

Distr.  
LIMITADA

LC/MEX/L.644  
22 de noviembre de 2004

ORIGINAL: ESPAÑOL

## **EVALUACIÓN DE LAS EXTERNALIDADES AMBIENTALES DE LA GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA EN MÉXICO**

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 la SEMARNAT y la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Subsección 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.



## ÍNDICE

	<u>Página</u>
RESUMEN .....	1
PRESENTACIÓN.....	3
I. ASPECTOS METODOLÓGICOS .....	5
A. METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO .....	6
1. Primera etapa: Caracterización de la fuente emisora.....	6
2. Segunda etapa: Dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones .....	6
3. Tercera etapa: Evaluación de los impactos.....	9
4. Cuarta etapa: Evaluación monetaria .....	12
B. METODOLOGÍA SIMPLIFICADA Y MODELO SIMPACTS DEL OIEA .....	14
C. INCERTIDUMBRES .....	18
II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS .....	20
A. CENTRALES DE GENERACIÓN .....	20
1. Selección de las centrales termoeléctricas.....	20
2. Datos técnicos de las centrales seleccionadas .....	22
B. DATOS METEOROLÓGICOS .....	24
1. Modelos de dispersión utilizados .....	24
2. Información meteorológica.....	25
C. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS.....	26
1. Tasas de incremento de riesgo relativo.....	26
2. Tasas de incidencia y de mortalidad.....	29
D. COSTOS ECONÓMICOS DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD ...	31
1. Morbilidad .....	31
2. Mortalidad .....	31

III. RESULTADOS .....	34
A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....	34
B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES .....	37
C. ANÁLISIS DETALLADO DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE MANZANILLO .....	41
D. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON LOS COSTOS UNITARIOS DE ENFERMEDADES.....	47
IV. CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA .....	51

## RESUMEN

El propósito de este trabajo es estimar las externalidades de la generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles en México. En la actualidad, la electricidad se genera en el mundo principalmente con este tipo de combustibles, lo que conlleva impactos locales, regionales y globales, tanto para la salud como para el medio ambiente. El costo de estos impactos, denominado costo externo, no ha sido incorporado al precio de la electricidad en ningún país, por el efecto económico que generaría.

A fin de evaluar las externalidades de la producción termoeléctrica en México, el presente trabajo utilizó la versión simplificada de la Metodología Vías de Impacto del proyecto ExternE de la Unión Europea, así como el modelo Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation (SIMFACTS) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). La Metodología Vías de Impacto comprende cuatro etapas: caracterización de la fuente emisora, dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones, evaluación de los impactos y, finalmente, la evaluación monetaria.

En el presente estudio se seleccionaron 11 zonas, donde se encuentran las 13 mayores plantas termoeléctricas del país que utilizan carbón o combustóleo como combustible. Estas plantas generan cerca de la mitad de la electricidad del país y se ubican en las siguientes localidades: Río Escondido, Tuxpan, Manzanillo, Petacalco, Tula, Salamanca, Altamira, Puerto Libertad, Mazatlán, Rosarito (Tijuana) y Samalayuca (Cd. Juárez). Las zonas de Tula, Salamanca, Altamira, Rosarito y Samalayuca se denominan “Zonas Críticas” en la NOM-085-SEMARNAT-1994, en tanto que las otras zonas se denominan “Resto del País”.

La aplicación de la metodología seleccionada requirió una serie de datos técnicos, económicos y de salud. Estos datos corresponden al año 2000, fecha considerada como referencia para evaluar la reducción en los niveles de emisiones de la industria eléctrica. Se obtuvo información geográfica y meteorológica para cada una de las zonas de estudio, así como las características técnicas de las plantas, 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” ni gases de invernadero.

Para estimar el impacto en la salud se analizaron los valores de Incremento de Riesgo Relativo (IRR) resultantes del meta-análisis del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ECOURS), así como otras referencias del proyecto ExternE y de la Organización Mundial de la Salud. Con base en la información analizada se decidió utilizar el IRR de menor valor para cada impacto, con objeto de realizar una estimación conservadora del daño.

Se recurrió también a información sobre los costos de morbilidad y mortalidad. Para el costo de atención a casos de enfermedad se consideraron los valores estimados por el Instituto Nacional de Salud Pública. Para la mortalidad se utilizó el enfoque de Años de Vida Perdidos

(AVP) del proyecto ExternE. El valor europeo fue transferido a México mediante la relación de la paridad del poder adquisitivo del ingreso nacional bruto con respecto al de la UE.

La estimación de los costos externos conlleva un nivel de incertidumbre que puede ser alto debido a la cantidad de variables involucradas y a los diferentes supuestos planteados, particularmente con respecto a los efectos de los contaminantes en la salud y a los costos asignados para cuantificar los casos de morbilidad y mortalidad. Influye también el insuficiente conocimiento sobre determinadas variables y procesos involucrados, así como errores en los datos, entre otros.

La aplicación del modelo SIMPACTS proporcionó información en dos aspectos importantes: 1) el nivel de concentración de contaminantes en las zonas aledañas a las plantas estudiadas, y 2) el valor de las externalidades por efectos en la salud. Con respecto a las concentraciones de partículas y de  $\text{NO}_x$ , los modelos de dispersión utilizados estimaron valores promedios anuales inferiores al máximo permitido por las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Salud. Sin embargo, con respecto a óxidos de azufre, los valores estimados resultaron superiores a los establecidos en la norma, por lo menos en algún punto receptor de la zona de influencia local de las centrales termoeléctricas de Tula, Mazatlán y Salamanca.

El estudio estimó los costos externos de las plantas seleccionadas, en el año 2000, en el orden de los 465 millones de dólares<sup>1</sup> anuales, considerando únicamente el impacto en la salud. Este monto equivale al 0,1% del producto interno bruto y al 4% del gasto público en salud de México, en el año de referencia. Las centrales de Tuxpan, Manzanillo, Tula y Petacalco presentaron las mayores externalidades.

Se encontró que las emisiones de  $\text{SO}_2$  arrojan los mayores costos externos y que la internalización de las externalidades en el precio de la electricidad implicaría aumentos de entre 0,12 y 0,83 centavos de dólar por kWh, es decir, entre 3% y 17% del costo del kWh. El costo externo ponderado, en función de la generación de las 13 centrales de producción, sería de 0,50 centavos de dólar por kWh.

El análisis de sensibilidad realizado en Manzanillo con modelos de dispersión más detallados, muestra que durante el año estudiado la estimación de la concentración promedio de 24 horas de óxidos de azufre fue superior a la permitida, en ocasiones hasta por un factor de 4. Se encontró un total de 93 días con valores estimados superiores a los permisibles. Los resultados anteriores deben interpretarse con cautela, tomando en cuenta diferentes factores que pueden afectarlos, en un sentido u otro. La diferencia en la estimación de los costos externos al utilizar modelos de dispersión más detallados resultó muy pequeña. Además, se realizó otro análisis de sensibilidad para la misma planta, variando los costos de morbilidad y mortalidad, usando los valores reportados por estudios de Voluntad a pagar. En este caso, el costo externo se elevó por un factor de 2,3 con respecto al primer estimado.

---

<sup>1</sup> Se refiere siempre a dólares estadounidenses.

## PRESENTACIÓN

El Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México identifica la “valoración de los recursos naturales” como uno de los pilares de la política ambiental de la actual administración. Establece como uno de sus objetivos detener y revertir la contaminación y la degradación de los recursos aire, agua y suelo. La valoración de las externalidades ambientales de la producción de energía es indispensable para formular y ejecutar la política ambiental orientada al logro de los objetivos referidos.

Entre las acciones de dicha política se incluyen la expedición de normas técnicas para prevenir y controlar la contaminación ambiental, así como la promoción de instrumentos de fomento. La Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994 regula las emisiones de los procesos de combustión en fuentes fijas. Entre éstas, las centrales termoeléctricas son preponderantes y generan externalidades, acerca de las cuales se dispone de escasa información.

Por estas razones, la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Sede Subregional en México, firmaron un convenio de colaboración para evaluar las externalidades ambientales de la actividad energética en las 13 mayores plantas termoeléctricas, localizadas en 11 zonas de la República Mexicana.

El objetivo del estudio es disponer de una primera evaluación nacional al respecto. Tal ejercicio conlleva diferentes grados de incertidumbre tanto por los datos utilizados como por la aplicación de la metodología. Así, los resultados deben interpretarse como un primer aporte a la evaluación del problema.

El informe comprende cuatro capítulos. En el primero se expone la metodología utilizada, Vías de Impacto, así como el modelo SIMPACTS del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). En el segundo se sistematiza la información técnica de las centrales termoeléctricas seleccionadas, así como la información de carácter ambiental, económico y de efectos en la salud requerida por la metodología. En el capítulo III se presentan los resultados con respecto a los niveles de concentración de los contaminantes, sus efectos en la salud, la estimación de las externalidades, un análisis detallado de la central termoeléctrica de Manzanillo y la sensibilidad con respecto de los costos unitarios de enfermedades. Las conclusiones se exponen en el capítulo IV.

Se pretende que los resultados del estudio contribuyan a: 1) fundamentar las decisiones a tomar en la revisión y formulación de normas oficiales mexicanas en la materia; 2) generar los instrumentos que consideren los costos externos en la regulación ambiental y orientar sobre las herramientas de fomento aplicables al sector, y 3) establecer un marco de referencia para profundizar en futuros estudios sobre la distorsión de los precios relativos de los energéticos que hasta ahora incorporan de manera insuficiente las externalidades.

El estudio fue ejecutado con pocos recursos y en un tiempo relativamente corto, de julio a diciembre de 2003, período en el cual se hizo la recopilación de la información, la adaptación de los modelos computacionales utilizados para el caso mexicano, su aplicación y el análisis de los resultados. Esta experiencia constituye una de las primeras aplicaciones detalladas de esta metodología, a nivel nacional, en un país latinoamericano.

Su elaboración estuvo a cargo de un grupo interdisciplinario constituido por funcionarios de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT y de 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, Liliana Castilleja, Manuel Eugenio Rojas y Eugenio Torijano, así como Leonor Turtos y Elieza Meneses, consultoras del proyecto. Con el grupo también participó Juan Mata, Director General de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Medio Ambiente de la Secretaría de Energía. Juan Carlos Moreno, Asesor Regional 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.

Se reconoce a las siguientes instituciones por la información proporcionada: Secretaría de Energía (Subsecretaría de Política Energética y Desarrollo Tecnológico), Secretaría de Salud (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios e Instituto Nacional de Salud Pública) y Comisión Federal de Electricidad (CFE). También fue importante la participación de las siguientes instancias de la SEMARNAT: Asesoría del Secretario, Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental (Dirección General de Estadística e Información Ambiental), Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental (Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes), Instituto Nacional de Ecología (Dirección General de Investigación para la Contaminación Urbana, Regional y Global) y Comisión Nacional del Agua (Servicio Meteorológico Nacional).

Se agradece al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por facilitarnos el modelo SIMPACTS y muy particularmente a Joseph V. Spadaro (actualmente en la École des Mines de Paris), uno de los desarrolladores de la metodología simplificada para la evaluación de externalidades, quien revisó este trabajo con gran dedicación y aportó comentarios y sugerencias de la mayor valía.

## I. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Las externalidades representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado que distorsionan las decisiones económicas óptimas. En la actualidad, la energía eléctrica en el mundo se genera principalmente a partir de combustibles fósiles. Esta generación produce impactos locales como la contaminación de áreas urbano-industriales; regionales, como la lluvia o deposición ácida; y globales como el cambio climático. El costo de estos impactos de la producción de energía no ha sido incorporado al precio por el impacto económico que conllevaría.

En 1991 la Unión Europea y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (Oak Ridge National Laboratory) iniciaron un proyecto de investigación conjunta, cuyo principal objetivo fue realizar una evaluación comparativa de riesgo de diferentes sistemas de energía, incluyendo el carbón y los ciclos de combustibles nucleares. Tal esfuerzo inicial fue conocido como “EC-US External Cost of Fuel Cycles Project”. Su propósito fue desarrollar una metodología común para determinar los costos externos de la generación de electricidad. Los trabajos se ampliaron a diversos países con el objetivo de aplicar las metodologías diseñadas.

La Unión Europea, en cumplimiento del principio de desarrollo económico sustentable con respeto al medio ambiente, establecido en el Tratado de Maastricht de 1992, impulsó el proyecto *Externalities of Energy*, ExternE,<sup>2</sup> y reconoció la valoración de las externalidades de la producción y uso de la energía como una de las tareas de la comunidad científica europea. Este proyecto fue desarrollado por más de 30 equipos adscritos a diferentes centros de investigación de nueve países de ese continente.

El proyecto ExternE, cuyos primeros resultados se publicaron en 1995, utilizó para tal efecto la Metodología Vías de Impacto en varios casos de estudio de plantas eléctricas individuales, con diferentes tipos de combustibles, en cada uno de los estados miembros de la Unión Europea. También fue aplicada a plantas de incineración y al transporte. Esta metodología es muy detallada y compleja, ya que requiere gran cantidad de datos de entrada, tanto técnicos como de salud, ambientales y económicos. Para su aplicación se han construido modelos computacionales, como el Ecosense,<sup>3</sup> utilizado en el proyecto ExternE. Sin embargo, estos elementos no siempre están disponibles en todos los países, por lo que dicho proyecto desarrolló también una metodología simplificada, con menos necesidades de información de entrada y que recurre a una serie de aproximaciones. A pesar de su sencillez, esta metodología da resultados razonablemente precisos. Inicialmente este modelo simplificado no era “amigable al usuario”, por lo que el OIEA apoyó su adaptación a un formato más accesible, y lo ofreció a los países miembros, con el nombre de SIMPACTS.<sup>4</sup> Este modelo se utilizó en el presente estudio.

---

<sup>2</sup> <http://www.externe.info/> y <http://externe.jrc.es/overview.html>.

<sup>3</sup> Programa desarrollado por el Instituto para Estudios Económicos y Uso Eficiente de la Energía de la Universidad de Stuttgart.

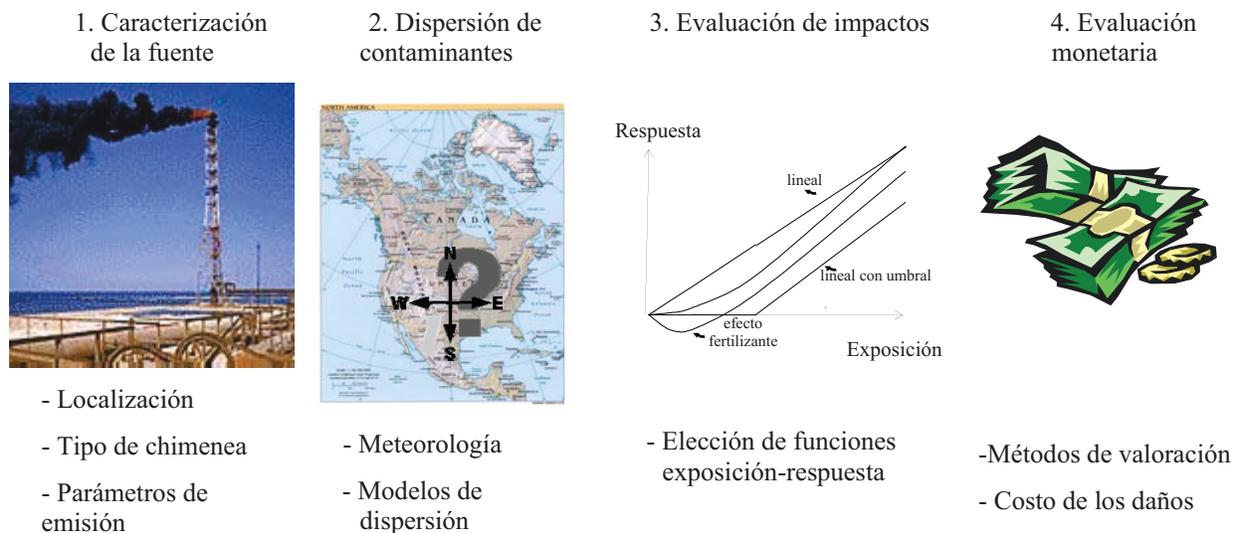
<sup>4</sup> SIMPACTS: Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation. Organismo Internacional de Energía Atómica, 2003.

## A. METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO <sup>5</sup>

La Metodología Vías de Impacto comprende cuatro etapas: 1) caracterización de la fuente emisora; 2) dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones; 3) evaluación de los impactos, y 4) evaluación monetaria (véase el gráfico 1).

Gráfico 1

### ETAPAS DE LA METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO



### 1. Primera etapa: Caracterización de la fuente emisora

El primer paso consiste en obtener la información relativa a la fuente de emisión, incluyendo su localización (urbana o rural), sus coordenadas geográficas, características físicas y un inventario detallado de los contaminantes emitidos. Los parámetros de la fuente incluyen: el diámetro y la altura de la chimenea por la cual se emiten los contaminantes, la temperatura, velocidad y flujo de los gases de escape, así como el volumen de emisiones, el cual depende de la tecnología y del tipo de combustible empleados.

### 2. Segunda etapa: Dispersión de los contaminantes y cálculo de concentraciones

La dispersión atmosférica de los contaminantes puede ser estudiada en un área local, comprendida en un radio de hasta 50 km alrededor de la fuente, o en un área regional que puede

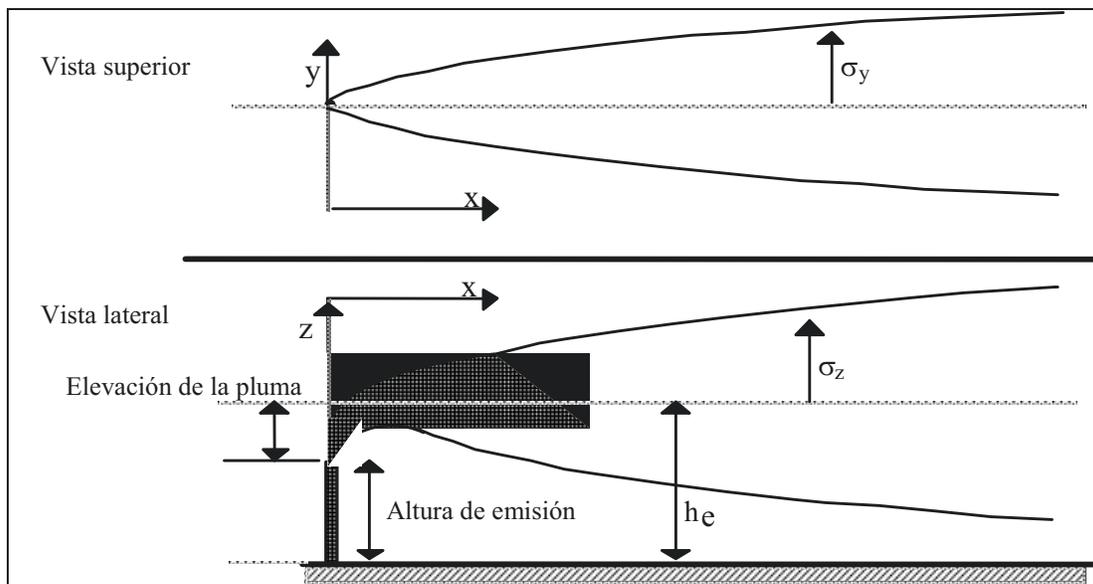
<sup>5</sup> Este capítulo se basa en los documentos Spadaro (1999) y Turtós (2003).

alcanzar hasta algunos miles de kilómetros. Dependiendo de la escala (regional o local), se emplean diferentes modelos de transporte de contaminantes para determinar las concentraciones.

Para la escala local, la dispersión de los contaminantes primarios depende fundamentalmente de parámetros meteorológicos, como la velocidad y la dirección del viento, la temperatura ambiente, la clase de estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla. En este análisis se utilizan modelos gaussianos para estimar los niveles de concentración de los contaminantes primarios emitidos por fuentes estacionarias con chimeneas.<sup>6</sup> La consideración básica de estos modelos es que una vez que el contaminante es emitido a la atmósfera, los perfiles de concentración vertical y horizontal pueden ser adecuadamente representados por dos distribuciones gaussianas independientes, cada una caracterizada por su propia desviación estándar o parámetro sigma (véase el gráfico 2).

Gráfico 2

PLUMA GAUSSIANA EN UN SISTEMA DE COORDENADAS ORIENTADO  
EN LA DIRECCIÓN DEL VIENTO



En general, la concentración  $C$  de un contaminante es una función de las coordenadas  $(x, y, z)$  o  $(r, \theta, z)$  según el sistema de coordenadas usado, el tiempo  $t$ , la tasa de emisión  $Q$  y otros parámetros de transporte atmosférico, como la velocidad y dirección del viento, y la estabilidad atmosférica. Generalmente se supone que el origen del sistema de coordenadas está fijo en la fuente de contaminación. La capa de mezclado identifica la zona más baja de la atmósfera donde ocurren los fenómenos de transporte, y se extiende hasta una altura de 100 a 2 000 m, dependiendo del grado de turbulencia, la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie terrestre.

<sup>6</sup> Spadaro (1999).

En una fuente de emisión constante y condiciones meteorológicas estables, el incremento de la concentración según los modelos gaussianos se evalúa mediante la relación siguiente: <sup>7</sup>

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \sum_{j=0, \pm 1, \dots} \left( e^{-\frac{(z+2jh_{mix}-h_e)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+2jh_{mix}+h_e)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad [1]$$

donde:

$Q$ , tasa de emisión del contaminante,

$u$ , velocidad del viento medida a la altura de la emisión,

$\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , parámetros de difusión lateral y vertical,

$y$ , distancia en dirección normal a la dirección del vector del viento,

$z$ , distancia vertical sobre tierra,

$h_{mix}$ , altura de la capa de mezcla,

$h_e$ , altura efectiva de la chimenea (altura de la emisión más el levantamiento de la pluma)

$j$ , número de reflexiones de la pluma.

Los dos factores exponenciales después del símbolo de sumatoria consideran las reflexiones de la pluma a lo largo de la superficie de la tierra y en el borde superior de la capa de mezcla, respectivamente. Las concentraciones máximas generalmente ocurren a unos pocos kilómetros de la fuente.

La ecuación (1) es considerada más exacta para predecir las concentraciones promedio a largo plazo o anuales, que para estimar las concentraciones instantáneas. La ecuación supone que no tienen lugar interacciones químicas en el aire y que las tasas de remoción seca y húmeda son irrelevantes. Se debe notar que las concentraciones estimadas dependen estrechamente de los parámetros de difusión  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ . Estos parámetros son frecuentemente determinados de manera semiempírica o estadística.

A escala regional, las interacciones químicas entre los contaminantes emitidos y las especies existentes en el aire, que forman contaminantes secundarios, y los mecanismos de remoción vía deposición seca y húmeda, tienen tanta importancia como los datos meteorológicos al determinar el destino de los contaminantes y sus niveles de concentración en el aire.

Los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera después de la emisión, en alguna área lejana, donde el contaminante primario o precursor es transportado y mezclado con el aire ambiente debido a la turbulencia, por lo que su concentración no depende de las condiciones meteorológicas locales ni de los parámetros de la chimenea. Se calcula mediante modelos de transporte regional, que requieren la siguiente información para cada una de las celdas del dominio regional considerado, el cual puede extenderse hasta miles de kilómetros: a) datos meteorológicos promediados estadísticamente de velocidades y direcciones del viento, y tasa de precipitación anual, y b) concentraciones de fondo de especies existentes en el aire, incluidos los propios contaminantes primarios, para simular las reacciones químicas de transformación (COV, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>).

---

<sup>7</sup> Ibídem.

### 3. Tercera etapa: Evaluación de los impactos

#### a) Funciones exposición-respuesta

Una vez determinada la concentración de los contaminantes, se procede a calcular los impactos en la salud mediante las funciones exposición-respuesta. Estas funciones se determinan por medio de estudios clínicos o epidemiológicos, los cuales relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud (por ejemplo, número de ataques de asma, visitas a hospitales, ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias, reducción en la expectativa de vida, y otros), con una exposición dada a un contaminante, en términos de su concentración. En rigor debería considerarse como referencia la dosis que el receptor recibe y no la concentración de un contaminante. Esta dosis es función de la calidad del aire y de factores tales como: tiempo de exposición, relación de concentración dentro y fuera de recintos cerrados, nivel de actividad física, composición del aire contaminado, dimensión y distribución de especies y proximidad a la fuente de contaminación. Sin embargo, en la práctica, esta información tan detallada casi nunca está disponible, razón por la que se emplea la concentración en lugar de la dosis como variable independiente, y la función se denomina exposición-respuesta.

Los contaminantes atmosféricos son capaces de ejercer una amplia gama de efectos adversos para la salud humana, los que de ningún modo son excluyentes entre sí; éstos pueden ser agudos y, más frecuentemente, crónicos. Entre ellos es posible mencionar: la disminución del flujo de aire en las vías respiratorias a nivel subclínico en los niños y en la población general;<sup>8</sup> deterioro del rendimiento físico aun en personas sanas;<sup>9</sup> irritación de las mucosas oculares y del tracto respiratorio superior; disminución de la resistencia a las infecciones del aparato respiratorio; deterioro de la función pulmonar en los niños y en la población sana;<sup>10</sup> aumento de la frecuencia, duración y severidad de las crisis agudas en pacientes asmáticos y de angina en pacientes de cardiopatía isquémica; incremento de la prevalencia y los síntomas de las enfermedades respiratorias obstructivas crónicas como la bronquitis crónica, e incluso el aumento de la incidencia de cáncer pulmonar, incluso después de ser controlado el hábito de fumar y la exposición ocupacional.<sup>11</sup>

Por lo que respecta a los ecosistemas, la contaminación afecta a la vegetación, ya que provoca lesiones en las hojas, reduce la fotosíntesis, y contribuye a la acidificación del suelo con las consecuentes pérdidas económicas de la agricultura. Es especialmente dañina para los ecosistemas acuáticos al contribuir a la acidificación de los cuerpos de agua, mermando también los recursos pesqueros. Por otra parte, genera pérdidas económicas por su efecto en los materiales, ya que corroe los metales, deteriora cables eléctricos, el papel, los textiles, las pinturas, los materiales de construcción y los monumentos históricos. En ocasiones se obtienen beneficios en algunas cosechas agrícolas que, al ser expuestas a un incremento en las

---

<sup>8</sup> Brunekreef y Hock (1993), y Schindler y otros (1998).

<sup>9</sup> OMS (1997).

<sup>10</sup> OPS/OMS (2000).

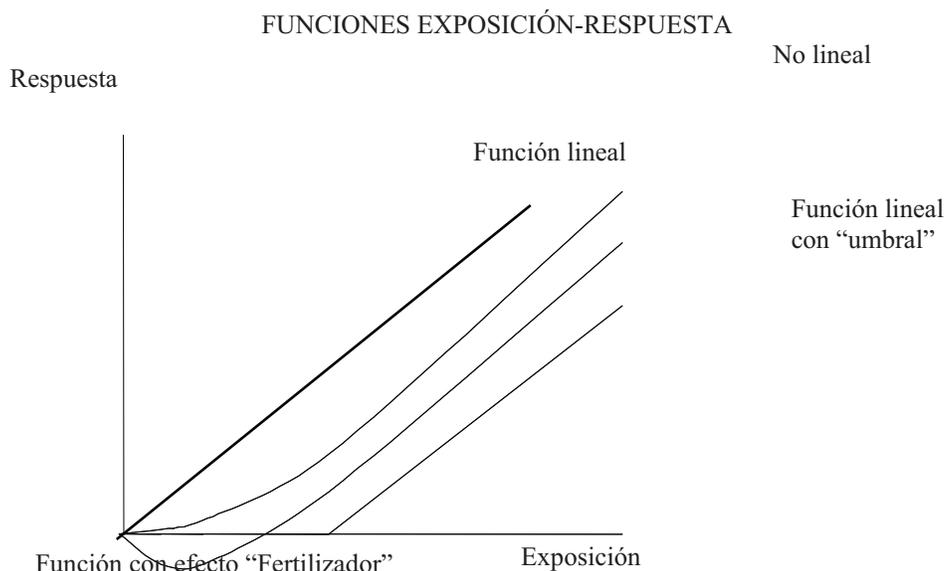
<sup>11</sup> Molina y otros (1996).

concentraciones marginales de  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ , necesitan menos fertilizante. Estos beneficios, sin embargo, dependen considerablemente de los niveles de la concentración de fondo.

Los estudios epidemiológicos realizados en las tres últimas décadas para establecer y cuantificar los efectos de la contaminación atmosférica en seres humanos han verificado la existencia de una relación causa-efecto entre el incremento en el nivel de concentración de un contaminante específico y el número de casos o eventos reportados por centros de salud u hospitales. Asimismo, hay estudios muy importantes que muestran una correlación positiva entre la exposición de varios años a concentraciones de partículas en el aire y la mortalidad total, la cual es llamada mortalidad crónica, en contraste con la mortalidad aguda, que se refiere a las muertes ocasionadas por un episodio de contaminación.<sup>12</sup> Como la sensibilidad individual a un estímulo externo puede variar considerablemente entre la población, las funciones exposición-respuesta se estipulan generalmente para los grupos de riesgo: niños menores de 14 años, adultos mayores de 65 años y asmáticos, principalmente.

De acuerdo con los estudios epidemiológicos realizados, las funciones exposición-respuesta para la salud humana se consideran lineales, sin umbral, con la concentración como parámetro independiente. Esto supone que no existe ningún valor límite de concentración por debajo del cual el impacto en la salud a nivel de la población desaparece (véase el gráfico 3).

Gráfico 3



## b) Cálculo de los impactos

El impacto en la salud de la contaminación atmosférica se calcula con la fórmula presentada en la ecuación [2] para los casos discreto y continuo.<sup>13</sup>

<sup>12</sup> Dockery y otros (1993) y Pope y otros (1995)

<sup>13</sup> Spadaro (1999).

Caso discreto:

$$I = \sum_j N_{rec,j} F_{er}(r_j, C_j(Q))$$

*Sobre toda la población*

Caso continuo:

$$I = \int \rho(r) F_{er}(r, C(r, Q)) dA \quad [2]$$

*Sobre el área de impacto*

donde:

$I$ , impacto estimado (casos de enfermedad o años de vida perdidos, por año),

$N_{rec,j}$ , número de personas en el vector de localización  $r_j$ ,

$F_{er}$ , función exposición-respuesta,

$C(r, Q)$ , cambio incremental en la concentración de fondo en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para una tasa de emisión  $Q$ , en el vector de localización  $r$ ,

$\rho(r)$ , densidad de la población de riesgo en el vector de localización  $r$  (personas/ $\text{km}^2$ ),

$A$ , área de impacto.

Los signos de sumatoria o de integración incluyen a toda la población expuesta a la contaminación que experimenta sus efectos. Se supone que el origen del sistema de coordenadas se encuentra en la fuente de contaminación.

La función exposición-respuesta  $F_{er}$  se puede expresar como el producto del incremento de la concentración por la pendiente de la relación exposición-respuesta ( $f_{er}$ ), es decir,

$$F_{er}(r, C(r, Q)) = f_{er}(r) \times C(r, Q), \quad \text{donde } f_{er} = \partial F_{er} / \partial C.$$

Generalmente, la pendiente se calcula como el Incremento del Riesgo Relativo al impacto (IRR) en cuestión, multiplicado por la línea base, tal como indica la ecuación [3]. Tanto la pendiente de la  $F_{er}$  como el IRR y la línea base son números positivos.

$$f_{er} = \text{Incremento\_Riesgo\_Relativo} \left( \frac{\%}{\mu\text{g}/\text{m}^3} \right) * \text{Línea\_base} \left( \frac{\text{casos}}{\text{persona} - \text{año}} \right) \quad [3]$$

El incremento de riesgo relativo, IRR, es el cambio en la tasa natural de incidencia de una enfermedad en particular (morbilidad) o en la mortalidad en una población en riesgo (adultos, niños y otros), por unidad de cambio en la concentración ambiente ( $\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). La tasa natural de incidencia de una enfermedad en particular es la línea base, la cual se expresa en casos al año normalizado por persona. Ésta se calcula como el producto de la tasa de incidencia o basal, que es el número de nuevos casos de una enfermedad en un período en una población dada, por la fracción del grupo de riesgo receptor con respecto a la población total. En consecuencia, la pendiente se expresa en casos anuales de enfermedad por grupo de riesgo por unidad de concentración (casos/(año-persona- $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )).

Para estimar el impacto en la mortalidad se optó por utilizar en el presente estudio el enfoque de pérdida de la esperanza de vida, expresando la mortalidad en años de vida perdidos

(AVP).<sup>14</sup> En este caso, para obtener el valor de la pendiente de la función exposición-respuesta, se multiplica el IRR por la tasa de mortalidad y por los años de vida perdidos en cada caso.

El número de AVP para la muerte aguda varía desde unas pocas semanas hasta uno o dos años, aun cuando se considera como valor promedio 6 meses (0,5 años), de acuerdo con los últimos estudios del ExternE. En las muertes crónicas, el número de AVP depende de la tasa de mortalidad de la población. A su vez, esta tasa depende de las condiciones demográficas, culturales, socioeconómicas y médicas de la población analizada, por lo que la generalización resulta a menudo difícil e incierta. Los estudios realizados en los Estados Unidos han considerado que en promedio una muerte crónica implica una reducción de la esperanza de vida de aproximadamente nueve años, mientras que en Europa se han estimado 11 años. Como promedio se toma en el presente análisis 10 años.

Cabe mencionar que otro enfoque para valorar la pérdida de la esperanza de vida es considerar el número de muertes estadísticas adicionales en lugar del número de años de vida perdidos; dicho enfoque se utilizó sólo en el análisis de sensibilidad.

#### 4. Cuarta etapa: Evaluación monetaria

El último paso en el análisis es la evaluación monetaria de los impactos obtenidos en la etapa anterior, utilizando la ecuación siguiente:

$$D = (I) (CU) \quad [4]$$

donde:

*D*, costo estimado de la externalidad (dólares por año),

*I*, impacto calculado por la ecuación [2]

*CU*, costo unitario (por ejemplo, costo por ataque de asma).

En la determinación de los costos unitarios de los impactos de morbilidad es posible aplicar tres enfoques: costos directos asociados a la enfermedad, gastos preventivos y valoración contingente.<sup>15</sup> Este último, utilizado en el proyecto ExternE, se basa en las preferencias individuales, expresado mediante la Voluntad a pagar (en inglés, Willingness to Pay) por algo que mejora el bienestar individual, o Voluntad de aceptar (en inglés, Willingness to Accept), por algo que la reduce. Incluye el costo directo de la enfermedad, cualquier ingreso perdido (pérdida de productividad) y cualquier costo social de la enfermedad. Es decir, comprende el costo de cualquier gasto para prevenir, mitigar o tratar los efectos de la enfermedad, el valor del tiempo perdido por la enfermedad y el valor del bienestar o utilidad perdidos por dolor y sufrimiento.

El costo directo de una enfermedad abarca el costo de atención médica como gastos por medicamentos, consultas con especialistas, hospitalización y análisis de laboratorios, entre otros. Para determinarlos se requiere información del diagnóstico y tratamiento típico de cada enfermedad, así como el tipo de servicios disponibles en las localidades consideradas (tipo de

---

<sup>14</sup> Leksell y Rabl (2001).

<sup>15</sup> Sánchez y otros (1997).

hospital, recursos humanos y materiales disponibles). El costo del tiempo perdido o pérdida de productividad se basa en el costo del tiempo que una persona pierde por enfermedad y la consecuente disminución en la producción, por no trabajar. Los dos conceptos utilizan como referencia los precios de mercado (costo de medicamentos, salario del trabajador, entre otros). Conviene mencionar que el costo directo de una enfermedad es sólo una parte del costo total definido anteriormente.

Para estimar los costos del impacto en la mortalidad se pueden utilizar tres enfoques: valoración contingente, diferencias salariales y capital humano.<sup>16</sup> El primero representa la medida más completa de los beneficios individuales por reducir la mortalidad. Éste fue el enfoque utilizado en ExternE. Con ese propósito, se calcula inicialmente el Valor Estadístico de la Vida (VEV) (o *Value of Statistical Life*, VSL), a partir de la estimación de la Voluntad a pagar por un cambio en el riesgo de muerte. Luego se encuentra el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP o *Value of a Year of Life Lost*) para la muerte aguda (aquella producida por un episodio de contaminación), usando la ecuación [5]<sup>17</sup> para una tasa de descuento dada sobre el intervalo de tiempo considerado.

$$VAVP_{Agudo} = VEV \left( 1 / \sum_{i=a}^{T_l} \frac{{}_a P_i}{(1 + d_r)^{i-a}} \right) \quad [5]$$

donde:

$a$ , edad del individuo cuyo VAVP es calculado,

${}_a P_i$ , probabilidad de que un individuo de edad  $a$  sobreviva hasta la edad  $i$  (valor esperado de la expectativa de vida para una edad específica),

$T_l$ , expectativa máxima de vida (ejemplo: 100 años),

$d_r$ , tasa de descuento

En las fases iniciales del proyecto ExternE se consideró un valor promedio estadístico de vida igual a 3,1 millones de ECU<sub>1995</sub>, o 3,9 millones dólares para una tasa de descuento base del 3% ( $d_r = 0,03$ ). Sin embargo, en estudios posteriores se han calculado VEV menores, de 1.500.000 dólares del año 2000,<sup>18</sup> con el que se obtendría un VAVP de 174.000 dólares del año 2000 para la misma tasa de descuento. Este valor se utiliza para determinar el costo de muertes agudas.

El análisis de la mortalidad crónica es muy diferente al de la mortalidad aguda, pues la muerte no se produce inmediatamente después de un episodio de exposición, sino muchos años después. Así, la ecuación debe ser modificada para tener en cuenta los efectos de una exposición prolongada antes de la muerte. En los estudios de ExternE se calculó mediante un estimado del valor de un año de vida perdido “ponderado”. La premisa fundamental es que el riesgo total de muerte está uniformemente distribuido en un período de 30 años (en otras palabras, cada año

<sup>16</sup> Sánchez y otros (1997).

<sup>17</sup> Spadaro (1999).

<sup>18</sup> Markandya y otros (2002).

contribuyó 1/30 al impacto total). El VAVP para casos de mortalidad crónica se calcula mediante la ecuación [6].<sup>19</sup>

$$VAVP_{Crónico} = \sum_{i=1}^{70} \frac{AVP_i}{AVP_{tot}} \frac{VAVP_{Agudo}}{(1 + d_r)^{i-1}} \quad [6]$$

donde:

$AVP_i$ , número de años de vida perdidos en el año  $i$  como resultado del incremento del riesgo o daño,

$AVP_{tot}$ , número total de años de vida perdidos en la población entera durante un período de 70 años.

Considerando el VEV en 1.500.000 dólares del año 2000, se encuentra un VAVP para muerte crónica de 101.000 dólares del mismo año para una tasa de descuento de 3%. Como se mencionó anteriormente, se estiman en promedio unos 10 AVP por cada muerte crónica relacionada con la contaminación atmosférica. Dentro del grupo de riesgo, sólo se consideran las personas mayores de 30 años debido a que se supone que en las personas menores de 30 años el cuerpo es capaz de neutralizar con sus propios mecanismos los efectos negativos de la contaminación atmosférica.<sup>20</sup>

Se debe puntualizar que los costos de mortalidad crónica calculados mediante el enfoque del valor estadístico de la vida, VEV, son mayores que los calculados mediante el enfoque de años de vida perdidos.<sup>21</sup>

## B. METODOLOGÍA SIMPLIFICADA Y MODELO SIMPACTS DEL OIEA

El modelo SIMPACTS consta de tres módulos principales: AIRPACTS, NUKPACTS e HYDROPACTS. El primero estima el impacto en la salud humana, las cosechas agrícolas y los materiales a causa de su exposición a la contaminación. Los otros dos módulos analizan el impacto de las centrales nucleares e hidroeléctricas, respectivamente. En el presente estudio sólo se utilizó el primero, restringido al impacto en la salud humana, por ser el más significativo.

Para evaluar el impacto en la salud, AIRPACTS incluye varios modelos con diversos procedimientos de cálculo que representan diferentes niveles de acercamiento analítico al problema en cuestión, dependiendo de la información disponible:

1) Modelo Simplificado Básico (en inglés *Simple Uniform World Model*, SUWM). Es el más simple y considera únicamente como parámetros la densidad de población regional en un

<sup>19</sup> Spadaro (1999).

<sup>20</sup> *Ibidem*.

<sup>21</sup> En estudios de valoración de la vida se ha encontrado que la pérdida típica de la vida varía entre 30 y 40 años. Estas cifras son 3 a 4 veces mayores que el resultado obtenido por la cuantificación de años de vida perdidos que, como ya se indicó, se estiman en 10 AVP por cada muerte relacionada con la contaminación.

radio de 500 a 1 000 km de la fuente, y la tasa de emisión de contaminantes, para resolver de una manera aproximada la ecuación de impacto (ecuación 2).

2) Modelo Simplificado Mejorado (en inglés *Robust Uniform World Model*, RUWM) en tres versiones (Estimaciones Básica, Media y Superior). Considera los parámetros reales de la fuente en su estimación más exacta o superior (en particular la altura de la chimenea y el flujo de gases), pero aplica un tratamiento simplificado para resolver la ecuación de función del daño, suponiendo una distribución uniforme de la población a nivel local y otra a nivel regional.

3) Modelo para la estimación de los impactos en la salud (en inglés *Quick Estimation of Respiratory Health Impacts*, QUERI) en tres versiones (Estimaciones Básicas, Media y Superior). Evalúa el impacto en la salud debido a los contaminantes primarios y secundarios presentes en la atmósfera a través de un enfoque semiempírico que utiliza factores de corrección, determinados con base en los resultados de análisis con modelos detallados de la Metodología Vías de Impacto, en algunas localizaciones en Europa con diferentes características de la fuente emisora. La estimación más exacta o superior requiere de información meteorológica detallada, en tanto que la media considera sólo valores promedio de velocidad y dirección de vientos.

4) Modelo para ambientes urbanos (en inglés *URBAN*) en dos versiones (Estimaciones Básica y Superior). Estima el impacto en la salud y los costos respectivos resultantes de los contaminantes primarios y secundarios emitidos por una fuente ubicada en un ambiente urbano o muy cerca de él. Considera una rosa de vientos uniforme y velocidades medias de viento, y estima una distribución de población aproximada por una función tipo gaussiana, aunque también puede aceptar los valores reales de población en celdas de 5 x 5 km.

A pesar de las simplificaciones del SUWM y el RUWM, los estimados del impacto son razonablemente próximos a los valores obtenidos en Europa cuando se aplicó la Metodología Vías de Impacto detallada.<sup>22</sup> Los resultados se aproximan aún más cuando la fuente se localiza en un área rural o poco poblada. En particular, los estimados del SUWM para una fuente de altura de chimenea de 25 m o más varían dentro de un orden de magnitud con respecto a los valores obtenidos en la Metodología Vías de Impacto detallada, aun cuando las fuentes estén localizadas cerca de ciudades densamente pobladas.

El procedimiento de cálculo del modelo AIRPACTS que proporciona resultados más exactos es el QUERI, en su estimación superior, ya que considera una gran cantidad de información detallada como: distribución de la población local en una resolución de 5 x 5 km, datos meteorológicos detallados para un año de referencia y todos los parámetros de la fuente emisora. El QUERI calcula los efectos locales causados por los contaminantes primarios, así como los efectos regionales por contaminantes primarios y secundarios.<sup>23</sup> Estudios comparativos de los resultados del modelo detallado y del QUERI en varias localidades europeas reportan desviaciones comprendidas entre  $\pm 30\%$ .<sup>24</sup>

---

<sup>22</sup> Spadaro (1999).

<sup>23</sup> Turtós (2003).

<sup>24</sup> Spadaro (1999).

La dispersión local de los contaminantes primarios en el QUERI se calcula mediante un modelo de dispersión gaussiano, el Industrial Source Complex Long Term Model (ISCLT2) de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos. Para estimar el impacto regional, aplica la fórmula simplificada del modelo básico SUWM, ya que no cuenta con un modelo de dispersión regional. Esta fórmula requiere conocer la velocidad de remoción de los diferentes contaminantes, la cual se puede estimar mediante modelos de simulación o a partir del tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera. En caso de no tener esta información para la zona de estudio, se pueden utilizar los valores que recomienda el módulo AIRPACTS.

El cuadro 1 resume la información requerida para cada uno de los procedimientos de cálculo descritos anteriormente, relativa a la fuente de emisión, datos meteorológicos y datos de los receptores. Dependiendo de la disponibilidad de los datos en cada caso, el módulo AIRPACTS selecciona de manera automática el procedimiento de cálculo más completo aplicable.

Para cada central de producción de electricidad estudiada se deben usar los datos meteorológicos de la estación más cercana, con condiciones geográficas y físicas similares, recomendadas por el Servicio Meteorológico Nacional. Aunque el AIRPACTS incluye variables por defecto, conviene utilizar metodologías nacionales para el cálculo de las variables meteorológicas secundarias, como la estabilidad atmosférica y las alturas de la mezcla urbana y rural.

Asimismo, se requieren los datos de población, ya sea densidades regionales o locales, o distribución en una resolución de 5 x 5 km. Para ello se debe usar un Sistema de Información Geográfica (SIG) con capas de población actualizadas al menos hasta el nivel municipal.

Con respecto a las funciones exposición–respuesta, lo óptimo es contar con funciones propias del lugar donde se lleva a cabo el estudio. A nivel internacional se ha realizado un número muy reducido de estudios epidemiológicos destinados a definir estas funciones, en razón de su alto costo. Por ello, es recomendable emplear toda la información local y compararla con los estudios internacionales, a fin de hacer compatibles los resultados y definir las funciones que se utilizarán en el cálculo de los impactos en el sitio seleccionado.

Es conveniente conocer también la distribución de la población por grupos de riesgo, ya que algunas  $F_{er}$  están referidas a estos grupos y no a la población en general: niños, adultos, ancianos, asmáticos, adultos mayores de 30 años. Asimismo, conviene disponer de los índices básicos de mortalidad y de incidencia de las enfermedades más relacionadas con la contaminación atmosférica cuando se usen  $F_{er}$  donde se conozca el incremento del riesgo.

Para determinar los costos del impacto en ausencia de estimaciones nacionales, se pueden utilizar los costos reportados por el Proyecto ExternE para la Unión Europea (Costos\_UE) o los de otros estudios internacionales, y transferirlos a las condiciones nacionales o locales de un país (Costos \_País), de acuerdo con la relación siguiente:

$$\text{Costo\_País} = (\text{Costos\_UE}) (R_{aji} [\text{dólares/caso}]) \quad (7)$$

Cuadro 1

## INFORMACIÓN REQUERIDA POR LAS DIFERENTES VERSIONES DEL MÓDULO AIRPACTS

Parámetros	SUWM	RUWM		QUERI			Urban
		Media	Superior	Básica	Media	Superior	
Dominio local: Datos de la fuente							
Ubicación, latitud y longitud		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zona horaria						✓	✓
Altura de la chimenea			✓		✓	✓	✓
Diámetro de la chimenea			✓			✓	✓
Temperatura de gases de escape			✓	‡	‡	✓	✓
Velocidad de gases de escape			✓	‡	‡	✓	✓
Tasa de emisión	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dominio local: Datos meteorológicos							
Velocidad media del viento			✓		✓		✓
Temperatura ambiente media			✓		✓		✓
Estadísticas de estabilidad atmosférica			✓		✓		✓
Datos meteorológicos			*			✓	*
Altura del anemómetro						✓	
Dominio local: Datos de los receptores							
Localización urbana o rural		✓	✓	✓	✓	✓	Zonas urbanas
Densidad local de receptores		✓	✓	‡	✓		
Distribución de los receptores		†	†	†	†	✓	✓
Dominio regional							
Densidad regional de los receptores	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Turtos (2003).

✓ Dato imprescindible.

‡ Si se conoce, los resultados son más exactos.

\* Puede ser sustituido por los valores medios estadísticos.

† Puede ser sustituido por la densidad local de los receptores.

donde: Costo\_País es el costo unitario en el país donde se aplica el estudio

$R_{ajt}$  es un factor de ajuste

Existen varias formas de determinar el valor del factor de ajuste  $R_{ajt}$ , entre ellas las siguientes:

a) 
$$R_{ajt} = (PPA\_INBp\_País / PPA\_INBp\_UE)^E,$$

donde  $PPA\_INBp\_País$  es la paridad del poder adquisitivo del ingreso nacional bruto del año de referencia del país a evaluar y se divide entre la paridad correspondiente al país donde se realizó el estudio (Unión Europea o los Estados Unidos) y  $E$  es un coeficiente de elasticidad-ingreso, al

que generalmente se le asigna un valor comprendido entre 0,35 y 1. En este estudio se consideró  $E = 1$ .

$$b) \quad R_{ajt} = (PIBp\_País / PIBp\_UE)^E,$$

donde  $PIBp$  es el producto interno bruto per cápita (dólares/persona).

$$c) \quad R_{ajt} = 1,$$

en casos en que los costos de la salud sean iguales a los de la Unión Europea.

### C. INCERTIDUMBRES <sup>25</sup>

La incertidumbre en la evaluación de los costos externos se debe al insuficiente conocimiento disponible de las variables o procesos involucrados. Las fuentes de incertidumbre para la Metodología Vías de Impacto son variadas. Entre ellas 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 pendiente de las funciones exposición–respuesta, el costo de un día de actividad restringida, entre otros. Por el contrario, 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 la transformación química, 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 umbral 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 actualizado, y otras.

3) Incertidumbre debido al proceso de selección de variables políticas o éticas, por ejemplo la tasa de descuento intergeneracional, la variación por edad o ubicación geográfica del valor de la vida, el valor estadístico de la vida, la 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.

---

<sup>25</sup> Rabl (2003).

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  $\mu_g$  y la desviación geométrica standard  $\sigma_g$ . El intervalo de confiabilidad del 68% se expresa como:  $[\mu_g/\sigma_g, \mu_g * \sigma_g]$ .

Según Ari Rabl, 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 de 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 sólo 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 expresa Rabl: “...un estimado con una incertidumbre muy alta es mejor que no tener ninguno”.

## II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS

La aplicación de la Metodología Vías de Impacto mediante el modelo SIMPACTS para la evaluación de externalidades en la producción de electricidad en México requirió una serie de datos técnicos, económicos y de salud. Toda la información utilizada corresponde al año 2000, salvo cuando se aclare expresamente. Ese año se considera como referencia en el Programa de Energía y Medio Ambiente de SEMARNAT – SENER.

Con los datos disponibles se pudo correr la versión superior del QUERI del AIRPACTS en todas las centrales eléctricas estudiadas, excepto en Puerto Libertad, donde se utilizó la Estimación 2 (Intermedia) de dicho modelo, al no contar con los datos meteorológicos necesarios.<sup>26</sup> La central termoeléctrica de Manzanillo se analizó también mediante un modelo de dispersión de contaminantes más detallado, lo cual implicó a su vez el uso de otros modelos computacionales de soporte.

### A. CENTRALES DE GENERACIÓN

Con base en la información estadística de la producción del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en el año de referencia, se seleccionaron las centrales de generación, cuyos costos externos serían evaluados. Se procedió entonces a la recopilación de la información requerida por los modelos.

#### 1. Selección de las centrales termoeléctricas

De acuerdo con el Informe de Operación de la CFE del año 2000, la producción bruta de electricidad total nacional fue de 191,4 TWh, de los cuales el 63,8% (122 TWh) provino de plantas que utilizan combustóleo y carbón (véase el gráfico 4). La ubicación de las principales plantas de generación se muestra en el mapa 1, de manera esquemática.

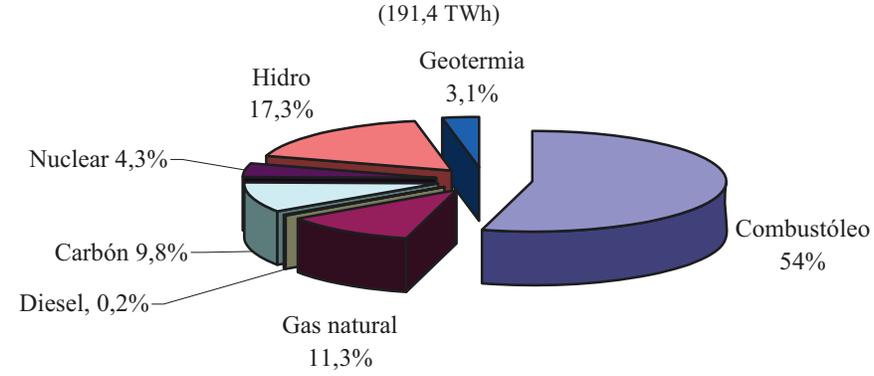
Las regiones o zonas seleccionadas para los propósitos del estudio son aquellas en las que se encuentran las mayores plantas termoeléctricas del país que utilizan carbón o combustóleo como combustible. Éstas se ubican en las localidades siguientes: Río Escondido, Tuxpan, Manzanillo, Petacalco, Tula, Salamanca, Altamira, Puerto Libertad, Mazatlán, Rosarito (Tijuana) y Samalayuca (Cd. Juárez). Las zonas de Tula, Salamanca, Altamira, Rosarito y Samalayuca se denominan “Zonas Críticas” en la NOM-085-SEMARNAT-1994, en tanto que las otras zonas se denominan “Resto del País”. Se precisa que en Manzanillo y Río Escondido se registran formalmente dos centrales, por lo que el estudio incluye 13 plantas de generación.

---

<sup>26</sup> Cabe acotar que para esta central se realizaron estudios de sensibilidad preliminares, variando el radio de dominio local y usando el modelo simplificado mejorado RUWM, pero los resultados en los costos externos no presentaron grandes variaciones (inferiores al 3%), debido a la baja densidad de población local.

Gráfico 4

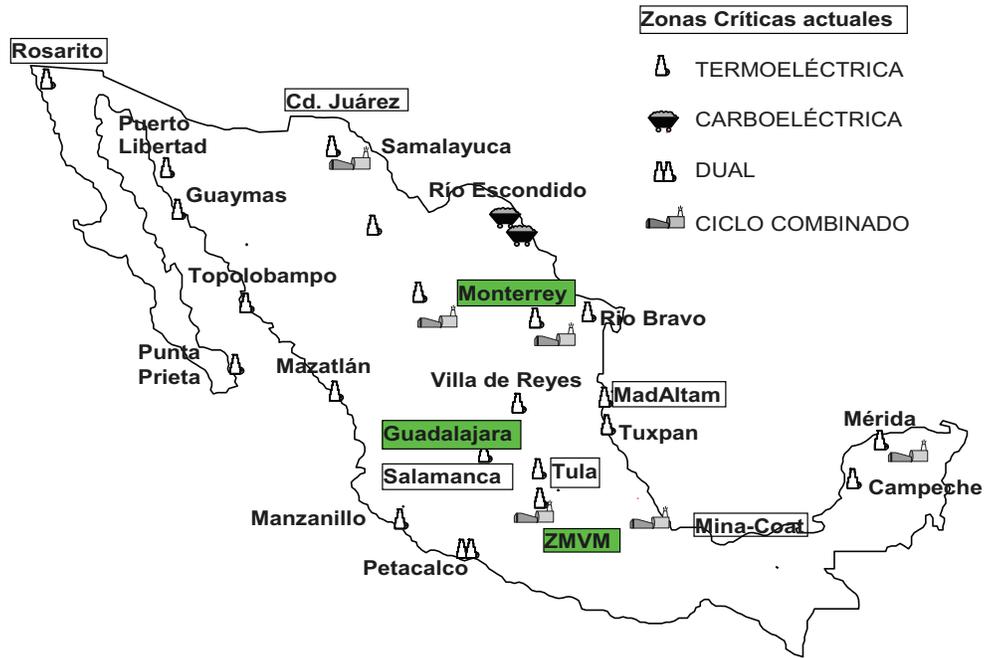
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD AÑO 2000



Fuente: Elaboración propia con datos oficiales.

Mapa 1

PRINCIPALES CENTRALES TERMOELÉCTRICAS DEL PAÍS, AÑO 2000



Fuente: Secretaría de Energía (2003).

Las plantas seleccionadas aportaron 92,3 TWh, cerca del 75% del total generado con combustóleo y carbón, y 48% del total generado en el país. Del total de emisiones a la atmósfera por el sector eléctrico, las plantas seleccionadas emitieron 77% de partículas y de SO<sub>2</sub> y el 67% de NO<sub>x</sub>.

## 2. Datos técnicos de las centrales seleccionadas

Para cada una de las 11 zonas estudiadas se recopiló información geográfica, como la ubicación de la central (coordenadas geográficas), densidad de población local y su distribución en una resolución de 5 x 5 km, y densidad de población regional (véase el cuadro 2). Para el caso de Manzanillo se obtuvo también la elevación del terreno en una resolución de 5 x 5 km.

Cuadro 2

### UBICACIÓN DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y DENSIDAD DE POBLACIÓN a/

Nombre instalación	Localidad	Municipio	Estado	Hab/km <sup>2</sup>	
				Densidad de población local en 50 km	Densidad de población regional en 500 km
Río Escondido	Río Escondido	Nava	Coahuila	18,1	15,0
A. López M.	Tuxpan	Tuxpan	Veracruz	46,1	25,7
P Elías C	Petalcalco	La Unión	Guerrero	20,6	23,5
Manzanillo	Manzanillo	Manzanillo	Colima	27,4	23,0
Francisco Pérez Ríos	Tula	Tula	Hidalgo	445,0	25,1
Salamanca	Salamanca	Salamanca	Guanajuato	225,0	24,7
CT Altamira	Altamira	Altamira	Tamaulipas	71,7	26,6
Puerto Libertad	Puerto Libertad	Pitiquito	Sonora	0,3	7,7
J. Aceves	Mazatlán	Mazatlán	Sinaloa	40,2	20,8
Presidente Juárez	Rosarito	Rosarito	B. California	110,0	7,2
Samalayuca	Samalayuca	Cd. Juárez	Chihuahua	1,7	8,2

Fuente: Elaboración de la SEMARNAT con datos de la CFE y del INEGI.

a/ En este documento, los decimales aparecen separados por comas (“,”); la separación para los miles está marcada con puntos (“.”) dentro del texto, y con un espacio para el caso de los cuadros.

La mayoría de las plantas seleccionadas utiliza combustóleo con un contenido de azufre de entre 3,5% y 4%, a excepción de Río Escondido y Carbón II, que emplean carbón con un contenido de azufre de 1%. En el cuadro 3 se muestra para todos los casos de estudio: tipo de combustible utilizado, número de unidades en cada instalación, capacidad instalada, generación y emisiones de partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> correspondientes al año 2000, calculadas mediante los factores de emisión compilados por la EPA (AP42). En el presente estudio no se consideraron las emisiones de otras fuentes “corriente arriba”, ni las emisiones resultantes de la exploración, producción y transporte de los combustibles, ni los gases de efecto invernadero. Los datos técnicos de las chimeneas que se muestran en el cuadro 4 son: número, altura, diámetro interior, velocidad y temperatura de salida de los gases; fueron tomados de las Cédulas de Operación Anual que la CFE informa a la SEMARNAT.

Cuadro 3

## CARACTERÍSTICAS DE LAS CENTRALES DE GENERACIÓN

Central	Tipo de combustible	Número de unidades	Capacidad (MW)	Generación 2000 (GWh) a/	Emisiones (t/año)		
					Partículas	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>
Río Escondido	Carbón	8	2 600	18 696	8 490	152 000	104 200
Tuxpan	Combustóleo	6	2 100	15 189	16 000	251 000	16 600
Petalcalco	Combustóleo	6	2 100	13 569	13 700	214 000	15 000
Manzanillo	Combustóleo	6	1 900	12 913	13 000	203 000	14 500
Tula	Combustóleo	10	1 882	10 210	9 650	150 700	10 530
Salamanca	Combustóleo	4	866	5 617	5 830	91 100	6 200
Altamira	Combustóleo	4	800	4 723	5 500	86 200	5 700
Puerto Libertad	Combustóleo	4	632	3 653	4 170	65 400	4 330
Mazatlán	Combustóleo	3	616	3 476	4 170	65 300	4 320
Rosarito	Combustóleo	11	1 326	2 525	1 372	19 480	2 881
Samalayuca	Combustóleo	2	316	1 704	1 570	24 700	1 630

Fuente: Prospectiva del sector eléctrico 2002-2011, Secretaría de Energía (SENER), México 2002. Datos de emisión calculados por la SEMARNAT y SENER.

a/ El estudio no considera unidades de ciclo combinado ni turbogás.

Cuadro 4

## CARACTERÍSTICAS DE LAS CHIMENEAS CONSIDERADAS Y PARÁMETROS DE EMISIÓN

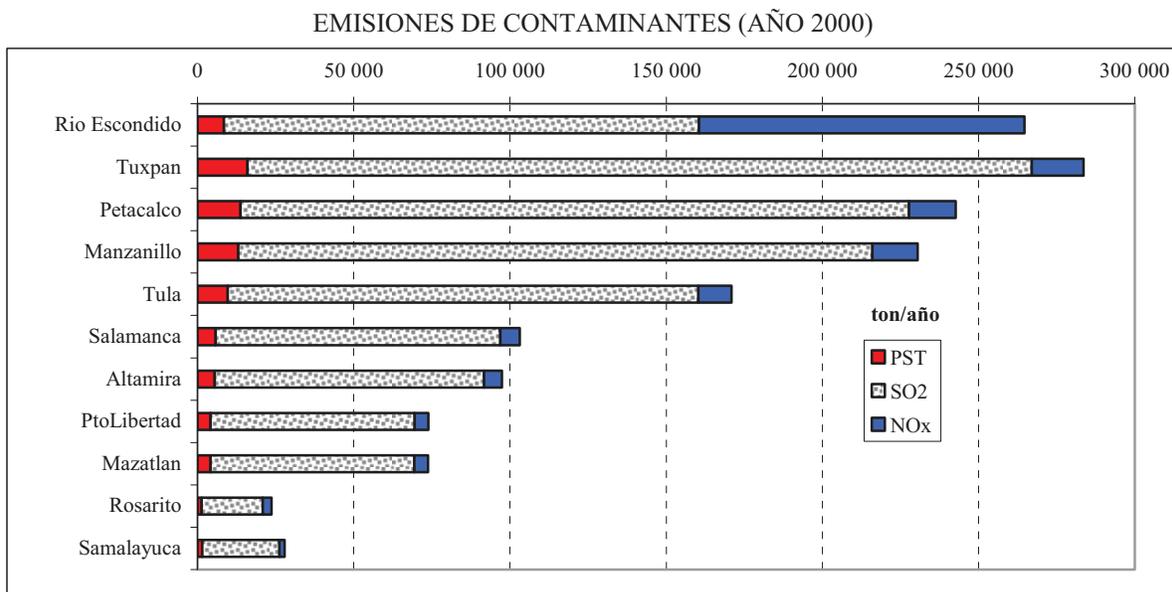
	Central	Puntos de emisión a/	Caso	Número de chimeneas	Altura de chimenea (m)	Diámetro (m)	Velocidad de flujo de gases (m/s)	Temp. de salida (K)
1	Río Escondido	8	a	4	120,0	5,5	21,0	393,0
			b	4	120,0	5,4	23,4	404,6
2	Tuxpan	6	a	6	120,0	5,5	23,3	425,0
3	Petalcalco	6	a	6	120,0	6,0	19,1	437,1
4	Manzanillo	6	a	2	55,0	4,9	24,0	413,0
			b	4	124,0	5,7	18,0	408,0
5	Tula	8	a	2	65,0	3,4	27,4	452,8
			b	2	65,0	5,3	27,1	447,2
			c	4	25,9	5,1	13,6	409,5
6	Salamanca	4	a	2	51,2	3,9	29,1	432,1
			b	1	64,6	4,5	22,8	438,5
			c	1	49,7	3,4	28,5	431,0
7	Altamira	4	a	2	52,2	3,3	45,8	429,2
			b	2	49,7	3,4	21,5	429,5
8	Puerto Libertad	4	a	4	120,0	3,0	26,6	450,8
9	Mazatlán	1	a	1	51,3	3,4	25,1	453,0
10	Rosarito	6	a	3	38,1	2,6	22,8	439,7
			b	1	38,1	3,5	25,3	436,0
			c	2	100,0	3,8	26,2	415,5
11	Samalayuca	2	a	2	67,3	3,8	23,3	422,2

Fuente: Elaboración de la SEMARNAT con datos reportados por la CFE en las COA.

a/ Corresponde a puntos de emisión que se reportan en la Cédula de Operación Anual (COA).

En el año 2000, cuatro centrales de generación eléctrica (Tuxpan, Río Escondido, Petatalco y Manzanillo) emitieron más de 200.000 toneladas de contaminantes, siendo el SO<sub>2</sub> el componente mayor (véase el gráfico 5).

Gráfico 5



Fuente: Elaboración propia.

## B. DATOS METEOROLÓGICOS

La recopilación de los datos meteorológicos estuvo determinada por los diferentes modelos de dispersión utilizados, tanto los del modelo SIMPACTS como de los otros programas.

### 1. Modelos de dispersión utilizados

El modelo de dispersión utilizado en el dominio local fue el ISCLT2 de la EPA, incluido en el modelo QUERI del módulo AIRPACTS. Este modelo permite calcular la concentración promedio anual del contaminante en estudio en cada punto receptor del dominio local seleccionado (red cartesiana de 100 x 100 km centrada en la fuente con celdas de 5 x 5 km). En el caso de Manzanillo se utilizó, además, sobre la misma red de receptores, un modelo de dispersión local más complejo, el ISCST3 de la EPA, el cual permite estimar las concentraciones promedio en un tiempo determinado, y con ello establecer los valores máximos de, por ejemplo, 24 horas o un mes. Asimismo, considera la topografía y la deposición seca de las partículas, entre otras variables.

Para ejecutarlo se requiere correr algunos programas de soporte, como el MIXHT, que calcula la altura de la capa de mezcla (mañana y tarde), y el PCRAMMET para la extrapolación horaria de la altura de la capa de mezcla, la estimación de las categorías de estabilidad

atmosférica (según el método de Turner), la longitud de Monin-Obukhov y la velocidad de fricción para atmósfera seca. En el presente estudio se realizaron las adaptaciones necesarias a los códigos fuente de estos programas para utilizar la información del Servicio Meteorológico Nacional.

Se debe puntualizar que los modelos de dispersión utilizados pueden simular varios puntos de emisión (chimeneas) en el mismo sitio en forma simultánea. Sin embargo, el SIMPACTS debe ser corrido en forma independiente para cada chimenea, aunque éstas se encuentren en la misma planta. Por ello, se hizo inicialmente un análisis de la información de las chimeneas a fin de agruparlas según sus características físicas. De esta forma se definieron “casos” (a, b y c cuando fue necesario) en cada central termoeléctrica y posteriormente se sumaron las concentraciones resultantes. Para las centrales termoeléctricas de Altamira y Manzanillo se simularon dos tipos de chimeneas, mientras que para las de Rosarito, Salamanca y Tula se modelaron tres tipos. En el cuadro 4 se presentan las características de las chimeneas que se consideraron en cada caso.

En ninguna de las zonas estudiadas se utilizaron modelos de dispersión regional, por lo que se aplicaron las aproximaciones del modelo QUERI explicadas en el capítulo I. La modelación de la dispersión regional deberá abordarse en estudios posteriores, lo que permitirá obtener resultados de mayor detalle.

## **2. Información meteorológica**

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México cuenta con dos tipos de estaciones meteorológicas: observatorios y estaciones meteorológicas automáticas (EMA). De los observatorios se obtuvieron bases de datos trihorarios en formato digital, que incluyeron 32 variables meteorológicas, en tanto que de las EMA se obtuvieron las bases de datos de 11 variables meteorológicas que reportan mediciones cada 10 minutos. Con base en esta información, se calcularon los promedios horarios. Las EMA no registran el cubrimiento nuboso y la altura de la capa de nubes, ya que son variables que deben estimarse por observadores expertos; en su lugar miden la radiación solar. Adicionalmente se tienen estaciones de radio sondeo.

Para cada una de las centrales de generación eléctrica seleccionadas se definió la estación meteorológica, así como la estación de radiosondeo más cercana o representativa, de acuerdo con las recomendaciones del SMN. Los datos meteorológicos de entrada comprendieron: año, mes, día, hora, dirección del viento, velocidad del viento y temperatura ambiente.

En el caso de Manzanillo, la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla (variables meteorológicas secundarias) se estimaron mediante el método de Turner y el método Holzworth, utilizando la información de los observatorios y radiosondeos, así como los programas de apoyo de la EPA anteriormente mencionados, debido a que el Servicio Meteorológico Nacional no recomendó un método específico para calcular estas variables. En las EMA se pudo haber usado el Método de Radiación Solar durante el día, pero se encontró que para la noche la magnitud medida no es la radiación neta, de modo que finalmente se decidió no utilizarlo y se aplicó un método simplificado incluido en el SIMPACTS.

Es importante subrayar que al no contar en el país con mediciones locales de la velocidad de remoción de los distintos contaminantes, se utilizaron los valores recomendados en el modelo AIRPACTS (1cm/seg). Los resultados de las externalidades son muy sensibles a este parámetro.

### C. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS

En rigor, las funciones exposición–respuesta deberían de obtenerse en el sitio de la fuente de emisión, para tomar en cuenta la incidencia de factores naturales y socioeconómicos locales. Sin embargo, debido al costo y complejidad de los estudios epidemiológicos, no se cuenta con estudios por sitio, por lo que se recurrió a estudios realizados en otras zonas o países, incluidos algunos meta–análisis, para seleccionar las IRR. El meta–análisis, conocido también como “análisis de análisis”, incluye un conjunto de procedimientos estadísticos que combinan los resultados de varios estudios epidemiológicos independientes, considerados compatibles, con el propósito de integrarlos en un resultado global.

En general, la aseveración de que la contaminación produce daños en la salud humana pareciera contar con un mayor grado de certeza que atribuir un daño específico a un contaminante en particular. Sin embargo, a nivel mundial, los resultados más consistentes se han encontrado al determinar los efectos de las partículas, las cuales comprenden una mezcla de contaminantes sólidos o líquidos cuya composición varía de un lugar a otro.<sup>27</sup>

De acuerdo con el enfoque de la metodología ExternE, las funciones exposición–respuesta para las partículas PM<sub>10</sub>, el SO<sub>2</sub> y el ozono (el cual no fue considerado en este estudio) se definen de forma independiente, y a partir de ellas se derivan las funciones para PM<sub>2.5</sub>, sulfatos y nitratos.

#### 1. Tasas de incremento de riesgo relativo

En este proyecto se utilizaron como referencia principal los valores de Incremento de Riesgo Relativo (IRR) resultantes del meta–análisis del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ECOURS).<sup>28</sup> Este meta–análisis consideró los estudios publicados sobre efectos en la salud humana por exposición a ozono y PM<sub>10</sub> en las bases de datos Medline, Pubmed, Biomed-net, Aries, e incluyó también un análisis de las principales publicaciones mexicanas. Aplicando criterios de exclusión e inclusión, se seleccionaron un total de 126 estudios. Es importante señalar que el meta–análisis consideró la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), por lo que a los estudios realizados en la zona se les dio mayor importancia en comparación con los estudios internacionales.

Además, se consideraron las recomendaciones de la metodología del OIEA para el modelo SIMPACTS, elaboradas por Ari Rabl,<sup>29</sup> quien analizó una serie de estudios epidemiológicos relacionados con partículas PM<sub>10</sub>, y recomendó valores de IRR. Se utilizó

---

<sup>27</sup> Rabl (2002).

<sup>28</sup> Cesar y otros (2000).

<sup>29</sup> Rabl (2002).

también el estudio de Ostro sobre el mismo contaminante publicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los valores de las tres referencias se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5

INCREMENTO DE RIESGO RELATIVO (IRR) PARA PM<sub>10</sub> DE DIFERENTES REFERENCIAS(Porcentaje de incremento por µg/m<sup>3</sup>)

Impactos en salud	Población afectada	ECOOURS a/	Rabl b/	Ostro c/
1. Mortalidad crónica	+ 30 años	0,384	0,46	0,42
2. Mortalidad Aguda	Total	0,101	-	0,123
3. Bronquitis crónica	+ 18 años	0,360	2,14	0,0000612 d/
4. Admisiones hospitalarias				
Respiratorias	Total	0,139	0,04	0,000012 d/
Cardio-cerebro vasculares	Total	0,060	0,1	
5. Visitas a salas de urgencia	Total	0,311	-	0,0000235 d/
6. Días de actividad restringidos	+ 18 años	0,774	0,26	0,3
7. Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,774	-	0,059 d/
8. Tos crónica	Niños	0,030	-	-

Fuente: Especificadas en las columnas respectivas.

a/ En el estudio de la Zona del Valle de México, los IRR están dados en porcentaje de cambio por cada 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub>, de forma que se recalcularon para este cuadro.

b/ Véase Rabl (2002).

c/ Véase Ostro (1996).

d/ Para este caso el IRR está dado en número de casos por µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> anual. Para compararlos con los valores de los otros estudios de referencia, los IRR del estudio ECOOURS y los propuestos por Rabl se multiplicaron por la tasa basal, quedando en casos por µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> anual.

Con base en la información analizada se decidió utilizar el IRR de menor valor para cada impacto (véase el cuadro 6), con objeto de realizar una estimación conservadora del daño. En este cuadro no se contempló la mortalidad aguda por PM<sub>10</sub>, pues se supone que está incluida en la mortalidad crónica y se podría incurrir en un doble conteo, de acuerdo con la metodología de ExternE.

A partir de las funciones para PM<sub>10</sub> se derivaron las correspondientes a PM<sub>2,5</sub>, sulfatos y nitratos, tomando en consideración los criterios de ExternE. Dichos criterios consideran que las partículas emitidas por los procesos de combustión tienen un diámetro aerodinámico equivalente a 10 micrones. Estudios de la contaminación atmosférica realizados en los Estados Unidos han mostrado que 60% de la distribución de masa corresponde a partículas inferiores a 2,5 micrones. Éstas son las que pueden penetrar más profundo en los pulmones y causar mayor impacto en la salud. Para tomar en cuenta este hecho, el IRR para partículas de 2,5 micrones se obtiene multiplicando por un factor de 1,67 el IRR para partículas de 10 micrones.<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Spadaro (1999).

Cuadro 6

IRR SELECCIONADOS PARA PM<sub>10</sub>, SULFATOS Y NITRATOS(Porcentaje de incremento en el riesgo relativo por µg/m<sup>3</sup>)

Impactos en salud	Población	IRR para PM <sub>10</sub> /nitratos	IRR para sulfatos
1. Mortalidad crónica	+ 30 años	0,384	0,64128
2. Bronquitis crónica	+ 18 años	0,360	0,6012
3. Admisiones hospitalarias			
Respiratoria	Total	0,040	0,0668
Cardio-cerebro vasculares	Total	0,060	0,1002
4. Visitas a salas de urgencia	Total	0,0000235 a/	0,000039245 a/
5. Días de actividad restringidos	+ 18 años	0,260	0,4342
6. Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,774	1,29258
7. Tos crónica	niños	0,030	0,0501

Fuente: Cuadro 5.

a/ Casos por µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> anual.

Debido a la similitud de sus diámetros, los valores IRR de los sulfatos se tomaron igual que los de las PM<sub>2,5</sub> y los de los nitratos igual que los de las PM<sub>10</sub>.<sup>31</sup> Estas aproximaciones introducen algunas imprecisiones, ya que al asignar a los nitratos la misma pendiente que a las PM<sub>10</sub>, se les está asignando un efecto que corresponde a una mezcla de contaminantes, formados no sólo por nitratos, sino por sulfatos y otros. En realidad, no se puede precisar con exactitud a cuál contaminante de la mezcla corresponden los mayores efectos. Esto se complica si se considera que los estudios epidemiológicos para PM<sub>10</sub> se han realizado en la atmósfera de otras ciudades con diferente composición química de partículas, y no sólo las provenientes de la generación de electricidad, como es el caso del presente estudio.

No existe información de estudios locales sobre los efectos de los óxidos de azufre en la salud, que pudiera ser utilizada en este estudio. Por la importancia que tienen las emisiones de SO<sub>2</sub> de la generación eléctrica, se incluyeron algunas funciones para evaluar su impacto, considerando para ello los IRR recomendados por Rabl<sup>32</sup> (véase el cuadro 7).

En resumen, con base en el análisis de otros estudios de referencia, especialmente ExternE, se seleccionaron los impactos que se muestran en los cuadros 6 y 7, junto con los valores de IRR, por ser los más importantes desde el punto de vista de los costos del impacto y frecuencia de ocurrencia.

El problema del doble conteo ocurre principalmente en el tratamiento de los días de actividad restringidos (DAR) y los días de trabajo perdidos (DTP). Las admisiones hospitalarias y los días de trabajo perdidos se incluyen en los días de actividad restringidos.<sup>33</sup> Por ello, se recomienda calcular un valor de DAR neto, restando a su valor inicial una porción de los días de

---

<sup>31</sup> Rabl (2002).

<sup>32</sup> *Ibidem*.

<sup>33</sup> *Ibidem*.

trabajo perdidos y las admisiones hospitalarias (respiratorias y cardiovasculares). Al no contar con funciones para los días de trabajo perdidos, se calculó la variación de los costos del daño al usar un valor total de DAR (incurriendo en doble conteo) o un valor neto de DAR. Se pudo apreciar que el doble conteo no superó el 1% de los costos totales, por lo que se decidió considerar la función de días de actividad restringidos sin restar la pérdida laboral por admisiones hospitalarias.

Cuadro 7

IRR RECOMENDADOS PARA SO<sub>2</sub>(Porcentaje de incremento en el riesgo relativo por µg/m<sup>3</sup>)

Impactos en salud	Población	IRR
Mortalidad aguda	Total	0,046
Admisiones hospitalarias respiratorias	Total	0,04

Fuente: Rabl (2002).

## 2. Tasas de incidencia y de mortalidad

Para evaluar la morbilidad se usaron diferentes referencias para obtener las tasas de incidencia, según el impacto analizado, al no contar con las tasas locales. En algunos casos se emplearon las tasas estatales, en otros las obtenidas para el estudio del Valle de México. Las tasas de incidencia para los ingresos a salas de urgencia no fueron necesarias porque se emplearon las funciones recomendadas por Ostro.<sup>34</sup> Las tasas de incidencia de las admisiones hospitalarias respiratorias y cardio-cerebro-vasculares se estimaron a partir de los datos del anuario estadístico de salud de México para el año 2000.

El empleo de las tasas de incidencia del Valle de México u otra que no corresponda a la región donde se realiza el estudio no es lo óptimo, pues existen muchos factores locales que inciden en el número de casos de una enfermedad (factores climáticos, condiciones de vida, hábito de fumar, entre otros), sobre todo de enfermedades respiratorias. A pesar de estas restricciones, el enfoque es aceptado internacionalmente por la falta de información pertinente. Las tasas de incidencia recomendadas para casos de morbilidad se presentan en el cuadro 8.

Respecto de la mortalidad, se encontró el valor de la tasa para cada estado de la República en que se ubican las termoeléctricas seleccionadas. Estas tasas, así como el promedio nacional y las fracciones de población estimadas para cada región, se muestran en el cuadro 9.

---

<sup>34</sup> Ostro (1996).

Cuadro 8  
TASAS DE INCIDENCIA DE MORBILIDAD

Efecto en salud por partículas	Tasa basal Casos/personas *año	Referencia
Bronquitis crónica, nuevos casos	0,00707	ECOURS a/
Admisiones hospitalarias respiratorias	0,000793	Secretaría de Salud, Anuario 2000 Morbilidad b/
cardio-cerebro-vasculares	0,00042	
Visitas a salas de urgencia c/ Días de actividad restringida	6,46	ECOURS
Crisis aguda de asma	0,1274	ECOURS
Tos crónica, prevalencia	0,0577	ECOURS

a/ Fuente: Cesar y otros (2000).

b/ Fuente: Sistema Nacional de Información en Salud. Anuario Morbilidad 2000

c/ Se emplea la  $F_{er}$  propuesta por Ostro 1996 completa, por lo que no se utilizó la basal local.

Cuadro 9  
TASAS DE MORTALIDAD POR ESTADO Y GRUPOS POBLACIONALES  
RESPECTO DE POBLACIÓN TOTAL

Zona	Estado	Tasa de mortalidad a/	Fracción de la población (%) b/		
			Niños menores 14 años	Población + 18 años	Población + 30 años
Río Escondido	Coahuila	4,3	32,4	60,5	38,0
Tuxpan	Veracruz	4,5	33,8	58,8	38,6
Petalcalco	Guerrero	3,3	38,9	52,9	33,3
Manzanillo	Colima	4,4	30,9	57,0	36,2
Tula	Hidalgo	4,0	35,5	57,1	36,7
Salamanca	Guanajuato	4,4	36,6	55,7	34,3
Altamira	Tamaulipas	4,1	31,3	61,8	38,7
Puerto Libertad	Sonora	4,6	32,4	60,9	38,7
Mazatlán	Sinaloa	3,8	33,8	59,2	37,3
Rosarito	Baja California	4,5	30,4	56,0	33,8
Samalayuca	Chihuahua	4,9	32,2	58,9	37,0
Toda la República (promedio)		4,2	33,4	58,2	36,5

Fuente: Sistema Nacional de Información en Salud, *Anuario Mortalidad 2000*.

a/ Tasa por 1.000 habitantes.

b/ La fracción de la población por grupos de riesgo para cada estado se determinó con base en el Censo Nacional de Población del INEGI del año 2000. La fracción de la población asmática se consideró igual al 7,5% de la población total del país, de acuerdo con información del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias.

## D. COSTOS ECONÓMICOS DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD

### 1. Morbilidad

El costo de la atención a casos de enfermedad está altamente influido por las condiciones propias del lugar en que se brindan los servicios médicos y por aspectos socioeconómicos de la población atendida. El Instituto Nacional de Salud Pública realizó un estudio que considera los costos del nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) para algunas enfermedades; dichos costos se utilizaron en el estudio del INE antes citado.<sup>35</sup> Es importante aclarar que el presente estudio no analiza los costos para cada zona y que no todas las zonas de influencia de las termoeléctricas cuentan con el nivel de atención mencionado. Se requiere profundizar en estos estimados para considerar, por ejemplo, otros niveles de atención, los costos incurridos por otras instancias sanitarias (hospitales de la Secretaría de Salud, ISSSTE y PEMEX, privados) y que se necesita determinar la fracción de población derechohabiente para cada instancia.

El presente estudio consideró los valores del Instituto Nacional de Salud Pública porque, pese a sus limitaciones, su información es mejor que la estimada indirectamente a través de los datos de la Unión Europea. Aun así, para el caso de la tos crónica en niños se adaptaron los costos transferidos de la Unión Europea, por no contar con valores nacionales.

En el cuadro 10 se presentan los diversos costos de los impactos evaluados: costos directos de la enfermedad (CD), pérdidas de productividad (PP) y Voluntad a pagar. De forma adicional se indica el valor de los costos unitarios transferidos de la UE, los que se presentan en el cuadro con fines comparativos. Asimismo, se añade una columna que indica los días de actividad perdidos considerados en cada caso, tomando como referencia el estudio de McKinley, con excepción de las admisiones hospitalarias cardio-cerebro-vasculares, para las que se utilizó el estudio de ECOURS.

### 2. Mortalidad

Como se señaló en el capítulo I, la mayoría de los estudios para determinar el valor de disminuir el riesgo de muerte prematura se basa en las técnicas de valoración contingente, en particular en la Voluntad a pagar. En este estudio se utilizó el enfoque de Años de Vida Perdidos (AVP), empleado en el proyecto ExternE. En dicho proyecto, como se señaló anteriormente, se determinó el valor de un AVP sobre la base del Valor Estadístico de la Vida estimado para la población europea. Para aplicar el concepto a México se consideró la relación de la paridad del poder adquisitivo del ingreso nacional bruto con respecto al de la UE y el coeficiente de elasticidad-ingreso igual a la unidad<sup>36</sup> (véase el cuadro 11).

---

<sup>35</sup> McKinley y otros (2003).

<sup>36</sup> <http://www.worldbank.org/data/>.

Cuadro 10

## COSTOS UNITARIOS PARA CASOS DE MORBILIDAD

(Dólares año 2000)

Efecto en salud	Costo directo de enfermedad a/	Pérdida de productividad a/	Voluntad a		
			pagar a/	Costos transferidos b/	Días perdidos d/
1. Bronquitis crónica (adultos mayores de 18 años)	17 750	81	30 000	65 786	7
2. Admisiones hospitalarias respiratorias	2 186	116	330	1 680	10
cardio-cerebro-vasculares c/	10 890	520	330	6 512	45
3. Visitas a salas de urgencia	269	58	170		5
4. Días de actividad restringidos		12	20	43	
5. Crisis aguda de asma	317	23	170		2
6. Tos crónica				93	

Fuente: Se especifica en cada llamada.

a/ McKinley y otros (2003), Tabla VI.5, Health values for each outcome (dollar/case). Los costos se tomaron tal cual aparecen en el estudio de McKinley, pero se considera pertinente la siguiente aclaración: los costos directos de enfermedad (CD) son los del Instituto Mexicano del Seguro Social considerando el nivel III de atención para el año 2001. La pérdida de productividad (PP) se calculó considerando únicamente la pérdida laboral, tomando como base el salario promedio ponderado del año 2000 de la población mexicana, con datos del INEGI. Los valores de Voluntad a pagar se apoyan en diversas fuentes de información, principalmente el estudio realizado por Cesar y otros (2002), el cual no precisa de qué año son los dólares. En el presente estudio se utilizaron los valores de CD y PP, sin otro tratamiento, para respetar los datos del estudio de McKinley (considerando que la inflación del año 2001 fue baja).

b/ Spadaro (2002), Airpacts Input Data: Monetary Costs. International Atomic Energy Agency, Viena, Austria.

c/ Se ajustó el valor de pérdida de productividad de las admisiones hospitalarias cardio-cerebro-vasculares con respecto al estudio del INE, considerando 45 días perdidos (ECOURS), ya que éstas requieren mayor tiempo de recuperación que las admisiones hospitalarias cardíacas consideradas en dicho estudio.

d/ Cesar y otros (2000).

Asimismo, se supuso que un caso de muerte crónica equivale a 10 AVP y que un caso de muerte aguda equivale a 0,5 AVP, como propone la Metodología Simplificada de Externe,<sup>37</sup> transfiriendo los costos a las condiciones locales.

En México se cuenta con un estudio realizado por Ibararán,<sup>38</sup> que estimó por medio de evaluaciones contingentes y precios hedónicos la Voluntad a pagar para reducir el riesgo por mortalidad, bronquitis crónica y resfrío. El estudio obtuvo resultados del costo por mortalidad para tres valores del coeficiente de elasticidad. El valor central de dichos resultados se considera en el estudio de sensibilidad.

<sup>37</sup> Spadaro (2002).

<sup>38</sup> Ibararán y otros (2003).

Cuadro 11

## VALOR DE UN AÑO DE VIDA PERDIDO (AVP)

(2000 dólares)

Tipo de mortalidad	Europa	México a/
Mortalidad aguda	174 000	64 380
Mortalidad crónica	101 000	37 370

Fuente: Banco Mundial 2002.

a/ Se utilizó un factor de 0,37 de acuerdo con los valores de PPP\_INB del Banco Mundial para México y Europa en el año 2000.

### III. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología simplificada de ExternE para evaluar los costos externos de salud en las zonas analizadas. Se exponen la dispersión de los contaminantes en cada una de las zonas de estudio, el análisis de las concentraciones resultantes, considerando las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud y, finalmente, los resultados de las externalidades, incluyendo el daño total generado, desglosado por tipo de contaminante y valor de la externalidades (centavos de dólar/kWh).

#### A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

La aplicación del modelo EPA ISCLT2 (incluido en el AIRPACTS) en las zonas donde se encuentran ubicadas las centrales termoeléctricas hizo posible estimar la concentración de contaminantes ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{NO}_x$ ) en el dominio local comprendido en una distancia de 50 km alrededor de las plantas. Como se mencionó anteriormente, para calcular el impacto de la dispersión regional se usaron las aproximaciones contenidas en el modelo SIMPACTS.

El cuadro 12 presenta un resumen de los valores máximos de las concentraciones promedio anual detectadas en algún punto receptor del dominio local de cada planta. Los receptores son los puntos centrales de las celdas de 5 x 5 km ubicadas en un dominio de 100 x 100 km centrado en la fuente. Por lo tanto, no se garantiza que dichos valores correspondan a las concentraciones máximas en cada celda ni a la absoluta de la región.<sup>39</sup> Las mayores concentraciones de contaminantes se encontraron en la zona de la central termoeléctrica de Tula, seguida por Mazatlán, Salamanca, Altamira, Petacalco, Río Escondido, Manzanillo, Rosarito y Tuxpan, con excepción de Río Escondido-Carbón II, donde las concentraciones de  $\text{NO}_x$  son mayores que en el resto. Con objeto de relacionar estas concentraciones con su potencial impacto en la salud humana, se presenta un resumen de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Salud, que estipulan la concentración permisible de cada contaminante como medida de protección a la salud de la población (véase el cuadro 13).

Con respecto a las concentraciones de partículas se aprecia que en todas las zonas de estudio se presentan valores menores al máximo permitido (véase el gráfico 6). Sin embargo, su control es conveniente en cualquier caso, ya que las partículas finas dañan la salud y no existe un umbral seguro debajo del cual no se encuentre efecto alguno.

---

<sup>39</sup> Los modelos ISC calculan las concentraciones en los puntos receptores especificados por el usuario, por lo que su selección es crítica para capturar el punto de máximo impacto. Para calcular el valor máximo absoluto se requieren estudios adicionales.

Cuadro 12

VALOR MÁXIMO DE LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL EN UN PUNTO RECEPTOR EN LA ZONA DE INFLUENCIA LOCAL DE CADA PLANTA

Central a/	Concentración del contaminante ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		
	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Tula	14,5	226,2	15,8
Mazatlán	11,5	181,2	11,9
Salamanca	7,1	111,6	7,6
Altamira	4,2	66,0	4,4
Petalcalco	3,0	47,0	3,3
Río Escondido-Carbón II	2,0	86,3	24,9
Manzanillo	1,8	28,5	2,0
Rosarito	1,9	26,6	3,9
Tuxpan	1,5	23,9	1,6
Samalayuca	0,3	4,0	0,3

Fuente: Elaboración propia.

a/ No se incluye la Central de Puerto Libertad debido a que no se contó con la información meteorológica de la región.

Cuadro 13

CONCENTRACIONES MÁXIMAS PERMITIDAS POR NORMAS OFICIALES MEXICANAS

NOM	Contaminante	Concentración diaria u horaria	Concentración promedio anual
NOM-025-SSA1-1993	Partículas menores de 10 micras (PM <sub>10</sub> )	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en 24 horas una vez al año	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NOM-022-SSA1-1993	Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0,13 ppm (341 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en 24 horas una vez al año	0,03 ppm (79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
NOM-023-SSA1-1993	Bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0,21 ppm (395 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) promedio de 1 hora, una vez al año	0,053 ppm a/ (aprox 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

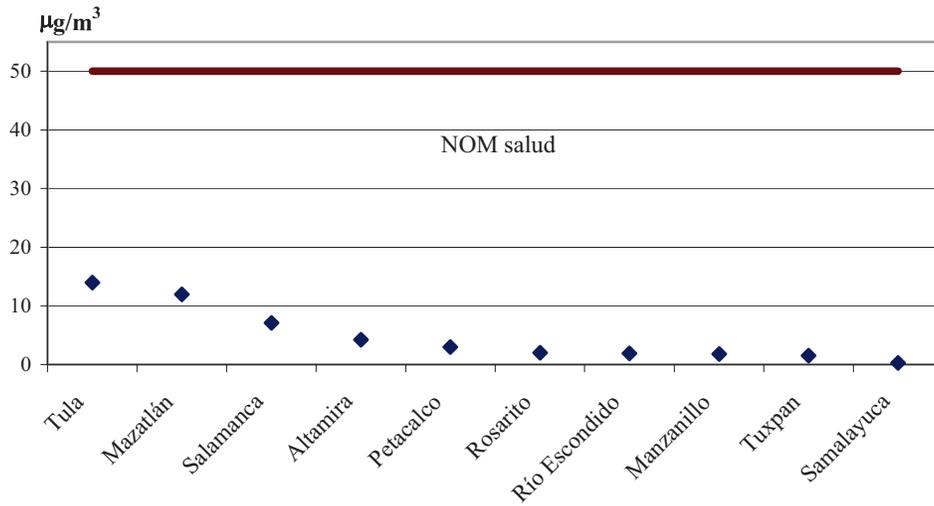
Fuente: Elaboración propia, sobre la base de información oficial.

a/ La NOM-023 no establece una referencia para concentración promedio anual. Con fines de comparación, se considera el estándar (NAAQS) de los Estados Unidos, el cual está dado en ppm. El equivalente en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se muestra entre paréntesis.

Respecto de los óxidos de azufre (véase el gráfico 7), en las zonas de influencia local de las termoeléctricas de Tula, Mazatlán y Salamanca, por lo menos un punto receptor presenta un valor máximo de las concentraciones promedio anuales superiores a la norma. Cabe observar que la concentración de referencia representa únicamente la emisión de la termoeléctrica estudiada, y no considera otras emisiones de contaminantes en cada una de las zonas de estudio. Las centrales termoeléctricas de Petacalco, Carbón II-Río Escondido, Rosarito y Tuxpan presentaron concentraciones menores al nivel máximo permitido en el dominio local.

Gráfico 6

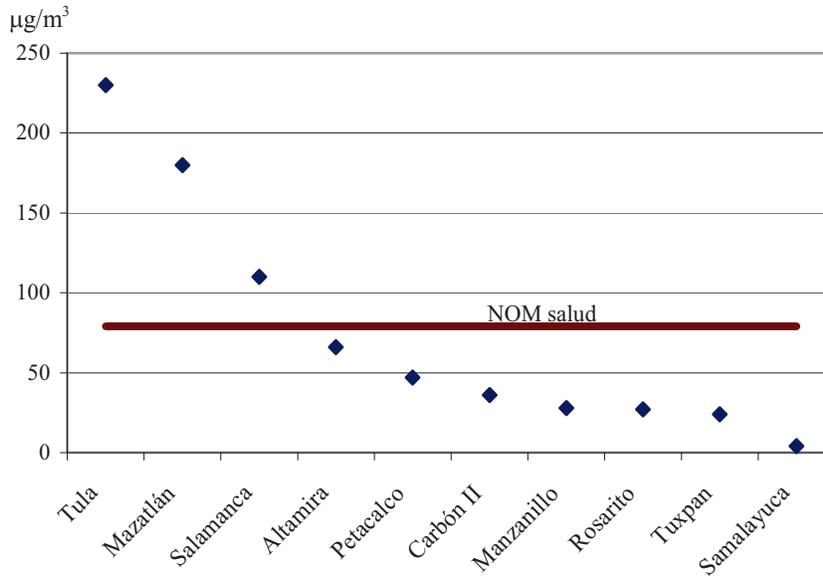
VALOR MÁXIMO DE LAS CONCENTRACIONES PROMEDIO ANUAL DE PM<sub>10</sub>



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7

VALOR MÁXIMO DE LAS CONCENTRACIONES PROMEDIO ANUAL DE SO<sub>2</sub>

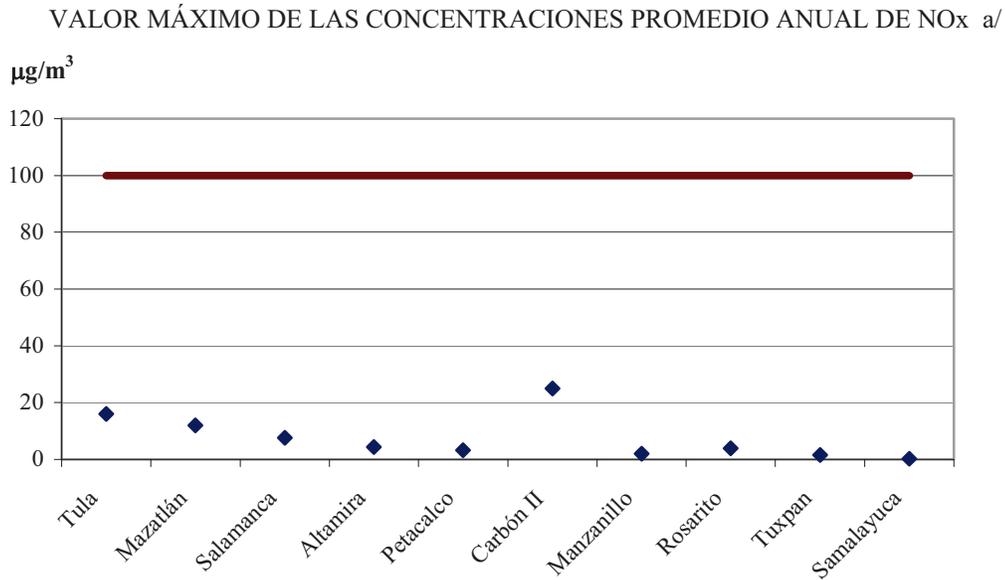


Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el valor máximo de las concentraciones promedio anual de NO<sub>x</sub> se encuentran por debajo de la norma, aun en las zonas de influencia de las termoeléctricas de Carbón II y Río Escondido, que presentan las mayores concentraciones (véase el gráfico 8). Por su potencial como precursor en la formación de ozono (contaminante que no se evaluó en el estudio) y su capacidad de acidificación de cuerpos de agua y suelos (formación de lluvia ácida, que tampoco

se evaluó), la acción de este contaminante debería ser analizada con modelos más detallados. Ambas características deben considerarse para determinar su impacto en la salud, en particular en las zonas urbanas y en general en los ecosistemas.

Gráfico 8



a/ La norma establece la concentración de NO<sub>2</sub>. Se toma como referencia, aunque las concentraciones se refieren a NO<sub>x</sub>.

Fuente: Elaboración propia.

## B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES

Con los resultados de los modelos de dispersión utilizados y siguiendo la Metodología Vías de Impacto, se calculó el impacto físico en cada uno de los sitios receptores (casos por año). Para la evaluación de los costos externos en la salud se tomaron, para los casos de morbilidad, la suma de los costos directos de la enfermedad más la pérdida de productividad; y para el caso de mortalidad, el valor de un año de vida perdida. Evidentemente, el primer valor no representa la pérdida total de bienestar individual ante la ocurrencia de una enfermedad, la cual es expresada en forma más completa por la Voluntad a pagar. En ese sentido, vendría a ser una estimación conservadora para los costos de morbilidad.

Con dichos datos se estimaron los costos totales de las externalidades para cada una de las 11 zonas estudiadas. El monto total es aproximadamente de 465 millones de dólares, a valores del año 2000 (véase el cuadro 14), el cual representa el 0,1% del producto interno bruto de México en el mismo año, así como el 4% del gasto público en salud.<sup>40</sup> Los costos más elevados se presentaron en las plantas de Tuxpan, Manzanillo, Tula y Petacalco, que son las centrales de mayor emisión del país, mientras los más bajos fueron los de Rosarito, Samalayuca, y Puerto

<sup>40</sup> Secretaría de Salud (2000). Boletín de Información Estadística.

Libertad, que tienen menores niveles de generación. Hay que señalar que dichos costos dependen en gran medida de la densidad de población en el área de impacto, siendo las plantas de Puerto Libertad y Carbón II - Río Escondido las que tienen menos población en su área de impacto local. Las áreas de impacto de Tula, Salamanca, Rosarito y Altamira son las más pobladas.

Este valor de las externalidades en las 11 centrales de producción eléctrica corresponde a un escenario bajo, ya que las pendientes de las funciones exposición repuesta seleccionadas fueron aquellas con menores valores, y los costos de morbilidad sólo incluyeron los costos directos y de pérdida de productividad, mas no toda la pérdida en el bienestar individual.

Cuadro 14

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

	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	Sulfatos	Nitratos	Total costos externos	Centavos de dólar / kWh
Tuxpan	3 503	1 267	98 300	3 897	106 967	0,70
Manzanillo	2 452	936	65 550	2 803	71 741	0,56
Tula	11 161	4 147	50 021	2 093	67 422	0,66
Petacalco	1 660	655	51 643	2 160	56 118	0,41
Río Escondido	1 024	426	13 639	33 231	48 320	0,26
Salamanca	5 780	2 323	30 461	1 241	39 805	0,71
Altamira	3 932	1 393	32 697	1 296	39 318	0,83
Mazatlán	1 651	601	17 548	696	20 496	0,59
Pto. Libertad	30	11	7 875	312	8 228	0,23
Samalayuca	99	38	3 230	128	3 495	0,20
Rosarito	689	255	1 785	300	3 029	0,12
Total	31 981	12 052	372 749	48 157	464 939	

Fuente: Elaboración propia.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana, sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, bosques, o en el calentamiento global. Se observa que los costos en la salud están determinados principalmente por el impacto de los contaminantes secundarios, en particular sulfatos y en menor escala nitratos, los cuales tienen su mayor efecto en el dominio regional, más allá de los 50 km alrededor de la central eléctrica. En el caso de las 11 zonas estudiadas, el impacto regional estimado por el SIMPACTS debido a los contaminantes representa entre el 74% y el 99,5% de los costos totales en salud, cifra comparable a la obtenida en el proyecto ExternE para el caso de Francia.<sup>41</sup> Por otro lado, el costo por mortalidad representó el 84% del total de externalidades, mientras que por morbilidad el 16%.

<sup>41</sup> European Commission. External Costs of Energy: Application of the ExternE Methodology in France, 1998. <http://externe.jrc.es>

Aun cuando en una cierta región no se rebasen las normas de calidad de aire, el modelo reporta un impacto local debido a que se están utilizando funciones exposición respuesta de tipo lineal sin umbral. Por su parte, el impacto regional puede llegar a ser muy importante, ya que los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

A partir del cálculo de la externalidad total por cada central se estimó el costo específico por kWh generado por planta, el cual oscila entre 0,12 y 0,83 centavos de dólar (véase el cuadro 14). Los valores más bajos correspondieron a Puerto Libertad, Samalayuca y Rosarito, y los más altos a Altamira, Salamanca y Tuxpan. Estos valores están determinados por los costos totales en salud y por los niveles de generación. Por esta razón, en las centrales de Tuxpan, Petacalco y Manzanillo, que arrojan los mayores costos en salud, los costos específicos no son los más elevados, debido a su alto nivel de generación eléctrica. El valor ponderado del costo externo en razón de las producciones de las 11 centrales es de 0,50 centavos de dólar por kWh. Además, se calculó el costo externo por cada uno de los contaminantes emitidos para cada una de las centrales (véase el gráfico 9), y se encontró que el SO<sub>2</sub> tiene la mayor contribución en el total de daños a la población.

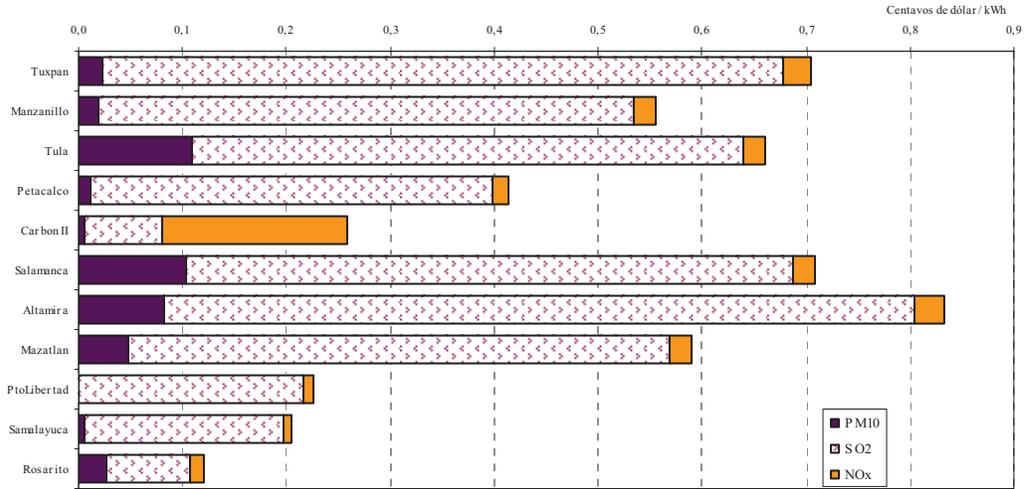
El modelo SIMPACTS calculó también un rango de incertidumbre en los costos externos para cada planta, suponiendo una desviación geométrica estándar diferente en función del tipo de impacto: seis para los casos de mortalidad aguda, cuatro para la mortalidad crónica y tres para la morbilidad. Así se obtuvo un estimado superior y un inferior. Con esta información se calcularon las externalidades por kWh para todas las plantas. El costo externo para la central de Altamira tendría un valor estimado de 0,83 centavos de dólar por kWh, con un rango de incertidumbre de entre 0,22 y 3,23 centavos de dólar por kWh, mientras que para Rosarito, con un valor estimado de 0,12 centavos de dólar por kWh, se ubicaría entre 0,03 y 0,48 centavos de dólar por kWh (véase el gráfico 10).

Las centrales de Tula, Salamanca, Altamira y Tuxpan son las que presentaron los valores más altos por tonelada emitida de PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> (véase el cuadro 15). Esta información es importante si se pretendiera internalizar la externalidad por medio de impuestos directos por tonelada de emisión de contaminantes.

Si se considera un valor de referencia de 5 centavos de dólar por kWh, como costo de producción en las centrales termoeléctricas de vapor, los costos por externalidades representarían entre un 3% y un 17% del valor de referencia. Éstos podrían ser los valores de incremento en los precios de referencia si se internalizaran los costos de las externalidades, bajo un escenario de estimados bajos, por las razones anotadas anteriormente.

Gráfico 9

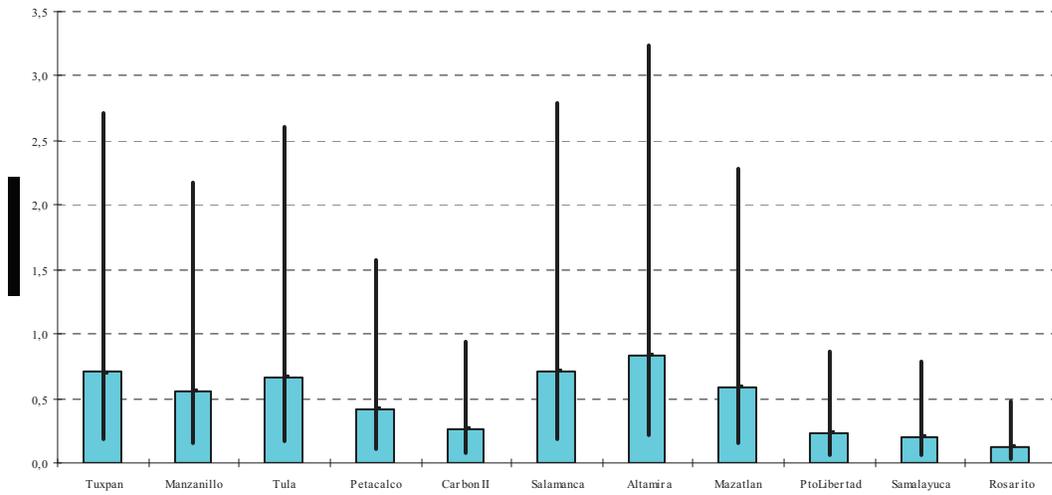
EXTERNALIDADES POR CADA CONTAMINANTE EMITIDO



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10

RANGO DE INCERTIDUMBRE DE LOS COSTOS EXTERNOS DE CADA CENTRAL



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 15

## COSTO POR TONELADA DE CONTAMINANTE EMITIDA

Región	Dólares / ton		
	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
Tuxpan	219	397	235
Manzanillo	189	328	193
Tula	1157	359	199
Petacalco	121	244	144
Río Escondido	121	93	319
Salamanca	991	360	200
Altamira	715	395	227
Mazatlán	396	278	193
Pto. Libertad	7	121	72
Samalayuca	63	132	78
Rosarito	502	28	619

Fuente: Elaboración propia

### C. ANÁLISIS DETALLADO DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE MANZANILLO

A fin de comparar los resultados obtenidos en la dispersión de los contaminantes y el cálculo de externalidades mediante opciones de modelación más completas, se realizó un análisis detallado de la central termoeléctrica de Manzanillo, utilizando otros modelos de dispersión e información meteorológica complementaria (véase el cuadro 16).

Cuadro 16

## OPCIONES DE MODELACIÓN PARA LA CENTRAL DE MANZANILLO

Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
ISC LT: altura de la capa de mezcla y categoría de estabilidad atmosférica por el método simplificado del SIMPACTS.	ISC LT: altura de la capa de mezcla y categoría de estabilidad atmosférica con el método Holzworth y el método Turner; considera radiosondeos y utiliza los programas de la EPA, MixHeight y PCRAMET para procesar los datos.	ISC ST: utiliza el fichero de datos meteorológicos obtenido en la opción 2 y considera la elevación del terreno.	ISC ST opción 3 más la deposición seca de partículas.

Fuente: Elaboración propia.

En las primeras dos opciones se obtuvieron las estimaciones de las concentraciones promedio anuales de los tres contaminantes estudiados, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, en el dominio local. En las opciones 3 y 4 se obtuvo, además de las concentraciones promedio anual, una estimación de las concentraciones promedio de 24 horas para el caso de SO<sub>2</sub>.

Los datos meteorológicos utilizados son las mediciones horarias (o de cada tres horas) obtenidas en un año (en este caso el año 2000) por el Observatorio de Manzanillo, y los datos de radiosondeo de la estación de Manzanillo, los que permiten evaluar las condiciones verticales de la atmósfera. La elevación del terreno se obtuvo de las cartas del INEGI,<sup>42</sup> considerando la elevación en el punto medio de cada receptor en la malla de celdas de 5 x 5 km. La distribución de tamaño de las partículas emitidas (diámetros, por ciento en masa y densidad correspondiente), necesaria para calcular la deposición seca de partículas, se obtuvo de los factores de emisión de la EPA.<sup>43</sup>

Para modelar la dispersión de las emisiones gaseosas sólo se utilizaron las dos primeras opciones mediante el ISC LT y la tercera opción mediante el ISC ST3, considerando la elevación del terreno. No se calculó la deposición de los gases porque es menos importante que la de partículas y requiere de gran cantidad de información.<sup>44</sup>

La estimación de la dispersión de PM<sub>10</sub> con la metodología más simplificada (opción 1) da como resultado concentraciones promedio anual que varían de 0,0062 a 1,80 µg/m<sup>3</sup> en un área de 50 km alrededor de la planta, en tanto que la estimación con la opción 2 calcula concentraciones ambiente de 0,074 a 1,65 µg/m<sup>3</sup> en el mismo radio de 50 km (véase el cuadro 17). Se obtiene así una diferencia de menos de 10% en las concentraciones promedio anual máximas utilizando las opciones 1 y 2.

Cuadro 17  
CONCENTRACIONES PROMEDIO ANUAL DE CADA CONTAMINANTE  
EN EL DOMINIO LOCAL  
(µg/m<sup>3</sup>)

Contaminante	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
PM <sub>10</sub>	0,006 a 1,8	0,07 a 1,65	0,008 a 7,25 a/	0,004 a 7,1
SO <sub>2</sub>	1,04 a 28,2	0,97 a 25,8	0,07 a 115,3 *	
NO <sub>x</sub>	0,07 a 2	0,06 a 1,8	0,004 a 7,2	

Fuente: elaboración propia.

a/ El segundo valor máximo es 3,6 para PM<sub>10</sub> y 59 para SO<sub>2</sub>

<sup>42</sup> Elevaciones: curvas de nivel escala 1:250.000 del INEGI.

<sup>43</sup> EPA (s7f), *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, AP-42, 5th Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources.

<sup>44</sup> Para cada contaminante se requiere obtener: la velocidad de remoción seca (o tipo y estado de la vegetación), difusividad molecular (cm<sup>2</sup>/s), factor de incremento de la solubilidad, parámetro de reactividad, resistencia de las hojas a la difusión (s/cm) y coeficiente de la ley de Henry. Además se agregan al fichero de datos meteorológicos la radiación de onda corta incidente (W/m<sup>2</sup>) y la porción de la superficie cubierta por vegetación.

El modelo ISC ST (opción 3) estima concentraciones promedio anuales entre 0,008 y 7,25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el dominio seleccionado, en tanto que la opción 4, considerando también la elevación del terreno y la deposición seca de partículas, estima concentraciones entre 0,004 y 7,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Es decir, se encuentra también una diferencia mínima en la estimación de las concentraciones máximas promedio anual entre las opciones 3 y 4. Sin embargo, al comparar las concentraciones máximas obtenidas por el modelo ISCST3 en las opciones 3 y 4 (la más completa para gases y partículas, respectivamente), se encuentra que son mayores que las obtenidas en la opción 1 para todos los contaminantes, hasta en un factor de 4 (cuadro 17).

Las diferentes opciones de modelación aplicadas al caso de Manzanillo permiten confirmar los resultados obtenidos en la opción 1, la más simple, para el caso de partículas y  $\text{NO}_x$ , de que las concentraciones promedio anuales estimadas son inferiores a la norma en todos los puntos del dominio local. Cabe recordar que en esta estimación se considera únicamente la emisión de la planta termoeléctrica y que la concentración de fondo u otras emisiones deben también evaluarse para determinar si se está o no dentro de la norma.

En el caso del bióxido de azufre, en algunos puntos del dominio seleccionado las concentraciones promedio anual estimadas mediante la utilización de la opción 3 resultan mayores a las estimadas con la opción 1, hasta por un factor de 4 (véanse los gráficos 11 y 12).<sup>45</sup> En general, están por debajo del límite fijado por la norma en México, salvo en un punto receptor del dominio local, donde alcanzó un valor de 115,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el promedio anual. Este punto se encuentra ubicado aproximadamente a 10 km de la fuente en dirección noroeste sobre tierra. Cabe señalar que esta concentración está influenciada por la topografía del terreno, ya que la celda en la que se encontró la mayor concentración presenta una elevación de 200 metros en el punto medio, lo que indica que la pluma de contaminantes colisionó con la elevación, generando una concentración mayor en ese punto.

Como se mencionó, la modelación con el ISCST3 permite además calcular las concentraciones promedio de 24 horas en cada punto receptor y listar los días en que se presentan las mayores concentraciones durante el año estudiado. En el cuadro 18 se presenta un resumen de las estimaciones promedio de 24 horas que exceden la norma (341  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), para el caso de  $\text{SO}_2$ .

Las estimaciones de las concentraciones promedio de 24 horas son más críticas que las del promedio anual. Los valores máximos estimados en diversos receptores rebasan la norma en un rango de 344,1 a 1 345,26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , es decir, hasta 4 veces más de lo permitido. Durante el año estudiado la modelación dio como resultado que en 93 días en al menos un punto receptor la concentración estimada fue mayor que la permitida. El cuadro 19 presenta la distribución de los días fuera de norma en el año de estudio, siendo los meses de mayo y junio los que tienen mayor frecuencia.

---

<sup>45</sup> Los gráficos presentan las isolíneas de concentración sobre el mapa geográfico, el cual tiene como punto de origen el sitio de la central eléctrica. En los márgenes izquierdo e inferior se anotan las coordenadas UTM de la zona. La escala para los niveles de concentración del contaminante se muestra en el margen izquierdo. Para este fin se utilizó el modelo Geographic de la Semarnat.

Gráfico 11  
 CONCENTRACIONES PROMEDIO ANUAL DE SO2  
 CALCULADAS CON EL MODELO ISC LT

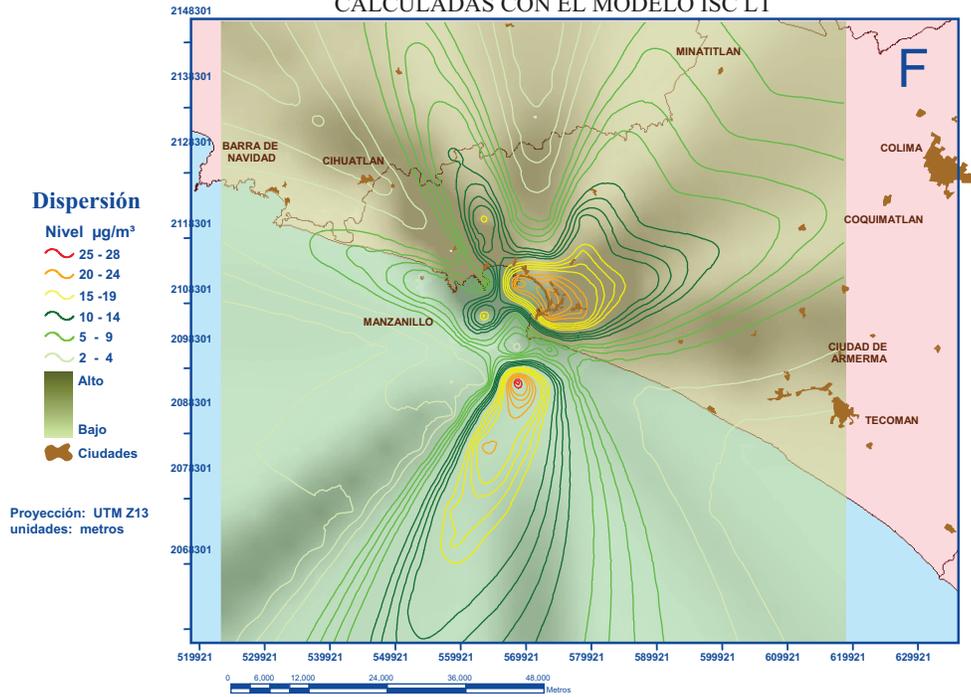
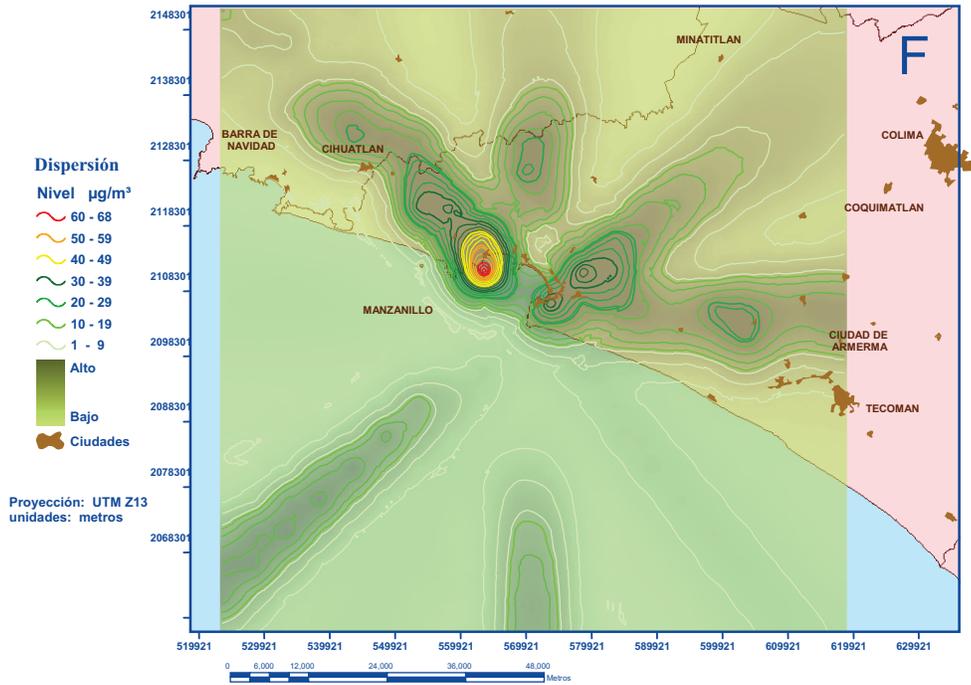


Gráfico 12  
 CONCENTRACIONES PROMEDIO ANUAL DE SO2  
 CALCULADAS CON EL MODELO ISC ST3



Cuadro 18

TABLA-RESUMEN DE MANZANILLO. CONCENTRACIONES PROMEDIO  
DE 24 HORAS QUE EXCEDEN LA NORMA OFICIAL MEXICANA

# Rec. a/	X	Y	Elev	Máximo b/	Mínimo	Fecha máxima	No de días
1	-27 500	27 500	200	372,3		May-28	1
2	-17 500	12 500	100	352,8	347,0	Jul-10	2
3	-17 500	17 500	200	576,7	455,9	May-28	8
4	-17 500	22 500	100	455,9	346,2	May-21	5
5	-12 500	12 500	100	447,6	370,5	Ago-14	2
6	-12 500	17 500	300	496,4	368,8	May-28	4
7	-7 500	7 500	200	1 345,3	345,9	May-25	57
8	-7 500	12 500	200	913,3	345,3	May-25	29
9	-2 500	22 500	300	345,9	341,6	Sep-28	2
10	2 500	2 500	0	596,0	344,1	Jun-07	13
11	7 500	7 500	300	799,5	368,8	Jun-01	10
12	7 500	12 500	200	456,0		Jun-20	1
13	12 500	2 500	200	714,8	365,2	Abr-28	7
14	12 500	7 500	300	544,3	375,6	Jun-01	8

Fuente: Elaboración propia.

- a/ Se presenta el número de receptor identificado por la distancia en X y Y en metros, considerando la planta en el origen y la elevación con respecto al nivel del mar.
- b/ Se muestran el máximo y el mínimo valor fuera de norma presentado en cada punto receptor, así como el número de días fuera de norma. La fecha corresponde a aquella en que se presenta la máxima concentración. El valor permitido para un promedio de 24 horas una vez al año es de  $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Los resultados anteriores deben interpretarse con cautela, tomando en cuenta las siguientes consideraciones. Por una parte, estudios de la EPA sobre la validación de los resultados de los modelos con respecto a mediciones reales <sup>46</sup> indican que en el ISCST3 puede haber una sobrevaloración al estimar los valores de concentración. La relación entre valores estimados y valores observados es de 0,96 para terrenos planos, y de 6,4 para terrenos complejos. <sup>47</sup> Sin embargo, hay otros dos factores que pueden influir en la subestimación de los resultados: 1) los valores máximos estimados en el modelo no corresponden a las concentraciones máximas de cada celda ni las absolutas de la región, por las razones explicadas anteriormente, y 2) la ubicación de Manzanillo a la orilla de la costa favorece la existencia de condiciones atmosféricas durante las primeras horas de la mañana, las cuales producen el fenómeno llamado “fumigación” en la pluma emitida por la chimenea. Este fenómeno tendería a incrementar los niveles de concentración a nivel del terreno. Lo anterior indica que para el caso de Manzanillo deberían

<sup>46</sup> EPA (2003).

<sup>47</sup> El problema de sobrevaloración del modelo ISCST se está tratando de solucionar en la actualidad con el modelo AERMOD de la EPA, el cual incorpora la teoría de la capa límite planetaria y métodos avanzados para manejar terrenos complejos.

hacerse estudios más detallados, complementados con mediciones de las concentraciones en sitios definidos.

Cuadro 19  
DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LOS DÍAS  
QUE EXCEDEN LA NORMA DE SO<sub>2</sub>  
(Promedio de 24 horas)

Mes	No de días
Enero	5
Febrero	6
Marzo	7
Abril	8
Mayo	13
Junio	17
Julio	9
Agosto	8
Septiembre	8
Octubre	6
Noviembre	4
Diciembre	2
Total días al año	93

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se hizo una estimación de las externalidades para las diferentes opciones de modelación,<sup>48</sup> utilizando el modelo SIMPACTS, y se obtuvieron los resultados que se muestran en el cuadro 20. Los principales cambios en el total de externalidades se dan en la zona de influencia o dominio local, que comprende 50 km alrededor de la planta, en tanto que los costos externos en el dominio regional no resultan afectadas porque en todos los casos se consideró el mismo tratamiento para la dispersión regional integrado en el AIRPACTS.

La diferencia en la estimación de las externalidades entre la opción más sencilla y la que incluye el mayor número de variables para estimar la concentración a la que están expuestos los receptores en el dominio local y en el regional (opciones 1 y 4) fue de sólo 1.879 miles de dólares, o sea, un 3% del monto total de las externalidades calculado con la primera opción. Lo anterior quiere decir que la opción más simple permite obtener estimados de las externalidades cercanos a los obtenidos con metodologías más complejas. Si se considera únicamente el dominio local, es decir, los contaminantes primarios, los costos en salud varían de unos 3,4 a unos 5,3 millones de dólares, variación de 55% mucho mayor que en el caso anterior. Esto significa que en zonas densamente pobladas, los impactos en el dominio local serán más significativos, por lo que conviene modelar con detalle la dispersión de contaminantes en esas zonas, en la medida en que la información necesaria esté disponible. Estos resultados deben ser interpretados considerando la sobrevaloración del modelo ISCST en terrenos complejos, así como los otros factores anteriormente mencionados.

---

<sup>48</sup> Para estimar el daño considerando las concentraciones calculadas en el ISC ST3, se utilizó una nueva función incorporada al modelo SIMPACTS.

Cuadro 20

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS EXTERNALIDADES  
(Miles de dólares/año)

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
PM <sub>10</sub>	2 452	2 545	3 807	3 776
SO <sub>2</sub>	936	971	1 490	1 490
Sulfatos	65 550	65 550	65 550	65 550
Nitratos	2 803	2 803	2 803	2 803
Total	71 741	71 869	73 650	73 619

Fuente: Elaboración propia.

#### D. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON LOS COSTOS UNITARIOS DE ENFERMEDADES

Para este caso también se eligió Manzanillo para determinar la variación de los resultados al emplear diferentes valores de costos unitarios de morbilidad y mortalidad. Para tal fin se consideraron tres estimaciones: una baja, que incluyó el enfoque de costos directos de la enfermedad más las pérdidas de productividad para los costos de morbilidad, y el de años de vida perdida para los costos de mortalidad. Una alta, en la que se utilizan costos estimados a través del método de valoración contingente (Voluntad a pagar) para la morbilidad y la mortalidad. En esta segunda estimación, para los casos de morbilidad, se consideraron los valores de Voluntad a pagar del estudio de McKinley (véase el cuadro 10), y para el caso de mortalidad se adoptó el enfoque de número de muertes estadísticas adicionales y no el de años de vida perdidos, considerando el valor central de la Voluntad a pagar obtenido en el estudio de Ibararán antes citado, el cual es de 506.000 dólares por cada caso de muerte estadística adicional. En este caso, la pendiente de la  $F_{er}$  de las funciones de mortalidad no se multiplica por los años de vida perdidos y se expresa en número de casos al año. A su vez, la tercera estimación consideró los costos transferidos de la Unión Europea (véase el cuadro 21).

Cuadro 21

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD UTILIZANDO DIFERENTES ENFOQUES  
DE VALORACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS

Caso Manzanillo	Costo total del daño (miles dólares/año)	Costos por tonelada de contaminante emitida (dólares/t)			Costos específicos (centavos de dólar/kWh)
		PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	
Estimación baja	71 739	188	327	193	0,56
Estimación alta	172 107	263	811	270	1,33
Costos transferidos	73 214	195	339	200	0,57

Fuente: Elaboración propia.

La estimación baja y la de los costos transferidos de la Unión Europea dan resultados semejantes, ligeramente superiores para la segunda, mientras que la estimación alta da costos mayores en un factor de 2,3 respecto de la estimación baja. Los costos por casos de mortalidad representaron 85%, 89% y 82% del costo total para la estimación baja, alta y la de costos transferidos de la Unión Europea, respectivamente.

#### IV. CONCLUSIONES

El presente estudio calcula, mediante la aplicación de la Metodología Vías de Impacto, los costos externos de la producción de energía de las centrales termoeléctricas más grandes del país que utilizan combustóleo o carbón. Con este fin se utilizó el modelo SIMPACTS de la OIEA.

Las externalidades de las centrales termoeléctricas seleccionadas se estimaron en 465 millones de dólares anuales. Este costo se circunscribe al impacto en la salud de la población afectada por las emisiones de dichas plantas generadoras. Sobresalen las centrales de Tuxpan, Manzanillo, Tula y Petacalco, con externalidades superiores a 50 millones de dólares anuales cada una.

Se debe aclarar que el monto total corresponde a un escenario conservador, en el que se tomaron las tasas de riesgo relativo (IRR) de menor valor y en donde los costos de morbilidad sólo incluyeron los costos directos de la enfermedad y la pérdida de productividad, pero no toda la pérdida en el bienestar individual. Los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre considerado en el modelo, lo que implica que el valor real podría ser tres a cinco veces menor o mayor que el valor estimado. Este rango se calculó considerando una desviación estándar para cada efecto (morbilidad y mortalidad).

Estos costos externos están determinados principalmente por el impacto de los contaminantes secundarios, en particular los sulfatos, cuyo mayor efecto se percibe en el dominio regional (más allá de los 50 km de la central). De forma que el impacto regional para las 11 zonas estudiadas representó entre el 71,7% y el 99,9% del total.

El costo externo de las centrales estudiadas se ubica entre 0,12 y 0,83 centavos de dólar por kWh, con un valor ponderado de 0,50, correspondiendo los valores más altos a las centrales de Altamira, Salamanca y Tuxpan. La internalización de estos costos implicaría un aumento de entre 3% y 17% en los costos de producción de electricidad.

Los modelos de dispersión utilizados en la Metodología de Vías de Impacto proporcionaron además información sobre los niveles de concentración de contaminantes en las zonas aledañas a las plantas termoeléctricas estudiadas, la que permitió evaluar la calidad del aire y su relación con las emisiones. Se comprobó que los promedios anuales de concentración estimados de PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> están dentro de los límites fijados por las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud para proteger la salud de la población, con excepción de las zonas de Tula, Mazatlán y Salamanca, donde se obtuvieron valores de SO<sub>2</sub> superiores a la norma. Por su parte, las emisiones de SO<sub>2</sub> de Tula y Salamanca se ubican por encima de los niveles máximos permisibles establecidos por la NOM-085-SEMARNAT-1994.

El estudio de sensibilidad, en el que se emplearon modelos de dispersión más detallados en Manzanillo, mostró en algunos puntos valores estimados de concentraciones de SO<sub>2</sub> promedio de 24 horas, por encima de los niveles permisibles, durante 93 días del año, y en ocasiones hasta cuatro veces mayores. Estos valores deben interpretarse con cautela, ante la existencia de factores

diversos que pueden hacerlos variar de forma significativa. Un segundo resultado se refiere a las diferencias en los costos externos al usar modelos de dispersión simplificados o detallados. A nivel de costos se detectaron diferencias pequeñas, lo cual constata que los modelos simplificados dan una estimación bastante cercana a la obtenida por modelos detallados, confirmando estudios previos realizados por el proyecto ExternE.

El otro estudio de sensibilidad, también para la central de Manzanillo, considerando los valores reportados por estudios de Voluntad a pagar, tanto para morbilidad como para mortalidad, indica que los costos externos se elevan por un factor de 2,3 con respecto al monto inicialmente calculado.

Los resultados encontrados, tanto del costo en salud como de los valores estimados de concentración de contaminantes superiores a los permitidos, señalan la necesidad de realizar acciones para controlar las emisiones, en particular en las centrales mencionadas. Esta situación deberá ser considerada en la revisión de la NOM-085-SEMARNAT-1994. Los costos externos de cada planta proporcionan las bases para dimensionar la viabilidad económica de aplicar medidas correctivas para disminuir estas emisiones y sus efectos en la salud de la población

En Tula, Salamanca y Altamira-Madero las refinerías de petróleo constituyen otra fuente importante de emisión de compuestos de azufre, además de las termoeléctricas, por lo que es necesario considerarlas al estimar los niveles totales de contaminación. La información preliminar de estas tres zonas indica que es conveniente tomar en cuenta todas las fuentes de emisión en cada zona, a fin de evaluar las diferentes opciones de control y seleccionar las más eficaces.

Los modelos de dispersión utilizados requieren ser calibrados y verificados en campo utilizando las mediciones de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire. En algunas zonas, como Manzanillo, se cuenta con estaciones de monitoreo perimetral operadas por la CFE, por lo que sería conveniente sistematizar esta información a fin de verificar las estimaciones de los modelos y obtener la información para las otras zonas de estudio.

A pesar de las incertidumbres inherentes a este tipo de análisis, el presente estudio permitió identificar las centrales termoeléctricas en las que deberían realizarse estudios más detallados para confirmar los resultados encontrados. Asimismo, se identificaron los puntos clave para mejorar la aplicación de esta metodología en México, tales como información escasa o inexistente, necesidad de nuevas formas de recopilar información rutinaria, o mediciones de contaminantes en lugares presumiblemente críticos, entre otros.

## BIBLIOGRAFÍA

- Banco Mundial (2002), *World Economic Indicators* (<http://www.worldbank.org/data/>).
- Brunekreef, B. y G. Hoek (1993), *The Relationship between Low-level Air Pollution Exposure and Short-term Changes in Lung Function in Dutch Children*, JEAAE, 3 (Suppl. 1), pp. 28-117.
- Cesar, H. y otros (2000), *Proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ECOURS), Módulo A: Valoración económica del mejoramiento de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*, Comisión Ambiental Metropolitana y Banco Mundial, México.
- Dockery D. y otros (1993), *An Association between Air Pollution and Mortality in six US Cities*, in *New England Journal of Medicine*, Vol. 329, pp. 1753-1759.
- European Commission (1998), *External Costs of Energy: Application of the ExternE Methodology in France*, <http://externe.jrc.es>
- \_\_\_\_\_ (1998), *Externalities of Energy*, Vol. 7: Methodology 1998 Update (EUR 19083); Vol. 8: Global Warming (EUR 18836); Vol. 9: Fuel Cycles for Emerging and End-Use Technologies, Transport and Waste (EUR 18887); Vol. 10: National Implementation (EUR 18528), Directorate-General XII, Science Research and Development. Office for Official Publications of the European Communities, L-2920 Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, Francia.
- \_\_\_\_\_ (1995), *Externalities of Energy*, ISBN 92-827-5210-0, Vol. 1: Summary (EUR 16520); Vol. 2: Methodology (EUR 16521); Vol. 3: Coal and Lignite (EUR 16522); Vol. 4: Oil and Gas (EUR 16523); Vol. 5: Nuclear (EUR 16524); Vol. 6: Wind and Hydro Fuel Cycles (EUR 16525), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxemburgo.
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Información de ExternE* (<http://www.externe.info/> y <http://externe.jrc.es/overview.html>).
- Fundación Mexicana para la Salud (1994), *Economía y salud. Propuestas para el avance del sistema de salud en México. Informe final*, México.
- Health Effects Institute (1993), *Revised Analyses of the National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study, Part II. Revised Analyses of Selected Time-series Studies* (<http://www.healtheffects.org>).
- Ibarrarán, M., E. Guillomen, I. Zepeda y J. Hammit (2002), *Estimate of the Economic Value of Reducing Health Risk by Improving Air Quality in Mexico City. Preliminary Results* (sin publicar), México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2003), *Cuaderno N° 19*, “Estadísticas del Sector Salud y Seguridad Social”, Edición 2002, México.

\_\_\_\_\_ (2001), *Censo de Población INEGI 2000. Población total por municipio, edad desplegada y grupos quinquenales de edad y su distribución según sexo*, México [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx).

\_\_\_\_\_ (1999), *Elevaciones: curvas de nivel escala 1:250.000* México.

\_\_\_\_\_ (s/f), *Elevaciones: curvas de nivel escala 1:250, 000*, México.

\_\_\_\_\_ y (CONAPO) Consejo Nacional de Población (1998), *Localidades de la República Mexicana. Información geoespacial digitada*. México.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática,

Instituto Nacional de Ecología (2004), *Evaluación del impacto de las emisiones de la termoeléctrica de Tuxpan en la calidad del aire de la región, usando el sistema de modelado de dispersión CALMET-CALPUFF, Informe final* (sin publicar), México.

Laffont, J. J. (1988), *Fondements de l'économie publique*, Economica, Paris.

Leksell, I. y Rabl A. (2001), *Air Pollution and Mortality: Quantification and Valuation of Years of Life Lost*, Risk Analysis, Vol. 21, N° 5.

Markandya, A., L. Hudson y T. Taylor (2002), *Valuing the Human Health Effects of Routine Atmospheric Releases from Nuclear Facilities*, preparado para el Organismo Internacional de Energía Atómica.

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](http://www.ine.gob.mx)).

Milford, J. y C. Davidson (1987), *The Sizes of Particulate Sulfate and Nitrate in the Atmosphere – A Review*, Journal of Air Pollution Control Association, 37, pp. 125-134.

Molina, E., C. Barceló, L. A. Bonito y C. Puerto (1996), *Factores de riesgo de cáncer pulmonar en Ciudad de La Habana*, Revista Cubana Higiene Epidemiológica.

Molina, Mario (2002), *Air Quality in Mexico Megacity: An Integrated Assessment*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Ma, USA, Kluwer Academic Publishers.

OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) (2003), *SIMPACTS: Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation*, Multilanguage version.

\_\_\_\_\_ (s/f), *Economic Valuation of Environmental Impacts*, Training Workshop.

OMS (Organización Mundial de la Salud) (1997), *Health and Environment in Sustainable Development. Five Years after the Earth Summit. Executive Summary*, Ginebra, pp. 9-30.

- OPS/OMS (Organización Panamericana de la Salud) (2000), *La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible*, Publicación Científica N° 572, Washington, D. C.
- Ostro, B. (1996), *A Methodology for Estimating Air Pollution Health Effects*, World Health Organization, Ginebra.
- Pope, C. y otros (1995), *Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of US adults*, in American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol. 145, pp. 669-674.
- Pigou, A. (1944), *The Economics of Welfare*, 4ª edición, Macmillan & Co., Londres.
- Rabl, A. (2002), *Airpacts Exposure Response Functions*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- Schindler, C., U. Ackermann-Liebrich, P. Leuenberger, Ch. Monn (1998), *Associations Between Lung Function and Estimated Average Exposure to NO<sub>2</sub> in Eight Areas of Switzerland*, Epidemiology 1998; 9(4):405-11.
- Secretaría de Energía/SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2003), *Programa de energía y medio ambiente hacia el desarrollo sustentable*, México (www.sener.gob.mx).
- Secretaría de Energía (2002), *Prospectiva del sector eléctrico 2002-2011*, México.
- \_\_\_\_\_ (2001), *Prospectiva del sector eléctrico 2001-2010*, México.
- Secretaría de Salud (s/f), *Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-1994, Contaminación atmosférica-fuentes fijas-para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxidos de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión* (www.semarnat.gob.mx).
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas menores de 10 micras (PM<sub>10</sub>). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras (PM<sub>10</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población* (www.salud.gob.mx).
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población* (www.salud.gob.mx).

- \_\_\_\_\_ (s/f), *Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población* (www.salud.gob.mx).
- Secretaría de Salud/Sistema Nacional de Información en Salud (2000), *Anuario 2000. Mortalidad. Cuadro 2. Defunciones y mortalidad general (cruda y estandarizada por edad) por sexo, según entidad federativa de residencia habitual*, México (www.salud.gob.mx).
- \_\_\_\_\_ (2000), *Anuario 2000. Morbilidad. Cuadro II.2. Egresos hospitalarios por grupos de edad, según causa a lista mexicana. Estados Unidos Mexicanos*, México (www.salud.gob.mx).
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales)/CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2003), *Convenio de colaboración entre la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de los Estados Unidos Mexicanos, y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas*, México.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2001), *Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2001-2006*, México.
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Cédulas de operación anual 1999 y 2000*, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental.
- Servicio Meteorológico Nacional (s/f), *Bases de datos digitales de 1999-2003 para todas las Estaciones meteorológicas automáticas (antes Estaciones Hidroclimáticas Automáticas) de la República Mexicana*.
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Bases de datos digitales para todos los observatorios meteorológicos del país 1992-2002*.
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Base de datos digitales de 1990-2002 para todas las Estaciones de Radiosondeo de la República Mexicana*.
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Mapas y descripción de estaciones del servicio* (<http://smn.cna.gob.mx/SMN.html>).
- Sheridan, P., C. Broca y J. Wilson (1990). *Aerosol Particles in the Upper Triosphere and Lower Stratosphere: Elemental Composition and Morphology of Individual Particles in Northern Midlatitudes*, Geophysique Research Letter 21, pp. 2587-2590.
- Spadaro, J. (2002), *Airpacts Equations for Impact and Damage Cost Assessments*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- \_\_\_\_\_ (2002), *Airpacts Input Data: Meteorological Data*, International Atomic Energy Agency, Austria.

- \_\_\_\_\_ (2002), *Airpacts Input Data: Receptor Data*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- \_\_\_\_\_ (2002), *Airpacts Input Data Requirements*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- \_\_\_\_\_ (2002), *Airpacts Input Data: Source Characteristics*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- \_\_\_\_\_ (2002), *Airpacts Manual, A Tool for Assessing the Environmental Impacts and Damage Costs to Human Health, Agricultural Crops and Man-made Structures from Exposure to Routine Atmospheric Emissions*, International Atomic Energy Agency, Austria.
- \_\_\_\_\_ (1999), *Quantifying the Impacts of Air Pollution*, Centre d'Énergétique, Ecole de Mines de Paris, Paris.
- Turtós, L. (2003), *Revisión de metodologías utilizadas para la estimación de las externalidades, Proyecto Uso Sustentable de Hidrocarburos*, Organización de Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (<http://www.eclac.cl/mexico/>).
- United States Environmental Protection Agency (2000), *EPA-454/R-99-005. Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications Office of Air Quality Planning and Standards Air Clean*, United States Office of Air Quality Environmental Protection Planning and Standards Agency Research Triangle Park, NC 27711, Estados Unidos.
- \_\_\_\_\_ (1995), *EPA-454/B-95-003a, User's guide for Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Vol. I. User Instructions*, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina, Estados Unidos.
- \_\_\_\_\_ (s/f), *EPA, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, 5th Edition, Vol. I: Stationary Point and Area Sources* ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)).
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Nitrogen Oxides (NOx). National Ambient Air Quality Standards* (<http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/nox/>).
- \_\_\_\_\_ (s/f), *Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Air Models, Meteorological Data: Stations TX23044 El Paso/Int'l Arpa* (<http://www.epa.gov/scram001/tt24.htm>).
- \_\_\_\_\_ (2003), *Aermod Latest Features and Evaluation Results*. EPA 454/R-03-003.