

2
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis de la Evolución de la Contamina- ción del Aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

T E S I S
Que para obtener el título de
B I O L O G O
p r e s e n t a

CLEMENTE AGUILAR GARDUÑO



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

DIRECTOR: Dr. Yori N. Skiba



México, D. F.
FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR

1998

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

265163



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Deseo manifestar mi más sincero agradecimiento a mi Director de tesis, a mis sinodales y a todos aquellos que de alguna u otra manera contribuyeron a enriquecer este trabajo por su valiosa y desinteresada ayuda.

Por su amor, dedicación y estímulo : a mis padres, a mi esposa, a mis hijos y a mis hermanos.

*El más sabio es el que sabe lo que no sabe.
Sócrates*

ÍNDICE	
I. INTRODUCCIÓN	2
Enfoque global de la contaminación del aire	2
Crecimiento urbano y principales fuentes de emisión	3
población urbana y tasa de crecimiento	3
Principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera	3
Crecimiento del parque vehicular	5
El clima de la ciudad de México	8
Estrategias de control existentes	10
Modelos de dispersión de la contaminación del aire	11
Índices de calidad del aire	12
¿Cómo se interpreta?	16
La red automática de monitoreo ambiental (RAMA)	17
El Programa Integral de Control de la Contaminación Atmosférica (PICCA)	17
Partículas fracción respirable (PM ₁₀)	19
.Evaluación de los costos atribuibles a los daños y efectos sobre la salud por la contaminación del aire	19
Comparación de las normas de calidad del aire OMS, EPA (USA) y México	21
II. OBJETIVOS	27
Objetivo general	27
Objetivos específicos	27
III. MATERIAL Y MÉTODOS..	27
IV. RESULTADOS	28
Evolución de la contaminación del aire desde 1989 hasta 1997..	28
Partículas	28
Partículas totales en suspensión (PTS)	28
Partículas de diámetro menor de 10 mm (PM ₁₀)	29
Dióxido de azufre.	29
Dióxido de nitrógeno.	29
Monóxido de carbono.	30
Ozono.	31
V. DISCUSIÓN	31
Partículas	31

Partículas totales en suspensión (PTS) y Partículas de diámetro menor de 10 µm (PM₁₀)

31

Bióxido de azufre.	31
Bióxido de nitrógeno.	32
Monóxido de carbono.	32
Ozono.	32
VI. CONCLUSIONES..	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .	38
CUADRO 1 INVENTARIO DE EMISIONES 1994. PORCENTAJE EN PESO POR CONTAMINANTE.	4
CUADRO 2 INCREMENTO EN EL NÚMERO DE VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y VEHÍCULOS COMERCIALES (MILLONES) EN MÉXICO	6
CUADRO 3 PUNTOS DE QUIEBRE PARA EL IMECA	14
CUADRO 4 INDICADORES E ÍNDICES	15
CUADRO 5 CALIDAD DEL AIRE IMECA	16
CUADRO 6 COMPARACIÓN DE CRITERIOS MEXICANOS CON LOS CRITERIOS DE LA OMS Y DE LA EPA DE EUA µg/m³ (ppm)	22
CUADRO 7. EVOLUCIÓN DE PARTÍCULAS PM₁₀ EN µg/m³ EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997	45
CUADRO 8. EVOLUCIÓN DEL BIÓXIDO DE AZUFRE EN (ppb) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	47
CUADRO 9. EVOLUCIÓN DE LA MEDIA ARITMÉTICA ANUAL DEL BIÓXIDO DE NITRÓGENO EN (ppb) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	49
CUADRO 10. NÚMERO DE DÍAS DE EXCEDENCIA DE LA NORMA DE CO (11ppm PROMEDIO MÓVIL DE 8 h) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	51
CUADRO 11. EVOLUCIÓN DEL PROMEDIO ANUAL DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES EN (µg/m³) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	53

CUADRO 12. EVOLUCIÓN DE HORAS DE EXCEDENCIA DE LA NORMA HORARIA DE OZONO (11 ppb) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	55
GRÁFICA 1. PROMEDIO ANUAL DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES EN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	57
GRÁFICA 2. PROMEDIO ANUAL DE PARTÍCULAS PM_{10} EN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	59
GRÁFICA 3. PROMEDIO ANUAL DE BIÓXIDO DE AZUFRE EN (ppb) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	60
GRÁFICA 4. PROMEDIO ANUAL DE BIÓXIDO DE NITRÓGENO EN (ppb) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	60
GRÁFICA 5. NÚMERO DE DÍAS DE EXCEDENCIA DE LA NORMA DE MONÓXIDO DE CARBONO (11 ppm PROMEDIO MÓVIL DE 8 HORAS) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	61
GRÁFICA 6. NÚMERO DE VECES DE EXCEDENCIA DE LA NORMA HORARIA DE OZONO (11 ppb) EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO DE 1987 A 1997.	61
GRÁFICA 7. INVENTARIO DE EMISIONES, PORCENTAJE EN PESO POR CONTAMINANTE EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.	62

FE DE ERRATAS

Página	Dice	Debe decir
4 Párrafo 1	Gráfica 1	Gráfica 7
38 5ª referencia	et al	Devlin R, Dockery DW, Frampton MW, Lambert W, Samet JM, Speizer FE, Utell MJ. 1996
38 5ª referencia	(en prensa)	153 :3-50
48 Al final	Cuadro 9	
49		Cuadro 9

En todo el documento en dónde dice mg/m^3 debe decir $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

I. INTRODUCCIÓN

Enfoque global de la contaminación del aire.

Existe un amplio reconocimiento de los problemas de contaminación ambiental, entre los que se destaca el de la contaminación del aire. Esta situación da lugar a la acumulación de riesgos que pueden afectar la salud y el bienestar de la población (Romieu, 1995; Bascom *et al.* 1995, en prensa). Muchos de estos problemas de contaminación se deben al rápido y desordenado crecimiento urbano y de la industrialización, los cuales no van, en muchas ocasiones acompañados de programas dirigidos a la protección del medio ambiente (Romieu *et al.* 1991 y WHO/UNEP, 1992).

La contaminación del aire se define como la presencia en la atmósfera de interiores y de exteriores, de uno o más contaminantes gaseosos o de partículas en cantidades características y de duración tal que sea dañino para los humanos, las plantas, la vida animal o para los bienes, interfiriendo con el bienestar de la vida y la propiedad. (UNEP, 1992)

El crecimiento de la población mundial, la industrialización, la urbanización y la motorización, conducen inevitablemente a una mayor demanda de energía. La producción y el consumo de energía, renovable y no renovable, ha aumentado continuamente en el último siglo, históricamente el monitoreo de sedimentos y suelos ha demostrado que el crecimiento en la producción de carbón, a partir de la revolución industrial ha traído consecuentemente un aumento en las emisiones de ciertos contaminantes (UK-MARC, 1985). Norteamérica, Europa y la antigua URSS contribuyen con el 20% de la población mundial, y desde 1988 estos países consumían ya el 68% del total de la energía primaria. Del consumo mundial total de energía, 88% se origina a partir de los combustibles fósiles, del petróleo el 37.6%, del carbón del 30%, y del gas natural el 20.2% (UK-BP, 1989). Las fuentes predominantes de contaminantes primarios en las naciones desarrolladas e industrializadas son la quema de combustibles fósiles para la producción de electricidad, en procesos industriales, el transporte, y el control del clima en espacios interiores. Los procesos industriales, tales como la fundición de metales y el refinamiento del petróleo, producen una significativa proporción de las emisiones de contaminantes primarios (UNEP, 1992).

Desde hace décadas la contaminación del aire se ha asociado con efectos adversos sobre la salud de las poblaciones, niveles de contaminación del aire extremadamente altos se

han asociado con los episodios de elevada mortalidad en Dónora, Pennsylvania, en 1948 (Shrenk *et al.* 1949), en Londres, Inglaterra en 1952 (UK-Ministry of Health, 1954) y en el valle de Meuse, Bélgica, en 1930 (Firkef, 1936). Esos episodios de contaminación del aire se caracterizaron por altos niveles de partículas, de bióxido de azufre y de mezclas de ellos. Asimismo, niveles de contaminación del aire no tan elevados se han asociado también con mortalidad prematura. El análisis de los datos del "smog" de Londres ha mostrado la asociación entre la mortalidad y un amplio rango de concentraciones de contaminación, sin que exista evidencia de un umbral. La relación con partículas fue independiente de los niveles de bióxido de azufre, pero no al contrario (Schwartz y Marcus, 1990). Hallazgos similares han sido referidos en otros países (Schwartz y Dockery, 1992).

Crecimiento urbano y principales fuentes de emisión

Población urbana y tasa de crecimiento.

El proceso de urbanización durante este siglo ha sido extremadamente rápido. Existen 14 grandes aglomeraciones urbanas (más de dos millones de habitantes). La Ciudad de México se encuentra entre las 12 ciudades más grandes del mundo. La ZMCM muestra una elevada tasa de crecimiento, alrededor de 2.7% por año en 1995. El porcentaje de la población urbana (en millones) en la ZMCM en 1950 fue de 3.15%, en 1965 de 14.47% y en 1995 de 15.64%, se espera que sea de 18.79% en el año 2015 (UN, 1995).

Principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera.

En México se cuenta con un inventario de emisiones para vehículos, industrias y fuentes naturales. Se realizó una evaluación preliminar basada en la producción industrial referida por la CANACINTRA y otras organizaciones empresariales, tipos de industrias, número de vehículos respecto a las posibles emisiones (México-SEDUE, 1986).

De acuerdo al inventario de emisiones de 1994 el total de emisiones es de 4,009,629 ton/año, de las cuales aproximadamente el 13% corresponde a la industria y servicios y un 75% al sector transporte. La contribución de la industria es de 57.3% en SO_2 y 24.5% en NO_x , mientras que los vehículos automotores emiten el 71.3% de los NO_x , el 99.5% del CO , el 54.1% de los HC y el 26.8% del SO_2 .

La contribución vehicular en cuanto a partículas totales en suspensión (PTS) es menor del 5% del total, sin embargo, cabe destacar que su grado de toxicidad y la exposición de las personas relacionada a esta fuente, son mucho mayores que las relacionadas a partículas provenientes de fuentes naturales, las cuales representan el 94.2% del total estimado. Cabe señalar que la contribución de los servicios (giros menores, es decir establecimientos o comercios dedicados a la prestación o venta de un servicio -baños públicos, hoteles, centros deportivos, hospitales, lavanderías, tintorerías, restaurantes, panificadoras y tortillerías-) representa el 38.9% del total de HC, en este sector el mercadeo y distribución de gas licuado de petróleo tienen aportaciones significativas (México-DDF *et al.* 1996) (Cuadro 1 y Gráfica 1).

CUADRO 1
INVENTARIO DE EMISIONES 1994
PORCENTAJE EN PESO POR CONTAMINANTE

Sector	PTS	SO ₂	CO	NO _x
Industria	1.4	57.3	0.4	24.5
Servicios	0.2	15.9	0.1	4.2
Transporte	4.2	26.8	99.5	71.3
Vegetación y suelos	94.2	0.0	0.0	0.0
Total	100	100	100	100

Fuente: México-DDF *et al.* 1996.

El consumo de gasolina referido por PEMEX es de 16 millones de litros por día. Se considera que los vehículos emiten en 80% en peso total de emisiones en el Valle de México y que éstas son determinantes en la formación de los oxidantes fotoquímicos (México-SEDUE, 1986).

Bravo *et al.* (1988), refirieron que al analizar datos de sulfatos (SO₄) en PTS recolectadas en la estación de muestreo del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) al

suroeste de la Ciudad de México de 1980-88, se presentó una aparente disminución de los SO_2 , a la vez que se observó una tendencia al crecimiento de los nitratos en las mismas muestras de PTS (Bravo *et al.* 1990).

Bravo *et al.* (1988) elaboraron la hipótesis de que la tendencia a la disminución de los SO_2 se podría deber a la aplicación de alguna de las medidas dictadas por el Gobierno Federal, así como la tendencia al aumento de los NO_x podría deberse a un incremento en la actividad fotoquímica como consecuencia directa del cambio de composición de la gasolina efectuado en 1986 en la ZMCM.

No obstante, la continuación de los programas de muestreo y análisis de los datos registrados por el CCA y la Red de SEDUE, indicaban que el SO_2 presentaba indicios de continuar incrementándose y no de reducirse, además de que la actividad fotoquímica mantenía su intensidad de reacción entre los precursores para la formación de oxidantes fotoquímicos (Bravo *et al.* 1990).

La actividad industrial en México es reconocida como la principal fuente emisora de dióxido de azufre (SO_2) en la ZMCM (México-SEDUE, 1986 y Bravo, 1987, Romieu *et al.* 1991). Por este motivo el Gobierno Federal decretó en el período 1986-87 medidas de concertación para mejorar la calidad del aire en relación a la concentración de SO_2 en la ZMCM (Bravo *et al.* 1990).

Otra fuente importante de contaminación atmosférica es la emisión vehicular e industrial ya que los procesos industriales habitualmente se concentran en las ciudades. Entre las áreas urbanas más afectadas por la emisión de contaminantes originada por el hombre se encuentra la ZMCM (Romieu *et al.* 1991).

Crecimiento del parque vehicular.

Uno de los más significativos índices de contaminación atmosférica es el proporcionado por las estadísticas del uso de vehículos automotores. Desde 1984 hasta 1993, México ha mostrado un rápido crecimiento en el número de vehículos (42.3%), (Cuadro 2), y la mayoría de ellos se concentran en las aglomeraciones urbanas y en el tránsito a través de ellas.

Este tipo de transporte es la principal fuente de un gran número de esos contaminantes, en particular el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos, el plomo, el

ozono y otros oxidantes fotoquímicos, y en más pequeña proporción de partículas totales en suspensión, bióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles (Romieu, 1995).

CUADRO 2
INCREMENTO EN EL NÚMERO DE VEHÍCULOS DE PASAJEROS Y VEHÍCULOS
COMERCIALES (MILLONES) EN MÉXICO

Año	Pasajeros	Comerciales	Total
1984	4.80	1.93	
1989	6.22	2.70	
1993	8.01	3.66	
Incremento	40.1%		47.242.3

Datos de 1992.

Fuente: UN, 1995.

Generalmente, las emisiones de contaminantes están determinadas por el método de combustión y el tipo de combustible utilizado. El carbón es el combustible más contaminante por unidad de energía, en base a la actual tecnología de combustión; proporciona del 20 al 25% del total de energía consumida en muchas regiones; sin embargo en China el 80% de toda la energía primaria, es derivada del carbón, representando el 22.6% del total del consumo mundial. China es la única que presenta problemas asociados con emisiones de bióxido de azufre (SO₂) y de material particulado. Semejantes problemas de contaminación fueron comunes en los países industrializados en las décadas de 1950 y 1960, hasta la introducción de la legislación del "aire limpio". Se predice que el carbón asumirá nuevamente un papel crecientemente importante en la producción de energía. El comercio mundial de carbón se ha incrementado en el 40% desde 1980 (UNEP/WHO, 1988, en UNEP, 1992).

La combustión de todos los combustibles carboníferos resulta de una oxidación exotérmica del carbono, hidrógeno, azufre y nitrógeno. Si la combustión completa es alcanzada, el bióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua, el bióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los metales traza volátiles y no volátiles, tales como arsénico (As), cadmio

(Cd), plomo (Pb), y mercurio (Hg), serían los principales contaminantes emitidos. En la práctica, la combustión completa no ocurre y adicionalmente se producen los contaminantes gaseosos y partículas, como el monóxido de carbono (CO) y las partículas de carbono, orgánicas y elementales; los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) pueden también estar involucrados, ya sea absorbidos en el material particulado o en fase gaseosa. Otras emisiones pueden ser producidas por los aditivos de combustibles tales como el tetraetilo de plomo y varios hidrocarburos (UNEP, 1992).

Los principales contaminantes de las ciudades son las partículas totales en suspensión, las partículas respirables (PM_{10} , $PM_{2.5}$), el ozono, el monóxido de carbono, los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno. Todos ellos tienen efectos potencialmente adversos sobre la salud de las poblaciones (Romieu, 1995).

Son diversos los contaminantes primarios emitidos simultáneamente a la atmósfera por todos los procesos emisores, con diferente toxicidad, grado de exposición de la población e impacto en la visibilidad. Adicionalmente, algunos contaminantes participan en diferentes reacciones fotoquímicas en la atmósfera dando origen a los contaminantes secundarios que incluyen a los oxidantes fotoquímicos, como el ozono (O_3), (México-DDF *et al.* 1990), el bióxido de nitrógeno (NO_2), peroxiacil-nitratos (PAN) y aerosoles ácidos. Ciertos contaminantes se convierten por la oxidación e hidrólisis atmosférica en lluvia ácida (UNEP, 1992).

La contaminación del aire en interiores, a pesar de que no tiene gran significancia, es muy importante en términos de exposición personal. Los principales contaminantes del aire en interiores son derivados de la combustión en estufas, calentadores de espacios y cigarrillos: CO, SO_2 , NO_2 y partículas. Otras fuentes importantes son los materiales de construcción, mobiliario y productos químicos (formaldehído y otros hidrocarburos), el suelo bajo las construcciones (radón, metano) y los aerosoles biológicos y el polvo doméstico.

El impacto de las emisiones en interiores depende de la magnitud de la fuente y de la ventilación, muchos países desarrollados tienen clima templado, en invierno las construcciones tienden a tener un bajo índice de intercambio, produciendo concentraciones de algunos contaminantes en interiores que exceden a las concentraciones en exteriores. El ambiente en interiores ofrece cierto grado de protección de la exposición a los contaminantes en exteriores, sin embargo, este también actúa como medio para reacciones y conversiones de

contaminantes. En los países en desarrollo, es aún común el uso del combustible sólido no procesado, para cocinar y calentar, en muchos casos el humo no es ventilado y es emitido directamente dentro del área en que se vive. El total de la población expuesta a las concentraciones excesivas de contaminantes en los países en desarrollo se estima en varios cientos de millones (US-EPA/CPSC, 1988, Chen *et al.* 1990, en UNEP, 1992).

Los problemas de contaminación del aire pueden variar enormemente con la geografía, demografía y el perfil socioeconómico de la región. Estos factores determinan la fuente y la cantidad de emisión del contaminante. El clima y la topografía de la región influyen la distribución y los procesos atmosféricos del contaminante y finalmente, sus efectos en el ambiente y la salud humana (UNEP, 1992).

En algunas grandes ciudades, como la Ciudad de México, debido a las condiciones meteorológicas y geográficas se dificulta la dispersión de los contaminantes emitidos a la atmósfera por las diferentes actividades que coexisten en la ciudad. Esta situación ocasiona que el fenómeno conocido como inversión térmica se presente con frecuencia, en especial durante los meses de invierno; en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México las inversiones térmicas se rompen todos los días entre las 8:00 y las 10:00 AM, lo que ocasiona que las concentraciones de contaminantes sean muy elevadas. Es por ello, que el gobierno, consciente de esta situación, ha considerado la importancia y necesidad de establecer programas de control de las emisiones (México-DDF *et al.* 1993).

El clima de la ZMCM.

La geografía y el clima de la ZMCM han sido ampliamente descritos (México-SEDUE, 1987, Aguilar *et al.* 1995), la Ciudad está en una cuenca rodeada por altas montañas de hasta 5 400 msnm, y ocupa un área de 1 300 km², es habitada por casi 20 millones de personas y tiene un crecimiento de 3.3% anual. Existe una apertura natural al norte de la cuenca atmosférica y todo el crecimiento urbano se encuentra encerrado en la parte más extrema del suroeste.

Climatológicamente es una región de clima Cw, templado con lluvias entre junio y octubre. La estabilidad atmosférica es un fenómeno común en la zona debido a brisas de montaña a valle, brisas por enfriamientos diferenciales entre zonas rurales y urbanas y los

frentes invernales de corrientes frías. Estas corrientes de aire en el gradiente térmico en las diferentes capas de la atmósfera de forma que, en el observatorio instalado en el aeropuerto capitalino a las 6:00 AM, se presentan inversiones térmicas en el 90% de los días invernales, entre noviembre y marzo, con un techo máximo de 200 m/s (México-SEDUE, 1987).

Los vientos corren a una velocidad del orden de 2 m/s, con ventarrones entre febrero y mayo que provocan tolveneras sobre la superficie del Lago de Texcoco al noreste de la zona urbana. Los vientos dominantes son del noreste y este (México-SEDUE, 1987).

La Ciudad se encuentra en los trópicos, y su localización en el interior de una meseta alta, la hacen más que un caso único. Durante la parte fría del año (noviembre-abril) el Valle de México está sujeto a alta frecuencia de condiciones anticiclónicas que dan origen a noches con cielos casi sin nubes y por ello la radiación de inversiones superficiales y durante el día abundante brillo de sol. El resto del año el Oeste se retira a lado norte dando origen a humedad, y a corrientes frecuentemente inestables de vientos alisios. Durante este período predominan los cielos nublados después del medio día hasta la media noche y ocurren frecuentemente lluvias tormentosas convectivas de las 16:00 a las 17:00 h (Jáuregui, 1988a).

Las velocidades del viento generalmente son menores en áreas construidas que en los alrededores de la ciudad (Chandler, 1976, en Jáuregui, 1988a). Para vientos ligeros, sin embargo, se ha observado que aumentan la velocidades del viento en las áreas urbanas cuando el enfriamiento rural nocturno permite la formación de una inversión superficial (Lee, 1979, en Jáuregui, 1988a).

En la estación fría y durante el día, las velocidades del viento medias urbanas son menores que las de los bordes de la ciudad como resultado de la turbulencia regional prevalente y la mayor aspereza superficial en la ciudad. En la noche, sin embargo, la aparición de la inversión superficial rural, reduce las velocidades del viento rural cerca de la superficie (Jáuregui, 1988a).

El área urbana de la Ciudad de México es tan extensa que los fuertes contrastes en los varios elementos climáticos, como la temperatura, la humedad relativa, insolación y el viento, muestran marcados gradientes al través de la ciudad (Jáuregui, 1988a).

Las fuentes naturales (tolveneras e incendios forestales y agrícolas, etc.) nunca han sido contemplados en los inventarios de emisiones intentados en México (García-Gutiérrez,

1990). La geografía de la ZMCM presenta características como las arriba mencionadas, las cuales son un factor determinante para la distribución de los contaminantes en la atmósfera de la cuenca del Valle de México (Jáuregui, 1988b).

La contaminación del aire es algo inherente al desarrollo y funcionamiento de las ciudades. Por lo tanto, para comprender la estructura del problema, en términos de contribución relativa de cada proceso urbano en las emisiones totales, es indispensable planificar un inventario de emisiones. Esto permite identificar responsabilidades y prioridades, como fundamento para establecer un programa efectivo de control de la contaminación atmosférica (México-DDF *et al.* 1990).

El balance energético mantiene una asociación estrechamente relacionada con el inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera, lo cual refleja la dependencia de las emisiones respecto del uso de la energía. El consumo de gasolina y diesel, en el sector transporte, representa el mayor gasto relativo de energía y la mayor aportación de contaminantes con respecto al volumen total, siendo los principales contaminantes emitidos por este sector el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, aunque la emisión de partículas puede ser también significativa en algunas zonas.

Por otra parte, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno son los principales contaminantes emitidos por aquellos sectores de actividad cuyos insumos energéticos son el combustóleo, el gasóleo, el gas natural y el gas licuado de petróleo, como pasa en la industria, la generación de electricidad y los servicios (México-DDF *et al.* 1996).

Estrategias de Control Existentes.

Las estrategias para controlar la contaminación del aire dependen de las autoridades nacionales e internacionales que establecen estándares de emisión y de calidad del aire. Esto requiere del desarrollo de modelos de dispersión de contaminantes, instalación de redes de monitoreo y de la elaboración de índices de contaminación del aire para información al público, que sirvan para elaborar programas de contingencias para prevenir eventualidades en el caso de que sean alcanzados altos índices de contaminación del aire.

Modelos de dispersión de la contaminación del aire.

Un modelo de dispersión es una expresión matemática de los efectos de la atmósfera sobre los contaminantes del aire. Este incluye los efectos de advección (transporte) y dispersión (incluye dilución por el viento y dispersión debida a turbulencia) y podrá también incluir consideraciones sobre el ascenso de pluma, viento cortante, y transformaciones químicas y físicas (incluyendo mecanismos de remoción) (Arias-Osoño, 1990).

La aplicación de modelos de simulación puede tener diferentes propósitos: desarrollo de estrategias de control; evaluación del impacto en la calidad del aire y en el análisis de la tendencia de este; selección de los sitios apropiados para ubicar estaciones de monitoreo; estudios de diseño de chimeneas, etc. (Bravo *et al.* 1990).

El método más preciso para obtener los parámetros de difusión es por determinación directa del contaminante en estudio en el área específica y la aplicación del resultado obtenido al modelo más apropiado. Sin embargo este tipo de estudio es demasiado costoso y prolongado pues los parámetros deben de ser obtenidos bajo todas las variables meteorológicas probables (Unbe *et al.* 1972).

La ecuación de transporte de contaminante puede ser aplicada en un área limitada a muchos problemas importantes Skiba, 1993:

- 1) Ubicación óptima de nuevas plantas industriales en un región dada con el fin de minimizar la concentración de la contaminación en ciertas zonas de importancia ecológica (Marchuk 1986, Skiba, 1993a, b, c, Skiba, 1995, Skiba, 1997).
- 2) La optimización de emisiones de plantas industriales en operación (Marchuk 1982a, Penenko y Raputa 1983, Skiba, 1993a, b, c, Skiba, 1995, Skiba, 1997).
- 3) La determinación (sobre la base de información de monitoreo de la calidad del aire) de la concentración existente de contaminantes provenientes de plantas industriales con el fin de identificar las plantas que violen las normas sanitarias permisibles (Penenko y Raputa 1982, Skiba, 1993a, b, c, Skiba, 1995, Skiba, 1997)
- 4) La evaluación del papel de las emisiones provenientes del tráfico vehicular incluyendo en el modelo las fuentes lineales de contaminación localizadas a lo largo de las principales vías carreteras (Heigom *et al.* 1991, Sliggers 1992, Skiba, 1993a, b, c, Skiba, 1995, Skiba, 1997).

Índices de calidad del aire

Desde 1973 se iniciaron las acciones de muestreo de la contaminación atmosférica de la Ciudad de México, se encontraron valores de contaminación muy elevados debido a las emisiones provenientes de la industria, vehículos y fuentes naturales. Se muestrearon y analizaron contaminantes utilizando dispositivos para partículas en suspensión denominados hi-vol o de altos volúmenes, así los contaminantes gaseosos llamados primarios (NO_x , CO , óxidos de azufre y oxidantes como el ozono), hasta esa fecha no se habían dado al conocimiento público los valores de las concentraciones de las partículas ni de los contaminantes gaseosos desde 1976 en que se estandarizó la Red de muestreo ambiental en la zona mencionada (García-Gutiérrez, 1990).

El Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMECA) está basado en el PSI (Pollutant Standar Index) de los Estados Unidos, se diseñó luego de la revisión de varios tipos de índices y tiene por objeto proporcionar un valor de indicador único para informar a la población sobre la calidad del aire en la ZMCM, observar el comportamiento de las tendencias de la contaminación atmosférica en el área, y comparar la calidad del aire entre zonas metropolitanas que utilicen índices similares.

Los índices de calidad del aire ponderan y transforman las concentraciones de un conjunto de contaminantes en un número adimensional, el cual indica el nivel de contaminación presente en una localidad dada, que pueda fácilmente ser entendido por el público (México-SSA, 1979). El índice más aceptable es aquel que considera las normas de calidad del aire como base para determinar los efectos (México-SSA, 1979). En México en el IMECA se optó por un enfoque que incluyera tanto las normas de calidad del aire como los niveles de daño significativo, como bases para ponderar los efectos de los contaminantes.

Es un enfoque realista puesto que permite utilizar factores de ponderación que cambien con los diferentes niveles de contaminación (México-SSA, 1979).

Las variables seleccionadas para su inclusión en el índice de calidad del aire se basaron en el PSI (Pollutant Standar Index) y en la información disponible en México, seleccionándose CO , O_3 , NO_x , PTS y el producto sinérgico $\text{SO}_2 \times \text{PTS}$ (SSA, 1979).

Con el objeto de proporcionar un valor de índice único, se decidió utilizar para cada zona el valor máximo que se obtuviese, ya que utilizar un índice combinado está sujeto a problemas de eclipsamiento y ambigüedad, los problemas de eclipsamiento se refieren a que dado que puede darse el caso de que uno o más contaminantes estén excediendo la norma de calidad del aire, el índice combinado no refiere este hecho. Los problemas de ambigüedad se deben a que en otras ocasiones el índice puede dar la falsa impresión de que se ha violado una norma, cuando esto no ha sucedido. En el IMECA se informa el subíndice máximo para cada zona, indicando el contaminante que le dio origen (SSA, 1979).

Por lo anterior, la función seleccionada como apropiada para el Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMECA), se expresa como:

$IMECA = (I_1, I_2, I_3, \dots, I_n)$, donde $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ son los subíndices individuales para cada uno de los n contaminantes. Los subíndices se calculan utilizando funciones lineales segmentadas que se basan en los puntos de quiebre listados en la Cuadro 3. El sistema de Ott-Thom es un índice de tipo estructural "5BB" ya que incluye cinco contaminantes (CO , O_3 , SO_2 , partículas y el producto $SO_2 \times PTS$), sus términos descriptivos están basados en los efectos umbrales a corto plazo y los niveles de daño significativo. Los cinco términos descriptivos utilizados son: "bueno" (0-50), "satisfactorio" (51-150), "no satisfactorio" (151-200), "malo" (201-300), "muy malo" (301-500) (México-SSA, 1979).

Para fijar el valor de 100 del índice se utilizaron los valores propuestos para Normas Mexicanas de Calidad del Aire. Las concentraciones correspondientes para un valor 50 del índice se obtuvieron dividiendo del intervalo entre cero y la norma de calidad del aire en dos partes iguales. Las concentraciones para los valores de 200, 300 y 400 del índice se determinaron dividiendo el intervalo entre la norma de calidad del aire y el nivel de daño significativo, valor 500 del IMECA, en cuatro partes iguales. Para el subíndice correspondientes a la fracción respiratoria de las partículas, se realizaron estudios de correlación para determinar los puntos de quiebre de las mediciones de partículas, utilizando medidor Beta en base a los definidos para las partículas totales en suspensión (Cuadro 3) (México-SSA, 1979)

CUADRO 3
PUNTOS DE QUIEBRE PARA EL IMECA

IMECA	PTS PS	Fracc. SO ₂	PTSxSO ₂	PS-FR ₂ SO ₂	O ₃	CO	NO ₂	
	24 h	resp. 24h	24h	24h	1h	8h	1h	
	mg/m ³	mg/m ³ ppm	ppmxmg/m ³	ppmxmg/m ³	ppm	ppm	ppm	
50	175	100	0,07	2,3	1,3	0,07	7	0,2
100	350	190	0,13	8,5	4,5	0,14	14	0,4
200	510	240	0,35	35	17,0	0,27	23	0,8
300	675	275	0,6	75	34,0	0,4	32	1,2
400	835	305	0,8	125	55,0	0,5	41	1,6
500	1000	330	1,0	187	80,0	0,6	50	2,0

Nota. mg/m³ = microgramos por metro cúbico

ppm = partes por millón de partes

ppm x mg/m³ = partes por millón de partes por metro cúbico.

Fuente: (México-SSA, 1978)

Las cantidades máximas de contaminantes que se permiten en el ambiente, sin causar daños a la salud de la población o al medio, en nuestro País, para los cinco principales contaminantes a partir de 1982, Cuadro 4 (México-SEDUE, 1985).

El IMECA, cuyos valores numéricos permiten relacionar el grado de contaminación atmosférica con los posibles efectos en la salud humana, en una forma accesible a la población, toma en cuenta los cinco contaminantes más importantes; por cantidad y frecuencia: bióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), partículas totales en suspensión (PTS), bióxido de nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) e hidrocarburos (HC), y el producto de dos de ellos (PTS x SO₂), que representa los efectos de la presencia de ambos en la atmósfera (México-SEDUE, 1985).

**CUADRO 4
INDICADORES E ÍNDICES**

Contaminante	Período en horas	Microgramos por metro cúbico mg/m ³
PTS	24	275
SO ₂	24	340
O ₃	1	216
CO	8	14872
NO ₂	1	395

(México-SEDUE, 1985)

El IMECA utiliza las siguientes equivalencias específicas para cada contaminante: IMECA 100 es la concentración igual a la establecida como **Norma de calidad** del contaminante; IMECA 200 es la concentración considerada como **Alerta interna** ya que **pueden existir daños al ambiente**; IMECA 300 es la concentración de **Alerta**, ya que **se incrementa la probabilidad de daños al ambiente**; IMECA 400 es la concentración de **Alarma** dado que **existe mayor riesgo de que se presenten daños al ambiente**; IMECA 500 es la concentración que **se tiene certeza de que existen daños significativos a la salud**. Para cada contaminante se elabora una gráfica en base a estos cinco puntos (México-SEDUE, 1995).

El IMECA se calcula con los valores diarios de los contaminantes que se registran en cada una de las estaciones que conforman la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), dichas estaciones se encuentran distribuidas en el área metropolitana, la cual se ha dividido en las siguientes cinco zonas: Noreste, Noroeste, Centro, Sureste y Suroeste. Primero se calcula un valor promedio de concentración por zona para cada contaminante, estos promedios se transforman en los subíndices correspondientes por medio de las gráficas para cada contaminante, se selecciona el valor mayor de entre los subíndices. Al contaminante cuyo subíndice corresponde el máximo valor se le denomina contaminante crítico y se informa junto con el valor IMECA correspondiente, Cuadro 5 (México-SEDUE, 1985).

CUADRO 5
CALIDAD DEL AIRE IMECA

CALIDAD DEL AIRE	IMECA
1.- BUENA	0-50
2.- SATISFACTORIA	51-100
3.- NO SATISFACTORIA	101-200
4.- MALA	201-300
5.- MUY MALA	301-500

Fuente: (México-SSA, 1978)

¿Cómo se interpreta?

A cada uno de los segmentos en el intervalo de 0-500 se le asigna la siguiente calificación relativa a la calidad del aire. De acuerdo a lo anterior se le informa a la población lo siguiente con relación a los intervalos reportados: BUENA -Situación muy favorable para la realización de todo tipo de actividades físicas; SATISFACTORIA -Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades; NO SATISFACTORIA -Aumento de molestias menores en personas sensibles; MALA -Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población general. MUY MALA -Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población sana.

El IMECA se utiliza como la información básica en un programa de contingencias ambientales. Se realizan las siguientes acciones dentro del programa de contingencias: de **100-200** -Alerta interna. Vigilancia horaria las 24 horas del día los niveles de contaminación, actualización y análisis de las condiciones meteorológicas, se elabora el pronóstico de calidad del aire, y se preparan recursos materiales y humanos; de **250** se implementa el doble no circula; de **201-300** -Se implementa un programa que reduce las emisiones al 30% de las fuentes industriales, y se sustituye parcialmente a gas natural en las termoeléctricas generadoras en lugar de combustóleo, se agiliza el tránsito; de **301-400** se implementa un programa de reducción de emisiones en las fuentes industriales al 50% y se incrementa el

suministro de gas natural en las termoeléctricas, se restringe el tránsito de vehicular; de 401-500 se pone en marcha el programa de reducción de emisiones de 70% en las fuentes industriales, se reduce el tránsito.

La Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA).

Actualmente cuenta con 52 estaciones de monitoreo distribuidas estratégicamente en cinco áreas de la ZMCM, esta red de monitoreo atmosférico está integrada por tres subsistemas:

La red automática, la red manual y la red meteorológica, complementándose con una unidad móvil, dos estaciones piloto y los equipos Rass, Ecosonda y DOAS, la red automática cuenta con 32 estaciones, 21 en el D.F. y 11 en el Estado de México, conectadas teleméricamente a un centro de control, el cual mide los niveles de Ozono O_3 , Óxidos de Nitrógeno NO_x , NO y NO_2 , Bióxido de azufre SO_2 , Monóxido de Carbono CO , y Partículas en suspensión, fracción respirable PM_{10} :

La red manual consta de 19 estaciones de monitoreo y mide los niveles de Partículas totales en suspensión y fracción respirable, sulfatos, nitratos, ácido sulfhídrico y metales como plomo, cadmio, cobre, zinc y níquel, la red meteorológica se compone de 10 estaciones con sensores de velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura complementándose esta información con una torre meteorológica y dos radares acústicos y una unidad móvil.

El Programa Integral de Control de la Contaminación Atmosférica (PICCA)

El PICCA del Plan Nacional de Desarrollo fue el resultado de una consulta pública realizada en 1983, la SEDUE publicó en el año de 1984 el Programa Nacional de Ecología para el período 84-88. En este Programa, se parte de un diagnóstico general que estableció la necesidad de controlar y disminuir la contaminación ambiental, dándole gran importancia a la contaminación atmosférica. El programa preveía la atención prioritaria de la ZMCM, dando énfasis a la operación del sistema de monitoreo, a la evaluación de las emisiones automotrices y el mejoramiento de las áreas desforestadas (México-SEDUE, 1987).

A partir de 1986 se comienzan a implementar medidas de control de la contaminación del aire de este Programa, se empieza a sustituir el combustóleo por gas natural y se reduce el contenido de tetraetil de plomo en las gasolinas, en 1990 se organizó la verificación vehicular, se introdujeron las gasolinas oxigenadas y el programa "Hoy no circula" el cual prohíbe la circulación de los automóviles un día a la semana, dependiendo del último número de la matrícula (México-DDF *et al.* 1990).

En 1990 se establece en México el PICCA 1990-1994, cuya aplicación ha sido gradual y ha reducido paulatinamente las emisiones de contaminantes atmosféricos. Las áreas prioritarias de acción de este programa se centran a nivel de: a) la industria petrolera, b) el transporte, c) la industria privada y los establecimientos de servicio, d) las termoeléctricas, e) reforestación y restauración ecológica, f) investigación, educación ecológica y comunicación social. (México-DDF *et al.* 1990)

Se pretendía lograr que no se rebasaran las normas internacionales de plomo, las normas nacionales e internacionales de bióxido de azufre (a partir de diciembre de 1991 se prohibió el uso de combustibles con más del 2% de azufre), se frenara el incremento en el aire de los niveles de partículas originadas por la destrucción de bosques, erosión de suelos y basureros clandestinos, se redujeran de forma significativa los hidrocarburos (precursores del O₃), con la incorporación gradual de los convertidores catalíticos y mejores sistemas de combustión en la industria y los servicios, asimismo, los óxidos de nitrógeno y el monóxido de carbono también se reducirían (México-DDF *et al.* 1990).

En la ZMCM, las principales fuentes de emisión de partículas a la atmósfera son la erosión del suelo (43%), así como la suspensión de polvos de áreas pavimentadas (32.9%) y sin pavimento (18.2%). De menor importancia son las emisiones generadas por los procesos de transformación industrial (1.8%), el uso de combustibles fósiles en las industrias, servicios y hogares (1.9%), así como la quema de residuos (0.8%) y otros (1.3%) (Romieu *et al.* 1991).

La reducción de las concentraciones de partículas en suspensión fue una de las prioridades establecidas en el PICCA (México-DDF *et al.* 1993), el cual contempla cinco estrategias de control de la contaminación atmosférica, cada una de las cuales incluye acciones orientadas al control de las emisiones de partículas en suspensión: 1) Mejoramiento de los combustibles; 2) Expansión del transporte colectivo y control de emisiones en los

vehículos automotores; 3) Control de emisiones provenientes de la industria y los servicios; 4) Reforestación del Valle de México y su área de influencia ecológica; 5) Educación ambiental, investigación local y participación comunitaria. (México-DDF *et al.* 1993)

En este contexto, las acciones de reforestación, y en general, las de restauración ecológica del Valle de México (recuperación del ex lago de Texcoco y del lago de Xochimilco, entre otras) y la pavimentación de las áreas suburbanas, juegan un papel central en el control de las emisiones de partículas de origen primario (DDF *et al.* 1993).

Partículas Fracción Respirable (PM_{10}).

Las partículas PM_{10} , son las más importantes desde el punto de vista de la salud pública, se ha comprobado que el 20% de éstas tienen su origen en procesos de combustión (DDF *et al.* 1993).

Evaluación de los costos atribuibles a los daños y efectos sobre la salud por la contaminación del aire.

Aunque se ha observado un decremento en los niveles de contaminantes del aire (ver gráficas de resultados), todavía es necesario seguir trabajando en la planificación de los programas de control de la contaminación del aire, ya que se han realizado diferentes estudios en distintos países del mundo sobre los beneficios económicos y de salud asociados con una reducción de la contaminación atmosférica (Romieu y Borja, en prensa y World Bank, 1994).

Así por ejemplo, en la Ciudad de México, Hernández-Ávila *et al.* (1995) han estimado la reducción anual de los efectos sobre la salud, que se lograría al alcanzar diferentes reducciones en las concentraciones de contaminación ambiental. En relación a PM_{10} , si las concentraciones promedio anuales y de 24 horas se redujeran a sus respectivos estándares de 50 y 150 mg/m^3 , se esperaría una reducción en la mortalidad prematura de 2 339 y 161 muertes. Para el caso del ozono, si se lograra alcanzar la norma mexicana de 0.11 ppm (una hora), la población tendría una reducción anual de 855 casos de mortalidad prematura, con un rango de 0 a 1 026 casos (Hernández-Ávila, 1995).

En cuanto a los beneficios económicos atribuibles a los daños y efectos en salud estimados, para la Ciudad de México, en relación a PM_{10} son casi de diez mil millones de

pesos. Esta cifra indicaría que de cumplirse la norma oficial mexicana en relación a PM_{10} , se reducirían en la cantidad antes mencionada, los casos en salud simultáneamente para el ozono, los cuales indican que la disminución del costo en salud, al cumplirse la norma mexicana, sería de alrededor de 344 millones de pesos (Hernández-Ávila, *op cit*).

No obstante, cabe señalar que los costos indicados probablemente representen una subestimación de los costos reales, ya que para su estimación no se incluyeron los costos indirectos asociados a la búsqueda de atención médica tales como costos de transporte o pérdida de días laborales o pérdida de días niño-escuela (Hernández-Ávila, 1995).

En contraste con el O_3 , el cual produce síntomas respiratorios, los niveles elevados de PM_{10} están fuertemente asociados con una constelación de efectos sistémicos, incluido un incremento de la mortalidad. Aunque los efectos asociados con la exposición a PM_{10} son menos frecuentes que los asociados a la exposición a O_3 , son más serios (Hall *et al.* 1992). Incluso efectos que tienen poca probabilidad de ocurrir pueden significar un número considerable de casos.

Sin embargo, si se lograra un control adecuado de la contaminación ambiental, se lograrían beneficios sustanciales en el área de la salud, no sólo desde el punto de vista económico, sino también en una mejoría importante de la calidad de vida de los habitantes de la gran ciudad.

Comparación de las Normas de Calidad del Aire OMS, EPA (USA) y México

En el Cuadro 6 se presentan los estándares de calidad del aire que se han fijado para México, para los Estados Unidos de América y por la OMS. Estos valores en México se han establecido tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países y las recomendaciones de organismos internacionales, ya que no se cuenta con los recursos ni la infraestructura para realizar los estudios necesarios.

Las guías de calidad del aire son valores límite para la prevención de efectos ambientales en la salud, los cuales se derivan de estudios toxicológicos y epidemiológicos. Los estándares o normas de calidad del aire son lineamientos promulgados por los gobiernos, que adicionalmente consideran concentraciones reales, disponibilidad de tecnologías para su cumplimiento, costos de control, variables socioeconómicas, culturales y concentraciones preexistentes o de origen natural.

El bióxido de azufre proviene principalmente de la quema de combustibles que contienen azufre, como el combustóleo que es empleado fundamentalmente en la industria, las termoeléctricas y los establecimientos de servicio. Por ser un combustible de baja calidad con un contenido promedio de 4.2% de azufre, las emisiones contaminantes producidas al ser quemado son sumamente agresivas al medio ambiente (México-DDF *et al.* 1990).

En este sentido PEMEX se comprometió a elaborar diesel y combustóleo con bajos contenidos en azufre y recuperación de azufre en la refinería 18 de marzo (México-DDF *et al.* 1990).

Desde 1986 la Comisión Federal de Electricidad junto con PEMEX, han mantenido la política de sustituir durante la época invernal el combustóleo que emplean en la generación eléctrica, por gas natural. La sustitución fue cada vez mayor en tiempo y volumen y en 1990 se alcanzó su punto óptimo de proceso, de tal manera que las centrales termoeléctricas operan todo el año con una relación promedio de 80% de gas natural y 20% de combustóleo (México-DDF *et al.* 1990).

CUADRO 6
Comparación de Criterios Mexicanos con los criterios de
la OMS y de la EPA de EUA $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ppm).

Contaminante	Tiempo promedio	MÉXICO	GUÍAS OMS	U.S.A. EPA
Partículas Suspendidas Totales, PST.	Anual ^a	75 ^c		75
	24 Horas	260		260
Partículas Fracción, PM 10.	Anual ^a	50 ^c		50
	24 Horas	150		150
Bióxido de Azufre, SO ₂ .	Anual ^b	79 (0.03)	50 (0.02)	79 (0.03)
	24 Horas	341 (0.13)	125 (0.04)	341 (0.13)
	1 Hora			1 046 (0.40)
Bióxido de Nitrógeno, NO ₂ .	Anual ^b		40-50	100 (0.05)
	24 Horas	395 (0.21)	(0.02)	300 (0.16)
	1 Hora		200 (0.11)	
Ozono, O ₃ .	8 Horas		120 (0.06)	
	1 Hora	216 (0.11) ^d		235 (0.12)
Monóxido de Carbono, CO.	Media diaria	12 595 (11)	10 000 (9)	10 000 (9)
	8 Horas ^b		30 000	40 000 (35)
	1 Hora		(25)	

^a Media Geométrica; ^b Media Aritmética; ^c No debe ser excedido más de una vez al año.; ^d No debe ser excedido más de una vez cada tres años.

Fuentes: Normas Oficiales Mexicanas publicadas en el Diario Oficial el día viernes 23 de diciembre de 1994. Secretaría de Salud (30)

Update and Revision of the Air Quality Guidelines for Europe (WHO) (31); 40 CFR (Code of Federal Regulations), Part 50(32)

Normas Oficiales Mexicanas publicadas en el Diario oficial el día viernes 23 de diciembre de 1994. Secretaría de Salud (SSA, 1994),

Update and Revision of the Air Quality Guidelines (WHO, 1995), Guías de calidad del aire para Europa (WHO, 1987) y 40 CFR (Code of Federal Regulations), Part 50 (CFR, 1994)

A partir de diciembre de 1991, en el Valle de México no pueden utilizarse combustibles que contengan más de 2% de azufre. Por esta razón, el combustóleo pesado usado hasta entonces por la industria y los servicios del Valle de México se ha reemplazado principalmente por gas natural y en menor escala por gasóleo industrial de menor contenido de azufre (México-DDF *et al.* 1996). El gasóleo tiene un contenido máximo de azufre de 2% en peso, lo cual ha permitido reducir cerca del 40% de las emisiones de SO₂ en relación con el combustóleo (México-DDF *et al.* 1993).

El diesel especial es el único tipo de diesel disponible tanto para uso vehicular como industrial y de servicios. Su consumo ha permitido reducir las emisiones de partículas generadas directamente como resultado de la oxidación del azufre contenido en el diesel en forma de sulfatos, así como, las de SO₂ (Romieu *et al.* 1991).

En 1990 la SEDUE exigió la inmediata instalación de medidores continuos en las empresas de mayor potencial de aporte contaminante en la ZMCM. Con esta medida se reforzarán las tareas de control y vigilancia en la ZMCM (México-DDF *et al.* 1990).

La fuente principal de monóxido de carbono la constituye el parque vehicular. Los convertidores catalíticos son muy eficientes en la oxidación del CO, es congruente la disminución de las concentraciones con la renovación del parque (Chile, CONAMA, 1996).

En este contexto en 1995 se estableció en México el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México (1995-2000) (México-DDF *et al.* 1996). Las cuatro metas de este programa cubren, de manera general, todos aquellos aspectos sobre los cuales hay posibilidad de incidir para modificar la calidad del aire. Dichas metas son: 1) Reducción en las emisiones en la industria y servicios; 2) Disminución de las emisiones vehiculares por km; 3) Regulación del total de kilómetros recorridos por vehículos automotores; 4) Abatimiento de la erosión.

Las estrategias del programa se fundamentan en el marco conceptual desarrollado, en el inventario de emisiones y en el conocimiento que se tiene, hasta ahora, de los problemas ambientales, de las tecnologías relevantes y de las experiencias propias e internacionales.

En este contexto, en 1995 se estableció en México el Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México (1995-2000) (México-DDF *et al.* 1996). Las cuatro metas de este programa cubren de manera general todos aquellos aspectos sobre los cuales hay posibilidad

programa cubren de manera general todos aquellos aspectos sobre los cuales hay posibilidad de incidir para modificar la calidad del aire. (México-DDF *et al.* 1996). Dichas metas son: 1) Reducción de las emisiones en la industria y servicios; 2) Disminución de las emisiones vehiculares por kilómetro; 3) Regulación del total de kilómetros recorridos por vehículos automotores; 4) Abatimiento de la erosión. (México-DDF *et al.* 1996)

Las estrategias del programa se fundamentan en el marco conceptual desarrollado, en el inventario de emisiones y en el conocimiento que se tiene hasta ahora de los problemas ambientales, de las tecnologías relevantes y de las experiencias propias e internacionales (México-DDF *et al.* 1996).

Estrategias propuestas para la prevención y el control de la contaminación del aire son las siguientes:

- 1) Mejoramiento e incorporación de nuevas tecnologías en la industria y los servicios;
- 2) Mejoramiento e incorporación de nuevas tecnologías en vehículos automotores;
- 3) Mejoramiento y sustitución de energéticos en la industria y los servicios;
- 4) Mejoramiento y sustitución de energéticos automotrices;
- 5) Oferta amplia de transporte público seguro y eficiente;
- 6) Integración de políticas metropolitanas (desarrollo urbano (vías carreteras y puentes), transporte y medio ambiente);
- 7) Incentivos económicos;
- 8) Inspección y vigilancia industrial y vehicular;
- 9) Información y educación ambientales y participación social. Además, el programa incluye importantes acciones de vigilancia e información epidemiológica a cargo de la Secretaría de Salud (México-DDF *et al.* 1996)).

Hay preocupación internacional por los problemas de salud como consecuencia de la contaminación del aire. Por ello son numerosas las medidas que se han tomado, a nivel internacional, para combatir la contaminación atmosférica. En el marco del Acuerdo sobre la Contaminación Transfronteriza del Aire de Largo Alcance adoptada el día 13 de noviembre de 1979 y que entró en vigor el día 16 de marzo de 1983, se desarrollaron los siguientes protocolos con el objetivo de combatir la contaminación del aire (UN-ECE, 1995):

- A) Protocolo de Helsinki (1985) sobre la reducción de la emisiones de compuestos de azufre o sus flujos transfronterizos al menos en un 30%.
- B) Protocolo de Sofía (1988) en relación al control de emisiones de óxidos de nitrógeno o sus flujos transfronterizos.
- C) Protocolo de Ginebra (1991) en relación al control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles o sus flujos transfronterizos.
- D) Protocolo de Oslo (1994) sobre la ulterior reducción de emisiones de azufre adoptado.

Los países se comprometieron a esforzarse para limitar y, en la medida de lo posible, gradualmente reducir y prevenir la contaminación del aire incluyendo la contaminación transfronteriza del aire de largo alcance (Artículo 2); Desarrollar políticas y estrategias que sirvieran como un medio para combatir la descarga de contaminantes al aire (Artículo 3); Intercambiar información sobre el tema y revisar sus políticas con el objetivo de combatir la descarga de contaminantes al aire (Artículo 4); Intercambiar la información disponible sobre políticas y estrategias a nivel nacional, subregional y regional para el control de compuestos de azufre y otros principales contaminantes del aire (artículo 8) (UN-ECE, 1995).

Con el fin de lograr tales propósitos, los países firmantes han ido implementando una serie de medidas tanto sobre fuentes fijas como móviles, para el control tecnológico de la contaminación del aire, basándose fundamentalmente en la llamada "Mejor Tecnología Disponible o Practicable". En algunos países el concepto de mejor tecnología disponible o practicable, se encuentra explícitamente especificada en la legislación, mientras que en otros, se fijan como condición en las licencias o permisos requeridos para iniciar actividades potencialmente contaminantes (UN-ECE, 1995).

La implementación de las medidas de control de la contaminación del aire ha conducido, para el conjunto de los 21 países que firmaron el protocolo de Helsinki, a una reducción del 48% de las emisiones de SO₂ desde 1985 hasta 1993. Para Europa incluyendo los países que no firmaron el protocolo se ha observado una reducción del 45% de las emisiones de este contaminante desde 1980 hasta 1993. Asimismo, para todas las partes que firmaron el protocolo de Sofía en 1988, aunque hasta 1993 no se dispone de datos para todos

los países del conjunto, las emisiones de NO_x se estabilizaron en 1990 a los niveles de 1987 y en 1993 estas se redujeron en un 4% (UN-ECE, 1995).

Una recomendación clave de 1992 de la "Cumbre de la Tierra" en Río de Janeiro, fue que cada gran ciudad prepare su propia "Agenda 21 Local" para mejorar su medio ambiente y permitir un desarrollo sustentable. Una componente de estos programas se refiere al desarrollo de políticas de transporte sustentables, en este sentido, diferentes estrategias fueron propuestas por la OCDE en la Conferencia Europea de Ministros de Transporte (Walter *et al.* 1995).

Por último, es importante mencionar que estudios recientes de toxicología experimental y epidemiológicos, sugieren que la fracción de partículas más importante en cuanto a sus efectos adversos sobre la salud, son las partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) procedentes de la contaminación, y quizás las partículas ultrafinas (que contienen sulfatos, nitratos y ácidos fuertes, y elementos traza, tales como metales de transición), debido a que penetran en profundidad en los pulmones y pueden causar reacciones inflamatorias. El material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$) contiene una mayor superficie de agregación que la fracción gruesa (PM_{10}) lo cual facilita la absorción de componentes potencialmente tóxicos y la disolución o absorción de contaminantes gaseosos y su subsecuente depositación en la región torácica. Por lo tanto, es extremadamente importante monitorear el material particulado fino y definir un estándar para su concentración en el ambiente con la finalidad de proteger la salud de la población. Debido a esto, la EPA ha propuesto revisar los estándares primarios actuales respecto al material particulado, agregando dos nuevos valores límite de concentración o estándares primarios para partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) (UNEP/WHO, 1994 y CFR, 1996).

- $\text{PM}_{2.5}$ media anual de 15 mg/m^3

- $\text{PM}_{2.5}$ promedio de 24 horas de 50 mg/m^3

Estos nuevos límites tienen el objeto aumentar la protección en contra de los efectos adversos sobre la salud relacionados con el material particulado, entre los cuales se incluyen: la mortalidad prematura, el aumento en las admisiones hospitalarias, el incremento en los síntomas respiratorios y las enfermedades en niños e individuos con problemas cardiopulmonares, función pulmonar disminuida y alteraciones en el tejido y la estructura del pulmón y en los mecanismos de defensa del tracto respiratorio.

II. OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar los niveles de contaminación del aire en la ZMCM.

Objetivos específicos:

1. Discutir la problemática de la contaminación del aire en la ZMCM.
2. Revisar en particular el Programa Integral de Control de la Calidad del Aire que se ha implementado en la Ciudad de México y su impacto en la evolución de las concentraciones de contaminantes del aire durante el período 1989-1997.
3. Evaluar este Programa, y hacer recomendaciones para mejorar su efectividad que servirán de marco para otras posibles políticas de control de la contaminación del aire en la ZMCM.

III. MATERIAL Y MÉTODOS.

Se seleccionaron cinco estaciones de monitoreo, una de cada zona de la ZMCM: Merced de la Zona Centro, Cerro de la Estrella de la Zona Sureste, Tlalnepantla de la zona Noroeste, Xalostoc de la Zona Noreste y Pedregal de la Zona Suroeste, ver Figura 1.

De los datos que nos proporcionaron los administradores de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA), fueron agrupados para facilitar su procesamiento en archivos separados por contaminante, por estación de monitoreo y por año de muestreo, para las estaciones y contaminantes seleccionados, las PTS se obtuvieron de la Red Manual de Monitoreo Ambiental.

Para estas cinco estaciones se eligieron los contaminantes más importantes en cuanto a su riesgo para la salud y concentraciones en la ZMCM, O_3 , y NO_2 , SO_2 , CO , PM_{10} y PTS, los cuales fueron analizados estadísticamente de la siguiente manera: para las PTS, PM_{10} , SO_2 y NO_2 se determinó la media aritmética anual además del primero y el segundo máximos diarios; en el caso del CO se calculó el número de días en los que la norma para este contaminante fue excedida (11 ppm), así como el primero y el segundo máximos (promedio móvil de 8 horas), para el O_3 se calculó el número de horas de excedencia de la norma y también el primero y el segundo máximos anual (1 h), durante el período de 1989 a 1997.

II. OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar los niveles de contaminación del aire en la ZMCM.

Objetivos específicos:

1. Discutir la problemática de la contaminación del aire en la ZMCM.
2. Revisar en particular el Programa Integral de Control de la Calidad del Aire que se ha implementado en la Ciudad de México y su impacto en la evolución de las concentraciones de contaminantes del aire durante el período 1989-1997.
3. Evaluar este Programa, y hacer recomendaciones para mejorar su efectividad que servirán de marco para otras posibles políticas de control de la contaminación del aire en la ZMCM.

III. MATERIAL Y MÉTODOS.

Se seleccionaron cinco estaciones de monitoreo, una de cada zona de la ZMCM: Merced de la Zona Centro, Cerro de la Estrella de la Zona Sureste, Tlalhepantla de la zona Noroeste, Xalostoc de la Zona Noreste y Pedregal de la Zona Suroeste, ver Figura 1.

De los datos que nos proporcionaron los administradores de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA), fueron agrupados para facilitar su procesamiento en archivos separados por contaminante, por estación de monitoreo y por año de muestreo, para las estaciones y contaminantes seleccionados, las PTS se obtuvieron de la Red Manual de Monitoreo Ambiental.

Para estas cinco estaciones se eligieron los contaminantes más importantes en cuanto a su riesgo para la salud y concentraciones en la ZMCM, O_3 , y NO_2 , SO_2 , CO , PM_{10} y PTS, los cuales fueron analizados estadísticamente de la siguiente manera: para las PTS, PM_{10} , SO_2 y NO_2 se determinó la media aritmética anual además del primero y el segundo máximos diarios; en el caso del CO se calculó el número de días en los que la norma para este contaminante fue excedida (11 ppm), así como el primero y el segundo máximos (promedio móvil de 8 horas), para el O_3 se calculó el número de horas de excedencia de la norma y también el primero y el segundo máximos anual (1 h), durante el período de 1989 a 1997.

Para el análisis se utilizaron los procesadores siguientes. El manejador de bases de datos DBASE III plus (Ashton-Tate, 1987) para preparar las bases de datos por estación de monitoreo, por contaminante y por año de muestreo, de 1989 a 1997, y un paquete para análisis estadístico STATA (STATA Corporation, 1993), para determinar la media aritmética anual, y el primero y el segundo máximos, así como el número de veces de excedencia de la norma y los promedios móviles, de acuerdo a como se describió en el párrafo anterior.

IV. RESULTADOS.

Evolución de la contaminación del aire desde 1989 hasta 1997.

Partículas

Partículas totales en suspensión (PTS)

En la ZMCM se ha observado un descenso en la concentración promedio anual de PTS durante el período 1989-1997. En concreto desde 1989 hasta 1990 (período anterior a la implementación del PICCA) se observó una reducción global del promedio anual de este contaminante de 41 mg/m^3 , considerando el promedio anual de las 5 estaciones contempladas en este trabajo, sin embargo, este descenso fue más marcado después de la implementación del PICCA, período de 1991-1997, mostrándose un descenso global de 80 mg/m^3 (Gráfica 1).

A pesar de ello, cabe destacar que todas las estaciones registraron, durante todo el período, concentraciones de PTS por encima de la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (US-CFR, 1996), para evaluar la calidad del aire en períodos largos (75 mg/m^3 concentración promedio anual) la cual es la norma para PTS que estaba en vigor desde 1995.

El primer máximo ha mostrado una importante disminución durante el período estudiado, observándose un rango entre $523\text{-}1331 \text{ mg/m}^3$ en 1989 y entre $153\text{-}747 \text{ mg/m}^3$ en 1997.

Cabe destacar que la estación de Xalostoc es la que ha venido registrando las concentraciones más elevadas de partículas, esto se debe a que se encuentra ubicada en una zona industrial, cercana a la autopista de Pachuca y además registra los polvos generados por una maderería muy cercana y las calles sin pavimentar que la rodean. Esto hace que los datos registrados no sean representativos de la zona (México-DDF *et al.* 1993).

Para el análisis se utilizaron los procesadores siguientes. El manejador de bases de datos DBASE III plus (Ashton-Tate, 1987) para preparar las bases de datos por estación de monitoreo, por contaminante y por año de muestreo, de 1989 a 1997, y un paquete para análisis estadístico STATA (STATA Corporation, 1993), para determinar la media aritmética anual, y el primero y el segundo máximos, así como el número de veces de excedencia de la norma y los promedios móviles, de acuerdo a como se describió en el párrafo anterior.

IV. RESULTADOS.

Evolución de la contaminación del aire desde 1989 hasta 1997.

Partículas

Partículas totales en suspensión (PTS)

En la ZMCM se ha observado un descenso en la concentración promedio anual de PTS durante el período 1989-1997. En concreto desde 1989 hasta 1990 (período anterior a la implementación del PICCA) se observó una reducción global del promedio anual de este contaminante de 41 mg/m^3 , considerando el promedio anual de las 5 estaciones contempladas en este trabajo, sin embargo, este descenso fue más marcado después de la implementación del PICCA, período de 1991-1997, mostrándose un descenso global de 80 mg/m^3 (Gráfica 1).

A pesar de ello, cabe destacar que todas las estaciones registraron, durante todo el período, concentraciones de PTS por encima de la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (US-CFR, 1996), para evaluar la calidad del aire en períodos largos (75 mg/m^3 concentración promedio anual) la cual es la norma para PTS que estaba en vigor desde 1995.

El primer máximo ha mostrado una importante disminución durante el período estudiado, observándose un rango entre $523\text{-}1331 \text{ mg/m}^3$ en 1989 y entre $153\text{-}747 \text{ mg/m}^3$ en 1997.

Cabe destacar que la estación de Xalostoc es la que ha venido registrando las concentraciones más elevadas de partículas, esto se debe a que se encuentra ubicada en una zona industrial, cercana a la autopista de Pachuca y además registra los polvos generados por una maderería muy cercana y las calles sin pavimentar que la rodean. Esto hace que los datos registrados no sean representativos de la zona (México-DDF *et al.* 1993).

Partículas de diámetro menor de 10 mm (PM₁₀)

Las partículas respirables (PM₁₀) siguen siendo un problema de contaminación del aire. Durante todo el período 1989-1997 se presentaron concentraciones promedio anuales por encima de la norma de la EPA de 50 mg/m³ (Gráfica 2).

En la ZMCM en general los promedios anuales de PM₁₀ muestran una tendencia decreciente desde 1989 hasta 1990 en todas las estaciones de monitoreo, mostrándose un descenso global del promedio anual de 24 mg/m³, sin embargo, de 1991 a 1997 se observa una tendencia más o menos estable, aunque se observa un incremento en el año 1993. (Gráfica 2)

En el primer máximo diario se ha observado un descenso importante, en las cinco estaciones, durante el período 1989-1997, mostrándose un rango entre 230-613 mg/m³ en 1989 y entre 225-319 mg/m³ en 1997.

Dióxido de azufre.

En la Gráfica 3 se muestra la tendencia de la concentración promedio anual de SO₂ (ppb) en la ZMCM desde 1989 hasta 1997. La concentración de este contaminante se mantuvo prácticamente constante y por encima de la norma hasta 1992 y a partir de este año se observa un descenso de la concentración de SO₂ hasta alcanzar concentraciones por debajo de la norma (30 ppb) en 1997 el promedio anual de este contaminante se redujo en 43 ppb (promedio de las 5 estaciones) en relación a 1991. El primer máximo diario también ha mostrado un importante descenso desde 1991 hasta 1997, con un rango entre 71-239 ppb en 1991 y entre 34 y 74 ppb en 1997.

Dióxido de nitrógeno.

En la ZMCM la situación global en relación a las concentraciones medias anuales de NO₂ para cada uno de los lugares de monitoreo, parecen estar más o menos estables, con variantes más o menos pronunciadas de un año a otro. Desde 1991 hasta 1995 se ha observado una ligera disminución del promedio anual de NO₂ de 8 ppb (promedio de las 5 estaciones), asimismo se observó una disminución del primer máximo anual, el cual osciló entre 70 y 125 ppb en 1990 y entre 57 y 117 ppb en 1997 (Gráfica 4).

Cabe destacar que durante todo el período de estudio la concentración de este contaminante se mostró por debajo de la norma (50 ppb promedio anual) en todas las estaciones de monitoreo a excepción de la estación de Xalostoc (Gráfica 4).

Monóxido de carbono.

En la ZMCM se observó una tendencia ascendente en el número de días de excedencia de la norma desde 1989 a 1990, en conjunto las 5 estaciones seleccionadas mostraron en promedio un incremento de 37 días de excedencia de la norma de la EPA para este gas (11 ppm promedio móvil de 8 horas) durante ese período. Mientras que a partir de 1990 se aprecia una clara disminución del número de días de excedencia de la norma, con una disminución global desde 1990 hasta 1997 de 78 días (promedio de las 5 estaciones) (Gráfica 5). Nótese que a partir de 1993 se observó un importante descenso en el número de días en que se excedió la norma y en 1997 no hubo ningún día en que esto sucediera para este contaminante. Este mismo comportamiento muestra el primer máximo anual de 8 horas.

Ozono.

En conjunto en la ZMCM el número de horas en que se excedió la norma horaria de ozono (0.11 ppm) muestra una tendencia creciente desde 1989 a 1991, con un incremento global de 646 horas (promedio de las cinco estaciones). A partir de 1991 hasta 1997 se ha observado una reducción en el número de horas que se sobrepasó la norma horaria. Las concentraciones máximas de 1 hora también han mostrado la misma tendencia decreciente, en 1991 el primer máximo de una hora osciló entre 285-400 ppm y en 1997 entre 210-309 ppm. Durante este período el número de veces de excedencia de la norma se incrementó en 1.33 horas (130 h) (promedio de las 5 estaciones). En el año de 1991 se excedió la norma de ozono un mayor número de horas (Gráfica 6). Desde ese año hasta 1997 se ha observado una reducción en el número horas en un 60% (314 horas), los niveles máximos han tendido a disminuir.

V. DISCUSIÓN.

Los resultados de esta revisión muestran que en la Ciudad de México hubo un descenso en el período 1989-1997 en las concentraciones de PTS, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO y O₃, sin embargo, las concentraciones de partículas totales en suspensión y las PM₁₀ aún se encuentran por encima de la norma de calidad del aire de la EPA (75 y 50 mg/m³ respectivamente). Cabe destacar que el mayor impacto del PICCA ha sido sobre los niveles de SO₂, alcanzándose concentraciones por debajo de la norma de la EPA (30 ppb promedio anual) y sobre el CO, cuyos niveles no sobrepasaron la norma ningún día de 1997.

Partículas totales en suspensión (PTS) y Partículas de diámetro menor de 10 µm (PM₁₀)

Respecto a las concentraciones de PTS y de la fracción respirable (PM₁₀) se encontraron, al final del período del estudio, por encima de la norma de EPA (75 y 50 mg/m³ concentraciones promedio anual, respectivamente) Estas elevadas concentraciones de partículas ponen en riesgo la salud de la población debido a la asociación que se ha observado en diversos estudios entre partículas y morbilidad y mortalidad prematura (Romieu y Borja, en prensa), por lo tanto son necesarias nuevas medidas de control que podrían estar justificadas en un contexto costo-beneficio, sobre la base de los beneficios en la salud y el bienestar de la población.

Esta tendencia más o menos estable de los niveles de PM₁₀ después de la implementación del PICCA podría ser debida al incremento en el parque vehicular que la ZMCM ha experimentado durante estos últimos años.

Dióxido de azufre.

En general el mayor impacto de los programas de control de la contaminación atmosférica en los países, ha sido el control de las emisiones de SO₂ debido fundamentalmente al control de la emisión por fuentes fijas y a la reducción del contenido de azufre en el diesel.

El descenso en las concentraciones atmosféricas de SO₂ desde 1988 hasta 1995 se puede atribuir fundamentalmente al mejoramiento de los combustibles que se emplean en la ZMCM, que constituyó la estrategia principal del PICCA, 1990-1994 (México-DDF *et al.* 1990).

Dicho programa tomó las siguientes medidas para reducir las concentraciones de SO_2 : 1) Elaboración de diesel y combustóleo con bajo contenido en azufre, 0.1 y 0.8% respectivamente; 2) Mejoramiento de la recuperación de azufre en la refinería 18 de Marzo; 3) Cambio de combustóleo por gas natural en las industrias; 4) Control de emisiones y reubicación de fundidoras; 5) Mejoramiento de procesos de combustión e instalación de equipos de control en establecimientos de servicios; 6) Utilización de gas natural en las termoeléctricas, hasta contar con combustóleo de bajo contenido en azufre; 7) Suspensión invernal en la operación de unidades de generación; 8) Cierre en 1991 de la refinería.

Dióxido de nitrógeno.

Posiblemente debido a que en 1990 se organizó la verificación vehicular, se introdujeron las gasolinas oxigenadas y el programa "hoy no circula", la presencia de NO_2 en el aire de la ciudad de México ha disminuido ligeramente.

Una de las metas del Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1995-2000 (México-DDF *et al.* 1996), es la reducción de aproximadamente 1 350 ton/año de óxidos de nitrógeno provenientes de los vehículos automotores en circulación.

Monóxido de carbono.

La disminución en el CO puede atribuirse a las medidas de control implementadas por el PICCA, tales como: la verificación vehicular y la incorporación de convertidores catalíticos en los automóviles.

La verificación de los vehículos a diesel reducirá la emisión de humos, CO, e HC. El uso de gas licuado de petróleo puede utilizarse como sustituto de la gasolina en vehículos automotores, su empleo disminuye en un 60% las emisiones de HC y en un 40% las de CO, sin embargo, su uso incrementa la emisión de NO_x (UN, Population Division, 1995).

Ozono.

La concentración de ozono en el aire de las grandes ciudades sigue siendo un problema importante, ya que habitualmente se excede la norma de calidad del aire (0.11 ppm).

En la ZMCM entre 1991 y 1997 su concentración excedió la norma (0.11 ppm) más del 90% del tiempo (México-CMPCCAVM, 1996).

Las altas concentraciones de O_3 constituyen, en la actualidad, el principal problema de contaminación atmosférica en el Valle de México. Los niveles de O_3 superan frecuentemente la norma de calidad del aire, alcanzando concentraciones que superan en más de un 100% el límite establecido. La estación Pedregal, representativa de la zona suroeste de la zona metropolitana, es la que históricamente ha registrado las concentraciones más elevadas de O_3 , con concentraciones persistentemente altas que presentan un comportamiento relativamente estable (México-DDF *et al.* 1996).

Las concentraciones de O_3 en la ZMCM se deben fundamentalmente a la presencia de sus precursoras, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. A pesar de las medidas que se tomaron con la implementación del PICCA en 1990, con la organización de la verificación vehicular, la introducción de gasolinas oxigenadas, la introducción de convertidores catalíticos en los automóviles y el programa "hoy no circula", la presencia de los precursores de O_3 en la atmósfera de la Ciudad de México sigue siendo importante, debido en parte al incremento del parque vehicular desde 1984 hasta 1995.

El mayor problema sigue siendo la alta concentración de PM_{10} en la Ciudad de México, acompañado con concentraciones elevadas de O_3 debido a que el programa de control para estos contaminantes no tuvieron el impacto esperado. Esto podría ser explicado en parte por el rápido crecimiento de la ciudad y de su parque vehicular. En la Ciudad de México cada cinco años, desde 1984, se ha observado un incremento superior al 20% en el número de vehículos y en consecuencia en la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

Diversos estudios epidemiológicos han enfatizado el efecto adverso de partículas finas ($PM_{2.5}$) y O_3 en la salud de la población, ocasionando un incremento de morbi-mortalidad asociada a estos contaminantes. Esta situación ha dado lugar a que la EPA haya propuesto revisar los estándares primarios actuales con respecto al material particulado, agregando dos nuevos valores límite de concentración o estándares primarios para partículas fina ($PM_{2.5}$).

Las medidas adoptadas en los últimos años con la finalidad de frenar el deterioro de la calidad del aire en la ZMCM han tenido buenos resultados relacionados con el control en la tendencia al aumento de la concentraciones de algunos contaminantes como el Pb, SO_2 y CO.

Sin embargo, se ha observado que ciertos contaminantes han alcanzado concentraciones inaceptables por los daños que ocasionan en la salud de la población y sobre los ecosistemas. Este es el caso de los oxidantes fotoquímicos, en particular el O_3 , y de las partículas menores a 10 μm de diámetro (PM_{10}) (Hall, 1992).

VI. CONCLUSIONES.

En este trabajo se hace una revisión de las tendencias en los niveles de contaminación del aire en la ZMCM y se describe de manera breve los esfuerzos para el control de la contaminación del aire realizados por el gobierno de México, se analiza la complejidad de la contaminación del aire, desde el punto de vista de sus fuentes, de las cantidades de contaminantes primarios emitidos, la producción de varios de los contaminantes secundarios originados por reacciones que ocurren en la atmósfera. Se reseñan los Programas para el control de la contaminación ambiental haciendo referencia a los principales medidas en cuanto a control de la contaminación del aire contenidas en estos documentos publicados por la Comisión Metropolitana para el Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, conformada por El Gobierno del Estado de México, La Secretaría de Gobernación, La Secretaría de Hacienda y Crédito Público, la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, La Secretaría de Comercio y fomento Industrial, La Secretaría de Comunicaciones y Transportes, La Secretaría de Desarrollo Social, la Secretaría de Educación Pública, La Secretaría de Salud, El Departamento del Distrito Federal, Petróleos Mexicanos, La Comisión Federal de Electricidad y el Instituto Mexicano del Petróleo.

Se da énfasis a las políticas nacionales e internacionales para normar y controlar: el uso y calidad de combustibles, las modificaciones requeridas en cuanto a tecnología, los estándares de sus emisiones, sus principales efectos adversos sobre la salud y el ambiente, hasta las políticas que se han implementado con este fin en el nivel mundial y en particular en la Ciudad de México.

Se hace una descripción de la evolución de las concentraciones de los principales contaminantes del aire registrados por la RAMA en las estaciones de monitoreo Cerro de la Estrella, Pedregal, Tlalnepantla, Xalostoc y Merced, representativas de cada una de las zonas

en las que se subdivide la ZMCM con el fin de tener una muestra "representativa" de lo que esta pasando en la ZMCM en su conjunto.

Nuestros resultados nos permiten concluir que aunque muchos son los recursos materiales y humanos que se han invertido para controlar la contaminación del aire, no obstante que se han tenido logros importantes en la disminución de las concentraciones en casi todos los contaminantes, aún se observa que las PTS, PM_{10} y el O_3 se encuentran por encima de la norma de calidad del aire y que se requiere del desarrollo y de la implementación de controles tecnológicos, estrategias normativas y políticas que permitan reducir esas concentraciones a los niveles aceptables, indicados en las normas de calidad del aire.

Es necesario introducir en la norma mexicana dos nuevos valores límite de concentración o estándares primarios para partículas finas ($PM_{2.5}$): $PM_{2.5}$ media anual de 15 mg/m^3 y $PM_{2.5}$ promedio de 24 horas de 50 mg/m^3 .

La efectividad de las medidas que se tomaron no fue la que se esperaba, en consecuencia, es importante que México evalúen la citadas medidas para buscar las alternativas más adecuadas para el caso de la ZMCM.

Es necesario considerar otras medidas de control que permitan reducir los contaminantes emitidos por los vehículos automotores, incluyendo combustibles "limpios", reducción del número de vehículos particulares, mejora del transporte público, prohibir la circulación de vehículos en la Zona Centro de la Ciudad.

Es importante la participación ciudadana a la hora de tomar decisiones en cuanto a las políticas de transporte.

No obstante que este estudio es de carácter descriptivo y por ende informativo, permite corroborar la evolución de la contaminación y generar hipótesis acerca de los factores que están interviniendo para dar como resultado las actuales tendencias en el caso particular de la ZMCM. Como se indica en la parte de modelos de calidad del aire, la determinación de las concentraciones en el aire, en zonas específicas de importancia ecológica, por el método directo, nos permite modelar la dispersión de contaminantes de una forma más precisa, aunque éste método es muy costoso, se requiere.

El estudio cuenta con varias limitaciones en cuanto a lo que está sucediendo en la exposición real a los contaminantes del aire, sin embargo nos da una visión de lo que se ha

implementado y las tendencias de la contaminación en la ZMCM, de que hace falta mucha investigación en México acerca toda la gama de efectos sobre la salud que se ha referido en la literatura mundial, se requiere del desarrollo técnico en términos uso-eficiencia y el desarrollo de combustibles no basados en el carbón y en cuanto al mejoramiento de la eficiencia y la calidad de los energéticos, en el uso de nuevas tecnologías en la Industria de la Transformación y la Automotriz, se requiere investigación y desarrollo urbano, principalmente en cuanto a caminos y puentes que agilicen la circulación vial, ya que es inaceptable que en la ciudad más extensa del mundo se cuente con una infraestructura carretera similar a la de zonas rurales de países desarrollados.

Finalmente observamos que las concentraciones de O_3 , PTS y PM_{10} aún están por encima de la norma de EPA, y sabemos que las PM_{10} y más aún las $PM_{2.5}$ son de mayor preocupación dados los efectos sobre la salud que estos producen (e.g. enfermedades crónico-degenerativas), sabemos que en el caso de México, aún no se controlan o erradican las enfermedades transmisibles y que la frecuencia de enfermedades crónico-degenerativas es ya muy alta (FUNDSALUD, 1995, México-INEGI E IISUNAM, 1994). No hemos superado los problemas del mundo en desarrollo y ya tenemos que afrontar los problemas de salud propios de los países desarrollados.

La RAMA, no obstante que actualmente cuenta con 52 estaciones de monitoreo, integrada por tres subsistemas: la red automática, la red manual y la red meteorológica, y una unidad móvil, dos estaciones piloto y los equipos Rass, Ecosonda y DOAS, y que para los fines de describir las tendencias de la contaminación en la ZMCM, no permite realizar estudios en zonas restringidas de importancia ecológica y de salud, e.g. parques y bosques recreativos, zonas hospitalarias, zonas industriales, por lo que debería complementarse con varias unidades móviles y monitores personales para realizar este tipo de estudios, con el fin de describir en forma más precisa y realista la distribución de contaminantes en estas zonas.

Se requiere mayor investigación sobre los impactos de los contaminantes atmosféricos sobre la salud humana y el ambiente, especialmente para el "smog" fotoquímico, los aerosoles ácidos y los contaminantes del aire en interiores. Las emisiones biológicamente generadas deben cuantificarse más precisamente a fin de mejorar la comprensión de los procesos

atmosféricos e investigar los efectos ambientales de los combustibles reformulados, sustitutos y biomasa.

Se requerieren mejores modelos de desarrollo para evaluar apropiadamente las medidas de control en cuanto a relevancia y el costo-efectividad, así como establecer estándares de emisión estrictos para promover el desarrollo tecnológico en controles de emisión y la utilización de combustibles menos contaminantes como el gas natural. Pueden ser buenas alternativas de control la planificación efectiva del uso del suelo y la reubicación industrial.

Debe fomentarse la introducción de tratamiento en escapes, el uso de catalizadores y trampas de vapor, la inspección y mantenimiento vehicular regulares, así como la reducción de la cantidad de Pb, benceno, tolueno y xileno, en los combustibles, y del azufre, los compuestos aromáticos y el petróleo pesado en el diesel. En el transporte, debe promoverse el uso del gas natural comprimido, el gas de petróleo líquido y el alcohol, y el desarrollo de energía eléctrica (células de combustible), así como el uso de transporte público.

La mayor eficiencia en la combustión y la conservación, podrían disminuir el consumo energéticos y por lo tanto las emisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Aguilar AG, Ezcurra E, García T, Mazari-Hiriart M, Pisanty I, 1995. The Basin of México. En: Kasperson JX, Kasperson RE, Tumer II BL, 1995. Regions at risk: comparisons of threatened environments. New York USA: United Nations University Press:305-367.

Arias-Osorio A, 1990. Procesamiento de información meteorológica para estimar la difusión de contaminantes en el aire. Presentado en: *VII Congreso Nacional Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 19-21 sep 1990*. México: SMISA (D37).

Ashton-Tate, 1987. *DBASE III plus, versión 1, IBM/MSDOS*. California, EUA: Ashton-Tate.

Automobile International, 1989. *World automotive market 1989*. New York, USA. Automobie International.

Bascom R, Bomberg PA, Cvosta DA, *et al.* A Committe of the environmental and occupational health assambley of the American Thoracic Society 1995. State of the art review: Health effects of outdoorair pollution. *Am J Respir Crit Care Med* (en prensa)

Bravo-Álvarez H, Camacho CMaR, Saavedra RI, Sosa ER y Torres JR, 1988. NO_x y SO_x en PTS y respirables en la Cd. de México como indicadores de estrategias ambientales (1981-1987). Presentado en: *Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Querétaro Qro, México 1988*.

Bravo-Álvarez H, Sosa-Echeverría R y Torres-Jardón R, 1990. Pronóstico del impacto en el calidad del aire por procesos industriales (complejo Industrial Pajaritos, Veracruz). *Ingeniería Industrial* 3(7):8-18.

Bravo-Álvarez H, Sosa Echeverría R y Torres Jardón R, 1990. Variación espacial, temporal y tendencia del SO₂ en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1986-1989). SMISA, Presentado en: *VII Congreso Nacional Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 19-21 sep 1990*. México: SMISA.

Bravo-Álvarez H, 1987. *La contaminación del aire en México*. México DF: Fundación Universo XXI.

Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región Metropolitana, 1996. Antecedentes para la declaración de zona saturada de la región metropolitana. Resumen ejecutivo. Santiago de Chile, Chile: CONAMA.

Chandler TJ, 1976. *Urban climatology and its relevance to urban design*. Geneva Switzerland: World meteorological Organization. (WMO No. 438).

Chen BH, Hong CJ, Pandey MR y Smith K, 1990. Indoor air pollution en developing countries. *Wild Hlth Statist Quart* 43:127-38.

Firket J, 1936. Fog along the Mesue Valley. *Trans Faraday Soc* 32:1192-7.

FUNDSALUD, 1995. *Economía de la salud. Propuestas para el avance del sistema de salud en México*. México DF: FUNDSALUD.

García-Gutiérrez A, 1990. Tendencias en las concentraciones atmosféricas de partículas totales en la Ciudad de México entre 1976 y 1986. Presentado en: *VII Congreso Nacional Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 19-21 sep 1990*. México: SMISA.

Haliewics J, Lamparczyk H, Grybowski J y Radeki A, 1987. On the aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbon levels in the southern Baltic Sea atmosphere. *Atmos Environ* 21:2057-63.

Hall JV, Winer AM, Kleinman MT, Lummann FW, Brajer V, Colome SD, 1992. Valuing the health benefits of clean air. *Science* 255:812-17.

Harrison RM, 1990. *Pollution, causes, effects and control*. 2 Ed. London, UK. Royal Society of Chemistry.

Heigom KC, Davis AE y Murphy MC, 1991. Wind tunnel modeling of roadways: comparison with mathematical models. *J Air Waste Manage Asses* 41:1469-75.

Hernández-Ávila M, 1995. *Valuación económica de los beneficios de reducir la contaminación del aire en la Ciudad de México*. Cuernavaca, Morelos, México: INSP.

Holzworth G, 1967. Mixing depth windspeeds and air pollution potential in US. *J Appl Meteor* 6:1039-44.

Jauregui E, 1988a. Efectos del clima urbano sobre los niveles de contaminantes en la Ciudad de México. *Geografía y Desarrollo* 1(2).

Jauregui E. 1988b. Local wind and air pollution interaction in the Mexico Basin. centro de ciencias de la Atmosfera. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México.

Lee D, 1979. Contrasts in warming and cooling rates at urban and rural site. *Weather* 24:60-66.

Marchuk GI, 1982. Mathematical issues of industrial effluent optimization. *J Meteorol Soc Japan* 60:481-5.

Marchuk GI, 1986. *Mathematical models in environmental problems*. New York, USA. Elsevier.

México-Comisión metropolitana para la Prevención y control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, 1996. La contaminación atmosférica en el Valle de México; Acciones para su control 1988-1994. México DF, México: CMPCCAVM.

México-DDF, Gobierno del Estado de México, SEMARNAP y SSA, 1996. *Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México, 1995-2000*. México, DF: Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud.

México-DDF, Gobierno del Estado de México, SEMARNAP y SSA, 1990. *Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica de la ZMCM, Octubre 1990*. México, DF: Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud.

México-DDF, Gobierno del Estado de México, SEMARNAP y SSA, 1993. *Programa Integral contra la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Partículas Suspensas: Situación actual en la ZMCM, 1993*. México, DF: Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud.

México-INEGI, IISUNAM, 1994. *La transición demográfica en América Latina y El Caribe. IV Conferencia Latinoamericana de la Población*. México DF: INEGI, UNAM, PROCAP

México-Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), 1979. *El índice mexicano de calidad del aire (IMEXCA)*. México D.F: Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente, Dirección General de Saneamiento Atmosférico.

México-Secretaría de Salud, Subsecretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Normas oficiales mexicanas en materia de protección ambiental. *Diario Oficial* viernes 23 de diciembre de 1994.

México-SEDUE, 1987. Políticas y estrategias de abatimiento y control de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de la Ciudad de México. En: *Primer Seminario Internacional sobre administración de la calidad del aire, 2-6 noviembre de 1987*, Metepec, Puebla. México: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

México-SEDUE y Subsecretaría de Ecología, 1986. *Índice metropolitano de calidad del aire*. México. Corporación Internacional Tecno Consult. (P-860124)

México-SEDUE, 1985. *Índice metropolitano de calidad del aire, IMECA*. México D.F. SEDUE, Subsecretaría de Ecología, Coordinación de Asesores, Asesoría Técnica.

México-SEDUE, 1986a. *Estado del medio ambiente en México*. México DF: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

México-SEDUE, 1986b. *Informe sobre el medio ambiente en México*. México DF: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

Penenko VV y Raputa VF, 1982. Experimental planning in inverse problems of pollutant transport. *Sov Meteorol Hydrology* 8:28-35.

Romieu I, 1995. Epidemiological studies of the health effects of air pollution due to motor vehicles. En: Mage DT y Zali O. *Health effects of air pollution*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

Romieu I, Weitzenfeld H, Finkelman J, 1991. Urban air pollution in Latin America and the Caribbean. *J Air Waste Manage Assoc* 41(9):1166-70.

Romieu I y Borja-Aburto V, *Particulate air pollution and daily mortality: Generalizability of the results to Latin America Countries*. (Enviado a: Salud Pública de México).

Schwartz J y Dockery DW, 1992. Particulate air pollution and daily mortality in Steubenville, Ohio. *Am J Epidemiol* 135:12-9.

Schwartz J y Marcus A, 1990. Mortality and air pollution in London, a time series analysis. *Am J Epidemiol* 131:185-94.

Shrenk HH, Heimann H, Clayton GD, et al. 1949. *Air pollution in Donora, PA: epidemiology of the unusual smog episode of October 1948. Preliminary report*. Washington, DC: US Public Health Service. (Public Health Bulletin No. 306).

Skiba YuN, 1993a. Balanced and absolutely stable implicit schemes for the main and adjoint pollutant transport equations in limited area. *Rev Int Contam Ambient* 9(2):39-51.

Skiba YuN, 1993b. On a method of estimating the pollution concentration. En: *Proceedings of International Symposium on Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmental Effects. Cancún, México, August 22-25, 1993:167-72.*

Skiba YuN, 1993c. Solution of the main and adjoint pollutant transport equations in limited area and spherical shell by splitting-up method. En: *II Congreso Iberoamericano del Medio Ambiente Atmosférico (CIAMAA/93), México DF Octubre 27-29, 1993d:130-32.*

Skiba YuN, 1995. Pollution concentration estimates in ecologically important zones. En: *Proceedings of the X World Clean Air Conference ESPOO, Finland, Helsinki, May 28-June 2, 1995, Vol 3, paper No. 525.*

Skiba YuN, 1998. Air pollution estimates. *World Resource Review*. En prensa.

Sliggers J, 1992. The car model: calculation of air pollution from road traffic, a calculation method for the determination of air quality in city streets in the Netherlands. In: Drop H. van y Kallos G. eds. *Air pollution modelling and its application*. New York USA: Plenum. vol 17:377-94.

Stata Corporation. *Stata reference manual*, 6th. College Station TX: 1993.

UK-BP, 1989. *BP Statistical review of world energy*. London, UK. British Petroleum.

UK-MARC, 1985. *Historical monitoring*. London, UK. Monitoring and Assessment Research Centre. (Technical Report No. 31).

UK-Ministry of Health, 1954. *Mortality and morbidity during the London fog of December 1952*. London, UK: HMSO. (Reports on public health and medical subjects no. 95).

UN-Economic Commission for Europe. *Convention on long-range transboundary air pollution; Strategies and policies for air pollution abatement*. Geneva, Switzerland: United Nations, 1995.

UNEP, 1992. *United Nations Environment Programme environment data report*. 3 Ed 1991-1992. Oxford UK. Basil Blackwell.

UNEP/WHO, GEMS/AIR, 1994. *Methodology review handbooks Vol. 1: Quality assurance in urban air quality monitoring*. Nairobi: United Nations Environment Programme.

UNEP/WHO, 1988. *Assessment of urban air quality*. Nairobi, Kenia. United Nations Environment Programme.

United Nations (UN), 1995. *Statistical Yearbook 1993/94*. New York, USA: United Nations.

UN, Population Division, 1995. *World urbanization prospects: The 1994 Revisión*. Nueva York, USA:ONU.

Uribe UC, García-del-Busto A, Velásquez D y Manjarrez A. 1972. Contribución de los modelos matemáticos para el estudio de la contaminación atmosférica. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo* 4(3):64-9.

US, Code of Federal Regulations, 1996. Particulate matter; proposed rule. 40 CFR Part 50. *Federal Register* 61(241).

US, Code of Federal Regulations, 1994. Protection of the environment National Archives and Records Administration. 40 CFR Parts 50 and 58. Washington DC, USA., july 1, 1994.

US-EPA/CPSC, 1988. *The inside story: a guide to indoor air quality*. Washington, USA. Environmental Protection Agency. (EPA/400/1-88/004).

Walter F, Suter S y Neuenschwander R, 1995. Sustainable transport policies; state of the art. En: health and the crossroads. Fletcher T y McMichael AJ. *Transport policy and urban health. Fifth Annual Public health Forum held in London School of Hygiene and Tropical Medicine*. London England: John Wiley & Sons:286-98.

WHO, 1987. *Air quality guidelines for Europe*. Copenhagen, DK. World Health Organization. Regional Office for Europe. (WHO Regional Publications, European Series No. 23).

World Bank, Country Operations Division. Country Department IV. Latin America and the Caribbean Regional Office. Chile, 1994. *Managing Environmental Problems: Economic analysis of selected issues*. Santiago de Chile: World bank.

World Health Organization/United Nations Environment Programme (WHO/UNEP), 1992. *Urban air pollution in megacities of the world*. Oxford, UK: Blackwell.

World Health Organization, 1995. *Update and Revision of the air Quality Guidelines for Europe*. Denmark: WHO.

Cuadro 7.
Evaluación de las partículas (PM10 en µg/m3) en
la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Año	Estación	MA anual	1 Máx (24 h)	2 Máx (24 h)
1989	Cerro de la Estrella	195	607	533
	Pedregal	68	230	128
	Merced	137	613	219
	Tlalnepantla	140	362	354
	Xalostoc	228	613	427
1990	Cerro de la Estrella	137	453	296
	Pedregal	64	107	100
	Merced	127	342	225
	Tlalnepantla	126	255	219
	Xalostoc	196	338	293
1991	Cerro de la Estrella	86	300	153
	Pedregal	62	200	97
	Merced	79	122	115
	Tlalnepantla	82	130	116
	Xalostoc	127	300	197
1992	Cerro de la Estrella	90	466	217
	Pedregal	51	109	93
	Merced	64	109	106
	Tlalnepantla	72	122	119
	Xalostoc	139	287	265

CUADRO 7. (cont)
Evolución de las partículas (PM10 en µg/m3) en la
Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Año	Estación	MA anual	1 Máx (24 h)	2 Máx (24 h)
1993	Cerro de la Estrella	77	143	139
	Pedregal	57	104	101
	Merced	109	220	201
	Tlalnepantla	187	303	295
	Xalostoc	92	180	165
1994	Cerro de la Estrella	90	502	489
	Pedregal	55	288	223
	Merced	79	159	158
	Tlalnepantla	105	643	545
	Xalostoc	163	192	167
1995	Cerro de la Estrella	67	196	163
	Pedregal	45	143	117
	Merced	52	187	176
	Tlalnepantla	58	206	167
	Xalostoc	83	239	235
1996	Cerro de la Estrella	57	157	126
	Pedregal	49	122	116
	Merced	61	147	141
	Tlalnepantla	84	275	250
	Xalostoc	126	276	270
1997	Cerro de la Estrella	72	225	194
	Pedregal	64	264	229
	Merced	98	319	204
	Tlalnepantla	66	230	198
	Xalostoc	106	291	276

CUADRO 8.
Evolución del bióxido de azufre (ppb) en la Zona
Metropolitana de la Ciudad de México

Año	Estación	MA anual	1 Máx (24 h)	2 Máx (24 h)
1989	Cerro de la Estrella	40	110	83
	Pedregal	28	77	76
	Merced	65	165	162
	Tlalnepantla	56	119	117
	Xalostoc	69	163	161
1990	Cerro de la Estrella	40	99	70
	Pedregal	50	92	81
	Merced	69	128	123
	Tlalnepantla	50	118	101
	Xalostoc	59	170	142
1991	Cerro de la Estrella	46	91	89
	Pedregal	55	97	95
	Merced	77	170	167
	Tlalnepantla	36	71	69
	Xalostoc	76	239	213
1992	Cerro de la Estrella	32	88	79
	Pedregal	41	102	89
	Merced	46	160	148
	Tlalnepantla	53	205	137
	Xalostoc	71	169	165

CUADRO 8. (cont.)**Evolución del bióxido de azufre (ppb) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México**

Año	Estación	MA anual	1 Máx (24 h)	2 Máx (24 h)
1993	Cerro de la Estrella	19	69	49
	Pedregal	13	70	66
	Merced	23	88	85
	Tlalnepantla	22	114	83
	Xalostoc	26	128	101
1994	Cerro de la Estrella	17	72	61
	Pedregal	1	38	35
	Merced	19	54	52
	Tlalnepantla	22	73	67
	Xalostoc	23	96	76
1995	Cerro de la Estrella	13	38	35
	Pedregal	14	35	29
	Merced	15	46	44
	Tlalnepantla	16	57	47
	Xalostoc	17	69	50
1996	Cerro de la Estrella	13	44	44
	Pedregal	12	49	38
	Merced	20	106	66
	Tlalnepantla	18	102	62
	Xalostoc	20	96	87
1997	Cerro de la Estrella	13	40	36
	Pedregal	10	34	32
	Merced	14	74	71
	Tlalnepantla	20	71	68
	Xalostoc	19	66	64

Cuadro 9.

**Evolución de la media aritmética anual de bióxido de nitrógeno (ppb)
en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.**

Año	Estación	Media anual	1 Máx (24 h)	2 Máx (24 h)
1989	Cerro de la Estrella	42	97	
	Pedregal	28	67	
	Merced	44	126	
	Tlalnepantla	45	144	
	Xalostoc	44	89	
1990	Cerro de la Estrella	34	74	66
	Pedregal	51	109	103
	Merced	55	125	118
	Tlalnepantla	36	70	70
	Xalostoc	36	77	71
1991	Cerro de la Estrella	52	129	114
	Pedregal	34	92	89
	Merced	43	121	119
	Tlalnepantla	32	112	99
	Xalostoc	45	98	92
1992	Cerro de la Estrella	46	96	96
	Pedregal	35	69	67
	Merced	50	98	94
	Tlalnepantla	36	72	68
	Xalostoc	43	101	93

Cuadro 9. (cont.)**Evolución de la media aritmética anual de bióxido de nitrógeno (ppb)
en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México**

Año	Estación	Media anual	1 Máx (24 h)	2 Máx (24 h)
1993	Cerro de la Estrella	41	101	87
	Pedregal	42	85	83
	Merced	56	104	92
	Tlalnepantla	35	102	84
	Xalostoc	44	90	89
1994	Cerro de la Estrella	36	68	65
	Pedregal	42	76	75
	Merced	52	125	108
	Tlalnepantla	36	78	77
	Xalostoc	37	69	69
1995	Cerro de la Estrella	37	82	81
	Pedregal	32	88	84
	Merced	37	80	77
	Tlalnepantla	32	89	88
	Xalostoc	30	71	70
1996	Cerro de la Estrella	42	102	102
	Pedregal	37	84	84
	Merced	43	89	88
	Tlalnepantla	43	93	93
	Xalostoc	39	119	97
1997	Cerro de la Estrella	37	102	77
	Pedregal	37	79	73
	Merced	28	117	98
	Tlalnepantla	30	79	76
	Xalostoc	32	57	57

Cuadro 10.**Número de días de excedencia de la norma de CO (11 ppm, promedio móvil de 8h) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México**

Año	Estación	Nº días	1 Máx (8 h)	2 Máx (8 h)
1989	Cerro de la Estrella	9	12.8	12.5
	Pedregal	194	16.6	16.6
	Merced	51	43.8	43.8
	Tlalnepantla	0	9.4	8.6
	Xalostoc	39	19.5	19.5
1990	Cerro de la Estrella	43	35.4	35.3
	Pedregal	0	10.0	9.9
	Merced	123	16.8	16.2
	Tlalnepantla	2	11.2	11.2
	Xalostoc	224	14.8	14.4
1991	Cerro de la Estrella	10	15.5	12.6
	Pedregal	6	12.4	12.1
	Merced	70	15.8	15.8
	Tlalnepantla	5	12.7	12.3
	Xalostoc	10	12.2	11.7
1992	Cerro de la Estrella	13	13.8	13.0
	Pedregal	0	9.0	8.4
	Merced	17	12.5	12.4
	Tlalnepantla	4	13.8	13.7
	Xalostoc	30	13.2	12.8

Cuadro 10. (cont.)**Número de días de excedencia de la norma de CO (11 ppm, promedio móvil de 8h) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México**

Año	Estación	Nº días	1 Máx (8 h)	2 Máx (8 h)
1993	Cerro de la Estrella	11	17.1	14.9
	Pedregal	0	6.8	6.5
	Merced	4	14.9	14.9
	Tlalnepantla	5	14.8	13.2
	Xalostoc	2	12.5	11.6
1994	Cerro de la Estrella	0	8.0	7.9
	Pedregal	0	9.0	7.9
	Merced	2	12.8	11.6
	Tlalnepantla	1	7.5	7.35
	Xalostoc	4	13.9	12.8
1995	Cerro de la Estrella	0	7.4	6.8
	Pedregal	0	7.4	67.0
	Merced	0	10.9	8.9
	Tlalnepantla	0	6.4	6.3
	Xalostoc	0	9.0	8.1
1996	Cerro de la Estrella	1	9.0	8.9
	Pedregal	0	5.8	5.3
	Merced	1	11.1	9.6
	Tlalnepantla	0	13.0	12.9
	Xalostoc	3	8.6	2.11
1997	Cerro de la Estrella	0	9.1	8.5
	Pedregal	0	7.5	5.9
	Merced	0	9.6	8.3
	Tlalnepantla	0	7.1	6.8
	Xalostoc	0	9.6	9.2

Cuadro 11
Evolución del promedio anual de partículas suspendidas totales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Año	Estación	Media anual	1 Máx diario	2 Máx diario
1989	Cerro de la Estrella	419	1013	892
	Pedregal	135	768	240
	Merced	237	523	416
	Tlalnepantla	256	731	456
	Xalostoc	579	1331	932
1990	Cerro de la Estrella	368	1026	862
	Pedregal	125	225	213
	Merced	214	393	376
	Tlalnepantla	233	448	445
	Xalostoc	481	1065	873
1991	Cerro de la Estrella	342	836	803
	Pedregal	131	269	258
	Merced	225	543	413
	Tlalnepantla	243	572	449
	Xalostoc	521	865	838
1992	Cerro de la Estrella	291	698	682
	Pedregal	91	189	185
	Merced	166	339	307
	Tlalnepantla	177	350	309
	Xalostoc	378	735	689

Cuadro 11. (cont.)

Evolución del promedio anual de partículas suspendidas totales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Año	Estación	MA anual	1 Máx diario	2 Máx diario
1993	Cerro de la Estrella	343	670	649
	Pedregal	108	190	188
	Merced	192	388	327
	Tlalnepantla	189	391	310
	Xalostoc	433	785	782
1994	Cerro de la Estrella	243	518	506
	Pedregal	101	189	187
	Merced	180	392	345
	Tlalnepantla	187	358	343
	Xalostoc	413	706	650
1995	Cerro de la Estrella	244	597	512
	Pedregal	100	187	181
	Merced	173	357	308
	Tlalnepantla	172	355	325
	Xalostoc	375	727	677
1996	Cerro de la Estrella	227	556	533
	Pedregal	111	399	225
	Merced	180	614	347
	Tlalnepantla	180	430	304
	Xalostoc	365	721	610
1997	Cerro de la Estrella	244	606	427
	Pedregal	100	153	150
	Merced	173	538	435
	Tlalnepantla	172	355	271
	Xalostoc	375	747	720

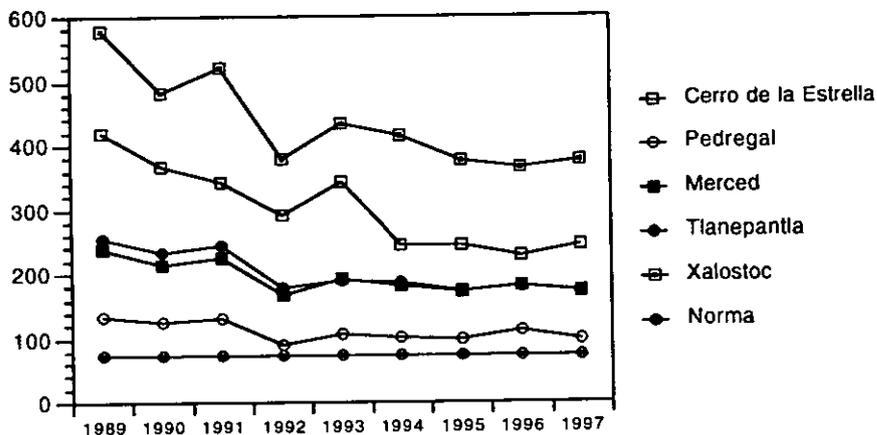
Cuadro 12.
Número de horas de excedencia de la norma horaria de ozono (11 ppb)
en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Año	Estación	Nº horas	1 Máx 1 hora	2 Máx 1 hora
1989	Cerro de la Estrella	308	226	216
	Pedregal	768	340	329
	Merced	295	332	269
	Tlalnepantla	378	346	291
	Xalostoc	202	220	217
1990	Cerro de la Estrella	527	268	255
	Pedregal	1307	403	375
	Merced	851	380	346
	Tlalnepantla	590	301	294
	Xalostoc	151	198	189
1991	Cerro de la Estrella	1071	314	309
	Pedregal	1417	404	375
	Merced	1013	377	373
	Tlalnepantla	1048	343	343
	Xalostoc	634	285	269
1992	Cerro de la Estrella	808	268	247
	Pedregal	1075	402	395
	Merced	872	357	353
	Tlalnepantla	744	294	284
	Xalostoc	598	263	260

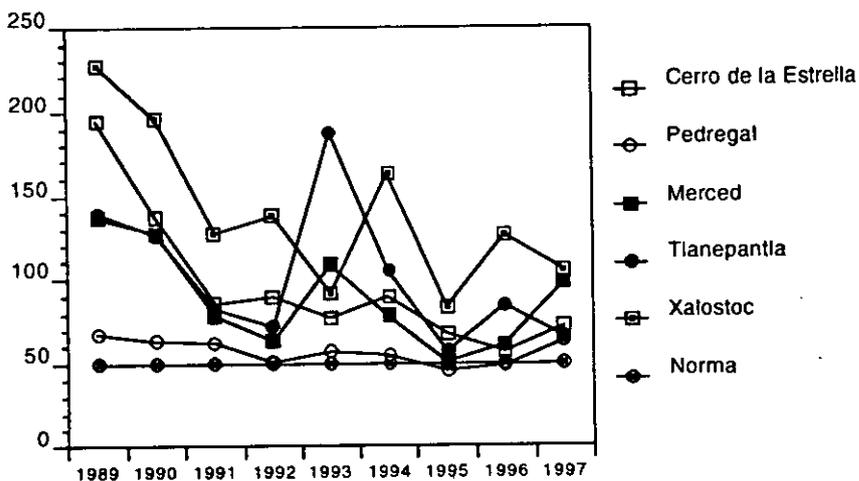
Cuadro 12. (cont.)
Número de horas de excedencia de la norma horaria de ozono (11 ppb)
en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Año	Estación	Nº horas	1 Máx (1 hora)	2 Máx (1 hora)
1993	Cerro de la Estrella	679	278	278
	Pedregal	1146	370	342
	Merced	927	335	268
	Tlalnepantla	651	337	337
	Xalostoc	551	272	272
1994	Cerro de la Estrella	622	262	258
	Pedregal	973	305	304
	Merced	997	248	248
	Tlalnepantla	604	281	276
	Xalostoc	461	220	213
1995	Cerro de la Estrella	706	274	269
	Pedregal	1233	349	320
	Merced	908	277	264
	Tlalnepantla	622	292	269
	Xalostoc	529	276	251
1996	Cerro de la Estrella	541	231	229
	Pedregal	1124	323	301
	Merced	564	221	221
	Tlalnepantla	568	262	244
	Xalostoc	216	288	230
1997	Cerro de la Estrella	419	227	224
	Pedregal	955	309	296
	Merced	534	259	242
	Tlalnepantla	437	292	292
	Xalostoc	255	210	202

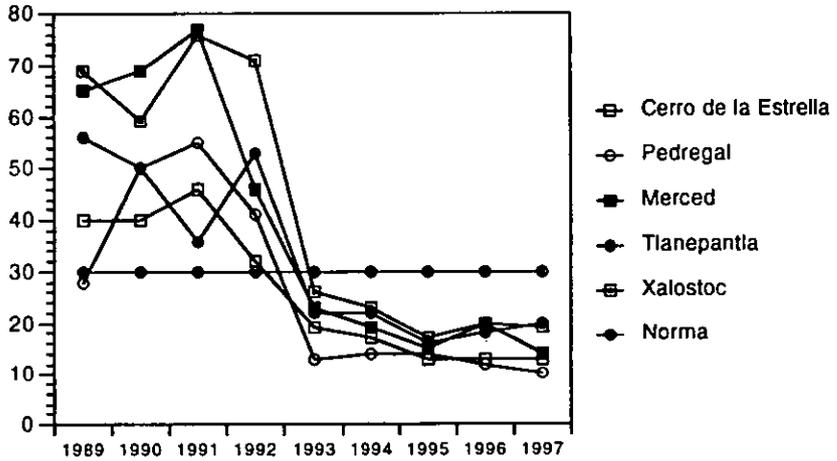
Gráfica 1. Promedio anual de partículas totales en suspensión ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1989-1997)



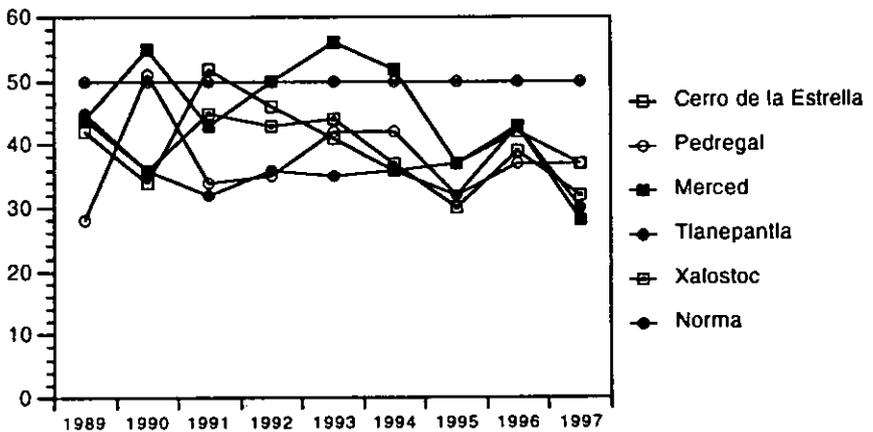
Gráfica 2. Promedio Anual de PM_{10} en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1989-1997)



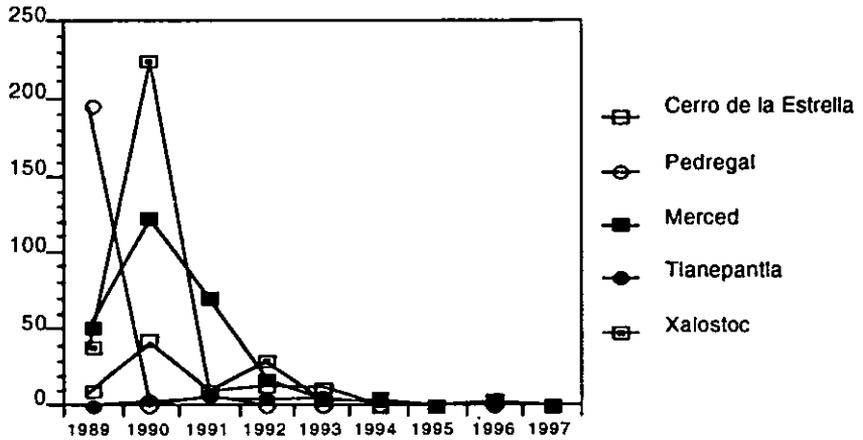
Gráfica 3. Promedio Anual de dióxido de azufre en ppb en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México .(1989-1997)



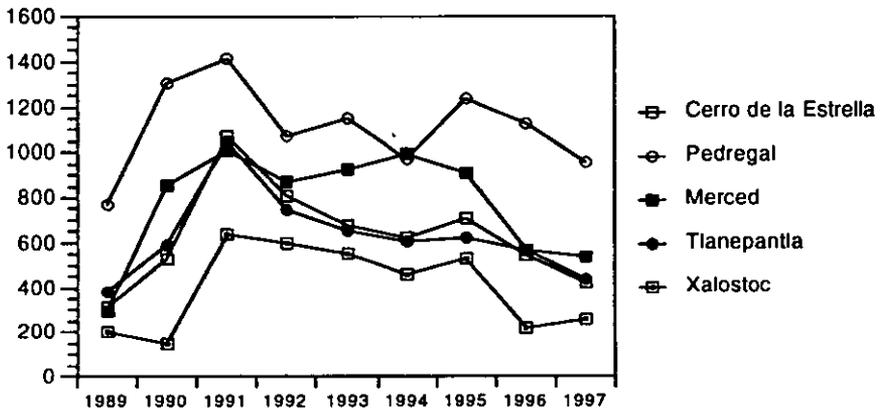
Gráfica 4. Promedio anual de bióxido de nitrógeno en ppb en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1989-1997)



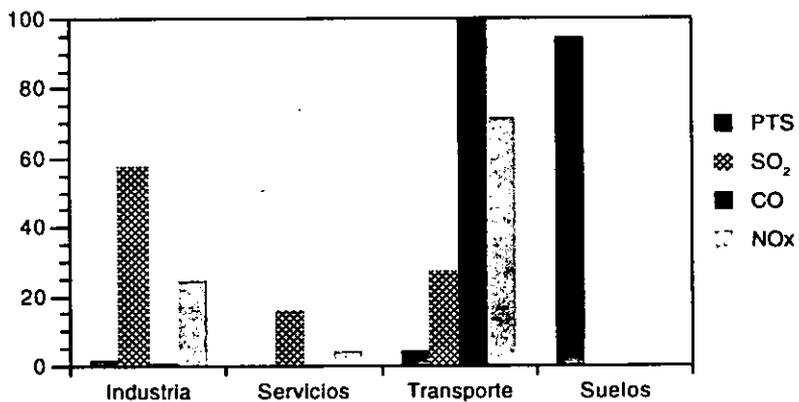
Gráfica 5. Número de días de excedencia de la norma de monóxido de carbono (11 ppm promedio móvil de 8 horas) Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1989-1997)



Gráfica 6. Número de veces de excedencia de la norma horaria de ozono (11 ppb) en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1989-1997)



Gráfica 7. Inventario de emisiones, porcentaje en peso por contaminante, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (1994).



Fuente: México-DDF, 1996