925 mbar, estos corresponden aproximadamente a 800 m de altura sobre el nivel del mar. Los datos del Reanalysis Data tienen una resolución de 2,5 x 2,5 grados de latitud-longitud, así que una vez obtenidos los dos ficheros anuales con los componentes de dirección y velocidad del viento para todas las celdas (5 ficheros para cada componente, por utilizarse 5 años de datos), se utilizó el programa Windrose para calcular las rosas de vientos más probables o promedio en una rejilla de 0,5 x 0,5 grados. El programa Windrose fue el usado con el mismo propósito en las diferentes implementaciones del EcoSense (Europa, China, América del Sur, Rusia).

Para mejorar la selección de los datos de viento y las rosas de viento resultantes en dependencia de la altura del terreno, se realizaron modificaciones adicionales al programa Windrose. Estas modificaciones están orientadas a promediar los componentes del viento de los dos niveles isobáricos entre los cuales se encuentra el valor de 800 m sobre el nivel de la superficie.

Para obtener los datos de vientos en las celdas en la proyección seleccionada (como resultado del Windrose se obtienen los datos de celdas de 0,5 x 0,5 grados sobre una proyección latitud/longitud), se procesó el fichero salida del Windrose directamente en un SIG, realizando un promedio proporcional de las áreas interceptadas. Finalmente se obtienen para cada una de las 7.200 celdas del dominio seleccionado una rosa de vientos promedio en el quinquenio 2000-2004 representada por 49 valores: 24 valores que representan la probabilidad de que el viento sople en 24 direcciones de 15 grados cada una y otros 24 valores de velocidad media del viento (m/s) en cada una de las direcciones. Además se obtuvo un valor medio único para la velocidad del viento

³² NCEP/NCAR, Reanalysis Data, <http://dss.ucar.edu/datasets/ds090.0/data/pgbf00-grb2d>

sobre la celda que puede usarse alternativamente sustituyendo la información más detallada de la velocidad en cada dirección.

b) Precipitaciones

Para obtener las precipitaciones promedio anuales por celda se utilizaron dos bases de datos del Global Precipitation Climatology Center, GPCC.³³ La primera, llamada “Producto de Monitoreo” (*Monitoring product*), de acceso libre, se basa en datos de calidad controlada de unas 7.000 estaciones de monitoreo; contiene datos asociados a rejillas de cobertura global con resoluciones de 2,5 y 1 grados, desde 1986 hasta el presente. La segunda, conocida como “GPCP Version 2 Combined Precipitation Data Set” contiene estimaciones de las precipitaciones basadas en la combinación de mediciones y observaciones por satélite, así como el error de dicha estimación, con una resolución de 2,5 grados.

c) Emisiones de fondo

Para el cálculo de las concentraciones de SO₂, NO_x, sulfatos y nitratos en todas las celdas del dominio, el WTM utiliza como datos de entrada las emisiones naturales y antropogénicas de SO₂, NO_x y NH₃. Las emisiones de SO₂ y NO_x se obtuvieron de la base de datos global EDGAR³⁴ que tiene información del año 2000, con una resolución de un grado. En esta base de datos las emisiones se reportan clasificadas en 81 sectores resultantes de subdividir los siguientes grupos de fuentes: combustibles fósiles, incluyendo tráfico marítimo y aéreo; bio-combustibles, procesos industriales, agricultura, uso de la tierra incluyendo quema intensa de biomasa; uso y producción de compuestos halo-carbonados y gases fluorados; tratamiento de desechos, y otras fuentes antropogénicas no incluidas en los grupos anteriores

Los datos se descargan como archivos de texto, uno para cada sector, que contienen información de la ubicación: longitud y latitud y la emisión clasificada en alta o baja. Se consideró que las emisiones provenientes del tráfico aéreo y las provenientes de generación eléctrica son emisiones altas (en realidad aquellas emitidas a más de 100 m de altura) mientras el resto se considera bajas.

Las emisiones de NH₃ se obtienen a partir de dos bases de datos de cobertura global.^{35,36} La primera tiene una resolución de medio grado e incluye las emisiones de 1995 sólo para fertilizantes inorgánicos y desechos de animales, los dos sectores cuya contribución se considera más relevante a las emisiones de NH₃. Las emisiones correspondientes a otros sectores se extraen de la segunda de estas bases de datos, de un grado de resolución, que incluye emisiones para 1990 clasificadas en sectores de los que se excluyen los anteriormente mencionados.

³³ The Global Precipitation Climatology Centre, <http://www.dwd.de/research/gpcc>

³⁴ EDGAR emission data base, <http://arch.rivm.nl/env/int/coredata/edgar.html>

³⁵ NH₃ International Emission Inventory, <http://arch.rivm.nl/databases/nh3>

³⁶ GEIA (Global Emissions Inventory Activity), <http://www.rivm.nl/geia/data/Ammonia>

El valor de concentración de fondo de ozono troposférico utilizado en este estudio es de 40 ppb: se seleccionó con base en la referencia³⁷ y las implementaciones del WTM en Europa y el Sudeste Asiático. El valor seleccionado para la concentración de fondo de radicales OH, de 1.300.000 moléculas/cm³, corresponde a la concentración a 20° de latitud, que es el paralelo central del dominio de estudio.³⁸

C. INVENTARIO DE EMISIONES DE MEXICO

Las emisiones de SO₂, NO_x y NH₃ sobre México fueron actualizadas utilizando el Inventario Nacional de Emisiones de México de la SEMARNAT,³⁹ del año 1999. Para ello se procesó con un SIG la capa de municipios de México, incorporándole campos con los valores de las emisiones de cada contaminante. Sobre estos valores se realizaron las siguientes modificaciones en los municipios donde se ubican las 12 mayores centrales termoeléctricas y las seis refinerías del país: 1) Para las refinerías se consideran las emisiones que señala el inventario del 2004 del Informe de PEMEX; 2) para las 12 centrales termoeléctricas analizadas previamente se consideró el inventario de emisiones que reporta la Secretaría de Energía para el 2004.

Se clasificaron las emisiones en altas y bajas en función de la altura de las chimeneas reportadas para cada unidad de las termoeléctricas; todas las emisiones provenientes de refinerías fueron consideradas bajas. Para las centrales carbo-eléctricas (Río Escondido y Carbón II) se utilizó el inventario de SEMARNAT, por considerar que había un problema con el reporte de NO_x en los cálculos de SENER para el año de referencia. Las emisiones de ambas centrales se consideraron altas.

Los municipios de Tula y Salamanca incluyen únicamente las emisiones de SO₂ provenientes de la central termoeléctrica y de la refinería para el año 2004, según fueron calculadas para el estudio.

Para las emisiones de NO_x en Salamanca se utilizó el criterio anterior, en tanto que en Tula se consideraron 10.000 ton para la refinería, más lo reportado en 1999 para la termoeléctrica. Al sustituir estos valores por los reportados para el año 2004, se dejó el remanente del inventario para considerar otras fuentes en el área. En los municipios de Madero, Salina Cruz y Cadereyta se consideró sólo la emisión de la refinería.

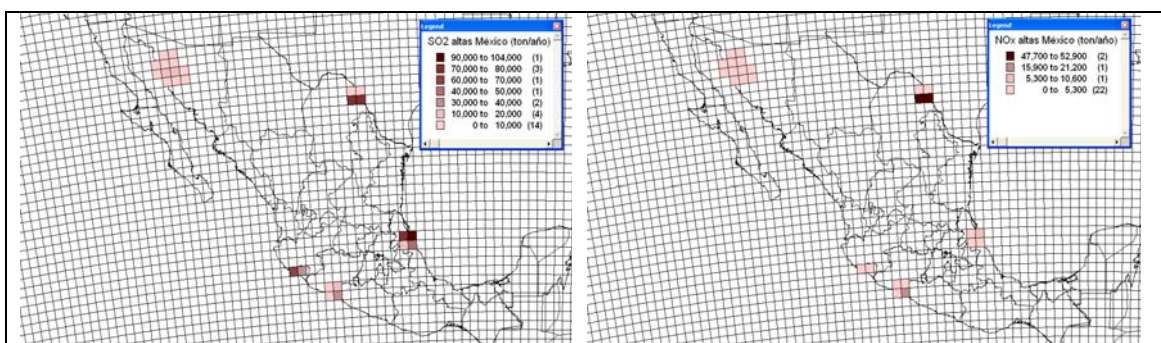
El gráfico 4 muestra las emisiones altas de SO₂ y NO_x actualizadas a la base de datos. Es apreciable que las únicas emisiones altas son las emisiones de algunas centrales termoeléctricas que descargan a chimeneas que sobrepasan los 100 m de altura.

³⁷ Logan (1999)

³⁸ Spivakovsky y otros (2000)

³⁹ SEMARNAT (2006b) *Inventario Nacional de Emisiones*.

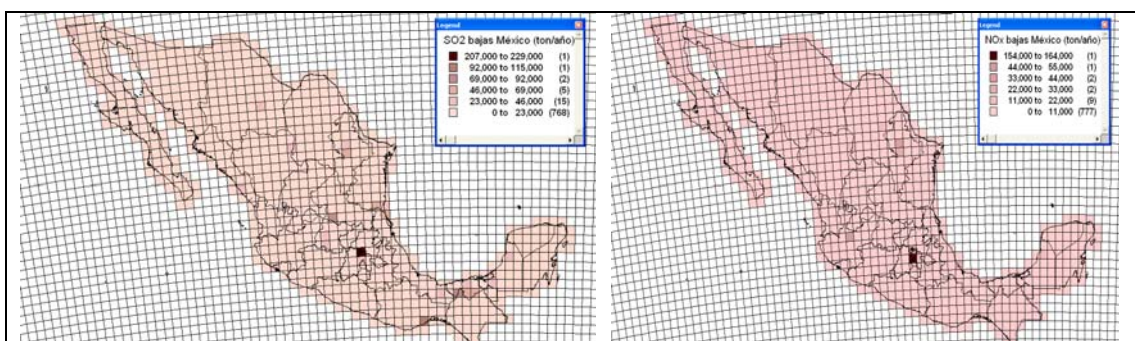
Gráfico 4

EMISIONES ALTAS DE SO₂ Y NO_x SOBRE MÉXICO ACTUALIZADAS A LA BASE DE DATOS

Fuente: Elaboración propia en base al Inventario Nacional de Emisiones de México.

El gráfico 5 muestra las emisiones bajas para SO₂ y NO_x. Las centrales termoeléctricas constituyen la fuente más importante para ambos contaminantes; la mayor parte de los valores que resaltan sobre la media tienen este origen.

Gráfico 5

EMISIONES BAJAS DE SO₂ Y NO_x SOBRE MÉXICO ACTUALIZADAS A LA BASE DE DATOS

Fuente: Elaboración propia en base al Inventario Nacional de Emisiones de México.

D. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS

Para la selección de las funciones exposición-respuesta, se hizo una revisión de estudios epidemiológicos disponibles en México, así como de estudios internacionales de referencia. De ellos se seleccionaron los valores de incremento del riesgo relativo en número de casos para un aumento en la concentración de un contaminante específico, tanto para morbilidad como para mortalidad. En el caso de la morbilidad, a partir de dichos incrementos y considerando las tasas de incidencia, fracciones de población y grupos de riesgo en México se determinaron las pendientes de las funciones exposición-respuesta. Por lo que hace al impacto en mortalidad, a partir de las

estadísticas de mortalidad y fracción de la población por grupos de edades de México se determinó la pérdida de expectativa de vida por la exposición prolongada a PM_{10} , considerando el incremento de riesgo reportado en los estudios. A continuación se presenta la información utilizada.

1. Tasas de incremento de riesgo relativo

Para la selección de los valores de Incremento de Riesgo Relativo (IRR) se consideraron dos meta-análisis y un estudio independiente. El primero de ellos es el meta-análisis realizado en el marco del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México, revisado y publicado por el Banco Mundial.⁴⁰ De este estudio se tomaron los valores de IRR para evaluar el impacto de partículas y a partir de ellos se derivaron los correspondientes a sulfatos y nitratos, siguiendo los últimos criterios de Externe 2005 sobre toxicidad para los contaminantes secundarios, que considera la toxicidad de los sulfatos igual a la de las partículas PM_{10} y la de los nitratos igual a la mitad, como se explicó en el primer capítulo.

Del segundo meta-análisis,⁴¹ elaborado por Stieb y otros en 2002, se obtuvo el valor de IRR para la mortalidad aguda por SO_2 ; este meta-análisis evaluó 109 estudios llevados a cabo en todo el mundo, incluido México. Para el caso de las admisiones hospitalarias por SO_2 , se consideró el estudio de Spix y otros 1998,⁴² al no contar con un meta-análisis. El cuadro 5 muestra los valores de IRR utilizados en el estudio.

Cuadro 5

INCREMENTO DE RIESGO RELATIVO (IRR) ($\%/\mu g/m^3$)

EFFECTO	GRUPO DE POBLACIÓN EN RIESGO	IRR ^a para PM_{10}	IRR para SO_2
Bronquitis crónica	Mayores de 30 años	0,360	-
Días de Actividad Restringida	Adultos	0,774	-
Ingresos Hospitalarios, Respiratorios	Población total	0,139	0,040 ^b
Ingresos Hospitalarios, Cardiovasculares	Adultos mayores de 65 años	0,060	-
Visitas a salas de urgencia (Respiratorias)	Población total	0,311	-
Crisis aguda de Asma	Asmáticos	0,774	-
Mortalidad por exposición Aguda	Población total	-	0,034 ^c
Mortalidad por exposición Crónica	Adultos mayores de 30 años	0,384	-

Fuente: a) Cesar y otros, 2002 b) Spix y otros, 1998 c) Stieb y otros, 2002.

⁴⁰ Cesar y otros (2002). Este meta-análisis incluyó 126 estudios epidemiológicos y da un mayor peso a los resultados de México.

⁴¹ Stieb y otros (2002)

⁴² Spix y otros (1998)

2. Tasas de incidencia y de mortalidad

Las tasas de incidencia para el estudio y las fracciones de la población para cada padecimiento se muestran en el cuadro 6. La información de tasas de incidencia proviene del Sistema Nacional de Información en Salud⁴³ (SINAIS) que administra la Secretaría de Salud, para los impactos en los que fue posible conseguir la información con la desagregación necesaria. Para los casos en que esto no fue posible, se utilizó la tasa basal estimada para la Zona Metropolitana del Valle de México, ya que se consideró preferible a utilizar la de otros países. Los datos de población son los reportados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

Cuadro 6

TASA DE INCIDENCIA Y FRACCIONES DE POBLACIÓN (Casos-persona-año / fracción del total)

EFFECTO	GRUPO DE POBLACIÓN EN RIESGO	TASA DE INCIDENCIA (CASOS-PERSONA-AÑO)	FRACCIÓN DE LA POBLACIÓN ^d
Bronquitis crónica	≥ 30 años	0,00700 ^a	0,410
Días de actividad restringida	Adultos	6,46000 ^a	0,540
Ingresos hospitalarios (respiratorios)	Población Total	0,00260 ^b	1,000
Ingresos hospitalarios, (cardiovasculares)	≥ 65 años	0,00210 ^b	0,050
Visitas a salas de urgencia (respiratorias)	Población Total	0,03200 ^a	1,000
Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,12740 ^a	0,056 ^e
Mortalidad Aguda	Población Total	0,00448 ^c	1,000
Mortalidad Crónica	≥ 30 años	0,00936 ^c	0,410

Fuente: a) Cesar y otros. *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City*, WB, 2002; b) Secretaría de Salud. SINAIS. Sistemas Automatizados de Egresos Hospitalarios, México, 2005a; c) Secretaría de Salud. SINAIS. *Mortalidad 2004*, México, 2005b; d) INEGI. *Población total por grupos quinquenales de edad según sexo, 1950 a 2005*, México, 2006; e) El porcentaje total de población con asma se estimó considerando 5% de adultos y 8% de niños, de acuerdo a estimaciones del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias.

3. Funciones exposición–respuesta para mortalidad estimadas con el enfoque de pérdida de expectativa de vida

Para evaluar la mortalidad crónica, Leksell y Rabl⁴⁴ desarrollaron una metodología para estimar la pendiente de la función exposición respuesta para la mortalidad asociada a la contaminación atmosférica (S_{FER}) en Años de Vida Perdidos (AVP / (persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)) a partir del riesgo relativo reportado en los estudios de cohorte y la pérdida de la expectativa de vida asociada a dicho riesgo. Dicha metodología se aplicó al caso de México, con la asesoría de Spadaro en el marco de este estudio, considerando un análisis de tipo estático.⁴⁵

⁴³ Acerca del SINAIS. <http://www.salud.gob.mx/unidades/dgied/sinais/acercade.htm>

⁴⁴ Leksell y Rabl (2001)

⁴⁵ Spadaro, comunicación personal. La metodología completa desarrollada por Leksell y Rabl considera un factor para medir el decremento del riesgo una vez que se termina la exposición, en base a

En términos generales, la metodología estima la pendiente de la función exposición respuesta a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{FER} = F_l \bullet \frac{\Delta T_L \Delta C}{T_L} \text{ AVP}/(\text{persona-año-}\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad [3]$$

donde: F_l : factor de ajuste que considera el retraso entre la exposición y el impacto en la población potencialmente en riesgo, así como la capacidad de auto recuperación del cuerpo humano después de una exposición. Se le denomina “factor de latencia”. Como el grupo de riesgo para esta función es la población mayor de 30 años, generalmente se asume el valor de este parámetro cercano a dicha fracción de la población, 0,6 para Europa, 0,41 para México.

T_L , es la expectativa de vida de la población; se expresa en años.

ΔT_L , es la pérdida de expectativa de vida por una exposición crónica; se expresa en Años de Vida Perdidos (AVP).

ΔC , es la variación en la concentración del contaminante para la cual se estimó el riesgo relativo RR, se expresa en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La expectativa de vida de la población, T_L , se estima a partir de las estadísticas de mortalidad y de la fracción de la población por grupos quinquenales de edades en México, reportadas por la Secretaría de Salud y el INEGI,⁴⁶ considerando un Riesgo Relativo igual a la unidad y aplicando las funciones de probabilidad de supervivencia y de determinación de expectativa de vida⁴⁷ para el caso de México. Esta estimación dio como resultado una expectativa de vida de 75,2 años, valor semejante al valor oficial reportado para el año 2004.

Una vez que se ha estimado la expectativa de vida de la población, se calcula la expectativa de vida asociada a una exposición crónica a la contaminación atmosférica. Para ello se utilizó un valor de riesgo relativo que considera el incremento en el riesgo asociado a un aumento en la concentración de PM_{10} en el aire ($\text{RR} = 1 + \text{IRR}$). El incremento de riesgo relativo considerado fue de 3,84% por un aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración ambiente de PM_{10} , valor que corresponde al reportado por Cesar y otros, 2002 (véase el cuadro 5). La expectativa de vida considerando la exposición disminuye a 74.743 años. Por lo tanto, la pérdida de expectativa de vida, ΔT_L , resulta ser de 0,457 Años de Vida Perdidos (AVP). Aplicando la ecuación [3] se encuentra que la pendiente de la función exposición–respuesta para mortalidad por exposición crónica a PM_{10} es de $2,49\text{E-}04 \text{ AVP}/(\text{persona-año-}\mu\text{g}/\text{m}^3)$, para mayores de 30 años.

Para evaluar la mortalidad por exposición aguda a SO_2 , se utiliza el IRR del estudio de Stieb y otros, 2002 y se considera, al igual que ExternE, que una muerte por exposición aguda equivale a 0,5 AVP. Así, $S_{FER} = \text{IRR} \cdot I_{\text{ref}} \cdot 0,5 \text{ AVP}/(\text{persona-año-}\mu\text{g}/\text{m}^3)$

los resultados obtenidos en estudios con población fumadora, en un enfoque dinámico. De acuerdo a Spadaro el enfoque estático es aceptable ante la complejidad del análisis dinámico, pues el valor obtenido tiene una precisión del orden de 15%, que es menor a otras incertidumbres asociadas.

⁴⁶ INEGI/Secretaría de Salud (2005)

⁴⁷ La función de probabilidad de supervivencia y la determinación de expectativa de vida se calculó utilizando la herramienta programada por Spadaro y consultores de CEPAL.

4. Resumen de funciones exposición–respuesta aplicadas en el estudio

Con la información de IRR del cuadro 5, las tasas de incidencia y fracciones de población presentadas en el cuadro 6 así como la aplicación de la metodología para la estimación de la pendiente de la mortalidad en años de vida perdidos, se calcularon las pendientes de las funciones exposición respuesta. El cuadro 7 presenta las funciones que se aplicaron para la determinación de las externalidades.

Cuadro 7

FUNCIONES EXPOSICIÓN RESPUESTA
(Morbilidad: casos-persona-año / Mortalidad: Años de vida perdidos)

Funciones exposición-respuesta	Pendiente (casos/(año-receptor- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	PM ₁₀ y sulfatos	Nitratos	SO ₂
Bronquitis Crónica (Adultos mayores de 30 años)	1.03E-05	5.16E-06	
Admisiones Hospitalarias Respiratorias (Población total)	3.61E-06	1.81E-06	1.04E-06
Días de Actividad Restringida (Adultos entre 20 y 65 años)	2.70E-02	1.35E-02	
Visitas a salas de urgencia (Población total)	9.95E-05	4.98E-05	
Crisis Aguda de Asma (Asmáticos)	5.50E-05	2.75E-05	
Admisiones Hospitalarias Cardiovasculares (Adultos mayores de 65 años)	6.30E-08	3.15E-08	
Mortalidad Crónica (Adultos mayores de 30 años)	2.46E-04	1.23E-04	
Mortalidad Aguda ^a (Población total)			7.62E-07

Fuente: Elaboración propia con base en la información presentada en los cuadros 5 y 6.

a/ La función de mortalidad aguda se aplica únicamente a SO₂; considera que una muerte aguda equivale a 6 meses de vida perdidos.

E. COSTOS ECONÓMICOS

1. Morbilidad

Como se explicó en el capítulo I, los costos de los casos de morbilidad incluyen los costos directos de la enfermedad, la pérdida de productividad y la voluntad a pagar.

El costo directo de enfermedad utilizado corresponde al nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), estimado por el Instituto Nacional de Ecología y el Instituto Nacional de Salud Pública en el marco del estudio “*The Local Benefits*”

of *Global Air Pollution Control in Mexico City*".⁴⁸ Los valores presentados en dicho estudio se encuentran en dólares del año 2001 y fueron actualizados a dólares de 2004.⁴⁹ El costo directo de enfermedad (costo del tratamiento) está altamente influido por las condiciones propias del lugar en que se brindan los servicios médicos y por aspectos socioeconómicos de la población atendida, por lo que, como se señaló en el estudio anterior, es deseable realizar estimaciones directas en las zonas de estudio.

La pérdida de productividad se calculó considerando la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares y el salario mínimo general promedio nacional para 2004.⁵⁰ Se consideró un salario mínimo de 43,30 pesos diarios y 4,48 salarios mínimos como promedio de ingreso de los hogares, por lo que un día de trabajo perdido se valoró en 194 pesos. El número de días perdidos por enfermedad se tomó de ExternE, excepto para la bronquitis crónica, para el cual se redujo a siete días, en base al estudio de Cesar y otros 2002. Se ajustó también el valor de los días perdidos por ingresos hospitalarios cardiovasculares, a la mitad de un día (\$87 pesos), para considerar que el grupo de riesgo es la población mayor de 65 años.

Finalmente al no contar con estimados de VAP para efectos de morbilidad se transfirieron de ExternE 2005, ajustando por relación de ingresos entre México y la Unión Europea.⁵¹ El coeficiente de transferencia resultó de 0,24, considerando el Producto Interno Bruto en Paridad del Poder Adquisitivo reportado por el Banco Mundial⁵² para 2004; se consideró una elasticidad ingreso igual a 1. En el cuadro 8 se resumen los costos utilizados para cada caso.

Cuadro 8

COSTOS UNITARIOS PARA CASOS DE MORBILIDAD
(Dólares año 2004)

EFEECTO	COSTOS DE ENFERMEDAD ^a	PÉRDIDA DE PRODUCTIVIDAD ^b	VOLUNTAD A PAGAR ^c	TOTAL
Bronquitis Crónica	18 941	127	80 188	99 256
Ingresos Respiratorios	2 336	145	188	2 669
Hospitalarios Cardiovasculares	11 621	73	188	11 882
Visitas Salas Urgencia Respiratorias	288	91	97	476
Crisis Aguda de Asma	338	18	87	443
Días de actividad restringida		18	20	38

Fuente: a) McKinley, y otros, 2003 (ajustado a dólares de 2004). b) Se estimó un valor de \$194 pesos por día laboral perdido equivalente a \$18 dólares de 2004; el número de días perdidos es 1 para las crisis agudas, 5 para visitas a salas de urgencia respiratoria y 8 para un ingreso hospitalario de acuerdo a ExternE 2005 y 7 para una bronquitis crónica de acuerdo a Cesar y otros, 2002. c) La VAP es transferida de ExternE 2005, con datos del Banco Mundial, World Development Indicators database, 2006.

⁴⁸ McKinley y otros (2003)

⁴⁹ Se utilizó para la actualización los factores de conversión de la Universidad de Oregon. (Robert C. Sahr, 2006).

⁵⁰ INEGI (2005)

⁵¹ Se aclara que el estudio de McKinley presenta valores de VAP pero los mismos corresponden a una transferencia de costos de ExternE 1999 por lo que se decidió utilizar la última actualización de ExternE 2005.

⁵² Banco Mundial (2006)

2. Mortalidad

Para valorar los casos de mortalidad se utilizó el Valor Estadístico de la Vida estimado para México por James Hammit (Harvard University) y María Eugenia Ibarrarán (Universidad de las Américas, Puebla) en el estudio *The Economic Value of Fatal and Non-Fatal Occupational Risks in Mexico City Using Actuarial and Perceived Risk Estimates (Estimando el Valor Económico de Reducir los Riesgo en Salud en la Ciudad de México: Diferencial en Compensaciones Salariales)* mismo que fue publicado en agosto de 2006.⁵³ Este estudio, primero en su clase en el país, estimó el VEV para México en un rango de \$235.000 y \$325.000 (dólares de 2002), mediante el método de compensaciones salariales. Se considera en el estudio el valor central de \$280.000 dólares de 2002, que actualizado a 2004 es \$293.933.

Este estimado es más bajo que el VEV que se obtiene en países desarrollados pero comparable a estudios llevados a cabo en países en desarrollo. Sin embargo, como se señaló con anterioridad, existen actualmente algunos cuestionamientos al método de compensaciones salariales, particularmente para su aplicación en medidas de control ambiental. Por ello es conveniente contar en el futuro con estudios que utilicen la técnica de valoración contingente⁵⁴ en el país, con el fin de verificar su consistencia y contar con un estimado central más robusto. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), por ejemplo, determinó un valor de \$4,8 millones de dólares₁₉₉₉ tras una revisión de 26 estudios, cinco de ellos basados en estudios de valoración contingente.

El cuadro 9 presenta con fines comparativos el VEV estimado para México y los que se obtendrían de transferir el valor de otros países utilizando la relación de poder adquisitivo entre el PIB del país de referencia y México en PPP.

Cuadro 9

VALOR ESTADÍSTICO DE LA VIDA PARA MÉXICO (VEV) (Dólares año 2004)

Referencia	VEV\$ ₂₀₀₄
Estimado en México ^{a)}	293 933
Transferencia de la Unión Europea ^{b)}	367 894
Transferencia de los Estados Unidos ^{c)}	1 679 507

Fuente: a) Hammit-Ibarrarán 2006; b) ExternE 2005 transferido a México con un factor de 0.24 c) US Environmental Protection Agency (s/f), *The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010*, transferido a México con un factor de 0.37. Los factores de transferencia se calcularon en base a datos del Banco Mundial, *World Development Indicators database*. Cifras actualizadas a dólares de 2004.

⁵³ El estudio fue financiado por la Comisión Ambiental Metropolitana, y es parte de los trabajos que coordina el Instituto Tecnológico de Massachussets bajo el proyecto: *MIT Integrated Program on Urban, Regional and Global Air Pollution: Mexico City Case Study*.

⁵⁴ Los mismos autores realizaron un estudio aplicando la valoración contingente, cuyo resultado preliminar aún en revisión, arrojaba un valor de \$506.000; este valor fue considerado para estudios de sensibilidad en el estudio anterior de externalidades de termoelectricas.

Con el fin de valorar la mortalidad en años de vida perdidos en lugar de número de muertes, en el marco del presente estudio se determinó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP), en base al VEV estimado por Hammit-Ibarrarán para México y a la metodología propuesta por Spadaro.⁵⁵ El cuadro 10 muestra los valores obtenidos para México y, con fines comparativos, los que se obtendrían de transferir el VAVP del Proyecto ExternE. Se puede apreciar que en este caso, la transferencia de costos da valores muy cercanos a los estimados para México. Estos valores se utilizaron para estimar los impactos asociados a mortalidad crónica y aguda.

Cuadro 10

VALOR DE UN AÑO DE VIDA PERDIDO PARA MÉXICO (VAVP)
(Dólares/año 2004)

	Estimado propio ^a	Transferido de ExternE ^b
VAVP _{AGUDO}	22 917	26 228
VAVP _{CRONICO}	13 327	17 485

Fuente: a) Estimación propia en base a la metodología de Spadaro, 1999 y al valor de Hammit-Ibarrarán, 2006.

b) ExternE 2005 transferido con un factor de .24 en base a datos del Banco Mundial, *World Development Indicators database*.

3. Otros impactos

Para valorar el impacto en el cambio climático se consideró el costo de reducir emisiones para México, tomando como base el potencial de reducción de emisiones (PRE) y el costo neto por tonelada de CO₂ evitada por año. La información se obtiene del documento *Hacia una Estrategia Nacional de Acción Climática* elaborado por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático de México y el Centro Mario Molina.⁵⁶ Se estima que en un escenario de penetración tecnológica intermedia podría tenerse un potencial de mitigación de 98,6 millones de toneladas de CO₂ al año. Los costos de reducción de los proyectos evaluados⁵⁷ se estiman entre \$0,66 y \$274 dólares, con una media de 18 dólares por tonelada. Se tomará como referencia este valor en la determinación de externalidades, que es semejante al que considera ExternE.

El cuadro 11 muestra las emisiones de GEI consideradas en el estudio:

⁵⁵ Spadaro (1999)

⁵⁶ SEMARNAT (2006a)

⁵⁷ Existen proyectos que reportan un beneficio económico en adición a la reducción de emisiones y no un costo (proyectos del tipo “no regrets”).

Cuadro 11

EMISIONES DE CO₂ DEL SECTOR ENERGÍA EN LAS ZONAS DE TULA Y SALAMANCA
(Millones de toneladas)

	Refinación ^a	Electricidad ^b	Total
Salamanca	2,47	2,23	4,70
Tula	3,31	6,81	10,12
Total	5,78	9,04	14,82

Fuente: a) PEMEX (2005a), *Informe 2004*. Desarrollo Sustentable. México.

b) Secretaría de Energía (2004), *Emisiones Sector Eléctrico*. www.energia.gob.mx

El impacto en ecosistemas no fue valorado por no disponer de valores de referencia aplicables a México. La determinación del valor del Proyecto ExternE, consideró curvas de costo marginal de mitigación y niveles definidos en Programas Regionales europeos⁵⁸ para protección de ecosistemas y no puede ser aplicado al país.

⁵⁸ Por ejemplo, la meta de reducción consideró el Protocolo de Gothenburg sobre Contaminación Transfronteriza (*Protocol of Gothenburg on the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*) y la Directiva Europea 2001/81/EC (*National Emission Ceilings for some air pollutants NEC*) que define techos de emisión de contaminantes para detener la acidificación y eutrofización de ecosistemas en Europa.

III. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología para evaluar los costos externos en las zonas analizadas. Se analizan la dispersión de los contaminantes en cada una de las zonas de estudio y las concentraciones resultantes, considerando las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud y, finalmente, los resultados de las externalidades, desglosado por tipo de contaminante tanto para la refinación de petróleo y para la generación de electricidad, como en forma conjunta.

A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

1. Calidad del aire en el dominio local

Por las características del modelo utilizado, AERMOD, la modelación de cada uno de los contaminantes es independiente de los otros. El modelo permite agrupar puntos de emisión de forma que se puede analizar en una misma corrida la contribución de cada grupo en el resultado total. Así, se definieron tres grupos de fuentes: planta termoeléctrica, quemadores de la refinería y el resto de las fuentes de la refinería; la contribución de la refinería es la suma de los resultados de estos dos últimos grupos.

De esta manera fue posible distinguir al analizar la dispersión de los contaminantes atmosféricos, la aportación de cada una de las instalaciones, la refinería y la planta termoeléctrica a las concentraciones totales de contaminantes estimadas tanto en la zona de Tula, como en Salamanca.

Así mismo, el modelo permite evaluar la concentración promedio para cualquier período que defina el usuario. La definición se hizo con base en las normas oficiales mexicanas de la Secretaría de Salud, que establecen las concentraciones máximas de los contaminantes considerados (SO_2 , NO_x y PM_{10}) para tener una calidad del aire aceptable.

En el caso del SO_2 , la NOM-022 establece que la concentración promedio de 24 h debe ser menor de $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para proteger la salud de la población y el promedio anual menor de $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El NO_x se expresa como NO_2 ; respecto a las concentraciones de este contaminante, la norma oficial mexicana de salud establece un valor de $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio horario, valor que no debe excederse más de una vez al año; el valor guía de la EPA es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual, valor que se tomó como referencia para este período.

Para el caso de PST y PM_{10} se tomaron como referencia los valores establecidos en las normas de la Secretaría de Salud, que considera valores promedio de 24 h y de un año. En el cuadro 12 se muestran los valores normados en México para los contaminantes bajo estudio, indicando en cada caso, el valor límite de concentración en un tiempo promedio y la frecuencia

máxima aceptable de exposición. Con el fin de analizar incidencias en las normas, se estimó la concentración promedio para estos contaminantes en los periodos de referencia y se comparó con los valores de las NOM.

El cuadro 13 presenta un resumen de las emisiones contaminantes consideradas para los estudios de dispersión.

Cuadro 12

VALORES NORMADOS PARA CONTAMINANTES DEL AIRE EN MÉXICO
(SO₂, NO₂ Y PARTÍCULAS)

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Concentración y tiempo promedio	
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (341 µg/m ³) 24 horas	1 vez al año	0.03 ppm (79 µg/m ³) promedio aritmético anual	NOM-022-SSA1- 1993
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)*	0.21 ppm (395 µg/m ³) 1 hora	1 vez al año	a/	NOM-023-SSA1- 1993
Partículas suspendidas totales (PST)	210 µg/m ³ (24 horas)	2% de mediciones en un año	-	Modificación a la NOM-025-SSA1- 1993
Partículas menores de 10 micrómetros (PM ₁₀)	120 µg/m ³ (24 horas)	2% de mediciones en un año	50 µg/m ³ (promedio aritmético anual)	

Fuente: Elaboración en base a las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud.

a/ Para evaluar la concentración anual de NO₂ se consideró como referencia la norma de la EPA, 100 µg/m³ ó 0,053 ppm.

Cuadro 13

EMISIÓN DE CONTAMINANTES CONSIDERADOS PARA LA DISPERSIÓN
(Toneladas / año)

Zona	Refinería			Termoeléctrica		
	SO ₂	NO _x	PST	SO ₂	NO _x	PST
Tula	110,799	4,925	7,834	108,357	20,225	6,906
Salamanca	46,115	3,377	3,350	38,303	3,938	2,999

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por PEMEX y CFE

a) **Zona de Tula**

Para el caso de SO₂, la concentración promedio anual estimada por el modelo para el dominio local excede el valor establecido por la norma de calidad del aire (79 µg/m³) en 196

receptores dentro del dominio, los cuales comprenden un área de 784 km² y se excede el doble de ese valor en 85 receptores (340 km²). En algunos puntos del dominio local se tienen valores estimados de concentración promedio anual que sobrepasan en más de 10 veces el valor correspondiente a la norma de calidad del aire.

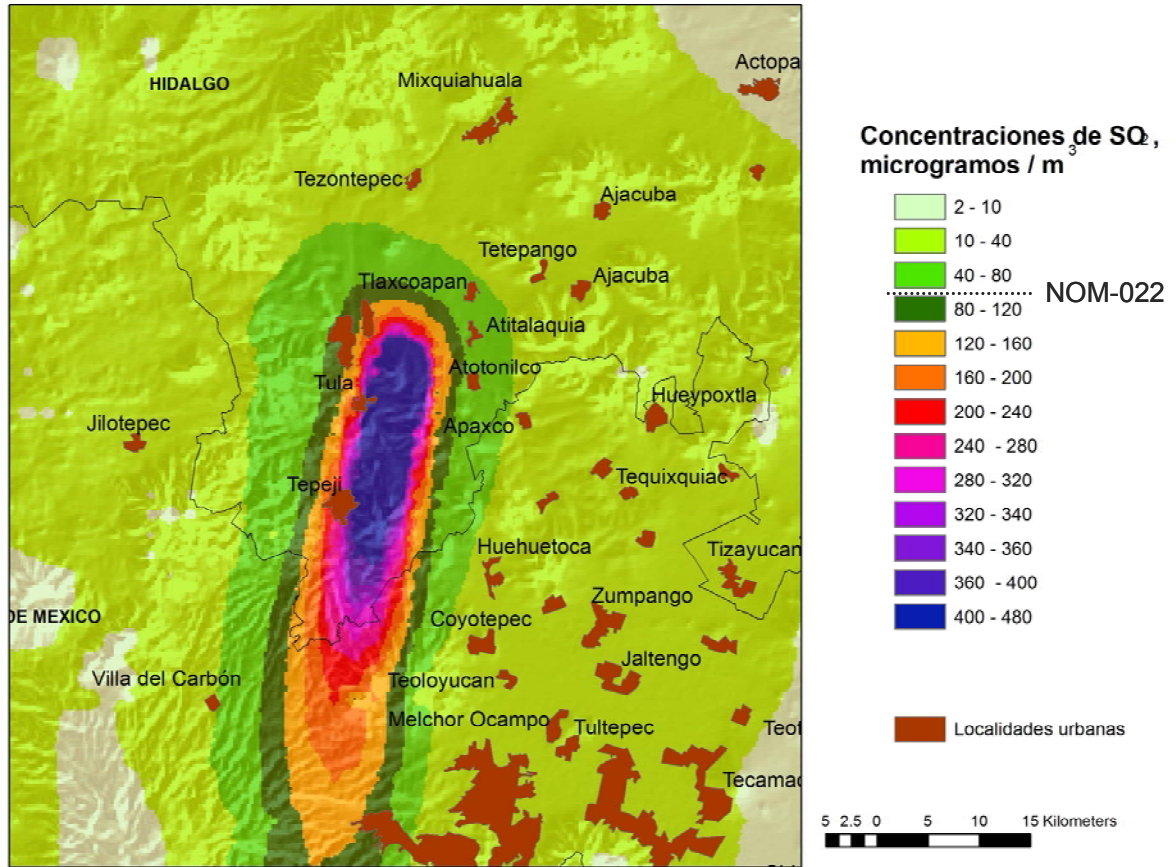
Se encuentra también que en 12.160 días-receptor se excede el promedio de 24 h que establece la citada norma de salud de 340 µg/m³ y 4.100 días-receptor exceden el doble de ese valor, de 680 µg/m³.

Se hizo una corrida del modelo de dispersión extendiendo el dominio local hacia el sur en 10 km más allá de los 50 km, con el fin de tener una estimación preliminar de la influencia de las emisiones de las instalaciones evaluadas en la parte norte de la Zona Metropolitana del Valle de México. El resultado se muestra en el gráfico 6. Para una evaluación precisa en la zona ampliada sería necesario aplicar un modelo de alcance medio, como el CALPUFF. Cabe precisar que para la determinación de las externalidades se consideró únicamente el dominio local regular de 100x100 km, como establece la metodología.

Con las emisiones consideradas, las concentraciones promedio estimadas para PM₁₀ y NO₂ en el dominio local están, en lo general, dentro de los valores de norma y presentan muchas menos excedencias a las normas de salud que las de SO₂. Para PM₁₀, la concentración promedio anual estimada por el modelo rebasa la especificada por la norma de salud en sólo 4 receptores; el valor máximo estimado es mayor que el valor de referencia en un factor de 2.6. La concentración diaria estimada excede el valor de referencia (260) sólo en 2 receptores en todo el dominio, por un factor de 1.7 en el caso extremo. Para el NO₂, la concentración promedio anual supera el valor de referencia (100) sólo en 5 receptores y es 2 veces mayor en 1 receptor.

La contribución de las emisiones de la refinería a las concentraciones de SO₂ y PM₁₀ es mayor que la de la planta térmica; para los NO_x, la contribución mayor es de la planta termoeléctrica. Sin embargo, la contribución de ésta para todos los contaminantes es ligeramente menor al porcentaje esperado si sólo se consideraran sus emisiones, posiblemente debido a la mayor altura de sus chimeneas y a la influencia de otros factores como la temperatura y velocidad de los gases de escape, que facilitan la dispersión de los contaminantes.

Gráfico 6

ISOLÍNEAS DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL DE SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), TULA

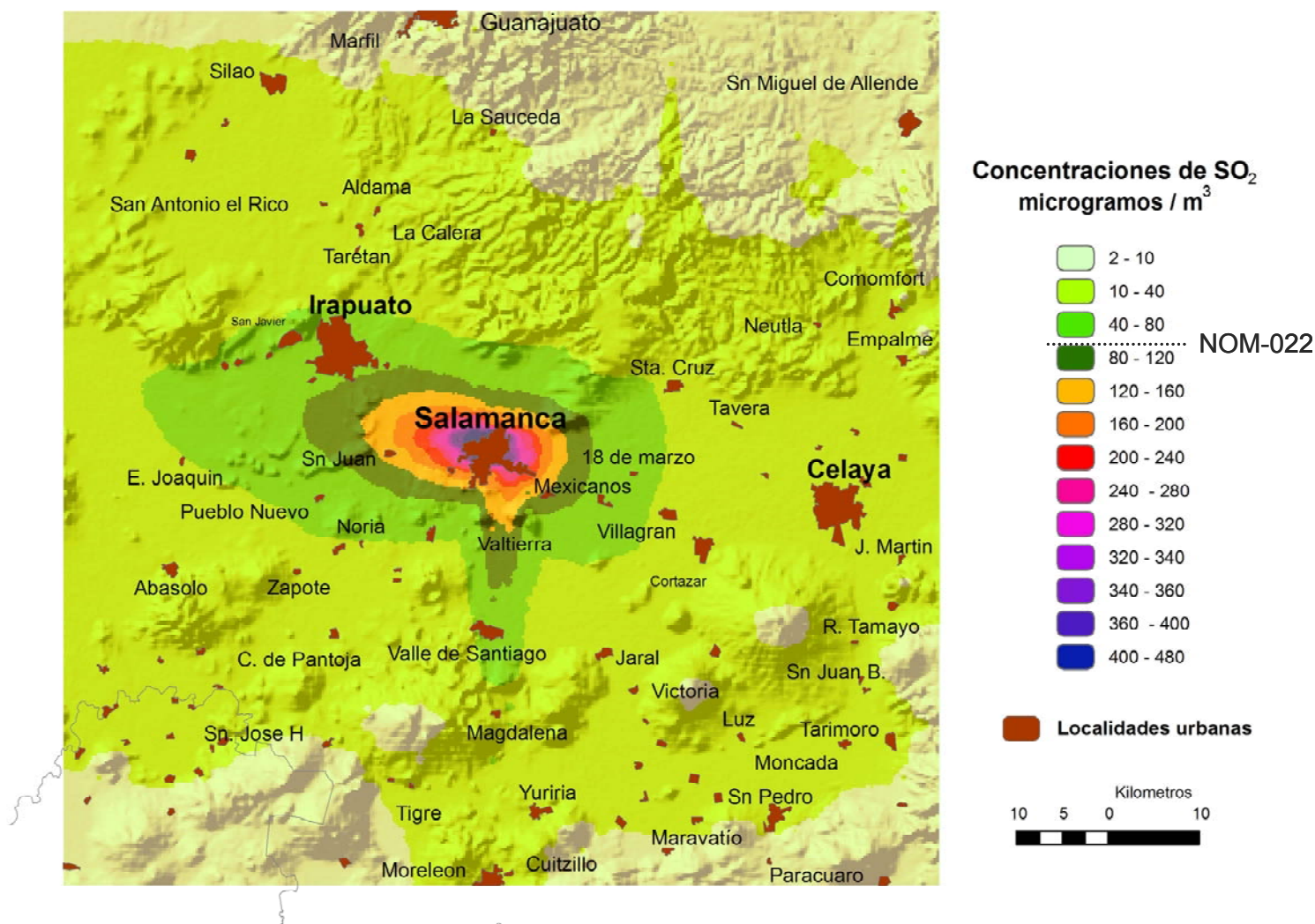
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo AERMOD.

b) Zona de Salamanca

Se modeló la dispersión local de los tres contaminantes SO_2 , NO_x y PM_{10} , considerando promedios anuales y de 24 h, al igual que para Tula. Para el SO_2 , la concentración promedio anual rebasa el valor de referencia ($79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en un total de 106 receptores de los 2.500 evaluados, que representa un área de 424 km^2 y en 29 receptores (116 km^2) se excede el doble de ese valor. El gráfico 7 muestra las isolíneas de concentración promedio anual estimadas.

Gráfico 7

ISOLÍNEAS DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL DE SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), SALAMANCA



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo AERMOD.

El valor máximo encontrado en algún punto del dominio excede en más de 5 veces el valor de referencia. La concentración promedio diaria estimada en todo el dominio rebasa el valor de referencia ($341 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 87 de los 2.500 receptores al menos un día del año; sólo 1.803 valores del total de promedios diarios calculados exceden el valor de referencia, lo que representa un 0.2%. Con las emisiones consideradas, las concentraciones de NO_2 y PM_{10} en el dominio local no presentan excedencias respecto a los valores de referencia.

2. Calidad del aire en el dominio regional

a) Definición de casos de estudio

Como se mencionó, el dominio regional evaluado fue definido como una rejilla con origen en 120 Oeste, 5 Norte, que contiene 120×60 celdas de $55 \times 55 \text{ km}$. Se definieron como receptores las celdas que se encuentran en un radio de 1.500 km. de la fuente evaluada, rango típico de los estudios de dispersión regional. Como resultado de la modelación se obtienen los niveles de concentración de SO_2 , NO_x y PM_{10} , así como aerosoles de sulfato y nitrato, en cada celda definida como receptor, durante el año 2004.

Al igual que para el dominio local, se evaluó la dispersión regional de los contaminantes emitidos por cada una de las instalaciones mayores y para las dos instalaciones en su conjunto, tanto en Tula, como en Salamanca. Como se mencionó, para evaluar una fuente en particular el procedimiento a seguir es correr el WMI dos veces: el “caso base”, sin tener en cuenta las emisiones de la fuente (o fuentes) que se desea estudiar y el “caso real” que incluye las emisiones del “caso base” más las emisiones propias de la fuente en estudio y restar las concentraciones obtenidas para cada contaminante en el caso real respecto al caso base.

Lo anterior implicó analizar tres casos de estudio para cada zona: i) aportación de ambas fuentes en su conjunto: en el caso base la celda correspondiente a Tula no tiene emisiones de SO_2 y sólo existe una aportación de NO_x (15.000 ton/año) de otras fuentes; ii) análisis de la Planta Termoeléctrica: en el caso base la celda tiene las emisiones de SO_2 y NO_x de la refinería, además del NO_x de las otras fuentes, y iii) estudio de la Refinería: en el caso base la celda tiene las emisiones de SO_2 y NO_x de la Planta Termoeléctrica, además del NO_x que se adjudica a las otras fuentes.

El caso base es muy importante en el análisis ya que las emisiones de SO_2 , NO_x y NH_3 consideradas tienen influencia directa en las emisiones de la fuente evaluada, es decir, en el caso real. Nótese que los procesos químicos que intervienen están gobernados por ecuaciones no lineales y la velocidad de reacción para la mayoría de los casos está relacionada con las concentraciones de los reactantes que intervienen. En el caso de las partículas, el modelo no considera interacciones químicas sino sólo su dispersión,

En Salamanca también se corrieron tres casos, Planta Termoeléctrica, Refinería y ambas. Las diferencias entre los casos están dadas por las emisiones de la celda donde se ubica Salamanca. No se consideran emisiones base en dicha celda cuando se evalúan ambas instalaciones; cuando se evalúa la planta térmica, las emisiones bases son las de la refinería y viceversa.

El cuadro 14 resume las diferentes corridas que se hicieron del modelo, considerando ambos casos, el base (que incluye emisiones de NH_3 y emisiones de fondo de NO_x) y el real. También muestra los valores máximos de incremento de la concentración estimados para los contaminantes primarios y los aerosoles de sulfatos y nitratos y el máximo decremento de aerosoles de nitrato, identificado como “mín”.

Cuadro 14

CASOS DE ESTUDIO, DATOS DE EMISIONES Y CONCENTRACIONES OBTENIDAS

Casos de estudio	Escenario	Emisiones, ton/año				Concentraciones, $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
		SO ₂	NO _x	PST	NH ₃	SO ₂	SO ₄ ²⁻	NO _x	NO ₃ ⁻	PST	
		SO ₂	NO _x	PST	NH ₃	Max	Max	Max	Min	Max	Max
1	Tula- todas	219 156	25 151	14 741	0	53,06	13,6	5,24	-0,76	0,7	3,51
1_base		0	15 000	0	9 636						
2	Tula- termo	108 358	20 225	6 906	0	26,23	6,44	4,22	-0,23	0,75	1,64
2_base		110 799	19 926	0	9 636						
3	Tula- refinería	110 799	4 926	7 834	0	26,83	6,62	1,04	-0,26	0,09	1,87
3_base		108 358	35 225	0	9 636						
4	Salamanca,	84 419	7 316	6 350	0	22,57	6,43	1,6	-0,05	0,67	1,68
4_base	todas	0	0	0	6 099						
5	Salamanca,	38 303	3 938	2 999	0	10,24	2,86	0,87	-0,02	0,35	0,79
5_base	termo	46 115	3 377	0	6 099						
6	Salamanca,	46 115	3 377	3 350	0	12,33	3,45	0,74	-0,03	0,28	0,89
6_base	refinería	38 303	3 938	0	6 099						

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo WMI.

Como se desprende del cuadro 14, aún en el peor de los escenarios, en el caso del dominio regional no se llegan a presentar los elevados valores de concentración de los contaminantes que se encuentran en el dominio local, debido a que el modelo estima la concentración promedio en cada celda del dominio, que en este caso tiene una superficie de 3.025 km² (55*55 km), en tanto que en el dominio local se consideran celdas de 2*2 km. No obstante, los incrementos estimados de concentración de los contaminantes son muy significativos y además, afectan a una gran población asentada en la gran extensión territorial que cubre el dominio regional.

Se observa una relación directa entre las emisiones de SO₂ y las concentraciones de SO₂ y SO₄²⁻ y entre las emisiones de NO_x y las concentraciones de NO_x. No se observa en lo general una relación directa entre las emisiones de NO_x y las concentraciones de NO₃⁻, las cuales dependen también de las emisiones de SO₂, tanto de la instalación que se analiza como de las emisiones base y, como se aprecia, pueden llegar a tener valores negativos.

b) Caso de Estudio: emisiones de la refinería y la termoeléctrica de Tula

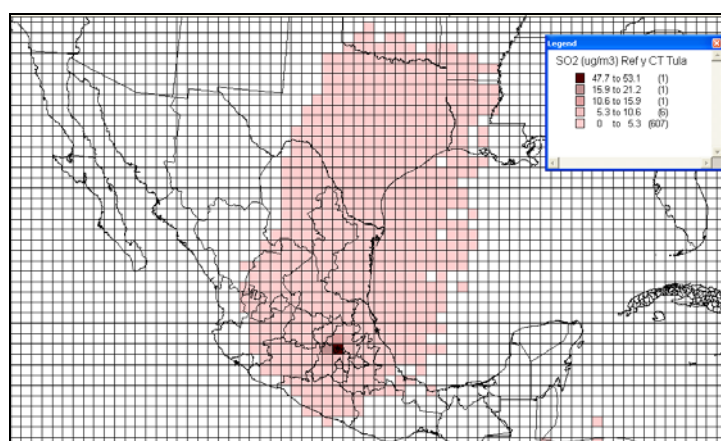
A manera de ejemplo se presentará una explicación general de los resultados obtenidos de las concentraciones al correr los modelos para el caso de Tula, emisiones de las dos instalaciones en conjunto. Para evaluar ambas fuentes el caso base considera en la celda de Tula emisiones de

SO₂ nulas y de NO_x 15.000 ton/año. Sobre esta base se añaden las emisiones totales: 219.156 ton/año para SO₂, 25.151 ton/año para NO_x y 14.740 ton/año de PST.

Los gráficos 8 al 10 muestran el comportamiento para los contaminantes primarios, con concentraciones promedio anual máximas de 53,1 µg/m³, 5,2 µg/m³ y 3,5 µg/m³ para SO₂, NO_x y PST respectivamente. Se observa que en todos los casos la concentración disminuye rápidamente a la décima parte del valor máximo, en correspondencia con el comportamiento esperado para los contaminantes primarios. Las concentraciones obtenidas para SO₂ son relativamente elevadas debido a los altos niveles de emisión de este contaminante.

Gráfico 8

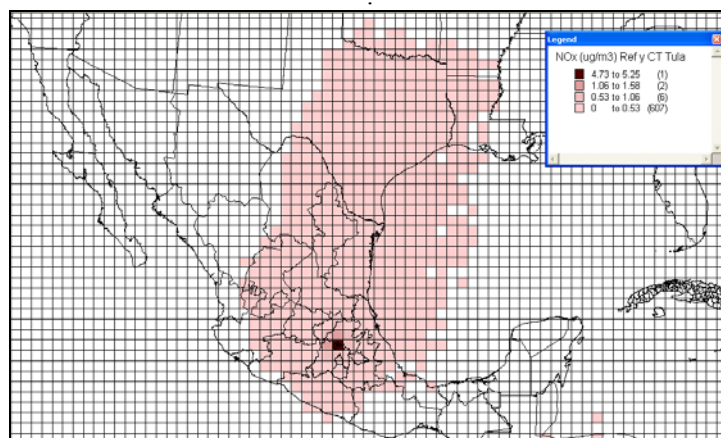
TULA, INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE SO₂ (µg/m³)



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo WMI.

Gráfico 9

TULA, INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE NO_x (µg/m³)

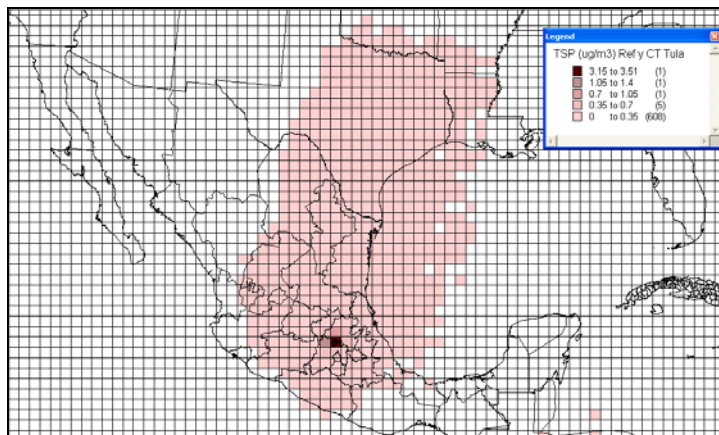


Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo WMI.

En el gráfico 11 se observa el resultado de la modelación de la concentración de aerosoles de sulfato. Como se esperaba, se alcanzan incrementos importantes a mayores distancias que en el caso de los contaminantes primarios. El valor máximo alcanzado es de $13,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se aprecian otros valores elevados en un mayor número de celdas cercanas del dominio, en correspondencia con la elevada emisión de SO_2 de las fuentes estudiadas y con las emisiones bases de NH_3 , las cuales son altas en la zona.

Gráfico 10

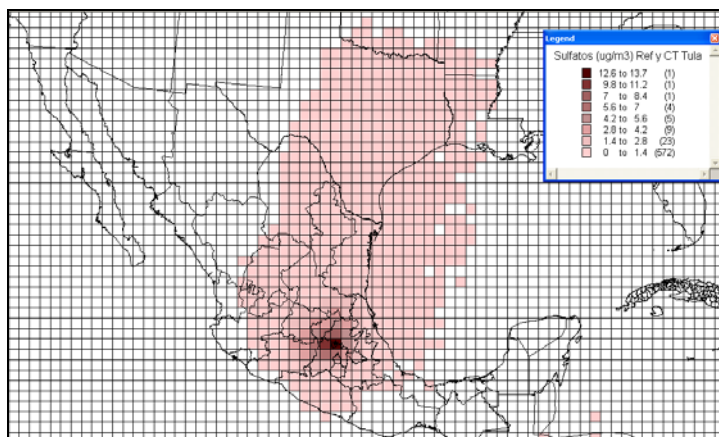
TULA, INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo WMI.

Gráfico 11

TULA, INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



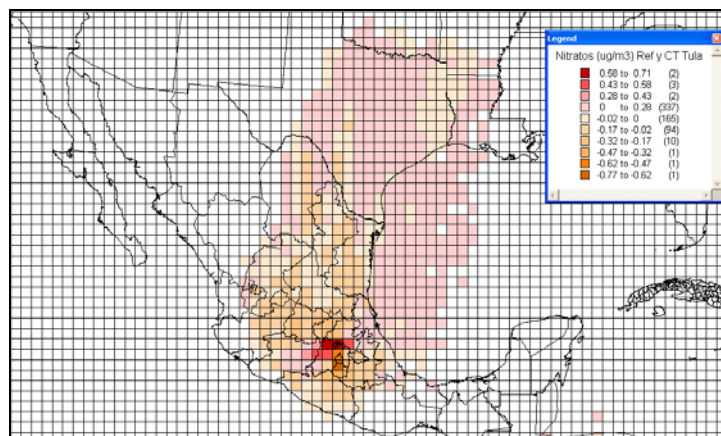
Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo WMI.

El gráfico 12 muestra la variación de la concentración de aerosoles de nitrato. En general se observa que los incrementos no son elevados, con un máximo de $0,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se aprecia también que en un número significativo de celdas, las concentraciones disminuyen siendo el

decremento máximo de $0,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento puede explicarse de la manera siguiente: El SO_2 y el NO_x necesitan del NH_3 para la formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y del NH_4NO_3 respectivamente. La formación de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ requiere el doble de NH_3 que la formación de NH_4NO_3 y ambas reacciones ocurren a la misma velocidad, a iguales concentraciones de los reactantes. Como en general la concentración de NO_x es mucho menor que la de SO_2 , se favorece la formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, resultando incluso que si la emisión de SO_2 de la fuente evaluada es significativamente mayor que la de NO_x , la concentración de nitratos totales ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{pNO}_3$) puede disminuir, respecto a la concentración obtenida en el caso base. Cabe esperar estos decrementos, especialmente cerca de la fuente donde la influencia de la concentración de SO_2 es aún más importante. En el gráfico 13 se observa el incremento de pNO_3 , especie cuya formación no depende del NH_3 , en la mayor parte de las celdas salvo por un pequeño grupo de celdas alejadas de la fuentes, donde disminuye con un mínimo de apenas $-0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gráfico 12

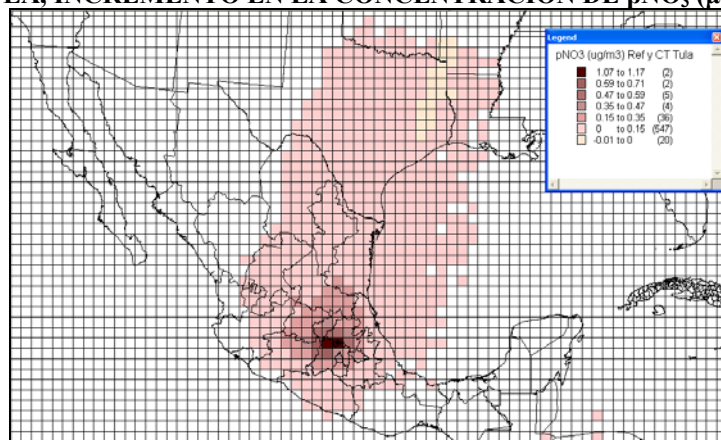
TULA, VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo WMI.

Gráfico 13

TULA, INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE pNO_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo WMI.

3. Deposición

Los análisis realizados con los modelos AERMOD y WMI incluyen la estimación de la deposición seca y húmeda de los contaminantes primarios y secundarios. Estos parámetros son muy importantes por tener una influencia directa en los valores de concentración.

Los valores de deposición máximos estimados para el SO₂ están en el orden, o superan los establecidos en la guía de Calidad de Aire para Europa tanto en Tula como en Salamanca. En el dominio local de Tula, los valores promedio también están por encima de lo establecido en dicha Guía. Para el caso de NO_x los valores obtenidos de deposición están por debajo de las cargas críticas propuestas para Europa.

No se han analizado estos resultados contra los valores de carga crítica para las condiciones de México, pues sería necesario caracterizar con gran detalle los datos de uso y tipo de suelos. En general, no se conoce en qué medida los valores de carga crítica propuestos para Europa puedan aplicarse en otras regiones debido a que la carga crítica depende del manejo pasado y presente, del tipo de ecosistema y de las condiciones y usos del suelo. La información requerida para analizar adecuadamente los resultados y convertirlos en impactos físicos y costos externos es difícil de obtener.

B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES

Siguiendo la Metodología de Vías de Impacto, a partir de los resultados de los modelos de dispersión se calculó el impacto físico en cada uno de los receptores (casos por año). Para la evaluación de los costos externos en la salud se consideró, en casos de morbilidad la suma de los costos directos de la enfermedad, la pérdida de productividad y la voluntad a pagar; y en los casos de mortalidad, el valor de los años de vida perdidos por exposición a la contaminación atmosférica.

Las externalidades ambientales de las instalaciones del sector energía en Tula y Salamanca se estimaron en 868 y 204 millones de dólares, respectivamente, en el año de 2004. Este valor corresponde exclusivamente al impacto de la emisión de contaminantes a la atmósfera en la salud humana, sin considerar los impactos en cultivos agrícolas, ecosistemas, materiales y el calentamiento global. El cuadro 15 muestra los costos externos por zona y por contaminante.

Cuadro 15

COSTOS EXTERNOS POR ZONA Y CONTAMINANTE (Millones de dólares/año)

Zona	PM ₁₀	SO ₂	Sulfatos	Nitratos	Total costos externos
Tula	74,2	5,5	754,4	34,3	868,4
Salamanca	43,2	2,8	152,3	5,4	203,7

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo SEIA.

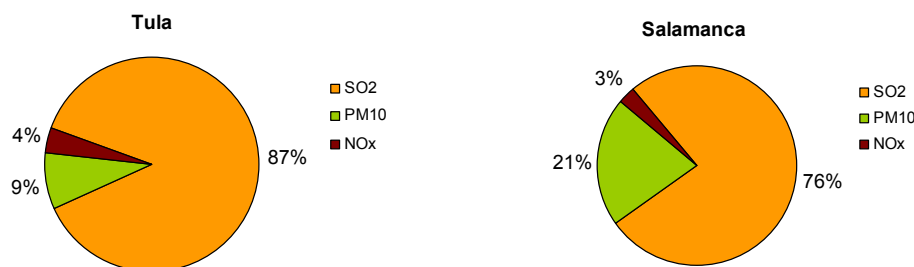
El mayor impacto de las instalaciones en Tula se explica porque tanto las emisiones como la población afectada en el dominio son mayores en esta zona. Como se ha señalado, los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbres inherente a los modelos, lo que implica que el valor real puede ser tres a cinco veces menor o mayor que el estimado.

El contaminante de mayor impacto es el SO₂, como se aprecia en el gráfico 14; su aporte como contaminante primario y como secundario en forma de sulfatos, constituye el 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. En segundo lugar se encuentran las partículas finas, PM₁₀, que aportan un 9% y 21% en Tula y Salamanca, respectivamente. Finalmente los nitratos tuvieron la menor contribución, por la menor emisión de NO_x, contaminante precursor, y su menor toxicidad. El impacto de los contaminantes secundarios es más importante que el de los primarios, alrededor del 91% y 77% del total, para Tula y Salamanca, respectivamente.

El impacto local es cerca de 4% para Tula y 20% para Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 Km) es el más elevado pues los contaminantes son transportados a grandes distancias, se transforman en contaminantes secundarios, y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Gráfico 14

CONTRIBUCIÓN POR CONTAMINANTE AL TOTAL DE LAS EXTERNALIDADES



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo SEIA.

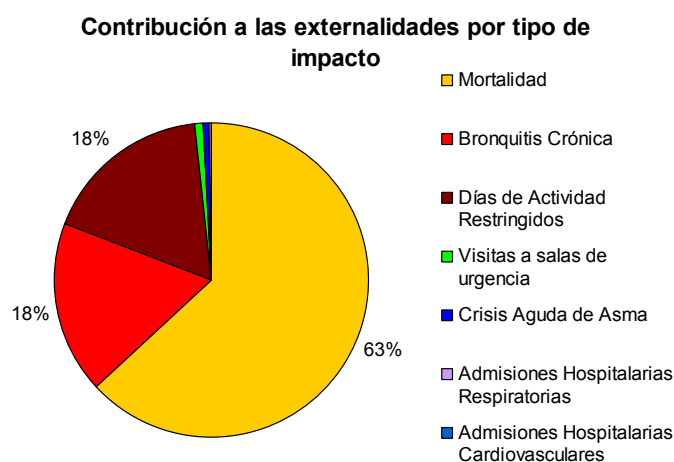
Nota: Se considera en el impacto del SO₂ la contribución de los sulfatos, y en el impacto del NO_x, la de los nitratos.

Cabe señalar que aún cuando no se rebasen las normas de calidad de aire, el modelo reporta un impacto porque las funciones exposición–respuesta son lineales, sin umbral. El principal componente de los costos es la mortalidad crónica (por material particulado y aerosoles de sulfato y nitrato), misma que representa más del 60% de los costos externos en ambas zonas. En segundo lugar se encuentran los impactos por morbilidad y pérdida de productividad laboral asociada, en este caso la contribución por bronquitis crónica y días de actividad restringida son los indicadores más importantes. El gráfico 15 muestra la contribución por tipo de impacto al total de las externalidades.

Con el fin de desglosar los costos externos por actividad económica, se corrió el modelo considerando de forma individual las emisiones de la refinación de petróleo y de la generación de electricidad. Se encuentra que el modelo estima un menor impacto si las actividades se evalúan de forma separada, debido a los mecanismos de formación de contaminantes en la dispersión regional que consideran distintas emisiones de fondo en cada caso. La suma de los costos de la refinería y de la central eléctrica evaluados de forma independiente es ligeramente inferior al costo de ambas instalaciones evaluadas simultáneamente (alrededor de 4%).

Gráfico 15

CONTRIBUCIÓN POR TIPO DE IMPACTO AL TOTAL DE LAS EXTERNALIDADES



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo SEIA.

Los impactos de la refinación de petróleo se muestran en el cuadro 16. La externalidad en esta actividad productiva se analizó considerando el volumen de proceso de crudo⁵⁹ de las refinerías Miguel Hidalgo (Tula) e Ing. Antonio M. Amor (Salamanca) de PEMEX Refinación, en miles de barriles de petróleo crudo diario (mbd). En el año 2004, las dos refinerías procesaron aproximadamente 490 mbd; 292 Tula y 199 Salamanca. Considerando el costo externo de cada instalación, de 418,6 y 114,4 millones de dólares, respectivamente para Tula y Salamanca, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo para Tula y de 1,58 para Salamanca. Como referencia, si se considera un precio de 33 dólares por barril de petróleo crudo,⁶⁰ la externalidad representaría 11,9% para Tula y 4,8% para Salamanca.

⁵⁹ PEMEX (2006)

⁶⁰ Petróleos Mexicanos, Precio Promedio de Exportación de Petróleo Crudo (dólares por barril). www.pemex.com. Valor promedio de 2004.

Cuadro 16

EXTERNALIDADES DE LA REFINACIÓN DEL PETRÓLEO

REFINERÍA	Total costo externo (millones de dólares ₂₀₀₄)	Dólares / barril	Proporción del precio (%)
Tula	418,6	3,93	11,9
Salamanca	114,4	1,58	4,8

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo SEIA.

Por su parte, la generación de electricidad durante el año 2004 en las dos zonas representó externalidades por un valor de 402,5 y 85,9 millones de dólares en Tula y Salamanca, respectivamente. En el cuadro 17 se muestra el total del costo externo para las centrales analizadas, así como el costo por kWh generado. Si se considera un costo de generación para las centrales termoeléctricas de vapor de 5,8 centavos de dólar por kWh,⁶¹ las externalidades representarían un 62,6% y 46,6% del costo de generación promedio para las centrales de vapor mayores respectivamente en Tula y Salamanca.

Cuadro 17

EXTERNALIDAD EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

CENTRAL	Total costo externo (millones de dólares ₂₀₀₄)	Centavos de dólar / kWh	Proporción del costo de generación (%)
Tula	402,5	3,63	62,6
Salamanca	85,9	2,70	46,6

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo SEIA.

La contribución a las externalidades del sector refinación fue de 51% y 57%, en Tula y Salamanca, respectivamente. Sin embargo, es necesario mencionar que los análisis realizados para modelar las emisiones potenciales de los quemadores de campo, cuando las refinerías operan a bajas eficiencias de recuperación de azufre o no operan de manera adecuada las plantas recuperadoras de azufre, muestran que el impacto de las refinerías puede ser considerablemente mayor que el impacto de las termoeléctricas.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas o bosques, que generalmente son menores, o en el calentamiento global. Si se considera el impacto por cambio climático, el valor de las externalidades ambientales en las dos zonas se incrementa en 266 millones de dólares considerando un estimado medio de 18 dólares por tonelada de CO₂ como costo de mitigación en México. El costo por emisiones de GEI se mantiene separado por estar estimado por un método indirecto y no por la metodología de Vías de Impacto.

⁶¹ CFE (2005)

C. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La mayor contribución a los costos externos la dan los casos de mortalidad, por lo que las variables relacionadas con su evaluación tienen una gran incidencia en los resultados. Por esta razón, se presentan en el cuadro 18 los resultados obtenidos en el caso base y los valores estimados de los costos externos aplicando el enfoque de valor estadístico de la vida para la mortalidad crónica usando tanto el valor encontrado para México como el valor transferido del valor estadístico de la vida de otros países, en este caso de Estados Unidos y de la Unión Europea, ajustando a través de la razón entre los productos internos brutos expresados en poder de paridad de compra.

Cuadro 18

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA EVALUACIÓN DE LA MORTALIDAD (Millones de dólares de 2004)

	Caso base ^a	Enfoque de VEV ^b	VEV de EUA ^c
Tula	868	1 145	4 938
Salamanca	204	300	1 341
Total	1 072	1 445	6 279

Fuente: Elaboración propia.

a/ Caso base: valoración de la mortalidad utilizando el enfoque de años de vida perdidos y Valor de un año de vida perdido, VAVP. Se calculó la pendiente de la FER en años de vida perdidos con estadísticas de México y se estimó el valor de un año de vida perdido VAVP a partir del VEV estimado por Hammit-Ibarrarán.

b/ Enfoque de Valor Estadístico de la vida: valoración de la mortalidad utilizando el enfoque de casos de muerte evitados y el Valor Estadístico de la Vida estimado por Hammit-Ibarrarán

c/ Igual que b), utilizando el VEV transferido de Estados Unidos (considerando la paridad del poder adquisitivo y una elasticidad ingreso igual a 1)

En el primer caso, el resultado aumenta un 32% para Tula y 47% para Salamanca. Como se explicó en el capítulo metodológico, existen argumentos para aplicar ambos enfoques; algunos expertos consideran que, en el caso de la mortalidad por contaminación atmosférica, el enfoque de pérdida de expectativa de vida es más adecuado sin embargo existen países como Estados Unidos que mantienen el enfoque de valorar cada caso de mortalidad aplicando el valor estadístico de la vida. El cuadro 18 se presenta únicamente con fines comparativos.

En el segundo caso, al aplicar la transferencia de costos de Estados Unidos y el enfoque de valor estadístico de la vida, el costo externo aumenta por un factor mayor de 5 y 6 veces con respecto al caso base, para Tula y Salamanca respectivamente. Como se señaló, el VEV en México utilizado en este análisis proviene de un único estudio desarrollado a través del método de compensaciones salariales por lo que representa un valor bajo con respecto a estudios realizados en países en desarrollo y podría no reflejar la aversión al riesgo de toda la población. El cuadro 18 presenta el análisis de sensibilidad, que muestra que es conveniente desarrollar estudios de valoración contingente para valorar la mortalidad, de forma que se pueda hacer un comparativo con los principales estudios de referencia internacional, para el caso de la mortalidad. Muestra también que el valor estimado para las externalidades ambientales en el caso base es un valor conservador, ya que utiliza un valor estadístico de la vida estimado a partir del método de compensaciones salariales.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio estima, mediante la aplicación de la Metodología Vías de Impacto, los costos externos del sector energía en las zonas críticas de Tula, Hidalgo y Salamanca, Guanajuato, en donde coexisten instalaciones de refinación de petróleo con centrales termoeléctricas.

Las externalidades ambientales del sector energía, para el año 2004, se estimaron en 868 y 204 millones de dólares en las zonas de Tula y Salamanca, respectivamente. El mayor impacto de las instalaciones en Tula se explica porque tanto las emisiones como la población afectada son mayores en esta zona.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, o en el calentamiento global. Si se considera el impacto por cambio climático, las externalidades ambientales se incrementan en 266 millones de dólares, considerando el estimado medio de costos de mitigación en México de una tonelada de CO₂.

El contaminante de mayor impacto es el SO₂; su aporte, como contaminante primario y secundario en forma de sulfatos, constituye el 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 Km) es mayor pues los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Considerando el costo externo de cada refinería, de 418,6 y 114,4 millones de dólares, respectivamente, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo procesado para Tula y de 1,58 para Salamanca. Como referencia, si se considera un precio de 33 dólares por barril de petróleo crudo, la externalidad representaría un 11,9% y 4,8%, respectivamente para Tula y Salamanca.

Para la generación de electricidad en las dos zonas, durante el año 2004, se estimó un costo externo de 402,5 y 85,9 millones de dólares para Tula y Salamanca, respectivamente. La externalidad equivale a 3,63 y 2,70 centavos de dólar por kWh generado, para Tula y Salamanca, respectivamente; si se considera un valor de referencia de 5,8 centavos de dólar por kWh, como costo de producción en las centrales termoeléctricas de vapor, los costos por externalidades representarían un 62,6% y 46,6% del costo de generación. Estos resultados son consistentes con la estimación de externalidades de la generación de electricidad en el principal estudio de referencia de Europa, el Proyecto ExternE.

Los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre considerado en el modelo, lo que implica que el valor real podría ser 3 a 5 veces menor o mayor que el valor estimado.

A pesar de las incertidumbres inherentes a este tipo de análisis, en el presente estudio se realizaron avances metodológicos que permitieron una mejor simulación de fuentes fijas de

emisión. Los modelos de dispersión utilizados proporcionaron información, más detallada que la del estudio previo, sobre los niveles de concentración de contaminantes tanto en el dominio local como regional. Los promedios anuales de concentración estimados de PM_{10} y NO_x están en lo general dentro de los límites fijados por las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud. Sin embargo, para el caso del SO_2 , en ambas zonas se encuentran incidencias importantes a las normas para proteger la salud. .

La concentración estimada de SO_2 excede el valor normado en el aire ambiente que establece la NOM-022-SSA1-1993, como medida de protección a la salud de la población. La concentración promedio anual excede el valor de referencia $79 \mu g/m^3$ en un área de $784 km^2$ en el caso de Tula y de $424 km^2$ en Salamanca, y es mayor del doble en un área importante en ambas zonas. En algunos puntos del dominio local en Tula los valores estimados de concentración promedio anual sobrepasan en más de 10 veces la norma. El parámetro de concentración máxima promedio de 24 horas ($340 \mu g/m^3$) se excede también varios días en ciertos receptores.

Los modelos de dispersión utilizados requieren ser calibrados y verificados en campo utilizando mediciones de estaciones de monitoreo de la calidad del aire. En Salamanca, por ejemplo, la red de monitoreo local, confirma que en una de las estaciones se excedió la Norma de concentración promedio anual para el 2004. En Tula, es necesario recopilar información sistematizada de la calidad del aire.

Los resultados obtenidos, tanto del costo en salud como de los valores estimados de concentración de contaminantes superiores a los permitidos, ratifican la necesidad de realizar acciones para controlar las emisiones. Los primeros resultados indujeron a la SEMARNAT a expedir una Norma Oficial Mexicana de Emergencia, NOM-EM-148, en abril de 2006, para reducir las emisiones de SO_2 de las refinerías de Tula y Salamanca, mediante el proceso de recuperación de azufre. Esta Norma está en proceso de expedirse como Norma definitiva, extendiendo su campo de aplicación a todo el Sistema Nacional de Refinación.

Por lo que hace a las emisiones de los procesos de combustión del sector eléctrico, su reducción requiere de acciones firmes del sector energía para incluir el uso de tecnologías de control de emisiones, en los casos en que no se pueda disponer de combustibles limpios. El presente estudio ratifica que los beneficios ambientales que se obtendrán de la reducción de emisiones son contundentes.

Sin duda alguna, la producción de energía es factor esencial del desarrollo y genera también externalidades positivas; su producción y consumo son indispensables para el crecimiento de nuestro país. Se espera que el estudio proporcione las bases para inducir a los agentes económicos a reorientar sus procesos y tecnologías a la protección del ambiente y al desarrollo sustentable, considerando los costos del impacto ambiental que ocasionan.

ACRÓNIMOS

AERMOD: American Meteorological Society / Environmental Protection Agency Regulatory Model
 AVP: Año de vida perdido
 CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la Organización de Naciones Unidas.
 CFE: Comisión Federal de Electricidad
 EPA: Environmental Protection Agency, (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
 FUND: Climate Framework for Uncertainly Negotiation and Distribution
 GPCC: Global Precipitation Climatology Center
 IMSS: Instituto Mexicano del Seguro Social
 INE: Instituto Nacional de Ecología
 INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
 INSP: Instituto Nacional de Salud Pública
 IRR: Incremento de Riesgo Relativo
 ISCST3: Industrial Source Complex Short-Term 3, (Modelo de dispersión a escala local para instalaciones industriales)
 LFC: Luz y Fuerza del Centro
 OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica
 PEMEX: Petróleos Mexicanos
 PPP: Paridad del Poder Adquisitivo
 SEIA: Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas
 SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
 SENER: Secretaría de Energía
 SIG: Sistema de información geográfica
 SIMPACTS: Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation, (Modelo simplificado para estimar el Impacto de la Generación de Electricidad)
 SINAIS: Sistema Nacional de Información en Salud
 SMN: Servicio Meteorológico Nacional
 UWM: Uniform World Model, (Modelo simplificado para estimar externalidades)
 VAVP: Valor de un Año de Vida Perdido
 VEV: Valor Estadístico de la Vida
 WTM: Windrose Trajectory Model, (Modelo de dispersión de contaminantes a escala regional)

BIBLIOGRAFÍA

Banco Mundial (2006), *World Development Indicators database*.

Beth, Anne y Brad Bass (2005), *Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model*, 6th biennial CANSEE (Canadian Society for Ecological Economics), conference, 27-29, October, 2005, Toronto.

Boerboom, A.J.H, y G. Kleyn (1969), "Diffusion Coefficients of Noble Gases in Water", *J. Chem. Phys.*, vol. 50, pp 1086-1088.

Carmichael, G. R. y otros (2001), "Model Intercomparison Study of Long Range Transport and Sulfur Deposition in East Asia (MICSASIA)", *Water Air & Soil Pollution*.

Cesar, Herman, y otros (2002), *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City*, Banco Mundial.

Cimorelli, A. y otros (2005), "AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization", *Journal of Applied Meteorology*, 44(5): 682–693.

CFE (Comisión Federal de Electricidad) (2005a), *Costos y Parámetros de Referencia para la formulación de Proyectos de Inversión del Sector Eléctrico México*.

_____ (2005b) *Informe de Operación 2004*, México.

Derwent, R. G. y otros (1989), "An intercomparison of long-term atmospheric transport models: the budgets of acidifying species for the Netherlands", *Atmospheric Environment*, vol. 23, No 9, 1893-1909.

Derwent, RG. y K. Nodop (1986), "Long-range transport and deposition of acidic nitrogen species in north-west Europe", *Nature* vol. 324, November, 356-358.

European Commission, ExternE (2005), *Externalities of Energy: Methodology 2005 Update*, (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, France, p.p 83-85; p.p. 181-188.

Hammit, J. y M. Ibarra (2006), *The Economic Value of Fatal and Non-Fatal Occupational Risks in Mexico City Using Actuarial- and Perceived-Risk Estimates*, México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2006), *Población total por grupos quinquenales de edad según sexo, 1950 a 2005*, México.

- _____ (2005), Salario mínimo general promedio de los Estados Unidos Mexicanos. Comisión Nacional de Salarios Mínimos, y Distribución porcentual de los hogares por sexo del jefe y rangos de salarios mínimos equivalentes, 1992 a 2004. México.
- _____ (2003a), *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) escala 1:50,000*, México.
- _____ (2003b) *Uso del suelo y Vegetación Serie 3 México*.
- _____ (2000), *Marco Geoestadístico Municipal 2000*. México.
- INEGI/Secretaría de Salud (2005), *Base de datos de defunciones 2004*.
- Leksell y Rabl (2001), “Air Pollution and Mortality: Quantification and Valuation of Years of Life Lost”, *Risk Analysis*. Vol. 1, N° 5.
- Logan, J. A. (1999), “An Analysis of Ozone Data for the Troposphere: Recommendations for Testing 3-D Models and Development of a Gridded Climatology for Tropospheric Ozone”, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* 104(D13): 16115-16149.
- McKinley, G. y otros (2003), *The Local Benefits of Global Air Pollution Control in Mexico City*, Instituto Nacional de Ecología, México, (www.ine.gob.mx)
- Metcalfe, S.E. y otros (1989), “Acid deposition modeling and the interpretation of the United Kingdom Secondary Precipitation Network Data”, *Atmospheric Environment*, vol. 23, N° 9, 2033-2052
- OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) (2003), *SIMPACTS: Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation*, Multilanguage version.
- Paine, R. J. y otros (1998), “Evaluation Results for AERMOD”. *Draft Report, Docket No. A-99-05; II-A-05*, disponible en www.epa.gov/scram001/
- Patronato para el Monitoreo de la Calidad del Aire de Salamanca, A.C. (2004), Datos de calidad del aire y parámetros meteorológicos de las estaciones de la red. México. (Disco de datos enviado a SEMARNAT)
- PEMEX (Petróleos Mexicanos) (2006), *Anuario Estadístico 2005*, México.
- _____ (2005a), *Informe 2004, Desarrollo Sustentable*, México.
- _____ (2005b), *Anuario Estadístico 2004*, México.
- PEMEX Refinación (2006), Reporte en línea de Emisiones Contaminantes al Aire, SISPA, México.

- Perry, S. y otros (2005), "AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part II: Model Performance against 17 Field Study Databases", *Journal of Applied Meteorology*, 44(5): 694–708.
- Rabl A. y J.V. Spadaro (1999), *An Analysis of the Uncertainties of Damages and Costs of Air Pollution*, Centre d'Energétique, Ecole des Mines de Paris, Francia.
- Sander, Rolf (1999), *Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry*, Air Chemistry Department, Max-Planck Institute of Chemistry, February. (<http://www.mpch-mainz.mpg.de/sander/res/henry.html>).
- Sahr, Robert C. (2006), *Consumer Price Index (CPI) Conversion Factors 1800 to estimated 2016 to Convert to Dollars of 2000*, Oregon State University.
- Secretaría de Energía (SENER) (2005a), *Emisiones Sector Eléctrico por Central 2004*. México. www.sener.gob.mx
- _____ (2005b) *Generación Bruta de Energía Eléctrica*. México. www.sener.gob.mx
- _____ (2004), *Emisiones del Sector Eléctrico Nacional*", www.sener.gob.mx
- _____ (s/f), *Elaboración de productos petrolíferos por refinería*, Sistema de Información Energética con información de Petróleos Mexicanos, periodo 1 de enero a 31 de diciembre de 2004, (www.sener.gob.mx).
- Secretaría de Salud/Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS) (2005a), *Sistemas Automatizados de Egresos Hospitalarios*, México.
- _____ (2005b), *Mortalidad 2004*, México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2006a), *Hacia una estrategia nacional de acción climática*, México.
- _____ (2006b), *Inventario nacional de emisiones*, Mexico.
- _____ (2005), *Cédulas de Operación Anual del 2004 de las Refinerías de Petróleo y Centrales Eléctricas*, México.
- SEMARNAT / CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2004), *Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México*, (LC/MEX/L. 644, 22 de noviembre, México.
- Scire, J.S., D.G. Strimaitis, y R.J. Yamartino (2000), *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model* (Version 5.0). Earth Tech, Inc., Concord, MA.

Servicio Meteorológico Nacional (2005a), Datos de la red de radiosondeos, Estación 76679, datos del 2004. México.

_____ (2005b), Datos meteorológicos de las estaciones meteorológicas automáticas con transmisión vía satélite, Estaciones 2389, 2320, 2350, 1915, 2080, 2423 y 2364, datos del 2004. México.

_____ (2005c) Datos de estaciones climatológicas, datos del 2004, Archivo comprimido en relación a la solicitud de información climatológica de datos diarios representativos para Tula, Hidalgo y Salamanca, Guanajuato, México, 2006.

Spadaro, Joseph V. (2006), *Methodology for CRF and VOLY estimates for Mexico*. Comunicación personal por correo electrónico, 11 de septiembre de 2006.

_____ (1999), *Quantifying the Impacts of Air Pollution*, Centre d'Energétique, Ecole de Mines de Paris, Paris.

Spix, C., HR Anderson, J Schwartz, MA Vigoti, A Le Tertre, JM Vonk, G Touloumi, F Balducci, T Piekarski, L Bacharova, A Tobias, A Pönkä, & Katsouyanni K. (1998), *Short term effects of air pollution on hospital admissions for respiratory diseases in Europe: a quantitative summary of APHEA study results*, Archives of Environmental Health.

Spivakovsky, C. M., J. A. Logan, S. A. Montzka, Y. L. Balkanski, M. Foreman-Fowler, D. B. A. Jones, L. W. Horowitz, A. C. Fusco, C. A. M. Brenninkmeijer, M. J. Prather, S. C. Wofsy and M. B. McElroy (2000), "Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH: update and evaluation", *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* 105(D7): 8931-8980.

Stieb, D.M., S. Judek y R.T. Burnett (2002), *Meta-analysis of time-series studies of air pollution and mortality: effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season*, Air Waste Management Association.

Trukenmüller, A., C. Klamt and W. Krewitt (2001), *Revision of WTM parameters for EcoSense China*, Stuttgart, Germany: Stuttgart University, IER.

Trukenmüller, A. and R. Friedrich (1995), "Die Abbildung der großräumigen Verteilung, chemischen Umwandlung und Deposition von Luftschadstoffen mit dem Trajektorienmodell WTM, in Jahresbericht ALS 1995", Stuttgart 1995, p. 93 – 108.

United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2005), 40 CFR Part 51 [AH-FRL-7990-9] RIN 2060-AK60, Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions, Federal Register / Vol. 70, No. 216 / Wednesday, November 9, / Rules and Regulations.

- _____ (2004a), User's Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET), Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, 03-002, November.
- _____ (2004b), 454/B-03-001 User's Guide For The AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, September.
- _____ (2004c) User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP), Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711
- _____ (2002), Compendium of reports from the Peer Review Process for AERMOD, February, disponible en (www.epa.gov/scram001)
- _____ (1998) User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP), Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711
- _____ (s/f), *The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010*.
- WHO (World Health Organization) (2000), “Air Quality Guidelines for Europe”, Regional Office for Europe, Copenhagen, WHO Regional Publications, *European Series, N° 91*, Second Edition.