

7 BIÓXIDO DE AZUFRE

Los gases de la familia de los óxidos de azufre (SO_x), entre los que se encuentra el bióxido de azufre (SO_2), son incoloros y de olor irritante; se forman al quemar combustibles con azufre, y tienden a disolverse fácilmente en agua. La fuente primaria de emisiones de SO_2 es la quema de combustibles fósiles que contienen azufre, tales como combustóleo, diesel y carbón.

Las fuentes naturales de SO_2 incluyen erupciones volcánicas, decaimiento biológico e incendios forestales. El SO_2 es, además, precursor de otros contaminantes, como el trióxido de azufre (SO_3), el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y los sulfatos, que contribuyen a la formación de partículas finas en la atmósfera y de la lluvia ácida.

La exposición al SO_2 se ha asociado con daños respiratorios temporales en niños y adultos asmáticos que realizan actividades al aire libre. Se ha observado que la exposición aguda de los individuos asmáticos a magnitudes elevadas de SO_2 al realizar ejercicio moderado,

puede causar reducción de la función pulmonar, estado que se puede acompañar de síntomas como estornudos, opresión en el pecho y falta de aire (Evans *et al.*, 2000). Por otra parte, los efectos que se han asociado con exposiciones crónicas aunadas a concentraciones elevadas de partículas en el ambiente, incluyen enfermedades respiratorias, alteraciones en las defensas pulmonares y agravación de enfermedades cardiovasculares preexistentes. En la Ciudad de México se encontró que en niños menores de 16 años una exposición a 50 ppb de SO_2 está asociada con un incremento del 5% en el número de visitas a salas de emergencias por sintomatología de asma (Romieu *et al.*, 1995).

A continuación se muestran las tendencias espaciales y temporales del SO_2 en las ocho ciudades que se han incluido en este almanaque para el periodo 1997-2005. Como un caso especial se incluye también Salamanca, dado el problema de contaminación por SO_2 en esta localidad.

7.1 Comportamiento del SO₂ en el tiempo

En las figuras 7.1 y 7.2 se muestra el comportamiento del SO₂ durante el día. La primera muestra las ciudades agrupadas de la región centro, que ahora incluye Salamanca, y la segunda, las de la región norte.

En todas las ciudades de la región centro se observa, como patrón predominante, una distribución unimodal con los niveles más elevados de SO₂ por la mañana, entre las 8:00 y las 11:00 horas. En Salamanca se observa que los niveles más altos superan por mucho las concentraciones de las otras ciudades.

FIGURA 7.1 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL SO₂ EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS (1997-2005)

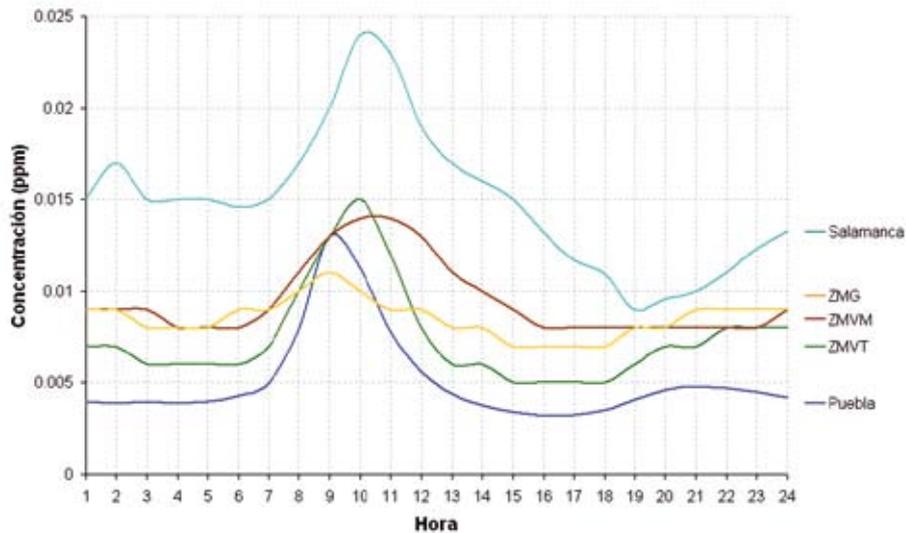
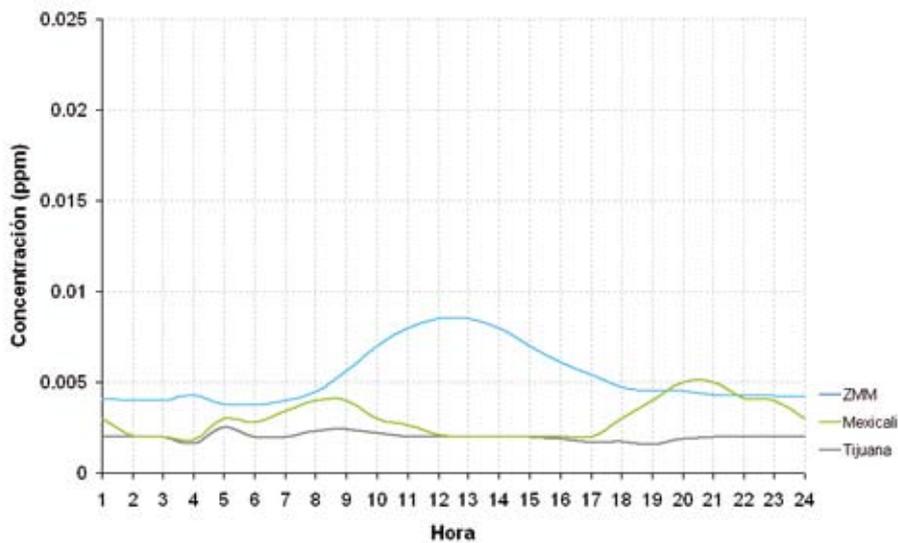


FIGURA 7.2 COMPORTAMIENTO HORARIO DEL SO₂ EN LA REGIÓN NORTE DEL PAÍS (1997-2005)



En la región norte las tres ciudades presentan un comportamiento diferente entre sí. En la ZMM se observa un comportamiento unimodal, similar a las concentraciones de la región centro, con niveles más elevados alrededor del medio día, y que podría asociarse con la actividad industrial debido a que ésta es la principal emisora de SO_x . En cambio, en Mexicali se presenta una distribución bimodal con un pico por la mañana y otro por la tarde; y por último, en Tijuana, las concentraciones son más o menos constantes durante todo el día.

En relación con el comportamiento del SO_2 durante el año, se aprecian en la ZMVM, la ZMG, la ZMVT y Puebla (figura 7.3) concentraciones más elevadas de noviembre a enero, y más bajas durante los meses de

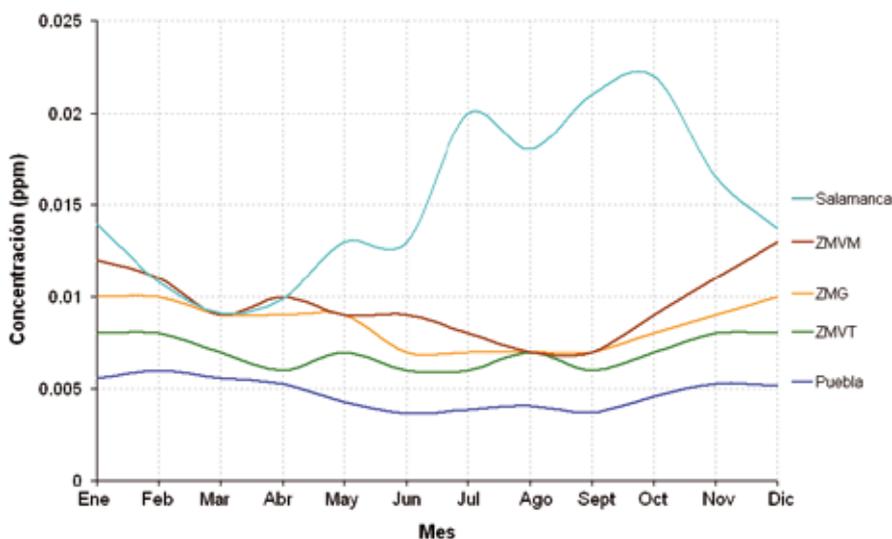
en este semestre, en comparación con el primero, un aumento del consumo de combustóleo de un 28 y un 21%, respectivamente (SENER, 2006).

De las ciudades que comprenden la región norte, sólo Mexicali muestra un comportamiento parecido al descrito para las ciudades de la región centro, mientras que en la ZMM y Tijuana se observa únicamente que los niveles de SO_2 se incrementaron a partir de octubre hasta diciembre.

7.2 Distribución espacial del SO_2

La distribución espacial de las concentraciones de SO_2 se presenta con mapas de contorno de los promedios anuales de las concentraciones horarias en 2005.

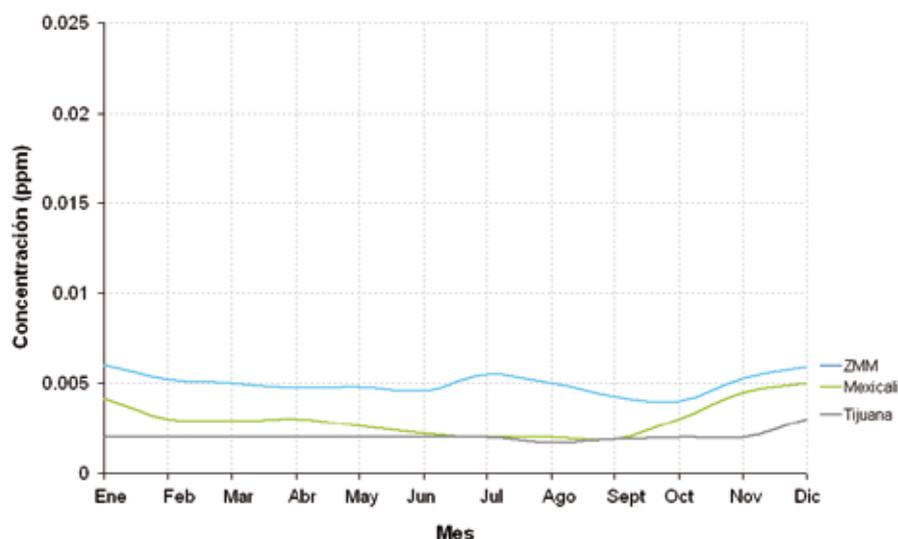
FIGURA 7.3 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL SO_2 EN LA REGIÓN CENTRO DEL PAÍS (1997-2005)



verano. Esto puede deberse a que durante los meses de mayo a agosto se presentan condiciones meteorológicas que promueven la depositación húmeda de este y otros contaminantes. En cambio, en Salamanca las concentraciones más altas se registran en el segundo semestre del año, que corresponde al consumo más alto de combustóleo. De acuerdo con datos de la Secretaría de Energía, durante 2004 y 2005 se registró

En la ZMVM (figura 7.5a) los niveles más altos se ubican en los alrededores de la estación Merced, en el centro del Distrito Federal, y en las estaciones Xalostoc, Tlalnepantla, Tultitlán y Villa de las Flores, en el Estado de México. Las altas concentraciones de SO_2 registradas en las estaciones del norte de la ZMVM pueden estar asociadas con procesos industriales en los que se utilizan combustibles con un elevado con-

FIGURA 7.4 COMPORTAMIENTO MENSUAL DEL SO₂ EN LA REGIÓN NORTE DEL PAÍS (1997-2005)



tenido de azufre; también existe la posibilidad de que estén asociados con emisiones de industrias, termoeléctricas y refinerías fuera del límite de la ZMVM, que bajo ciertas condiciones meteorológicas podrían transportarse a la ZMVM.

En la ZMG (figura 7.5b) las concentraciones más elevadas se encuentran en los alrededores de la estación de monitoreo Loma Dorada, en el sureste de la zona metropolitana.

En la ZMVT (figura 7.5c) los niveles más elevados se presentan en las inmediaciones de la estación de monitoreo Aeropuerto, disminuyendo gradualmente hacia el suroeste. La estación Aeropuerto se localiza dentro de una zona industrial y colinda con varias instalaciones industriales, además de que hay un intenso flujo vehicular.

Para Puebla (figura 7.5d), las concentraciones más altas se registran cerca de la estación Serdán, al norte de la ciudad, y disminuyen gradualmente hacia el sur. La estación Serdán, como ya se había mencionado, se ubica cerca de un área de mucha actividad comercial y vialidades con intenso flujo vehicular.

En Salamanca (figura 7.5e) los niveles más elevados se generan alrededor de la estación de monitoreo Cruz Roja, que se localiza en un área predominantemente habitacional; sin embargo, hacia el este y a una

distancia aproximada de 1500 metros se ubica la zona industrial donde se encuentran la Refinería Ing. Antonio M. Amor y la Central Termoeléctrica Salamanca.

En la región norte, la ZMM (figura 7.6a) presenta las mayores concentraciones de SO₂ en la estación ubicada en el noroeste (San Bernabé), y disminuyen hacia el noreste. La estación San Bernabé está ubicada a favor del viento de salida de la mayoría de las fuentes industriales y del tráfico de la zona metropolitana.

Con respecto a Tijuana (figura 7.6b), los niveles más altos se localizan en los alrededores de la estación de monitoreo Instituto Tecnológico.

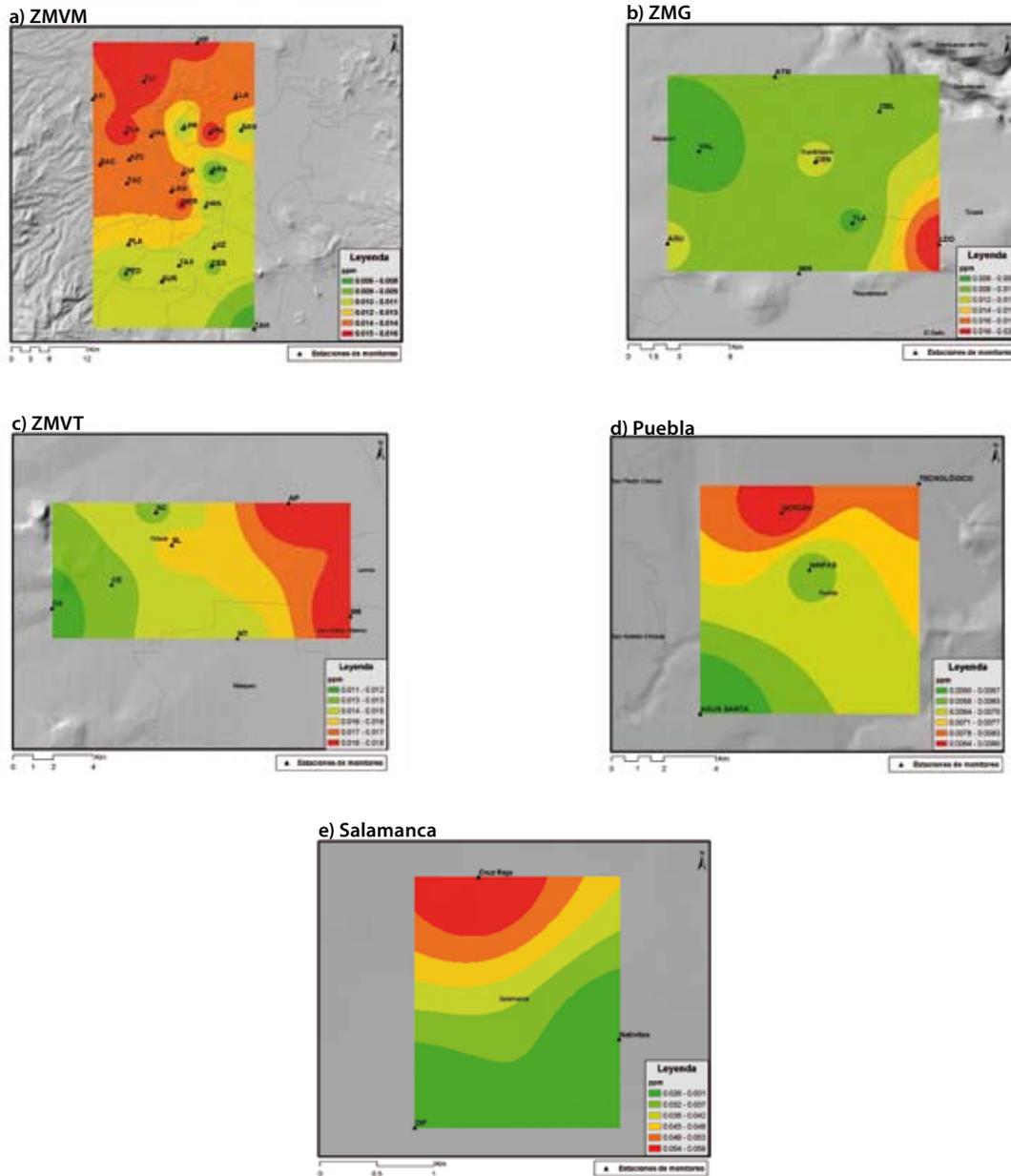
En Mexicali (figura 7.6c) las concentraciones más elevadas se registran cerca de la estación de monitoreo UABC, disminuyendo gradualmente hacia el este y el oeste.

7.3 Exposición de la población al SO₂

La exposición de la población al SO₂ en las ciudades incluidas en este capítulo se estimó combinando la información de la distribución espacial del SO₂ con la correspondiente a la población.

En el cuadro 7.1 se observa que la ZMVM presenta, después de Salamanca, los niveles más altos; le siguen la ZMG, la ZMM y Puebla (figura 7.7). Para la ZMVT es

FIGURA 7.5 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL SO₂ EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN CENTRO (2005)



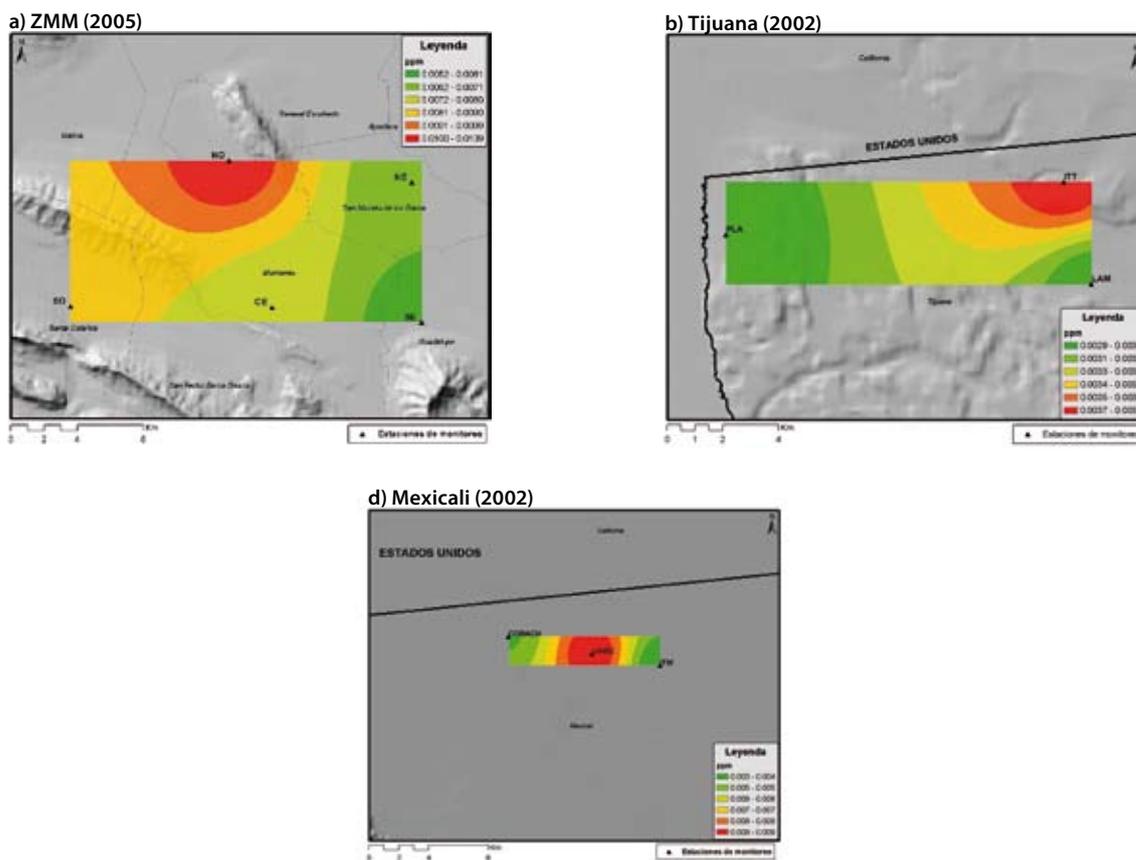
notorio el incremento de cerca del 50% en este indicador de 2004 a 2005. La situación de Salamanca destaca por exhibir las mayores concentraciones anuales ponderadas por población, con valores alrededor de dos veces por arriba del valor más elevado de las otras ciudades.

Cabe mencionar que debido a la insuficiencia de información en Tijuana y Mexicali, no se muestran los datos para los años 2003 a 2005.

7.4 Evaluación del cumplimiento de la NOM de SO₂

En esta sección se evalúa el cumplimiento de las ciudades incluidas en este documento con respecto a los límites establecidos en la NOM correspondiente a SO₂ (cuadro 1.2).

FIGURA 7.6 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL SO₂ EN LAS CIUDADES DE LA REGIÓN NORTE

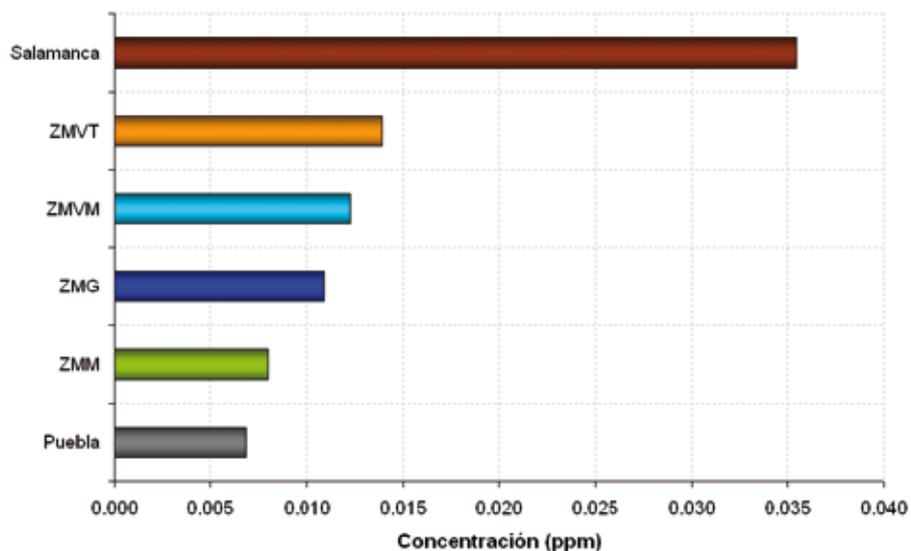


CUADRO 7.1 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES¹ (PPM) DE SO₂ PONDERADO POR POBLACIÓN EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	Salamanca	ZMM	Tijuana	Mexicali
1997	0.0123	0.0106	0.0091	SM	SM	0.0104	0.0034	0.0074
1998	0.0140	0.0085	0.0096	SM	SM	0.0103	0.0024	0.0033
1999	0.0140	0.0097	0.0103	SM	DI	0.0107	0.0035	0.0043
2000	0.0177	0.0089	0.0091	DI	0.0524	0.0120	0.0039	0.0044
2001	0.0154	0.0084	0.0093	0.0079	0.0443	0.0116	0.0031	0.0039
2002	0.0123	0.0096	0.0089	0.0071	0.0525	0.0093	0.0031	0.0064
2003	0.0120	0.0103	0.0082	0.0065	0.0400	0.0071	DI	DI
2004	0.0125	0.0109	0.0090	0.0054	0.0410	0.0078	DI	DI
2005	0.0123	0.0109	0.0139	0.0068	0.0355	0.0080	DI	SI

¹ Promedio anual calculado a partir de las concentraciones horarias de SO₂
 SM = sin medición
 DI = datos insuficientes
 SI = sin información.

FIGURA 7.7 PROMEDIO ANUAL DE CONCENTRACIONES DE SO₂ PONDERADO POR POBLACIÓN EN SEIS CIUDADES MEXICANAS (2005)



En las figuras 7.8 y 7.9 se presentan los segundos máximos de los promedios de 24 horas de SO₂ en las regiones centro y norte, respectivamente, de tal forma que aquellos que rebasan una concentración de 0.13 ppm indican el incumplimiento con el valor normativo. Así, de la primera figura destaca que la ZMVM y ZMG sólo incumplieron la norma en el año 2001, y

que Salamanca, en cambio, incumplió durante todos los años con el límite establecido.

En relación con las ciudades de la región norte, las tres cumplen con la norma, a pesar de que en la ZMM la tendencia es creciente en los últimos dos años.

Con respecto al límite anual, todas las ciudades cumplen con él, excepto Salamanca (figura 7.10 y 7.11).

FIGURA 7.8 SEGUNDO MÁXIMO DE LOS PROMEDIOS DE 24 HORAS DE SO₂ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

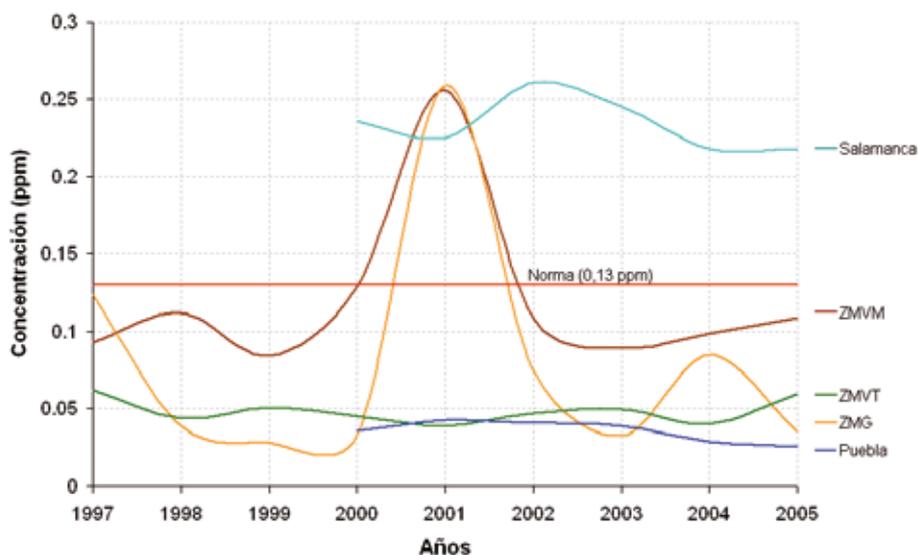


FIGURA 7.9 SEGUNDO MÁXIMO DE LOS PROMEDIOS DE 24 HORAS DE SO₂ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)

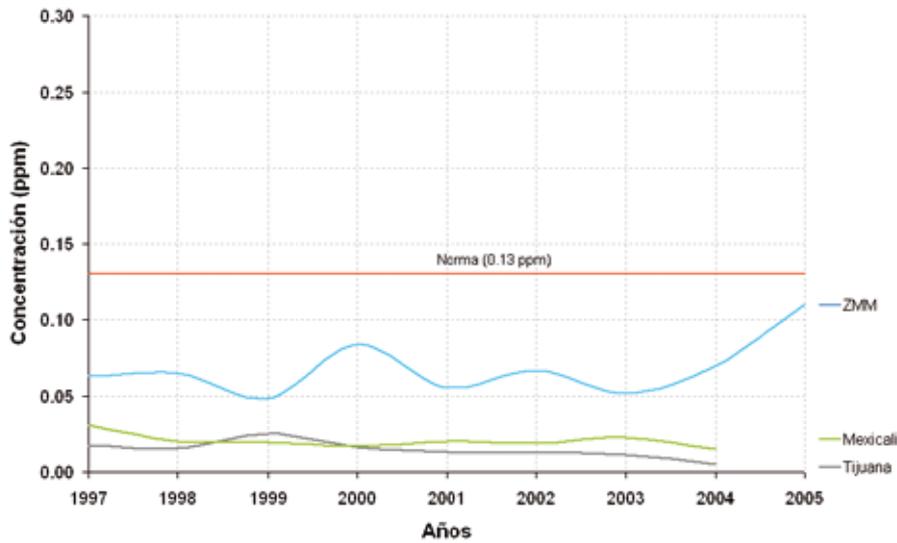
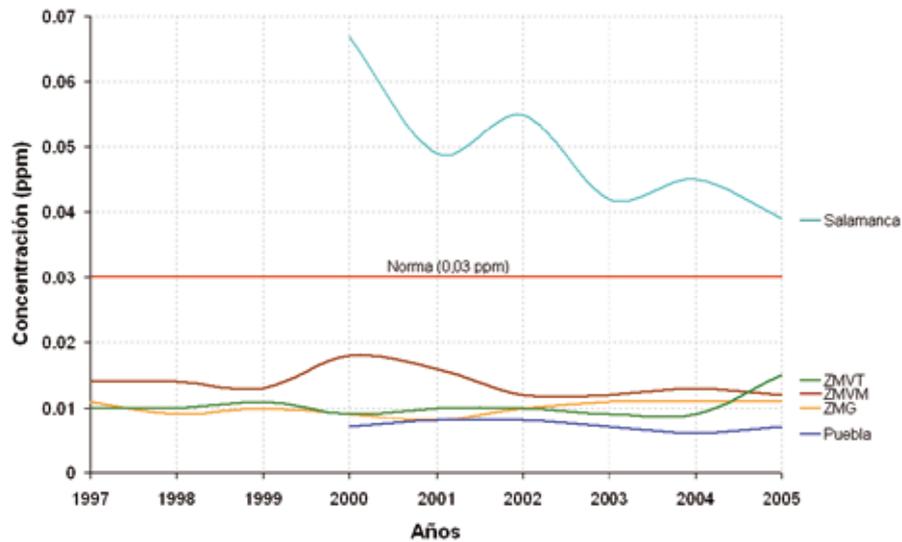


FIGURA 7.10 PROMEDIO ANUAL DE SO₂ EN LA REGIÓN CENTRO (1997-2005)

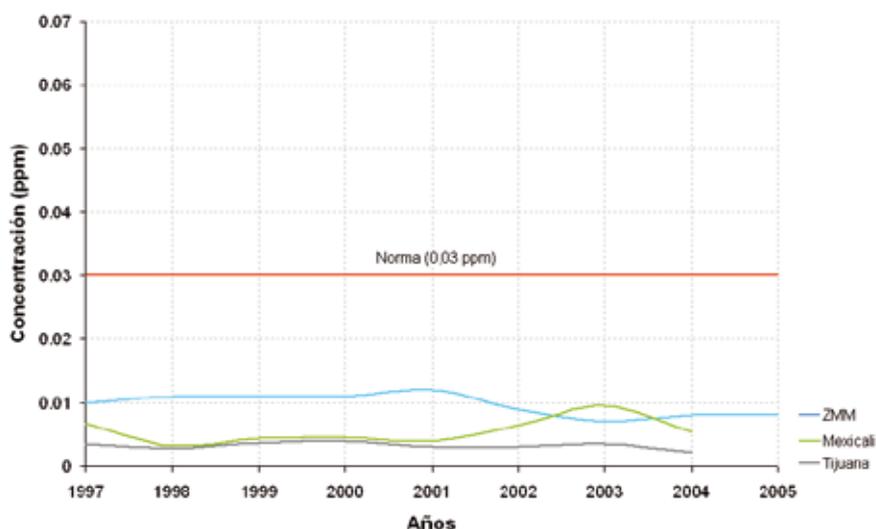


Para Salamanca el promedio anual más alto es poco más de cuatro veces el promedio anual de las demás ciudades.

En el cuadro 7.2 se muestra el número de días en los que se rebasa el valor de la norma de 24 horas para SO₂ en cada una de las ciudades. En la ZMM, aunque

se rebasó el valor de 0.13 ppm en un día en 2005, no hay incumplimiento dado que la NOM establece que dicho valor puede excederse una vez al año. Así, Salamanca es la única ciudad que rebasa consistentemente el límite establecido, con una clara tendencia hacia la baja en los últimos dos años.

FIGURA 7.11 PROMEDIO ANUAL DE SO₂ EN LA REGIÓN NORTE (1997-2005)



CUADRO 7.2 NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE REBASA EL VALOR DE LA NORMA (0.13 PPM, 24 HORAS) PARA SO₂ EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (1997-2005)

Año	ZMVM	ZMG	ZMVT	Puebla	Salamanca	ZMM	Tijuana	Mexicali
1997	0	1	0	SM	SM	0	0	0
1998	0	0	0	SM	SM	0	0	0
1999	0	0	0	SM	DI	0	0	0
2000	1	0	0	DI	51	0	0	0
2001	8	3	0	0	60	0	0	0
2002	1	1	0	0	75	0	0	0
2003	0	0	0	0	73	0	0	0
2004	0	0	0	0	51	0	0	0
2005	0	0	0	0	29	1	SI	SI

SM = sin medición DI = datos insuficientes SI = sin información.

7.5. Conclusiones sobre el SO₂

Finalmente, en la figura 7.12 se muestra un mapa del país, donde se representa el cumplimiento de la norma anual de SO₂ para el año 2005, así como las tendencias temporales de acuerdo con el promedio anual ponderado por población para el periodo 2000-2005.

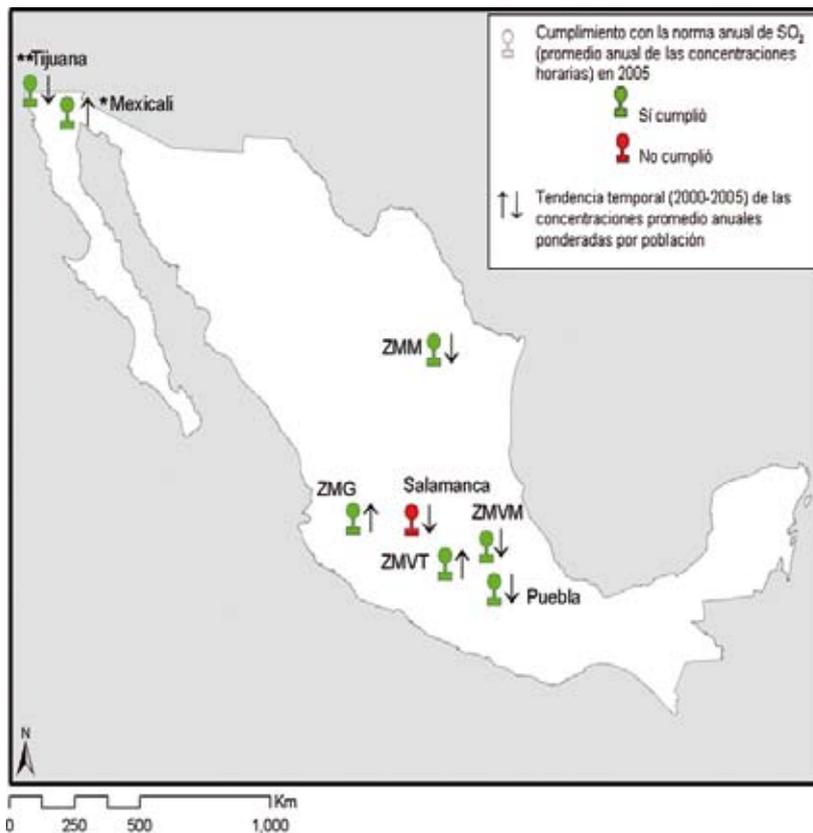
Como se observa en el mapa, sólo Salamanca incumplió con la norma en 2005; sin embargo, cabe hacer notar que la ZMVT, la ZMG y Mexicali muestran

tendencias crecientes en las concentraciones anuales ponderadas por población.

La clasificación de las ciudades en términos de su grado de contaminación por SO₂ se estableció utilizando el número de días por arriba del valor de la norma, el segundo máximo anual de los promedios de 24 horas, y la concentración promedio anual ponderada por población, todos para 2005.

De acuerdo con los resultados (cuadro 7.3), la ciudad más contaminada por SO₂ es Salamanca, pues los tres indicadores considerados para generar el indica-

FIGURA 7.12 CUMPLIMIENTO CON LA NORMA ANUAL PARA SO₂ (2005) Y TENDENCIAS EN OCHO CIUDADES MEXICANAS (2000-2005)



*En Mexicali la información corresponde, para el cumplimiento de la norma, a 2004, y para la tendencia temporal, al periodo 2000-2002.

**En Tijuana la información para la tendencia temporal corresponde al periodo 2000-2002.

Fuente: elaboración propia de los autores.

dor compuesto fueron los más elevados; le siguen en la clasificación la ZMVM, la ZMVT y la ZMM, aunque estas tres ciudades cumplieron con la norma anual y no mostraron días con valores por arriba del límite de 24 horas. Por otra parte, las ciudades menos contaminadas por SO₂ fueron Mexicali y Tijuana, que han cumplido con las normas de calidad del aire para este contaminante en los años de análisis.

CUADRO 7.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CIUDADES SEGÚN SU GRADO DE CONTAMINACIÓN POR SO₂

Ciudad	Clasificación
Salamanca	1°
ZMVM	2°
ZMVT	3°
ZMM	4°
ZMG	5°
Puebla	6°
Mexicali	7°
Tijuana	8°