



17
2ej

**Universidad Nacional Autónoma
de México**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**Emisiones de partículas por fuentes fijas,
en la zona Metropolitana de la
Ciudad de México.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA QUIMICA
P R E S E N T A :
PATRICIA LOSNAYA RUIZ

ASESOR: ING. MARGARITA ALONSO ESPINOZA
CO-ASESOR: M. EN C. JORGE RAUL GAZCA RAMIREZ

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



Departamento de
Exámenes Profesionales

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Emisiones de partículas por fuentes fijas, en la
Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

que presenta la pasante: Patricia Osnaya Ruiz
con número de cuenta: 8702814-0 para obtener el TITULO de:
Ingeniera Química

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlan Izcalli, Edo. de Méx., a 13 de Junio de 1996

PRESIDENTE I.Q. Margarita Castillo Agreda [Firma]
VOCAL M. en C. Eligio Pastor Rivero Martínez [Firma]
SECRETARIO I.Q. Margarita Alonso Espinoza [Firma]
PRIMER SUPLENTE I.A. Rosa Maribel Rodríguez Montoya [Firma]
SEGUNDO SUPLENTE I.Q. Gilberto Atilano Amaya Ventura [Firma]

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis la dedico a las personas más importantes en mi vida, mis padres. A quienes agradezco su apoyo incondicional y sus consejos, gracias por ayudarme a llegar hasta esta etapa.

Quiero agradecer al Instituto Mexicano del Petróleo la oportunidad brindada para la elaboración de este trabajo.

Asimismo se debe agradecer a PEMEX el financiamiento del proyecto IMADA, dentro del cual se incluye la presente tesis. Se agradece al Departamento del Distrito Federal, al Instituto Nacional de Ecología y a Pétroleos Mexicanos la información proporcionada para el desarrollo de este trabajo.

Dentro de la Gerencia de Ciencias del Ambiente del IMP, quiero agradecer al M. en C. Jorge Raúl Gasca Ramírez su valioso tiempo para la asesoría de esta tesis. También quiero reconocer la ayuda de la Dra. Ma. Esther Rulz Santoyo, de la Dra. Ma. Eiba Ortiz Romero-Vargas, de la Dra. Elizabeth Vega Rangel, del M. en C. Gustavo Sosa y todas las personas que tuvieron una respuesta a mis dudas.

A mis sinodales agradezco el tiempo brindado para la revisión de este trabajo.

Gracias a todos mis amigos y amigas, en recuerdo a las vivencias dentro de la FES-Cuautitlán.

Agradezco finalmente a mis familiares y conocidos la presión amablemente ejercida para la conclusión de esta tesis.

Título: Emisiones de partículas de fuentes fijas, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Objetivos:

- 1. Establecer el inventario de emisiones de partículas PM-10 y PM-2.5, provenientes de la combustión en fuentes estacionarias en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Para lo cual se utilizarán factores de emisión.**
- 2. Establecer la distribución espacial y la variación temporal de las emisiones de partículas PM-10 y PM-2.5 provenientes de fuentes estacionarias en la ZMCM.**
- 3. Identificar la composición química y la distribución de tamaño de las partículas emitidas por la combustión en las principales fuentes de emisión estacionarias.**

RESUMEN

Además de los contaminantes en estado gaseoso que están en la atmósfera, se pueden encontrar también diminutas partículas que varían en cuanto a su tamaño y composición.

Las partículas con diámetro de $10\mu\text{m}$ y $2.5\mu\text{m}$ son de especial interés. Se ha comprobado que son éstas las más dañinas a la salud humana por ser de mayor penetración en las vías respiratorias. También contribuyen a la disminución de la visibilidad. Esta reducción se debe a la dispersión y absorción de la radiación solar por las partículas en este rango, presentes en la atmósfera.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México las partículas son el segundo problema más importante de calidad del aire después del ozono. Las principales fuentes de emisión de partículas son de origen natural como por ejem: polvos de arrastre de las zonas erosionadas y deforestadas, o de origen antropogénico como son: la combustión en vehículos, en equipos estacionarios, quema de desechos, etc. Las partículas provenientes de la combustión de combustibles derivados del petróleo son de diámetro pequeño y están constituidas principalmente por: sulfatos; nitratos; iones amonio; carbón orgánico y carbón elemental. También contienen una variedad de metales provenientes del combustible.

Una de las formas de diseñar estrategias de control para resolver el problema de la contaminación, es mediante modelos que simulan las condiciones meteorológicas y las transformaciones fisico-químicas de los contaminantes emitidos. Para que esta modelación represente realmente lo que sucede en la atmósfera, es necesario contar con un inventario de emisiones acertado y completo, que muestre: cantidades; fuentes; variaciones geográficas y temporales de las emisiones de contaminantes.

En esta tesis se realizará el inventario de emisiones de partículas de $10\mu\text{m}$ y $2.5\mu\text{m}$, provenientes de la combustión en fuentes fijas. La metodología seguida es mediante factores de emisión, que son una relación entre la masa de contaminante y la cantidad de combustible. Los factores aplicados se obtuvieron de la compilación de factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA 1985), adecuados a las condiciones de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Con respecto al nivel de actividad, se usó el consumo de combustibles del sector eléctrico, industrial, comercial y residencial.

Las fuentes fijas se dividieron en puntuales y de área. Además se analizaron las emisiones de una planta de cementos, debido a el tipo de proceso y combustible utilizado.

Las emisiones de PM-10 y PM-2.5 se distribuyeron en una malla de 5600 km^2 constituida por 224 celdas de 25 km^2 , cada una. La distribución se hizo en base a la densidad industrial, de comercios y de población para los sectores respectivos.

La variación temporal de las emisiones del sector industrial se basó en una carta de demanda eléctrica y para el sector residencial se tomaron los resultados obtenidos de una encuesta realizada dentro de la Gerencia de Ciencias del Ambiente.

El análisis químico de las emisiones de la combustión de diesel y gas natural se tomaron de los resultados obtenidos por Hildemann (1991) para la Ciudad de Los Angeles. En el caso de la planta de cementos la especiación química se basó en el AP-42.

Del inventario de PM-10 y PM-2.5, es el sector industrial quien genera 65% de las PM-10 y de PM-2 generadas por combustión en fuentes fijas. El sector residencial aporta el 19% de las emisiones de PM-10 por combustión en fuentes estacionarias. Gran parte de las cuales se deben a la combustión de gas l.p. Por tipo de combustible, es en la combustión de gasóleo donde se emiten más PM-10, debido a su contenido de azufre. Le sigue el gas l.p.

De las 12 fuentes puntuales, incluyendo la planta de cemento emiten por combustión 15.6 y 9.75 toneladas de PM-10 y PM-2.5 respectivamente, esto es el 20% y 17% del total en la ZMCM. Las emisiones de PM-10 y PM-2.5 provenientes de la fabricación de cementos representan más del 50% de las emisiones totales por combustión en la ZMCM.

INDICE GENERAL

	Págs.
Objetivos.	iv
Resumen.	v
Indice general	viii
Indice de tablas.	x
Indice de figuras.	xii

CAPITULO 1 **Introducción**

1.1 Antecedentes.	1
1.2 Partículas.	2
1.2.1 Efectos sobre la salud.	6
1.2.2 Partículas en la Ciudad de México.	7
1.2.3 Normatividad.	8
1.3 Modelo de simulación.	11
1.4 Area de estudio.	12
1.5 Población.	14
1.6 Combustibles.	14
1.7 Trabajos previos sobre inventarios de emisiones.	17
1.7.1 Inventario de partículas suspendidas totales (PST) para fuentes de área 1989.	18
1.7.2 Inventario de partículas suspendidas totales (PST). para fuentes de área 1992	20
1.7.3 Estudio para Fuentes Fijas de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA 1991).	23

CAPITULO 2 **Metodología**

2.1 Fuentes estacionarias consideradas en el I.E. 1995.	27
2.1.1 Fuentes de Area.	27
2.1.2 Fuentes Puntuales.	28
2.1.3 Planta de Cemento.	29
2.2 Factores de emisión para partículas PST, PM-10 y PM-2.5 en el I.E. 1995.	30
2.3 Consumo de combustibles.	32
2.4 Distribución espacial de las emisiones de PM-10 y PM-2.5 del I.E. 1995.	34
2.5 Variación temporal.	35
2.6 Análisis químico de las emisiones.	35

2.6.1 Diesel.	36
2.6.2 Gas natural.	38
2.6.3 Planta de cemento.	40

CAPITULO 3
Resultados

3.1 Consumo de combustibles en las fuentes fijas.	41
3.2 Inventario 1995 de emisiones de PST.	42
3.3 Cálculo de las emisiones de PM-10 y PM-2.5.	43
3.3.1 Emisiones de PM-10 y PM-2.5 para las fuentes puntuales seleccionadas	44
3.3.2 Emisiones de PST, PM-10 y PM-2.5 para la planta de cementos	44
3.4 Distribución espacial de las emisiones de PM-10 y PM-2.5.	47
3.5 Distribución temporal.	47
3.6 Análisis químico.	47
3.6.1 Emisiones provenientes de la combustión de diesel y gas natural	47
3.6.2 Emisiones provenientes de la planta de cementos.	47

CAPITULO 4
Discusión de resultados

4.1 Consumo de combustibles.	66
4.2 Factores de emisión.	68
4.3 Emisiones.	69
4.3.1 Partículas Suspensas Totales (PST).	69
4.3.2 Partículas PM-10 y PM-2.5.	70
4.4 Distribución espacial.	71
4.5 Variación temporal.	71
4.6 Composición química.	72

CAPITULO 5
Conclusiones y recomendaciones.

	73
Bibliografía	76
Anexo A. Metodología del cálculo para los factores de emisión de emisión de PST, PM-10 y PM-2.5.	A

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Contenido de azufre, % en peso en los combustibles de la ZMCM	15
Tabla 2. Factores de emisión de PST utilizados en 1989 (kg/m ³)	19
Tabla 3. Emisiones de PST por combustión en 1989 (ton/año).	19
Tabla 4. Factores de emisión de PST actualizados en 1992 (kg/m ³).	21
Tabla 5. Emisiones de PST por combustión en 1992 (ton/año).	21
Tabla 6. Consumo de combustibles en Fuentes Estacionarias en la ZMCM 1989 (Miles m ³ /año).	24
Tabla 7. Consumo de combustibles en los establecimientos seleccionados.	24
Tabla 8. Factores de emisión de PST en las fuentes industriales seleccionadas (kg/m ³).	25
Tabla 9. Factores de emisión de PST en las fuentes fijas estudiadas por SEDUE y DDF (kg/m ³).	25
Tabla 10. Emisiones de PST por combustión en las fuentes industriales seleccionadas (ton/año).	26
Tabla 11. Factores de emisión por combustión de Diesel para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m ³).	30
Tabla 12. Factores de emisión por combustión de gasóleo para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m ³).	31
Tabla 13. Factores de emisión por combustión de gas l.p. para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m ³).	31
Tabla 14. Factores de emisión por combustión de combustóleo para PST, PM-10 y PM-2.5(kg/m ³).	32
Tabla 15. Factores de emisión por combustión de gas natural para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m ³).	32
Tabla 16. Consumo de combustibles en la ZMCM para febrero de 1995 (Miles m ³ /año).	41
Tabla 17. Distribución del consumo de combustibles por sector en 1995 (miles m ³ /mes).	42
Tabla 18. Consumo de combustibles para las fuentes puntuales seleccionadas (Miles m ³ /mes).	42
Tabla 19. Emisiones de PST por combustión para febrero de 1995 (ton/mes).	43
Tabla 20. Emisiones de partículas PM-10 en febrero de 1995 en la ZMCM (ton/mes).	43

Tabla 21. Emisiones de partículas PM-2.5 en febrero de 1995 en la ZMCM. (ton/mes).	44
Tabla 22. Emisiones de PM-10 y PM-2.5 para las fuentes puntuales seleccionadas (ton/mes).	44
Tabla 23. Comparación de emisiones de PST por tres métodos (ton/mes).	45
Tabla 24. Distribución del tamaño de partícula para equipo de proceso en la fabricación de cemento.	46
Tabla 25. Emisiones de PM-10 y PM-2.5 generadas en la planta de cemento (ton/mes).	46
Tabla 26. Análisis químico de las emisiones de partículas finas por combustión de diesel y gas natural (a,b).	57
Tabla 27. Emisiones de aerosol fino de compuestos orgánicos provenientes de la combustión de diesel, en calderas industriales.	59
Tabla 28. Emisiones de aerosol fino de compuestos orgánicos provenientes de la combustión de gas natural en hogares.	61
Tabla 29. Análisis químico de las emisiones de partículas de la planta de cemento.	64
Tabla 30. Comparación de las emisiones de PST para tres inventarios.	69

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Distribución de tamaño y origen de las partículas ambientales.	2
Figura 2. Malla de simulación, (área total 5600 km ²).	13
Figura 3. Consumo de combustibles en fuentes fijas 1989 (Tcal/año).	18
Figura 4. Distribución del consumo de combustibles en fuentes fijas para 1989 (%).	18
Figura 5. Emisiones de PST por sector en la ZMCM 1989 (Ton/año).	19
Figura 6. Consumo de combustibles en fuentes fijas 1992 (Tcal/año).	20
Figura 7. Distribución del uso de combustibles en fuentes fijas en 1992 (%).	20
Figura 8. Emisiones de PST por sector en 1992 (Ton/año).	22
Figura 9. Emisiones de PST en las fuentes fijas seleccionadas.	25
Figura 10. Principales industrias emisoras de PST en la ZMCM.	26
Figura 11. Distribución del consumo de combustibles en fuentes fijas en 1995.	41
Figura 12. Emisiones de PST por sector en la ZMCM 1995 (Ton/año).	43
Figura 13. Emisiones totales de PM-10 (Ton/mes).	46
Figura 14. Emisiones totales de PM-2.5(Ton/mes).	46
Figura 15. Densidad industrial.	48
Figura 16. Distribución espacial de PM-10 Sector Industrial.	49
Figura 17. Distribución espacial de PM-2.5 Sector Industrial.	50
Figura 18. Distribución espacial de PM-10 Sector Comercial.	51
Figura 19. Distribución espacial de PM-2.5 Sector Comercial.	52
Figura 20. Distribución espacial de PM-10 Sector Residencial.	53
Figura 21. Distribución espacial de PM-2.5 Sector Residencial.	54
Figura 22. Variación temporal de las emisiones para el sector industrial.	55
Figura 23. Variación temporal de las emisiones de partículas para el sector residencial.	56
Figura 24. Promedio de la composición química de las emisiones de partículas finas provenientes de la combustión de diesel y de gas natural.	58
Figura 25. Consumo de combustibles en fuentes fijas en la ZMCM.	67
Figura 26. Precio de los combustibles industriales en \$/Kcal.	68

CAPITULO 1. INTRODUCCION.

1.1 Antecedentes.

La contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se ha ido agravando, debido a que el crecimiento de la población ha traído consigo una mayor demanda de transporte, de energía y de diversos artículos. Esta situación conduce a aumentar las fuentes emisoras, que lanzan a la atmósfera grandes cantidades de contaminantes

Después del ozono, las partículas suspendidas son el segundo problema más importante de calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Respecto a este problema, en la Gerencia de Ciencias del Ambiente, del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), se está desarrollando el proyecto llamado Investigación sobre Materia Particulada y Deterioro Atmosférico (IMADA). Este proyecto comprende los siguientes objetivos:

- La caracterización fisicoquímica de las partículas finas para determinar su composición y origen.
- La determinación del impacto de las partículas finas sobre la visibilidad en el Valle de México.
- La evaluación de estrategias de control con criterios de orden económico, social e institucional.

El desarrollo de un inventario de emisiones de partículas es parte de las actividades dentro del proyecto IMADA, particularmente como dato para realizar simulaciones. Anteriormente se habían elaborado inventarios que incluían Partículas Suspendidas Totales, NO_x , SO_x , CO, etc. [5,6,20]. La metodología seguida fue el cálculo de las emisiones en base a dos valores, un factor de emisión y un nivel de actividad.

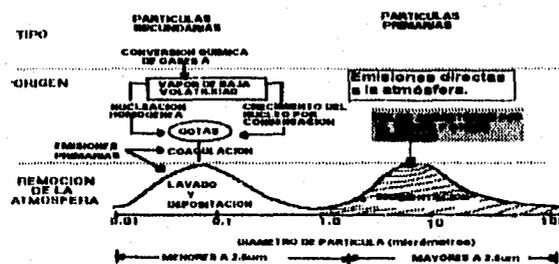
En este trabajo las emisiones que se estimarán son de partículas cuyo tamaño es de $10\mu\text{m}$ y $2.5\mu\text{m}$ de diámetro, provenientes de la combustión en fuentes estacionarias, utilizando factores de emisión. Se eligió este rango ya que las partículas tienen un

impacto mayor sobre la salud pública y contribuyen a la disminución de la visibilidad. Este inventario de emisiones se realizará para el mes de febrero de 1995. Este es uno de los dos períodos más secos del año, por lo que se registran mayores niveles de contaminación atmosférica por partículas. Además, en marzo del mismo año se realizó una campaña de monitoreo en la ZMCM. No se ha establecido todavía una relación entre los resultados obtenidos en esta tesis con las concentraciones medidas en la campaña.

1.2 Partículas.

Además de los contaminantes en estado gaseoso que están en la atmósfera, se pueden encontrar también diminutas partículas. El término de partículas suspendidas abarca un amplio rango de sólidos o líquidos sutilmente divididos que pueden estar dispersos en el aire. Se encuentran en un tamaño mayor que el de las moléculas simples (0.0002μ de diámetro), pero menor que 100μ [1 micrón (μ)- $\times 10^{-6}$ m]. Las partículas suspendidas en este rango tienen una vida media en estado suspendido que va de unos cuantos segundos a varios meses. Las partículas suspendidas presentan distribuciones de tamaño y composición distintas. La variación en cuanto a tamaño se muestra en la figura 1.

Figura 1. Distribución de tamaño y origen de las partículas ambientales.



Fuente: DDF, 1996.

Partículas menores a 10 micrómetros (PM-10).

Son aquellas partículas cuyo diámetro es $\leq 10\mu\text{m}$ de diámetro. Debido a su tamaño, éstas sedimentan a una velocidad tan lenta que pueden ser inhaladas y llegar a los pulmones. Actualmente se considera que este tipo de partículas son un mejor indicador de la calidad del aire que las partículas suspendidas totales, que anteriormente se utilizaban como criterio. La norma de calidad del aire de PM-10 adoptada en México y los Estados Unidos es de $150\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tomando en cuenta las concentraciones de PM-10 que se presentan cotidianamente en la ZMCM, se puede concluir que más de la mitad de la población se ve expuesta diariamente a concentraciones superiores a la norma actual. Un número considerable de individuos están expuestos a concentraciones mucho mayores.

La combustión de combustibles fósiles representa el proceso más relevante en la emisión de este tipo de partículas.

Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM-2.5).

En esta categoría se incluyen las partículas con un diámetro $\leq 2.5\mu\text{m}$, son inhalables y de mayor penetración en el sistema respiratorio, y por tanto, las más dañinas a la salud. Por su tamaño, situado en el intervalo de longitudes de onda de la luz, interfieren con la dispersión de la luz contribuyendo a la disminución de la visibilidad.

En la atmósfera se encuentran también suspendidas las partículas aerobiológicas, por ejem: bacterias; hongos; virus y protozoarios. Son de tamaño pequeño. Su importancia radica en el potencial infeccioso y alérgico que depende de las condiciones ambientales y la resistencia de los posibles huéspedes.

Entre las propiedades de las partículas pueden señalarse algunas más importantes:

- **Concentración:**

la concentración de las partículas, se expresa usualmente como la masa total de las partículas en un volumen dado de gas. Las unidades básicas son los microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

- **Tamaño:**

las partículas se dividen en finas que son aquellas que tiene un diámetro menor o igual a $10\mu\text{m}$ y gruesas con diámetro mayor a $10\mu\text{m}$.

- **Propiedades de superficie:**

las partículas pueden reaccionar químicamente, o funcionar como soporte o catalizador (absorción) con compuestos químicos. Si la partícula es inhalada, cualquiera de los mecanismos indicados podría presentarse en el sistema respiratorio.

- **Propiedades de movimiento:**

las partículas con tamaño menor a $0.1\mu\text{m}$ tiene movimientos al azar (Browniano). Partículas mayores a $1\mu\text{m}$ tienden a sedimentarse. Sus movimientos pueden variar con respecto al patrón del movimiento del aire que las acarrea. Las partículas mayores de 5μ ó 10μ son removidas en un alto porcentaje por gravedad.

- **Propiedades ópticas:**

las partículas con diámetro menor a $0.1\mu\text{m}$, son lo suficientemente pequeñas. La reducción en la visibilidad es el resultado de la absorción y dispersión de la luz incidente. Diversos estudios indican, que la reducción de la visibilidad puede ser proporcional a la concentración de partículas suspendidas.

Fuentes de partículas en la atmósfera.

De acuerdo a la fuente de emisión, las partículas se clasifican como primarias o secundarias. Las partículas primarias, son aquellas que son lanzadas directamente a la atmósfera. Las principales fuentes de éstas son: la erosión del suelo; la suspensión de

polvos de áreas pavimentadas y sin pavimentar por la acción de los vientos y los automóviles; quema abierta de desechos agrícolas y domésticos; además de la combustión vehículos automotores y fábricas.

La combustión es un fenómeno complejo en cuanto a la producción de materia particulada, debido a que se pueden producir cuatro diferentes tipos:

- El calor puede vaporizar material que después condensa para producir partículas en un intervalo de tamaño entre $0.1\mu\text{m}$ y $1\mu\text{m}$.
- Los procesos mecánicos pueden reducir tanto al combustible como a las cenizas, a partículas de tamaños mayores de $1\mu\text{m}$ que son transportadas en suspensión.
- La combustión incompleta de combustibles fósiles puede resultar en la formación de hollín.

Las partículas secundarias se forman en la atmósfera a partir de gases y vapores producidos por alguno de los siguientes procesos: reacciones químicas entre contaminantes gaseosos; reacciones químicas entre contaminantes gaseosos en la superficie de partículas ya existentes; aglomeración de aerosoles; o reacciones fotoquímicas en las que intervienen compuestos orgánicos. A este tipo se le conoce como aerosoles. Los aerosoles difieren de las partículas en que los primeros incluyen tanto a las partículas y el gas en que están suspendidas.

Composición química.

Las partículas gruesas se componen generalmente de polvos y tierras en los continentes, y de sal marina a lo largo de las costas. Los elementos encontrados mayoritariamente en este tamaño son: silicio, Si; aluminio, Al; calcio, Ca; hierro, Fe; potasio, K; titanio, Ti; manganeso, Mn y estroncio, Sr.

Dado que las partículas finas generalmente provienen de conversiones gas-partícula y de procesos de combustión. Están constituidas principalmente por: sulfatos; nitratos; iones amonio; carbón orgánico y carbón elemental. También contienen una variedad de metales provenientes de la combustión. Las partículas de origen natural se componen principalmente de suelos. Ocasionalmente por partículas de origen biológico, como: restos orgánicos de plantas y animales; esporas; virus, etc.

1.2.1 Efectos sobre la salud.

La contaminación atmosférica, representa uno de los problemas de salud pública más importantes de la década. El daño que puede ocasionar en los seres humanos, depende de muchos factores entre los que se encuentran: el tipo y concentración de los contaminantes a que se está expuesto; el lugar; la hora del día; la temperatura; el clima y las características individuales de cada individuo. La contaminación del aire por partículas requiere serias atenciones por los siguientes motivos:

- ◆ La contaminación por partículas contribuye a enfermedades crónicas, cáncer y muerte prematura. Las partículas finas conocidas como PM-10, son especialmente dañinas ya que pueden llegar a las partes más profundas del sistema respiratorio. Entre la gente que puede considerarse más sensible se encuentran:

- Personas con influenza, enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares o bronquitis.
- Niños y gente mayor.
- Fumadores y personas que practican mucho deporte al aire libre.

- ◆ Algunas partículas aumentan los efectos tóxicos de otros contaminantes. Las partículas suspendidas y el dióxido de azufre al estar interactuando causan un efecto combinado significativamente mayor al de cada contaminante actuando por separado. Concentraciones altas de dióxido de azufre y partículas suspendidas totales pueden elevar la morbilidad. Agudizan las enfermedades de asma y de bronquitis, provocan

respiración agitada, disminución del volumen de las vías respiratorias, dificultad para respirar e irritación en las vías respiratorias de leve a severa. En algunos estudios se observaron disminuciones de los niveles de función pulmonar en niños, asociados con fluctuaciones a corto plazo en la concentración de partículas. La exposición crónica al humo juega un papel importante en la enfermedad pulmonar obstructiva crónica [20].

1.2.2 Partículas en la Ciudad de México.

Después del ozono, las partículas suspendidas son el segundo problema más importante de calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Las principales fuentes de emisión de partículas primarias en la Ciudad son: la erosión del suelo; la suspensión de polvos de áreas pavimentadas y sin pavimento por la acción de los vientos. Se estima que 95% de las partículas suspendidas en el aire son de origen natural. Las áreas con mayor emisión de partículas de origen natural se encuentran en el Este y Noreste de la Zona Metropolitana. Estas aportan el 65%, debido a la gran superficie de terrenos desprovistos de cubierta vegetal y a la mayor frecuencia de vientos provenientes de estas zonas.

Estudios realizados por el IMP y DDF en 1992 [4], muestran que la concentración de partículas suspendidas totales colectadas durante el día fue casi el doble de la registrada en la noche. Sin embargo, durante la noche se encontraron en mayor proporción partículas PM-10. En la ZMCM el contenido de PM-10 puede representar entre 40 y 60% de las partículas suspendidas totales.

En los años de 1988 y 1989, los valores más altos de este contaminante se registraron en el noreste, donde se encuentra localizada gran parte de la industria de la Ciudad y el sureste. Las concentraciones alcanzadas eran cercanas a los $350\mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo las zonas noroeste y centro de la ciudad presentaron un máximo situado en el intervalo de $200\text{-}250\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, la zona suroeste ha presentado las

concentraciones más bajas de partículas de fracción respirable en los últimos siete años [7].

En el período 1990-1992, los niveles promedio de partículas de fracción respirable en todo el Valle de México, disminuyeron considerablemente respecto al período 1988-1989. En 1993 se tiene un ligero incremento en las concentraciones promedio en todas las zonas de la ciudad, que nuevamente disminuyeron en 1994.

También se encontró que el porcentaje de aerosoles considerados como el total de sulfatos, nitratos y carbono orgánico contenidos en las partículas, varía dependiendo del tamaño de las mismas. Además durante el día, el contenido de aerosoles es mayor que durante la noche debido a su origen fotoquímico, desencadenado por la radiación solar. Con base en el análisis del contenido de carbono orgánico total, se estima que 80% de las partículas con un diámetro menor a 2.5 micrómetros son de origen secundario, es decir, se forman en la atmósfera.

La pavimentación de calles con una superficie equivalente a 1 millón 705 mil metros cuadrados, la plantación de 42 millones de árboles durante los últimos cuatro años, así como la restauración ecológica del ex vaso del Lago de Texcoco, han permitido reducir la cantidad de polvos suspendidos en la atmósfera. El uso de combustibles más limpios, de tecnologías modernas tanto en la industria como en el transporte, la renovación vehicular, aplicación y seguimiento de los programas de verificación vehicular e industrial son algunas medidas adicionales que han hecho posible reducir la emisión de partículas a la atmósfera de nuestra Ciudad [4].

1.2.3 Normatividad.

En décadas recientes se ha venido acelerando la gravedad del deterioro ambiental. El cual se asocia a las formas de progreso relacionados con la industrialización, el desarrollo económico urbano y las transformaciones de la energía en nuestra biosfera. En virtud de lo anterior, ha surgido la necesidad de condicionar las conductas individuales y

sociales para evitar aquellas que produzcan efectos negativos al ambiente. Sobre esta base se elaboran legislaciones ambientales en todo el mundo para prevenir y controlar la contaminación ambiental. Todos los sectores, conscientes de su responsabilidad con la sociedad a la que pertenecen, deben evaluar a priori y evitar los riesgos ambientales, manteniendo un equilibrio entre sus objetivos económicos y su responsabilidad ética.

La legislación ambiental se inicia a partir de 1971 con la Ley Federal para prevenir y controlar la contaminación ambiental. Sin embargo, se debe destacar que este ordenamiento abordó únicamente los fenómenos de contaminación de agua, aire y suelo concibiéndose a la problemática ambiental sólo como un problema de salud pública. En 1982, se publicó la Ley Federal de Protección Ambiental, en esta ley aparecen por primera vez, aunque en forma precaria, las medidas preventivas orientadas a la protección integral del ambiente.

En 1987, para fortalecer las bases constitucionales en la materia, se reformaron los artículos 27 y 73 de nuestra Carta Magna. Se elevó al más alto rango una de las principales preocupaciones de la sociedad e involucrando las tres instancias de gobierno: Federal, Estatal y Municipal. Bajo esta concepción en enero de 1988, se expide la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Medio Ambiente como base fundamental de la Legislación Ambiental. Este nuevo ordenamiento sustenta el principio de que la prevención es el medio más eficaz para preservar el equilibrio de los ecosistemas ecológicos, fortalece los mecanismos de control a fin de reducir o corregir el deterioro ambiental, define los campos de atribuciones de las entidades congruentes y establece como instrumento de la política ecológica, el ordenamiento ecológico, el impacto y riesgo ambiental y las normas técnicas ecológicas para el control de la contaminación atmosférica.

En octubre de este mismo año fueron transformadas un total de 18 normas técnicas a Normas Oficiales Mexicanas, de las cuales 5 son de monitoreo, 5 de fuentes fijas y 8 de fuentes móviles. Su relevancia radica en el establecimiento tanto para las autoridades ambientales como para los particulares de los parámetros y límites dentro de los cuales

se deben realizar las actividades socioeconómicas. Fijan los valores máximos permisibles de concentración de contaminantes, con el propósito de proteger la salud de la población en general y de los grupos de mayor susceptibilidad. Las normas vigentes de calidad del aire se publican en el Diario Oficial de la Federación. A continuación se enuncian las principales normas ambientales de contaminación por partículas en fuentes fijas:

1) Norma Oficial Mexicana NOM-ECOL-1994. Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones.

Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales y los requisitos y condiciones de operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión.

2) NOM-024 -SSA1-1993. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente respecto a partículas suspendidas totales (PST).

Establece que la concentración de partículas suspendidas totales, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo permisible de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas, en un período de 1 año y $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible.

3) NOM-025-SSA1-1993. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a partículas menores de $10 \mu\text{m}$ (PM-10).

Establece que la concentración de partículas menores de $10 \mu\text{m}$, como contaminantes atmosféricos, no deben rebasar el límite permisible de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en 24 horas una vez al año y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual.

4) NOM-040-ECOL-1993

Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas. Así como los requisitos de control de emisiones fugitivas provenientes de fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento.

La legislación vigente en México en materia de fuentes fijas es muy general, por lo que su aplicación y seguimiento presenta limitaciones en la práctica. Es necesario a corto plazo que la Comisión Nacional de Normalización efectúe una revisión que conlleve a:

- una jerarquización de las fuentes fijas prioritarias.
- generación de normas específicas para dichos procesos.
- generación y actualización de procedimientos de muestreo y evaluación.

Igualmente deberán modificarse y/o aclararse varias disposiciones reglamentarias que hoy día presentan gran confusión para su interpretación.

1.3 Modelo de simulación.

Para la simulación de la formación de aerosoles en la ZMCM se utiliza un modelo fotoquímico de tipo euleriano o de redcula. El cual permite estudiar la calidad del aire de la región en tres dimensiones [12]. Este modelo emplea un sistema cartesiano, por lo que el área de estudio se subdivide en celdas. Resuelve numéricamente la ecuación de difusión para un conjunto de especies químicas reaccionando:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \nabla \cdot (u C_i) = (k V C_i) + R_i + Q_i \quad \text{ec. (1)}$$

donde: C_i = concentración de especies i .

μ = velocidad del viento.

k = tensor de difusibilidad turbulenta (se ha supuesto diagonal).

R_i = rapidez de generación de la especie i debido a reacciones químicas.

Q_i = término para la i -ésima fuente.

Los datos de entrada para la resolución de esta ecuación incluye un inventario de emisiones de fuentes móviles, fijas y biogénicas. Las emisiones distribuidas temporal y

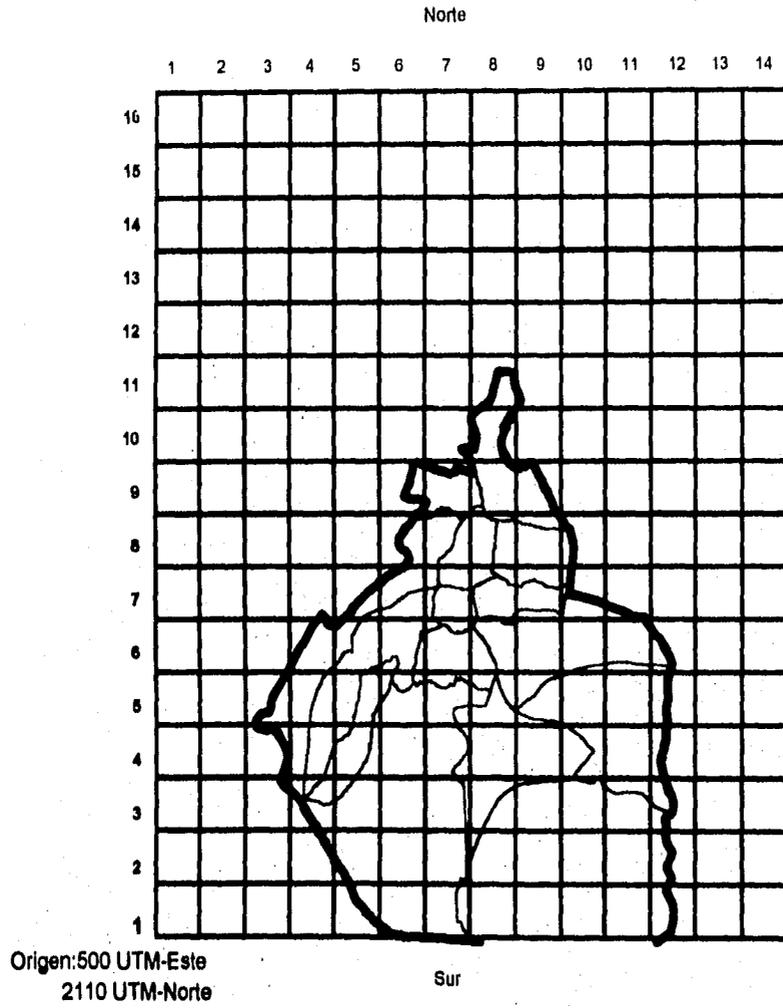
especialmente se suministran al modelo como emisiones horarias para las fuentes puntuales y de área.

1.4 Area de estudio .

La concentración de las actividades industriales y administrativas en la ZMCM hace que la población busque establecerse alrededor de éstas. La urbanización se va extendiendo cada vez más y los niveles de contaminación que se viven han aumentando de manera alarmante. El proceso de conurbación en esta zona se inició en la década de los sesenta y originó la conformación de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Esta se compone del área integrada por las 16 Delegaciones Políticas del Distrito Federal: Alvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco. Y los siguientes 17 Municipios Conurbados del Estado de México (MCEM): Atizapán de Zaragoza, Coacalco, Cuautitlán México, Cuautitlán Izcalli, Chaico de Covarrubias, Chimalhuacán, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, La Paz, Naucalpan de Juárez, Nezahualcóyotl, San Vicente Chicoloapan, Villa Nicolás Romero, Tecámac, Tlalnepantla y Tultitlán. El área de estudio se ha dividido en 14x16 celdas, de 5 km² cada una. En total el dominio de modelación tiene una extensión de 5600 km². Esta malla tiene su origen en 500 y 2110 UTM⁽¹⁾, con dirección P-O y S-N respectivamente. En la figura 2, se muestra la malla de simulación.

⁽¹⁾ Las coordenadas UTM (iniciales del inglés Universal Transverse Mercator) son coordenadas geográficas estándares a nivel mundial. Se asignan con respecto a una zona geográfica establecida en base a los meridianos y se dan en miles de metros. La Ciudad de México, con coordenadas geográficas de 99° de longitud corresponde a la zona 14.

Figura 2. Malla de simulación (área total 5600 km²).



1.5 Población.

De acuerdo al censo general de población de 1990 [17], el número de habitantes en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es de cerca de 14'990,000. Esto es 18.4% de la población total del país. En el DF residen 8.24 millones o 55%. En los municipios conurbados del Estado de México residen 6.75 millones o 45%.

En la ZMCM se produce 36% del producto interno, y se consume 17% de la producción nacional de energía. El número de vehículos que circulan es de aproximadamente 3.3 millones. El número de fuentes estacionarias con sistema de combustión es de 30,000 industrias y 12,000 establecimientos de servicios. De las industrias, 72% se localizan en el Distrito Federal y el resto en los 17 municipios del Estado de México. Estas industrias están clasificadas en cuatro categorías de acuerdo a su tamaño: 75% son micro, 20% pequeñas, 3% medianas y el 2% grandes [21]. La industria manufacturera ha mostrado una tendencia negativa en la década reciente. No así los establecimientos comerciales y de servicio que durante el mismo período han aumentado. Las mayores fuentes de energía para la industria son el gas natural, combustóleo y la electricidad. Para el sector residencial, comercial y público lo es el gas L.P., madera y la electricidad.

1.6 Combustibles.

En nuestra ciudad consumimos más de 44.4 millones de litros diarios de combustibles (gasolinas Nova Plus y Magna Sin, diesel, gasóleo industrial, gas licuado de petróleo y gas natural). Ello nos da un consumo promedio de 2.5 litros por habitante [4].

El petróleo mexicano se caracteriza por su alto contenido natural de azufre, el cual permanece en la composición de los productos petrolíferos como una impureza. En los procesos de combustión, el azufre se transforma en dióxido de azufre, que es un irritante respiratorio muy soluble. Además se conocen ya los efectos de este contaminante

en presencia de partículas [23]. Las medidas que se han venido implementando respecto a los combustibles han sido las siguientes:

- Sustitución de Combustóleo por Gasóleo

A partir del invierno de 1991 se prohibió que en la ZMCM se consumieran combustibles con un contenido mayor a 2% en peso de azufre. A partir de esta fecha, Petróleos mexicanos introdujo en el Valle de México gasóleo industrial. Además de tener 30% menos azufre que el combustóleo, el gasóleo industrial tiene 99.5% menos impurezas (elementos insolubles como n-pentano, vanadio y níquel). Debido a que es menos viscoso que el combustóleo, se facilita su manejo y aspersion en los quemadores. Originándose así, una combustión más limpia y una menor emisión de partículas.

- Introducción de Diesel Sin.

En octubre de 1993 se introdujo en el Valle de México el Diesel Sin, cuyo contenido máximo de azufre es de 0.05%, el más bajo del mundo. En la siguiente tabla se muestra la calidad de los combustibles mexicanos en función de su contenido de azufre expresado como % peso [26].

Tabla 1. Contenido de azufre, % en peso en los combustibles en la ZMCM.

Combustible	Antes de 1986	1986	1991	1994
Combustóleo pesado	3.8%	4.0%	4.0%	3.8/4.5%
Combustóleo ligero*	3.1%	desaparece	-	-
Combustóleo lig. esp.*	-	3.0%	desaparece	-
Gasóleo industrial *	-	-	2.0%	2.0%
Diesel industrial	-	-	0.5%	0.5%

*exclusivo ZMCM.

Fuente: PEMEX-Refinación, 1994.

- Sustitución de Combustóleo por Gas Natural en las Industrias.

Sin lugar a duda, las principales fuentes de dióxido de azufre eran las dos termoeléctricas que dentro del Valle de México generan 40% de la energía eléctrica que consume la Ciudad. Para solucionar este problema, a partir de 1986 las termoeléctricas "Valle de México" y "Jorge Luque" empezaron a sustituir el combustóleo por gas natural, hasta eliminarlo por completo. Las empresas de gran tamaño en la Ciudad también empezaron a sustituir el combustóleo que consumían por gas natural. Actualmente 365 empresas ya usan en sus procesos de combustión gas natural.

- Compromisos por parte de los Establecimientos de Servicio.

Los establecimientos de servicio, como son baños públicos, lavanderías, panificadoras, restaurantes, hoteles y hospitales, entre otros, contaminan al operar sus calderas, hornos e incineradores. Estos establecimientos operan con muy diversos combustibles, las panaderías utilizan preferentemente gas LP, al igual que los restaurantes y algunos hoteles. Los baños públicos, hoteles, clubes deportivos y hospitales emplean principalmente gasóleo o diesel en sus calderas e incineradores. Sus equipos son en su mayoría pequeños y resulta prácticamente incosteable instalar dispositivos de control de contaminantes en las chimeneas de desfogues, por lo que la estrategia para el control de los contaminantes en establecimientos de servicio se centra principalmente en la mejoría del combustible, así como en el mantenimiento y la adecuada operación de los equipos. Se acordó que los establecimientos mercantiles que funcionaban con combustóleo, operaran con combustibles más limpios como diesel o gas.

1.7 Trabajos previos sobre inventarios de emisiones.

Un Inventario de Emisiones (I.E.) es un registro de las fuentes fijas, como son: fábricas; estaciones eléctricas; establecimientos comerciales; etc. y de las fuentes móviles existentes, así como una relación detallada de la cantidad y tipo de contaminantes que emite cada una de ellas. En este trabajo, la metodología empleada es por factores de emisión. Los dos componentes principales de este tipo de inventario son:

1) Factores de emisión.

Un factor de emisión (F.E.) es básicamente un parámetro, el cual es recabado de pruebas de emisiones en las fuentes antes y/o después de incluir controles. Aplicado a un nivel de actividad de fuente apropiado, como nivel de producción, nos da las emisiones de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de emisión} \times \text{Nivel de actividad} \times \text{control} = \text{Emisión} \quad \text{ec.(2)}$$

donde el dato de control es expresado como (1- eficiencia). En algunos casos puede ser igual a 1, si la fuente estudiada no tiene implementados controles de emisión. Los factores de emisión de fuentes estacionarias y puntuales más comúnmente usados son los del manual AP-42 [10]. Este documento incluye datos de tamaño de partícula.

2) Nivel de actividad.

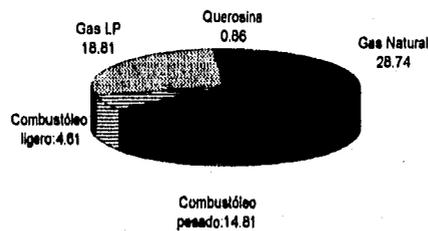
El segundo componente de un inventario de emisiones consiste de: datos de parámetros de flujo de chimenea y escape; niveles de producción; eficiencias de los equipos de control, etc. También se requiere de información sobre localización y organización del emisor. Las fuentes pueden ser clasificadas como: puntuales; de área y lineales.

Como antecedentes en la elaboración de inventarios de emisiones se tienen los siguientes documentos. Cabe mencionar que los datos que a continuación se presentan se refieren a emisiones por combustión.

1.7.1 Inventario de partículas suspendidas totales (PST) para fuentes de área 1989.

En este documento las emisiones por combustión representan el 1.85% del total de fuentes fijas. El consumo de combustibles en la ZMCM en este año se muestra en la figura 3:

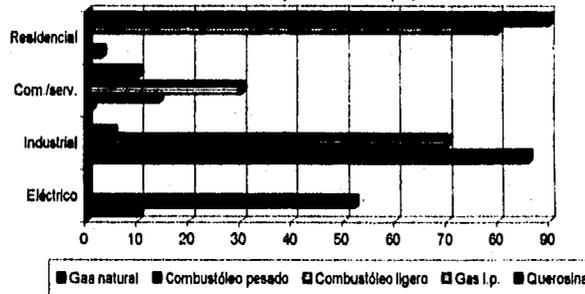
Figura 3. Consumo de combustibles en fuentes fijas 1989 (Tca/año).



*Consumos calculados a partir de los poderes caloríficos superiores [28].

A continuación se muestra la distribución de los combustibles por sector en 1989.

Figura 4. Distribución del uso de combustibles en fuentes fijas en 1989 (%).



Fuente: DDF, 1990.

Los factores de emisión utilizados para el cálculo de las emisiones de partículas suspendidas totales por combustión para fuentes fijas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Factores de emisión de PST utilizados en 1989 (kg/m³).

Combustible	F.E
Gas natural	0.000048
Combustóleo pesado	5.38
Combustóleo ligero	0.24
Gas LP	0.06
Querosina	3.00

Fuente: DDF, 1990.

Las emisiones totales por combustión para este año fueron:

Tabla 3. Emisiones de PST por combustión en 1989 (ton/año).

COMBUSTIBLE	SECTOR				
	Eléctrico	Industrial	Comercial	Residencial	Total
Gas natural	12.59	108.29	1.30	3.80	125.98
Combustóleo pesado	4123.10	2695.87	1110.07	0.00	7929.04
Combustóleo ligero	0.00	77.01	33.56	0.00	110.57
Gas LP	0.00	8.65	8.05	138.40	155.10
Querosina	0.00	00.00	29.58	266.21	295.79
Total	4135.69	2889.82	1182.56	408.41	8616.48

La contribución de emisiones de PST por cada sector se muestra en la figura 5.

Figura 5. Emisiones de PST por sector en la ZMCM 1989 (Ton/año).

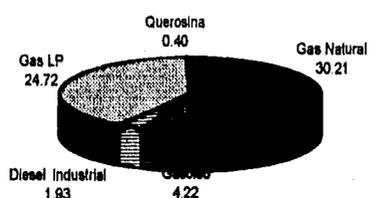


Las plantas de energía son las principales fuentes de emisión por combustión. Contribuyen con el 48.0%, debido al elevado consumo de combustóleo cuyo contenido de azufre era alto. Le siguen las fuentes industriales con el 33.55%. Finalmente la combustión en servicios, comercios y hogares representa el 18.5%.

1.7.2 Inventario de partículas suspendidas totales (PST) para fuentes de área 1992.

En 1995, el DDF publica un inventario que tiene como base el año de 1992. Contempla los cambios efectuados en los combustibles en este lapso. A continuación se muestra el consumo de combustibles en fuentes fijas.

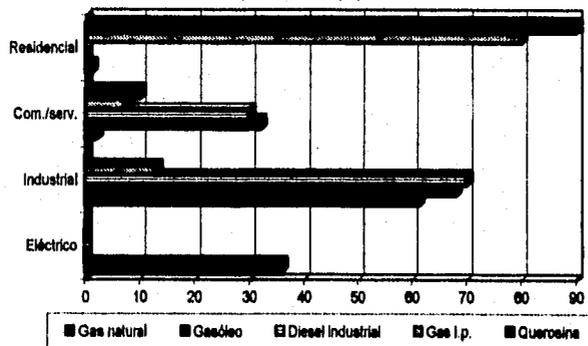
Figura 6. Consumo de combustibles en fuentes fijas 1992 (Tcal/año)*



*Consumo calculados a partir de los poderes caloríficos superiores [28].

La distribución de combustibles por sector cambió respecto a 1989. Se sustituyó el combustóleo pesado por gasóleo. El combustóleo ligero por diesel industrial, como se muestra en la figura siguiente:

Figura 7. Distribución del uso de combustibles en fuentes fijas en 1992 (%).



Fuente: DDF, 1995.

Los factores de emisión actualizados en este inventario son:

Tabla 4. Factores de Emisión de PST actualizados en 1992 (kg/m³).

Combustible	F.E
Gas natural	0.000048
Gasóleo	4.88
Diesel industrial	0.24
Gas LP	0.055
Querosina	4.88

Fuente: DDF, 1995.

El factor reportado para el gasóleo de 4.88 kg/m³ tiende a parecerse al del combustóleo. Pero el factor correcto para el gasóleo debe ser de 2.88, debido a que el contenido de azufre en el gasóleo es de 2%.

Las emisiones calculadas por el personal del DDF sólo corresponden a los sectores comercial, de servicios y al residencial. Sin embargo, en los resultados que aquí se muestran, se calcularon las emisiones del sector industrial. Se puede así, hacer la comparación entre el inventario de 1989 con el de 1992.

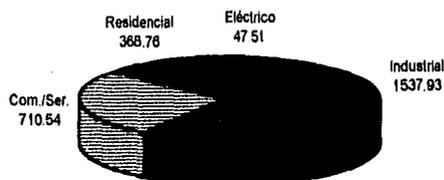
Tabla 5. Emisiones de PST por combustión en 1992 (ton/año).

COMBUSTIBLE	SECTOR				
	Eléctrico	Industrial	Com/Serv	Residencial	Total
Gas natural	47.51	80.99	2.51	1.32	132.33
Gasóleo	0.00	1393.89	655.95	0.00	2049.84
Diesel industrial	0.00	35.67	15.23	0.00	50.90
Gas LP	0.00	27.38	14.75	168.53	210.66
Querosina	0.00	0.00	22.10	198.91	221.01
Total	47.51	1537.93	710.54	368.76	2664.74

Fuente: DDF, 1995.

La siguiente figura muestra en que proporción los sectores contribuyen con sus emisiones al total de PST.

Figura 8. Emisiones de PST por sector en 1992 (Ton/año).



De los inventarios anteriores se observa que el sector eléctrico emitió 4136 toneladas en 1989. Lo cual representa más del 50% de las emisiones por combustión. Esto se debe a la cantidad de combustible consumido que es el 52% del total y cuyo contenido de azufre era en 1989 de 4%. Para 1992 este sector elimina el combustible y aumenta su consumo de gas natural en un 26%. Por lo que sus emisiones disminuyeron 87 veces.

El sector industrial emitió en 1989, 2890 ton/año, originadas por un consumo de gas natural que representa el 86% del total. Pero principalmente por el consumo de combustible pesado y ligero, el 34 y 70% respectivamente del consumo total en la Zona Metropolitana. Si bien el consumo de combustible ligero fue mayor, las emisiones debidas al combustible pesado cuyo contenido de azufre es alto, superan a las emisiones de aquel en 35 veces. En 1992 al introducirse gasóleo con la mitad del contenido de azufre que el combustible pesado, esto es con 2%, las emisiones se redujeron en aproximadamente 50%. Se observa que al sustituir el combustible ligero con 3% de azufre por diesel industrial con 0.5%, las emisiones se redujeron a la mitad. Debido al aumento en el consumo de gas LP, las emisiones por este combustible aumentaron en más de la mitad. Este sector emitió 1537 ton/año, o sea 1.8 veces menos que en 1989.

El sector comercial consumía en 1989, 14% del total del combustible pesado. Las emisiones por este combustible representaron el 94% del total de las emisiones del sector. Le siguen las emisiones por la combustión de combustible ligero con un 3%. En 1992 se destina a este sector el 32% del gasóleo. Por lo que las emisiones se reducen a

la mitad. El consumo de querosina se reduce, sin embargo al corregirse el factor de emisión de este combustible, sus emisiones aumentan.

Respecto al sector residencial, en 1989 se consumía 80% del gas LP y el 90% de la querosina consumidos en la ZMCM. En 1992 se conserva esta proporción, pero el consumo de querosina en la ZMCM disminuyó y el de gas LP aumentó. Los F.E. se corrigieron, el F.E. de la querosina aumentó y el de gas LP disminuyó. Todo lo anterior trajo como consecuencia una disminución del 10% en las emisiones de este sector.

1.7.3 Estudio para Fuentes Fijas de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA 1991).

El objetivo de este estudio es el abatimiento de la contaminación atmosférica causada por las fuentes estacionarias en la ZMCM, mediante la formulación de estrategias de control, por ejem: cambio de combustibles por otros cuya combustión sea más limpia, implementación de controles de emisiones, etc. El equipo de trabajo estuvo integrado por las autoridades concernientes del Gobierno de México y la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA). El año base de este inventario es 1989.

La agencia japonesa presenta cinco estudios sobre fuentes fijas realizados por organismos como la SEDUE y el DDF. Estas fuentes representan por sus características al total de las fuentes en la ZMCM ya que se contempla la mayoría de las grandes y medianas industrias más contaminantes. Respecto a comercios y servicios, de los 120 000 establecimientos que hay en la ZMCM, se determinó que sólo el 3.3% contaminan. Ninguna de estas fuentes se duplicó en los diferentes estudios. Se abarcan 7710 fuentes de las cuales 1380 son industrias y 6330 son comercios y servicios. Se reportan emisiones por combustión. Para el caso de 97 industrias, se analizan además las emisiones originadas por el tipo de proceso.

De acuerdo a este documento, el consumo de combustibles en la ZMCM en 1989 fué:

Tabla 6. Consumo de combustibles en fuentes estacionarias en la ZMCM 1989 (Miles m³/año).

Tipo de combustible		Consumo
Combustóleo	Pesado	702.00
	Ligero	905.00
Gas natural		2'584,000.00
Diesel		410-660.00

Fuente: JICA, 1991.

La distribución del consumo de combustibles en esta investigación es como sigue:

Tabla 7. Consumo de combustibles en los establecimientos seleccionados.

Estudio	JICA	SEDUE I	SEDUE II	DDF	CANAIBAL	Total
Sector	Elec/Ind	Industrial	Ind/Com/Serv	Com/Serv	Baños	
No. muestra	97	969	371	6070	203	7710
% muestra	1.25	12.57	4.81	78.73	2.60	100
Combustible	Consumo en miles de m ³ /año.					
Combustóleo	815	190	36	51	40	1132
Diesel	29	84	8	51	0	172
Querosina		16	0	26		42
*Gas natural	2478	735	104	0.2		3317
Gas LP ⁽²⁾	6	(2928)	(10122)			
Coke	11		2			13

* Millones de m³/año

⁽²⁾ El consumo de gas lp, presenta incertidumbre en la investigación realizada por la SEDUE.

Fuente: JICA, 1991.

Estas 7710 fuentes consumen el 70.47% del combustóleo que se consumió en 1989 en la ZMCM. El consumo de diesel, 172 000 m³ está por debajo del reportado en 1992. En cuanto a la querosina no se da un consumo, pero si se toma el reportado para 1989 que fué de 98.6 miles de m³, se observa que las 7710 fuentes consumen un 43% del total. El consumo de gas LP no está explícito. El gas natural que consumen estas siete mil fuentes es un 30% mayor que el total para la ZMCM en 1989. Esto parecería ilógico, lo que ocurre es que en el tiempo del estudio aumentó el consumo de gas natural en las termoeléctricas.

Los factores utilizados para 97 fuentes industriales son un promedio a partir de varias mediciones y corresponden a calentadores.

Tabla 8. Factores de Emisión de PST en las fuentes industriales seleccionadas (kg/m³).

Combustible	Factor de Emisión
Combustóleo	3.1
Diesel	0.5
Gas natural	0.000031

Fuente: JICA, 1991.

Para las fuentes investigadas por SEDUE y el DDF los factores usados fueron:

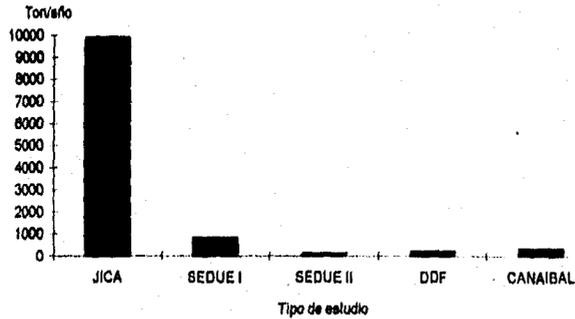
Tabla 9. Factores de Emisión de PST en las fuentes fijas estudiadas por SEDUE y DDF (kg/m³).

Combustible	Factor de Emisión
Combustóleo	2.75
Diesel	1.80
Gas natural	0.000162
Querosina	1.20

Fuente: JICA, 1991.

Las emisiones totales de las casi ocho mil fuentes se muestran en la siguiente figura:

Figura 9. Emisiones de PST en las fuentes fijas seleccionadas
11,300 ton/año



Las emisiones de las 97 fuentes industriales estudiadas por JICA son el 87.6% del total, y sólo representan el 1.25% de las fuentes investigadas. Estas emisiones se deben a la quema de combustibles. Otra parte se origina por la forma de procesar los materiales, como es el caso de las plantas de asfalto y de cemento. Las 97 fuentes industriales utilizan el 50.7% del combustóleo consumido en la ZMCM. Consumen 5.4% del diesel;

95.9% del gas natural y 85% del coke. Estas fuentes se dividieron por tamaño en grandes, medianas, chicas y micro. Dentro de estas 97 fuentes se encuentran dos termoeléctricas, las cuales consumen 55% del gas natural y 50% del combustóleo de las 97 fuentes. El gas natural es consumido principalmente por el sector eléctrico y la industria. El consumo de este combustible en los sectores residencial y comercial es mínimo. El consumo de gas LP no está muy claro. Gran parte se destina al sector residencial, servicios y comercios. Las grandes industrias, que son 25, consumen el 92% del combustóleo destinado a las 97 fuentes industriales seleccionadas (46.5% ZMCM). Consumen 97% del gas natural (72% del total para la ZMCM), 70% del diesel y 99% del gas LP de estas mismas 97 fuentes industriales. De las 11300 toneladas, las emisiones originadas por combustión se muestran en la siguiente tabla:

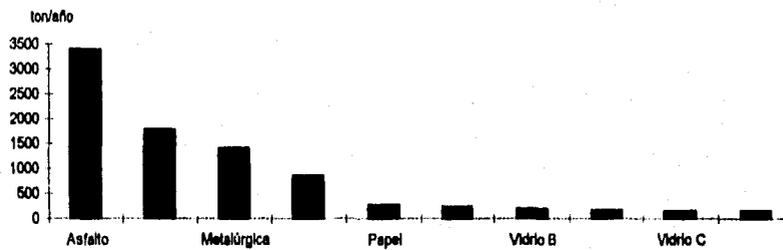
Tabla 10. Emisiones de PST por combustión en las fuentes seleccionadas (ton/año).

Combustible	PST
Combustóleo	4018.00
Diesel	14.50
Gas natural	77.00
Gas LP	1.00
Coke	----
Total	4110.50

Fuente: JICA, 1991.

Diez grandes emisoras son tratadas como fuentes puntuales. En la siguiente figura se muestran las emisiones de PST por combustión y proceso:

Figura 10. Principales industrias emisoras de PST en la ZMCM.
8541 ton/año



CAPITULO 2 **METODOLOGIA**

En este trabajo serán seleccionados los factores de emisión del AP-42, de acuerdo a las características de los combustibles que se consumen en la Ciudad de México. Una vez seleccionados estos, se multiplicarán por el consumo de cada combustible. Esta metodología se aplicará tanto para calcular emisiones de PST como de PM-10 y PM-2.5. El inventario de emisiones de partículas se hará para el mes de febrero de 1995 debido a que en febrero se registran niveles altos de contaminación.

2.1 Fuentes estacionarias consideradas en el I.E. 1995⁽³⁾

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentran establecidas cerca de 30,000 mil industrias, 12,652 comercios y el 18 % de la población del país. Dado la gran cantidad de información que supondría manejar cada una de las fuentes anteriores, se han considerado para este trabajo, aquellas industrias que emiten mayor cantidad de partículas [16]. Se agruparon en dos categorías: fuentes de área y fuentes puntuales.

2.1.1 Fuentes de Área.

Las fuentes de área son aquellas cuyas emisiones individuales son insignificantes y por lo que se suman. Debido a que hay una gran cantidad de fuentes como se mencionó en el punto 2.1, no es práctico ubicarlos en el área de estudio individualmente. Por lo que se distribuyen espacialmente en la malla de simulación en función de la densidad industrial, comercial y/o residencial.

- **Combustión industrial**

Se consideraron 120 industrias que generan más del 90% de Partículas Suspendidas Totales [16], por lo que estas fuentes son representativas del total que hay

⁽³⁾ I.E. 1995, el inventario de emisiones de partículas PM10 y PM2.5 para el mes de febrero de 1995.

en la ZMCM. Con el nombre de cada fuente se obtuvieron sus teléfonos a través de TELMEX. Después, se habló para verificar su dirección y si ésta correspondía a las oficinas o las plantas, siendo de interés las últimas, que es donde se lleva cabo la combustión y los procesos. Con la dirección verificada, se ubicó cada una de estas fuentes en las celdas de la malla de simulación, mediante las coordenadas UTM.

- Combustión comercial y residencial.

Se consideraron todos los comercios y residencias que existen en la ZMCM. Se distribuyeron de acuerdo al número de comercios y habitantes que hay en cada delegación y municipio, de acuerdo a lo reportado por el DDF [6].

2.1.2 Fuentes Puntuales.

Para fines de modelación [11], las fuentes puntuales tratadas en este inventario son las chimeneas de más de 20 metros de altura, de acuerdo a las necesidades del modelo de simulación. Se estimaran las emisiones de partículas provenientes de la combustión en 11 fuentes. Se incluyen además las emisiones de partículas debidas a la fabricación de cemento. A continuación se listan las fuentes puntuales:

1. Termoeléctrica A.
2. Termoeléctrica B.
3. Química A.
4. Química B (detergentes, jabón).
5. Química C (resinas, látex).
6. Vidriera A.
7. Vidriera B.
8. Vidriera C (botellas de vidrio).
9. Papelera A.
10. Papelera B.
11. Industria Automotriz
12. Planta de cementos.

2.1.3 Planta de Cemento.

El proceso de elaboración de cemento portland es continuo. Las operaciones en una planta donde se emiten partículas son: 1) cantera y extracción; 2) almacenamiento de materia prima; 3) molienda y mezcla en el proceso seco; 4) producción de clinker; 5) tamizado final; y 6) empaque y carga.

Descripción del proceso.

Las materias primas comúnmente usadas son: caliza, arcilla, yeso, óxido de hierro, caolín y puzolana. Las materias primas semicrudas, mineral de hierro y caolín previamente dosificados se introducen a los molinos para obtener una mezcla de polvos finos a la cual se le llama crudo. En estos molinos se efectúa el secado de las materias primas a través de generadores de gases calientes. Una vez obtenido el crudo, es depositado en un silo de homogeneización de proceso continuo, con el fin de garantizar un producto con una calidad estándar. Una vez homogeneizado el material, se envía a un silo de almacenamiento o directamente a los hornos para su proceso y obtener el clinker.

En la calcinación, el crudo se somete a elevadas temperaturas. Esto origina reacciones químicas que darán lugar a la obtención de clinker. Para un aseguramiento de la calidad se requiere de un enfriamiento rápido del clinker, por lo que se cuenta con un enfriador. A través de este equipo se inyecta aire del ambiente por medio de ventiladores, después de pasar el clinker por el enfriador, los trozos grandes llegan a un molino de martillos donde este material es fragmentado y posteriormente enviado a su almacén respectivo.

Una vez obtenido el clinker, se mezcla con el yeso. Con estos dos componentes se obtiene el cemento normal. Para la fabricación de cementos puzolánicos, se le agrega a éstos dos componentes arena volcánica denominada puzolana. Estos materiales en los porcentajes necesarios se introducen en molinos, donde se fragmentan a tamaños muy pequeños. Al salir del molino el material es transportado a los separadores donde las partículas son seleccionadas, retornando las más gruesas al molino para que nuevamente

se efectúa la molienda. El material fino que ya cumple con las características establecidas es transportado a silos de almacenamiento para su próxima distribución. Esta planta consume al mes aproximadamente 11,000 m³ de combustóleo y 1'399,000 m³ de gas natural.

Las fuentes de azufre son el combustóleo, que contiene un promedio de 3.8% en peso y la materia prima en menor grado. La combustión de este combustible en cámara abierta generaría emisiones SO₂ altas, de acuerdo al factor de emisión reportado [9]. Sin embargo en la fabricación de cemento el uso de combustóleo tiene dos objetivos: el aprovechamiento de la energía calorífica y la fijación de masa adicional de azufre, como SO₂, en el producto final. La generación de dióxido de azufre, SO₂, se combina con los álcalis de las materias primas, sodio y potasio, y se obtiene en forma de sulfatos con el clinker. Dependiendo del proceso y la fuente de azufre, en una planta de cementos el SO₂ se absorbe en un rango de 70 a 95%. Con el fin de evitar la contaminación, en cada una de las instalaciones de molienda se tienen instalados filtros de mangas y electrostáticos, en el área de calcinación se cuenta con electrofiltros, filtros de gravas y filtros de mangas.

2.2 Factores de Emisión para partículas PST, PM-10 y PM-2.5 en el I.E. 1995

Los factores de emisión para partículas PM-10 y PM-2.5 que este trabajo plantea, no consideran controles de emisiones:

- Diesel.

Tabla 11. Factores de emisión por combustión de Diesel para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m³).

Sector	PST	PM-10	PM-2.5
Industrias	0.240	0.120	0.030
Comercios y servicios	0.240	0.130	0.100

Fuente: EPA, 1985.

Se observa que las calderas pequeñas como las que se utilizan en el sector comercial y residencial generan más partículas de diámetro 10 y 2.5µm, debido a que la

eficiencia de combustión se reduce. Las PM-10 representan el 50% de las partículas suspendidas totales para todos los sectores. Las PM-2.5 son el 12.5% de las PST para equipos de gran capacidad como el caso del Sector Eléctrico e Industrial y el 42% para equipos más pequeños.

- Gasóleo.

Tabla 12. Factores de emisión por combustión de gasóleo para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m³).

Sector	PST	PM-10	PM-2.5
Industrias	2.880	1.075	0.700
Comercios	2.880	0.775	0.288
Residencial	-	-	-

Fuente: EPA, 1985.

En el caso de la combustión de gasóleo se observa un nivel de emisión mayor para el sector industrial, con un 37.3% de PM-10 y un 24% de PM-2.5 respecto a las PST. El sector eléctrico no consume gasóleo, por lo que sólo se consideran las emisiones de la industria y los hogares.

- Gas L.P.

En base a las características fisicoquímicas del gas L.P. en la Ciudad de México, se calcularon los factores de emisión siguientes:

Tabla 13. Factores de emisión por combustión de gas LP para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m³).

Sector	PST	PM-10	PM-2.5
Industrial	0.070	0.070	0.070
Comercial	0.055	0.054	0.054
Residencial	0.055	0.054	0.054

Fuente: EPA, 1985.

En el caso del Gas LP se observa que prácticamente todas las PST que se generan son de diámetro 10 µm e implícitamente 2.5µm.

- **Combustóleo.**

Tabla 14. Factores de emisión por combustión de combustóleo para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/m³).

Sector	PST	PM-10	PM-2.5
Industrial	4.880	4.197	2.733

Fuente: EPA, 1985.

Sólo se contempla en la tabla anterior al sector industrial, ya que la única fuente autorizada para consumir combustóleo es la Planta de Cementos. Los niveles de emisión por combustión de combustóleo son los más altos, comparados con los demás combustibles debido a que este combustible contiene entre 3-4% de azufre

- **Gas Natural.**

En la siguiente tabla se observan los factores de emisión por combustión de gas natural.

Tabla 15. Factores de emisión por combustión de gas natural para PST, PM-10 y PM-2.5 (kg/1e6 m³).

Equipo	PST	*PM filtrable
Calderas industriales grandes	48.00	48.00
Calderas industriales chicas	99.00	99.00
Calderas comerciales	72.00	72.00
Calderas residenciales	48.00	2.80

* Aunque no fueron medidas, todas las PM han sido estimadas menores a 1µm de diámetro. Por lo tanto las PM filtrables son PM-2.5 y PM-10.
Fuente: EPA, 1985.

2.3 Consumo de combustibles.

- **Gas natural.**

En 1992, el sector eléctrico e industrial consumían 36 y 61% respectivamente del gas natural para la ZMCM. Para este trabajo, esta distribución se actualizó, quedando como 52 y 45% en el orden mencionado. Esto es que el uso de gas natural desde 1989

ha ido aumentando en las Termoeléctricas, mientras que en el caso de las industrias ha sucedido lo contrario.

- Gasóleo.

La distribución por sector de este combustible no se varió, sin embargo la cantidad consumida en la ZMCM ha ido disminuyendo.

- Diesel Industrial.

Para el cálculo del consumo de diesel industrial se sumó el diesel especial y diesel sin en la ZMCM. De este total, se destinó un 13% para las fuentes estacionarias, el resto corresponde a fuentes móviles [6].

- Gas L.P.

La distribución de Gas L.P. para 1992 [6], se conservó para este trabajo. En 1995 el consumo total en la ZMCM disminuyó.

- Combustóleo.

Este combustible genera niveles de PST altísimos como se aprecia en la tabla 3, debido al contenido de azufre que contiene (comparado con el diesel industrial). Sin embargo la planta de cementos está autorizada a consumir combustóleo debido a que por el tipo de proceso que utilizan, el azufre es absorbido por el producto final. Además de la implementación de equipos de control para partículas. También se consideró el consumo de cuatro fuentes industriales obtenidos de la bases de datos consultada [16]. Sin embargo existe incertidumbre en estos consumos, ya que esta información no había sido actualizada para 1995.

2.4 Distribución espacial de las emisiones de PM-10 y PM-2.5 del I.E. 1995.

Esta actividad comprende los siguientes puntos:

1.- Estimación porcentual del área de las delegaciones, municipios conurbados y no conurbados ubicados dentro de cada celda de la malla de simulación en base a métodos geométricos.

Así por ejemplo la celda -9,6- está integrada por:

$$63.54\% \text{ F25} + 36.46\% \text{ M39}$$

donde: F25 es la delegación Gustavo A. Madero
y M39 es el municipio de Ecatepec.

Se elabora así una plantilla de 14x16 celdas con sus % de área respectivos.

2.- El consumo total de combustibles para el sector comercial y residencial se distribuye en función del número de establecimientos y personas que hay en cada delegación y municipio.

Por ejem. en el caso del sector comercial, en la ZMCM hay 12652 establecimientos:

	# de establecimientos	% total
Ecatepec	842	6.66
Gustavo A. Madero	1215	9.60

entonces el consumo queda como:

$$\begin{aligned} \text{Ecatepec} &= m^3 \text{ combustible consumidos en la ZMCM} \times 0.066 \\ \text{Gustavo A. Madero} &= m^3 \text{ combustible consumidos en la ZMCM} \times 0.096 \end{aligned}$$

3.- Aplicando los factores de emisión a cada tipo de combustible, se calcularon las emisiones de PM-10 y PM-2.5 en cada delegación y municipio.

4.- Estas emisiones dadas en kg/día se alimentan a la plantilla de % de áreas.

Las emisiones del sector industrial, fueron distribuidas en la malla de acuerdo a la dirección de cada una. Se incluyen las fuentes industriales de área y puntuales.

5.- Se establecieron intervalos de emisiones, asignando un color diferente a cada uno de ellos para determinar en qué áreas de la malla se concentran los mayores niveles de partículas PM-10 y PM-2.5.

2.5 Variación temporal.

La variación temporal diaria de las emisiones de partículas en este inventario, se tomó, en el caso del sector industrial de un estudio realizado en el IMP llamado "Estudio Global para la Calidad del Aire" [19], basado en una carta de demanda eléctrica. Para el sector residencial se hizo una encuesta dentro de la Gerencia de Ciencias del Ambiente. Se preguntó sobre las actividades realizadas por las personas desde el inicio del día hasta finalizarlo. Así se encontraron las horas en que el consumo de combustibles es mayor. Los resultados obtenidos de esta encuesta no son representativos de la población en la ZMCM. La variación temporal cambia entre una semana de actividades diaria y un fin de semana, también cambia de acuerdo a cada estación del año. Sin embargo es una aproximación preliminar del comportamiento temporal de las partículas, ya que no hay suficiente bibliografía al respecto.

2.6 Análisis químico de las emisiones.

Una vez calculado el nivel de emisión de PM-10 y PM-2.5, es necesario conocer los elementos, compuestos, complejos o sustancias en general que componen la emisión de un contaminante para determinar el grado de toxicidad del mismo.

Debido a lo anterior, en estudios realizados en la ciudad de Los Angeles [14,15], se determinó la composición química de las emisiones de fuentes urbanas de aerosol orgánico fino ($dp \leq 2.5 \mu m$). Se utilizó un sistema de dilución de la muestra, que ha sido diseñado específicamente para recoger materia particulada orgánica, incluyendo material en fase vapor que ha condensado dentro de la fase aerosol bajo condiciones ambientales. Minimizando así, los problemas de contaminación. El carbono orgánico medido fue analizado por "Cromatografía de Gases de Alta Resolución" [27].

2.6.1 Diesel.

El diesel industrial que se utiliza en nuestro país tiene características fisicoquímicas semejantes al combustible destilado No.2 ⁽⁴⁾, utilizado en Los Angeles [3].

Se realizaron muestreos a la salida de los gases de combustión de una caldera industrial. Se variaron las condiciones experimentales como son: % de capacidad; exceso de O₂ y temperatura en la caldera [14,15]. El rango de emisiones medido está entre 5 y 13 µg/kJ de combustible quemado. El promedio para las cinco pruebas es 9(±2).

Las mayores especies químicas encontradas en las emisiones de partículas finas fueron: sulfatos; carbón elemental; ion amonio y carbón orgánico. Del total de las emisiones 32% son sulfatos, 29% carbón elemental, 5% orgánicos, 6% NH₄ y 3% de otras especies iónicas así como trazas de elementos oxidizados (consistentes principalmente de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y Na⁺). El otro 25% de la masa emitida no fue identificada químicamente. Se espera que sea agua en forma de compuestos hidrolizados.

Para el análisis del carbón orgánico, se tomaron dos de los muestreos y se encontraron los siguientes compuestos orgánicos:

- n-Alcanos.

Las partículas orgánicas finas emitidas por la combustión de diesel, contiene n-alcanos entre el rango de C₁₄/C₃₃ con C₂₁ y C₂₃ como n-alcanos predominantes. Estos n-alcanos son originados directamente de los n-alcanos del combustible o indirectamente de los compuestos nafténicos n-alquil sustituidos y nafto-aromáticos presentes en el combustible.

⁽⁴⁾ En los Estados Unidos se comercializan seis tipos de combustible (Buonicore 1990).

- **Acidos Carboxílicos.**

Los mayores niveles de emisión encontrados fueron para el ácido palmítico (C₁₆) y el ácido esteárico (C₁₈). Solamente 2.2% de los ácidos n-alcanoicos emitidos tienen un número de carbono >C₁₈. La principal porción de los ácidos n-alcanoicos identificados tienen un peso molecular ≤ al del ácido esteárico. Las diferencias mostradas entre el experimento No.2 y el No.5, se deben a las condiciones de operación en que se llevaron ambos.

- **Hidrocarburos clorados.**

Los compuestos aromáticos sustituidos clorados como son mono y diclorhidroxi-benceno, ácidos mono y diclorobenzoico fueron identificados en las emisiones de combustión. Estos compuestos fueron sintetizados a partir de cloruros inorgánicos durante la combustión. Los procesos de desalinización del petróleo remueve típicamente >90% de las sales en los aceites crudos, por lo que se espera que el contenido de cloro en el combustible sea muy bajo. El contenido de ion cloro inorgánico en el combustible fue medido por cromatografía, del promedio de los cinco experimentos solamente 0.056% de la masa de partículas finas emitidas consisten de Cl.

- **Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.**

El diesel tiene un contenido de azufre del 0.5% y es comúnmente usado en el sector industrial y el comercial. Los hidrocarburos policíclicos aromáticos (siglas en inglés PAH's) son potencialmente mutagénicos y carcinógenos. En el experimento No.2 se encontró niveles altos de criseno y trifenileno. en contraste a lo obtenido en el experimento No.5. Los factores responsables de la variación en los niveles de emisión de PAH encontrados, pueden ser:

- 1.- Diferencias en la composición del combustible, por ejem: aromaticidad y propiedades del combustible como la gravedad API.

2.- Condiciones de operación de la caldera, por ejem: la temperatura del aire de combustión; el grado de recirculación del gas de flama; el exceso de oxígeno.

3.- El contenido de compuestos clorados.

- Cetonas Aromáticas Policíclicas y Quinonas.

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos oxigenados (Oxi-PAH) fueron cuantificados predominando la antraquinona y la 2-metilfluoren-9-ona. El nivel de emisión durante el experimento No.2 fue dos veces mayor respecto al experimento No.5.

- Hopanos y Esteranos.

Los combustibles fósiles como son el carbón y el petróleo son productos de materia biogénica transformada por diagénesis y catagénesis a través de millones de años. Los esteranos y hopanos triterpanoides han sido identificados en aceites lubricantes, escapes vehiculares, polvo de carreteras y partículas suspendidas.

2.6.2 Gas Natural.

El gas natural es quemado en calderas industriales, calentadores de procesos industriales y por consumidores residenciales y comerciales. El análisis químico de las emisiones incluye: especies iónicas; trazas de metales; carbón orgánico y carbón elemental. Los resultados muestran que la mayor parte de las emisiones de aerosol consisten de materia orgánica. La gran mayoría de esta masa orgánica identificada consiste de: hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH); oxigenados (oxi-PAH) como son cetonas aromáticas policíclicas y quinonas aromáticas policíclicas. Además de pequeñas cantidades de aza- y tía-arenos, n-alcanos, y ácidos n-alcanoicos.

- n-alcános.

Se encontraron n-alcános del rango C₁₉ a C₃₃, similares a los hallados en partículas finas provenientes de desechos vegetales. Debido a que el gas natural está compuesto de metano, etano y pequeñas cantidades de propano, entonces los n-alcános encontrados se deben a lo siguiente:

- 1.- Existen como contaminantes dentro del sistema de tubería.
- 2.- Fueron sintetizados durante el proceso de combustión.
- 3.- Se recogieron junto con el aire de combustión no filtrado.

- Ácidos Alcanoicos.

Los ácidos alcanoicos C₈ a C₁₈ con C₁₆ como especie predominante, fueron identificados en las emisiones del uso residencial de gas natural. También se encontraron pequeñas trazas de C₂₈. La gran concentración de C₁₆ encontrada puede deberse a fuentes de origen biogénico como consecuencia del venteo de las chimeneas al medio ambiente.

- Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos.

Fueron identificados dieciocho hidrocarburos policíclicos aromáticos (siglas en inglés PAH) y alquil-PAH's, de los cuales el criseno y/o trifenileno predominaron. Los PAH, como el binaftaleno, benzo(k)- y benzo(b)fluoranteno, y benzo-(e)pireno, se encontraron en menor proporción.

- Cetonas Policíclicas Aromáticas y Quinonas.

Los hidrocarburos policíclicos aromáticos oxigenados (oxi-PAH) son la segunda clase importante identificada en las emisiones de escape de la combustión de gas natural. La antraquinona (9,10-antracenediona), una quinona policíclica aromática (siglas en

inglés PAQ) fué encontrada en una concentración aproximada de 2000 pg/kJ de combustible quemado. El segundo compuesto más abundante fué 4-ciclopenta(def)fenantren-4-ona. En estos experimentos fueron excluidas las reacciones de conversión química que involucran a los PAH.

- Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos con Nitrógeno y Sulfuro.

Los compuestos aza-arenos así como tia-arenos han dado positivo en los ensayos sobre mutagenidad en bacterias y carcinogenicidad en animales. Estos compuestos heterocíclicos, son formados durante la combustión de combustibles fósiles de manera similar a la formación de los PAH por adición de átomos de nitrógeno y azufre dentro de las estructuras anilladas. Entre los compuestos encontrados fueron: la benzo(h)quinolina; benzo(f)quinolina; fenantridina y la acridina, así como isómeros de tia-arenos como benzo(b)naftaliofenos.

2.6.3 Planta de cemento.

Las emisiones primarias en la fabricación de cemento son: partículas; óxidos de nitrógeno, NO_x; dióxido de azufre, SO₂; monóxido de carbono, CO y CO₂. Pequeñas cantidades de compuestos orgánicos volátiles, amoníaco, cloro y ácido clorhídrico también pueden ser emitidos. Las emisiones incluyen residuos del combustible y de las materias primas (pueden contener trazas de metales pesados que pueden ser emitidos como partículas o vapor), o productos de una combustión incompleta. Los componentes de las emisiones de metal se agrupan en tres clases generales: metales volátiles; incluye mercurio (Hg) y talio (Tl); metales semivolátiles; antimonio (Sb); cadmio (Cd); plomo (Pb); selenio (Se); zinc (Zn); potasio (K⁺) y sodio (Na⁺); metales refractarios o no volátiles como bario (Ba); cromo (Cr); arsénico (As); níquel (Ni); vanadio (V); manganeso (Mn); cobre (Cu) y plata (Ag). El nivel de emisión de las especies químicas emitidas durante el proceso de calcinación se calculará en base a los factores de emisión presentados por el AP-42 y tomando en cuenta la producción de clinker en la planta de cemento.

**CAPITULO 3
RESULTADOS**

3.1 Consumo de combustibles en las fuentes fijas.

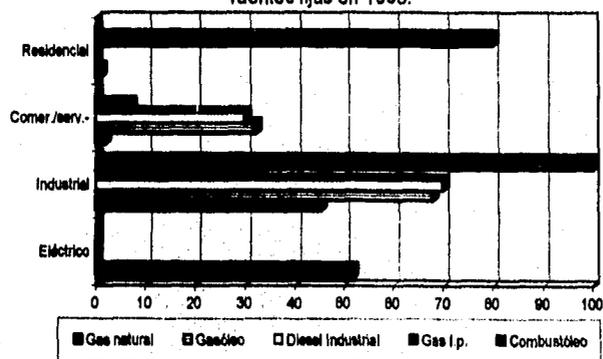
En la siguiente tabla se muestra el consumo de combustibles en la ZMCM para febrero de 1995.

Tabla 16. Consumo de combustibles en la ZMCM para febrero de 1995 (miles m³/mes).

Combustible	Consumo
Gas natural	214813.72
Gasóleo	21.21
Diesel industrial	15.03
Gas LP	335.95
Combustóleo	14.68

La distribución del consumo de combustibles por sector para el inventario de febrero de 1995 se muestra en la figura 11.

Figura 11. Distribución del consumo de combustibles en fuentes fijas en 1995.



Aplicando esta distribución a los consumos de la tabla 16, se tiene el consumo en m³ de combustible por sector, como se muestra a continuación:

Tabla 17. Distribución del consumo de combustibles por sector en 1995 (miles m³/mes).

Combustible	Consumo de combustibles por sector.				
	Eléctrico	Industrial	Comer./Serv.	Residencial	Total
Gas natural	111,440.40	97,319.00	3,966.32	2,088.00	214,813.72
Gasóleo	00.00	14.42	6.79	00.00	21.21
Diesel ind.	00.00	10.52	4.51	0.00	15.03
Gas LP	00.00	43.67	23.52	268.76	335.95
Combustóleo	00.00	14.68	00.00	00.00	14.68

El consumo de combustibles para febrero de 1995 de las fuentes puntuales seleccionadas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 18. Consumo de combustibles para las fuentes puntuales seleccionadas (Miles m³/mes).

Nombre	Tipo de combustible	Consumo
Termoeléctrica A	Gas natural	86,152.65
Termoeléctrica B	Gas natural	20,623.20
Química A	Gas natural	1,166.32
Química B	Gas natural	929.39
Química C	Gas natural	683.57
Vidriera A	Gas natural	2,569.78
Vidriera B	Gas natural	1,814.61
Vidriera C	Gas natural	1,988.39
Papelera A	Gas natural	1481.85
Papelera B	Gasóleo	4.20
Industria Automotriz	Gas natural	682.69
Total	Gas Natural	117,892.45
	Gasóleo	4.20

El consumo de gas natural de las fuentes puntuales representan el 56% del total para la ZMCM. En tanto que la única fuente que utiliza gasóleo representa el 20%.

3.2 Inventario 1995 de emisiones de PST.

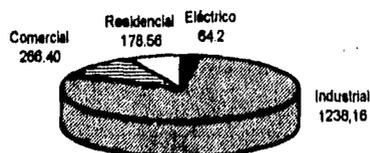
Las emisiones de PST para el mes de febrero de 1995 son las siguientes:

Tabla 19. Emisiones de PST por combustión para febrero de 1995 (ton/mes).

Combustible	Emisiones de PST.				
	Eléctrico	Industrial	Comer./Ser.	Residencial	Total
Gas natural	5.35	9.63	0.29	0.10	15.37
Gasóleo	0.00	41.54	19.54	0.00	61.08
Diesel ind.	0.00	2.53	1.08	0.00	3.61
Gas LP	0.00	3.06	1.29	14.78	19.13
Combustóleo	0.00	46.42	0.00	0.00	46.42
Total	5.35	103.18	22.20	14.88	145.61

En base a las emisiones de febrero, se hace una estimación anual para 1995. Estos resultados podrán ser comparados con los reportados para años anteriores [5, 6, 20].

Figura 12. Emisiones de PST por sector en la ZMCM 1995
1747,32 ton/año



3.3 Cálculo de las emisiones de PM-10 y PM-2.5.

Se multiplica el consumo de los combustibles por su factor de emisión.

Tabla 20. Emisiones de partículas PM-10 en febrero de 1995 en la ZMCM (ton/mes).

Combustible	Emisiones de PM-10				
	Eléctrico	Industrial	Comer./Ser.	Residencial	Total
Gas natural	5.35	9.63	0.29	0.01	15.28
Gasóleo	0.00	15.51	5.26	0.00	20.77
Diesel ind.	0.00	1.26	0.59	0.00	1.85
Gas LP	0.00	3.06	1.27	14.51	18.84
Combustóleo		20.85	0.00		20.85
Total	5.35	50.31	7.41	14.52	77.59

Tabla 21. Emisiones de partículas PM-2.5 en febrero de 1995 en la ZMCM (ton/mes).

Combustible	Emisiones de PM-2.5				
	Eléctrico	Industrial	Comer./Ser.	Residencial	Total
Gas natural	5.35	9.63	0.29	0.01	15.28
Gasóleo	0.00	10.10	1.95	0.00	12.05
Diesel ind.	0.00	0.32	0.45	0.00	0.77
Gas LP	0.00	3.06	1.27	14.51	18.84
Combustóleo		11.20	0.00		11.20
Total	5.35	34.31	3.96	14.52	58.14

3.3.1 Emisiones de PM-10 y PM-2.5 para las fuentes puntuales seleccionadas.

Para conocer el impacto sobre las emisiones totales, se presentan a continuación las PM-10 y PM-2.5 de las fuentes puntuales.

Tabla 22. Emisiones de PM-10 y PM-2.5 para las fuentes puntuales seleccionadas (ton/mes).

Nombre	PM-10	PM-2.5
Termoeléctrica A	4.14	4.14
Termoeléctrica B	0.99	0.99
Química A	0.06	0.06
Química B	0.05	0.05
Química C	0.03	0.03
Vidriera A	0.12	0.12
Vidriera B	0.08	0.08
Vidriera C	0.10	0.10
Papelera A	0.07	0.07
Papelera B	4.52	2.94
Industria Automotriz	0.03	0.03
Total	10.19	8.61

3.3.2 Emisiones de PST, PM-10 y PM-2.5 para la planta de cementos.

Emisiones de Partículas Suspendidas Totales.

Se realizó el cálculo de las emisiones de la planta cementera con los factores de emisión reportados por el AP-42 con y sin controles. Se comparó con las emisiones reportadas por la propia planta que incluyen controles. El factor de emisión de SO₂ para un horno con precalentador es de 0.54 kg/ton de clinker. Si la producción es de 120,000

toneladas por mes, las emisiones de bióxido de azufre son de 64.80 toneladas. Se consideró una absorción en el producto del 74% y por lo tanto las emisiones a la atmósfera son de 17.04 toneladas. En la siguiente tabla se muestra una comparación entre los resultados.

Tabla 23. Comparación de emisiones de PST para tres métodos (ton/mes).

Equipo	AP-42 sin controles	AP-42 con controles	Emisiones reportadas
Combustión	52.00	10.45	28.46
Trituración	N.D.	0.12	N.D.
Molino de crudo	9,120.00	6.42	1.96
Horno	23,180.00	4.56	31.06
Enfriador	N.D.	13.20	24.89
Molino de cemento	5,760.00	3.13	2.01
Total	38,112.00	37.88	88.38

De esta tabla se observa que las emisiones en la fabricación de cemento sin ningún tipo de control implementado son muy altas. Sin embargo desde la década pasada las emisiones de esta planta han ido disminuyendo. Así, en 1989 cada horno generaba 32 toneladas por mes. Después de instalar un precalcinador sobre cada horno se redujo un 30% en el consumo de combustible, se mejoró la relación aire/combustible. Las emisiones en 1994 se redujeron hasta un 70%.

Si se comparan las emisiones calculadas de acuerdo al AP-42, se observa que los controles con que cuenta la planta de cementos no están trabajando con una eficiencia adecuada.

Emisiones de PM-10 Y PM-2.5.

De acuerdo a la bibliografía [10], la distribución promedio del tamaño de las emisiones generadas durante el proceso se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24. Distribución del tamaño de partícula para equipo de proceso en la fabricación de cemento.

Equipo	PM-10	PM-2.5
Combustión	0.19	0.04
Horno	84.00	45.00
Enfriador	76.00	40.00

Fuente: EPA, 1985.

Tomando en cuenta la distribución anterior y las emisiones reportadas por la planta de cementos, a continuación se muestran las partículas PM-10 y PM-2.5 emitidas:

Tabla 25. Emisiones de PM-10 y PM-2.5 generadas en la planta de cemento (ton/mes).

Equipo	PM-10	PM-2.5
Combustión	5.41	1.14
Trituración	N.D.	N.D.
Molino de crudo	N.D.	N.D.
Horno	26.09	13.98
Enfriador	18.92	9.96
Molino de cemento	N.D.	N.D.
Total	50.42	25.08

Las emisiones generadas por la fabricación de cemento son muy altas, en comparación con las emisiones que provienen de la combustión en las once fuentes puntuales restantes. En su mayoría estas once fuentes consumen gas natural, cuya combustión genera bajas emisiones de partículas PM-10 y PM-2.5. En las siguientes figuras se puede apreciar mejor la distribución de emisiones para el sector industrial:

Figura 13. Emisiones totales de PM-10
77,59 ton/mes

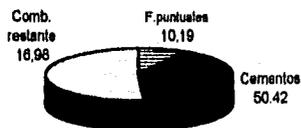


Figura 14. Emisiones totales de PM-2.5
58,14 ton/mes



3.4 Distribución espacial de las emisiones de PM-10 y PM-2.5.

En la figura 15 se muestra la distribución en la malla de simulación de la densidad Industrial. De la figura 16 a 21 se muestran las distribuciones espaciales de PM-10 y PM-2.5 para el sector industrial, comercial y residencial.

3.5 Variación temporal.

En las figuras 22 a 23 se muestran la variación temporal diaria de las emisiones de partículas para el sector industrial y residencial en la ZMCM.

3.6 Análisis químico.

3.6.1 Emisiones producidas por combustión de diesel y gas natural.

En la tabla 26 se muestra el análisis químico de las emisiones de partículas finas por combustión de diesel en una caldera industrial y de gas natural en residencias [14]. En esta tabla está especificado el nivel de emisión para cada componente iónico. La porción orgánica se muestra de manera muy general. Para una mejor apreciación esta tabla se muestra esquemáticamente en la figura 24.

En la tabla 27 y 28 se presenta una descripción detallada de los componentes orgánicos para combustóleo y gas natural respectivamente [14].

3.6.2 Emisiones provenientes de la planta de cementos.

En la tabla 29 se observa el análisis químico de las partículas emitidas por los hornos cuando el equipo de control es: 1) un precipitador electrostático y 2) un filtro. En los hornos de la planta de cementos analizada se tienen implementados precipitadores electrostáticos, cuyo nivel de emisiones es mayor que en el otro caso.

Figura 15. Densidad Industrial

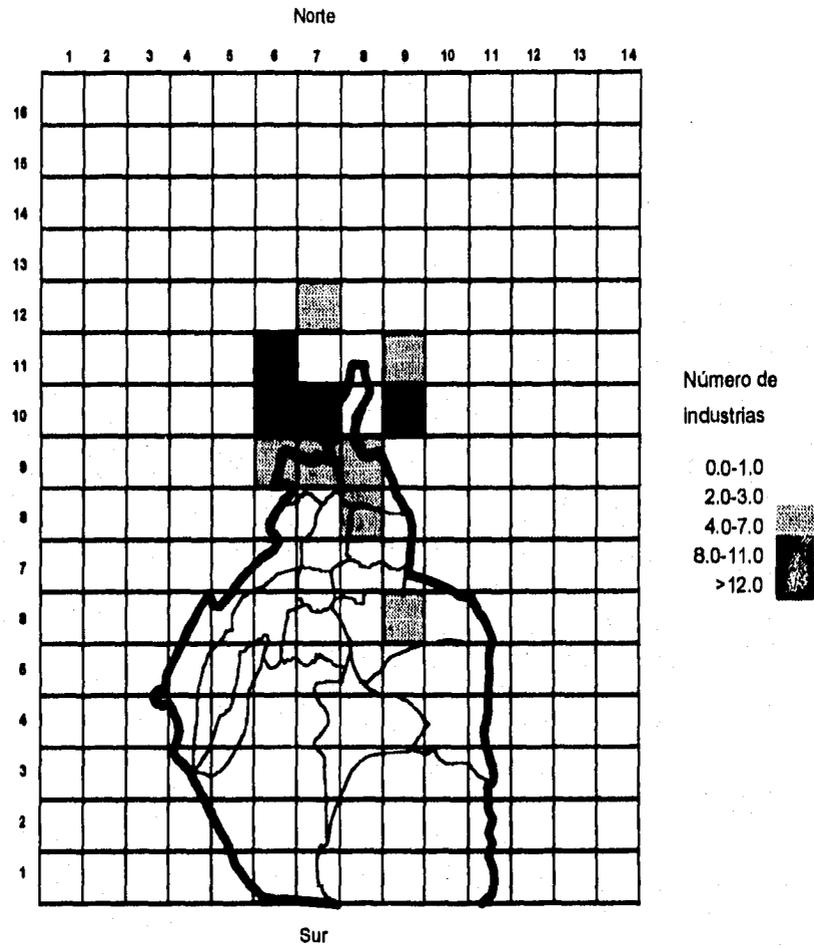


Figura 16. Distribución espacial de PM-10 Sector Industrial.

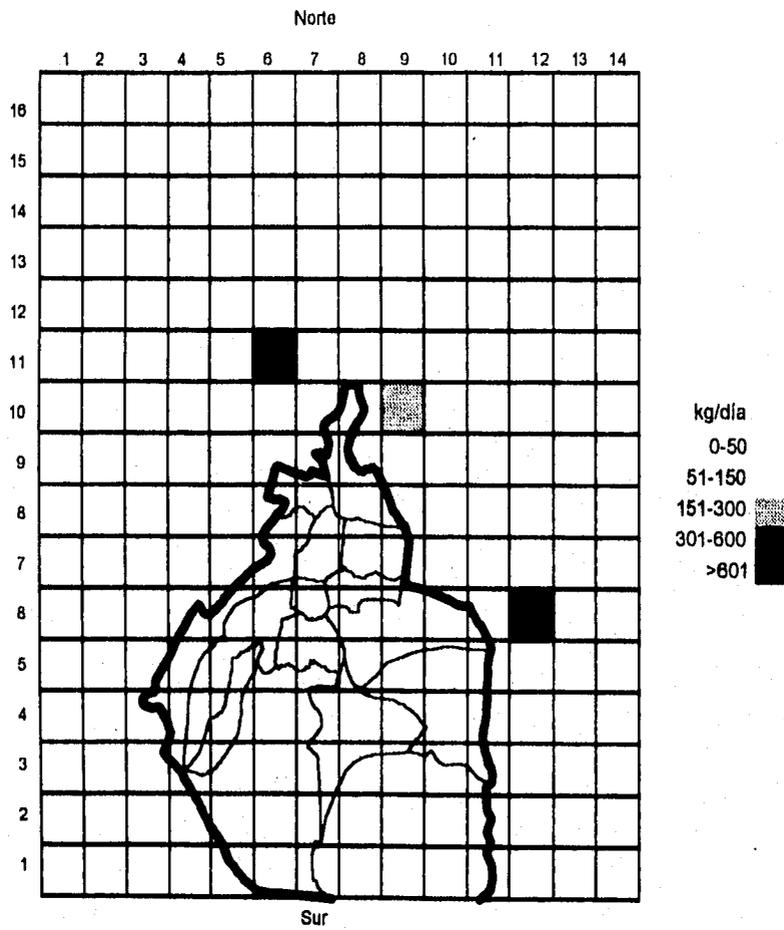


Figura 17. Distribución espacial de PM-2.5 Sector Industrial.

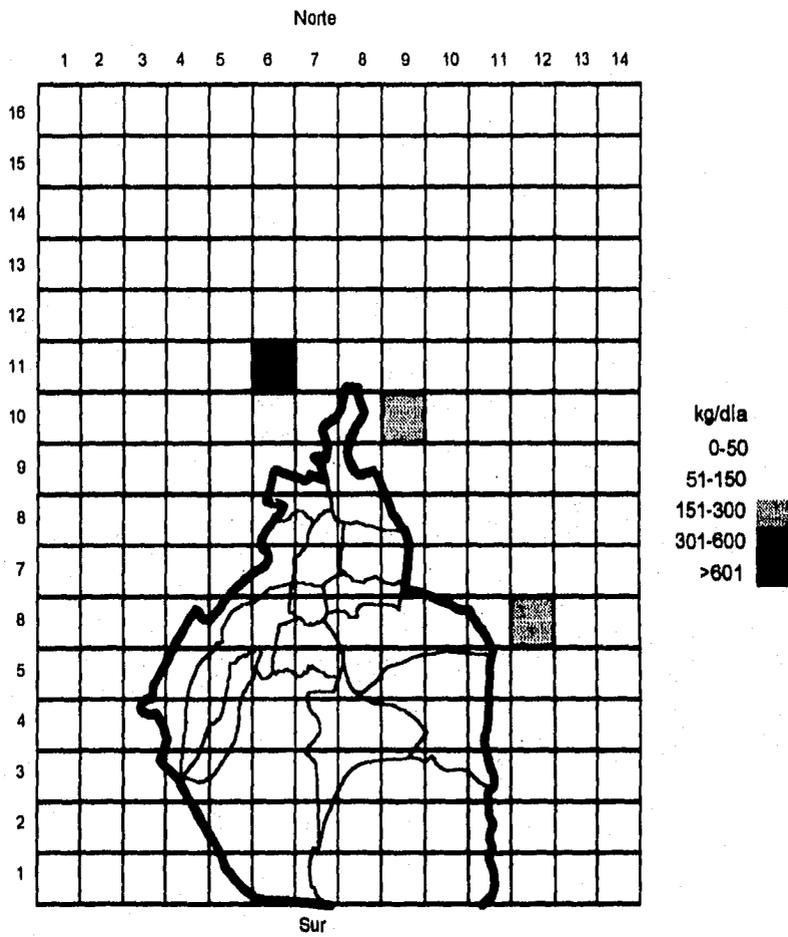


Figura 18. Distribución espacial de PM-10 Sector Comercial.

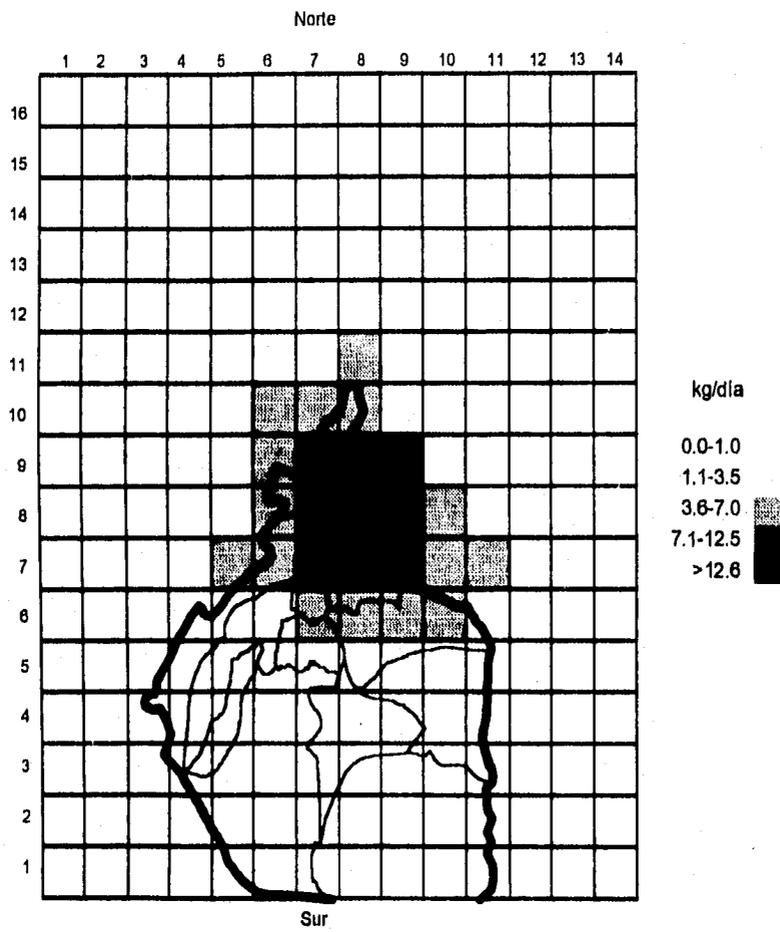


Figura 19. Distribución espacial de PM-2.5 Sector Comercial.

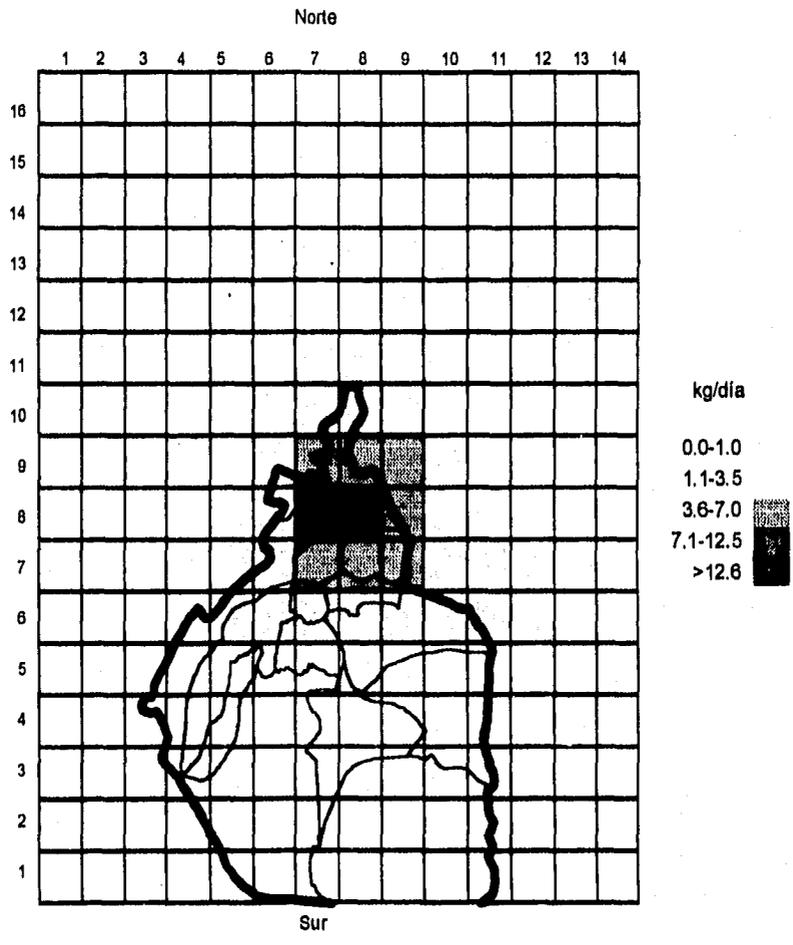


Figura 20. Distribución espacial de PM-10 Sector Residencial.

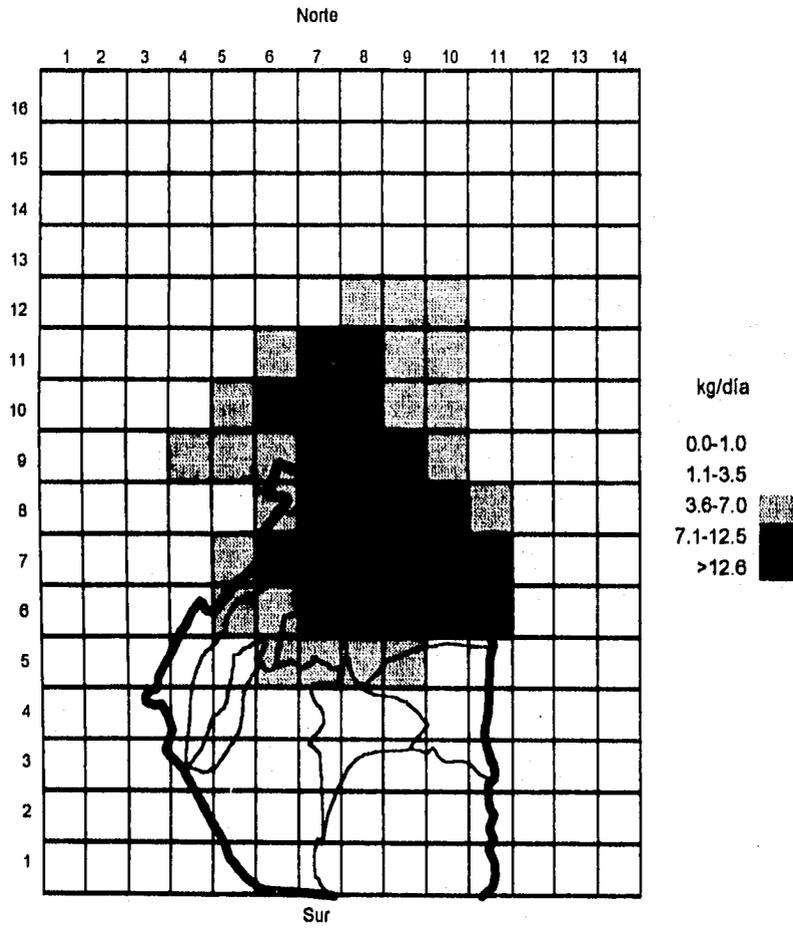


Figura 21. Distribución espacial de PM-2.5 Sector Residencial.

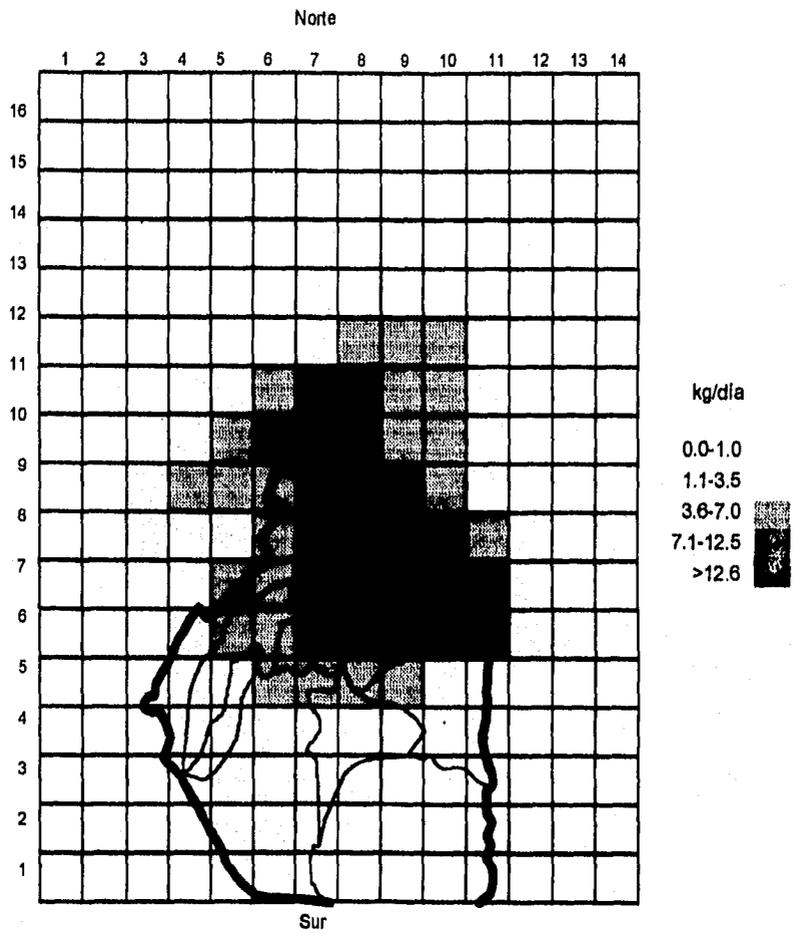
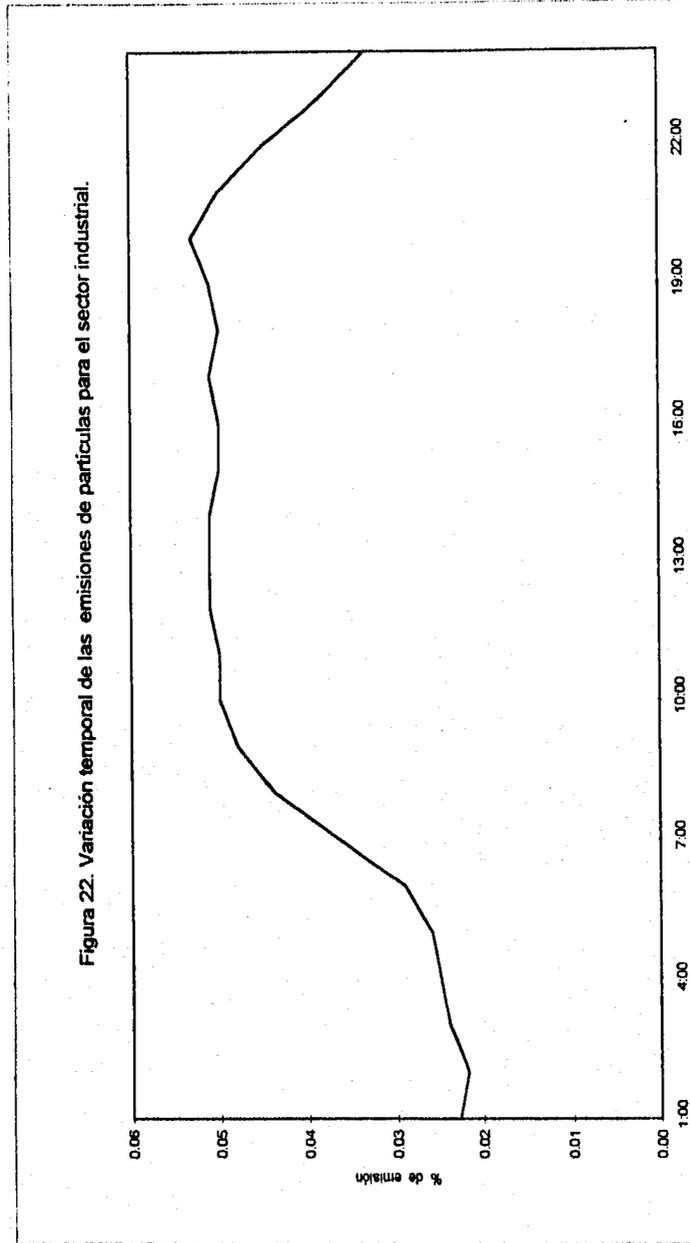


Figura 22. Variación temporal de las emisiones de partículas para el sector industrial.



Fuente: IMP, EGCA 1994.

Figura 23. Variación temporal de las emisiones de partículas para el sector residencial.

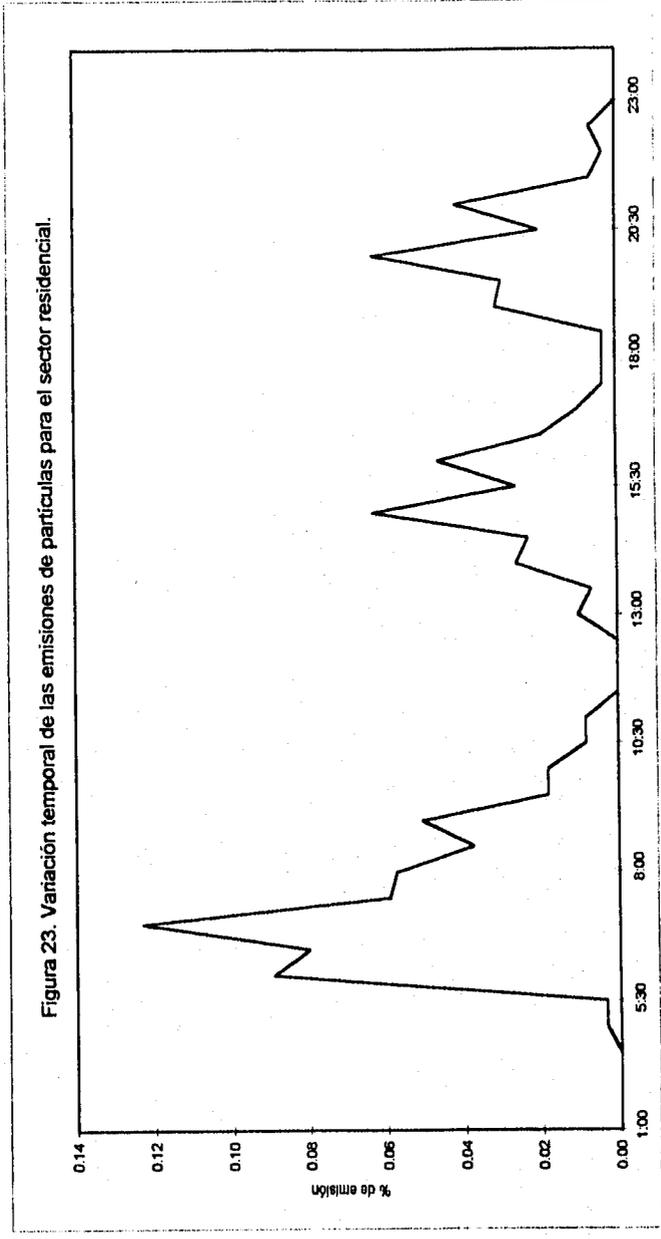


Tabla 26. Análisis químico de las emisiones de partículas finas por combustión de diesel y gas natural ^(a,b)

	% peso	
	Combustóleo No.2	Gas Natural
Al	0.420 ¹	0.220
Si	0.890 ¹	0.280
P	0.170 ¹	0.030
S ^(c)	9.100 ¹	0.730
Cl ^(c)	0.000	-0.090
K	0.002	0.170
Ca	0.006	1.040 ¹
Ti	0.001	0.100
V	0.001	0.018
Cr	0.002	0.050
Mn	0.000	0.020
Fe	0.130 ¹	0.090
Ni	0.000	0.090
Cu	0.001	-0.210
Zn	0.001	-0.180
As	0.002	0.000
Se	0.002	0.081
Br	0.005	0.040
Rb	0.001	0.020
Sr	0.000	-0.150
Ba	-0.06	-0.230
Pb	0.032 ¹	0.000
CE ^(d)	28.900 ¹	6.700
CO ^(d)	4.800 ¹	84.900 ¹
Mg ²⁺	0.013	-1.510
Na ⁺	0.250	2.130
Cl ⁻	0.056	3.880
NO ₃ ⁻	0.240 ¹	3.410 ¹
SO ₄ ²⁻	31.500 ¹	12.600 ¹
NH ₄ ⁺	6.200 ¹	0.440
Nivel de emisión de masa fina	9.370 ¹ (+1,54)ug/kJ	45.800 ¹ (+17,4)ng/kJ

(a) ¹denota las medias mayores que cero al menos dos veces el valor de la desviación estándar de las fuentes analizadas
¹denota que las concentraciones medidas en cuando menos la mitad de los experimentos, son mayores que cero por lo menos dos veces la desviación estándar del método analítico.

(b) Los valores en la tabla muestran el porcentaje del compuesto o elemento encontrado en las emisiones de ese tipo de fuente, promediados entre el número de pruebas realizadas. Los valores se corrigieron debido a la contribución de cualquier especie contaminante detectado en el aire diluyente, y como resultado pueden darse valores negativos. Ninguno de estos valores negativos difiere de cero por más de dos veces la desviación estándar. Se midieron también Ga, Y, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, La y Hg; pero se encontró que sus concentraciones son dos veces menores que la desviación estándar tanto del método analítico como de la media para todas las fuentes analizadas.

^(c) Estas mediciones no se incluyen en el balance de materiales, porque duplican otros compuestos contenidos en la tabla.

^(d) CE carbón elemental, CO carbón orgánico

Fig. 24 Promedio de la composición química de las emisiones de partículas finas por combustión de diesel y gas natural.

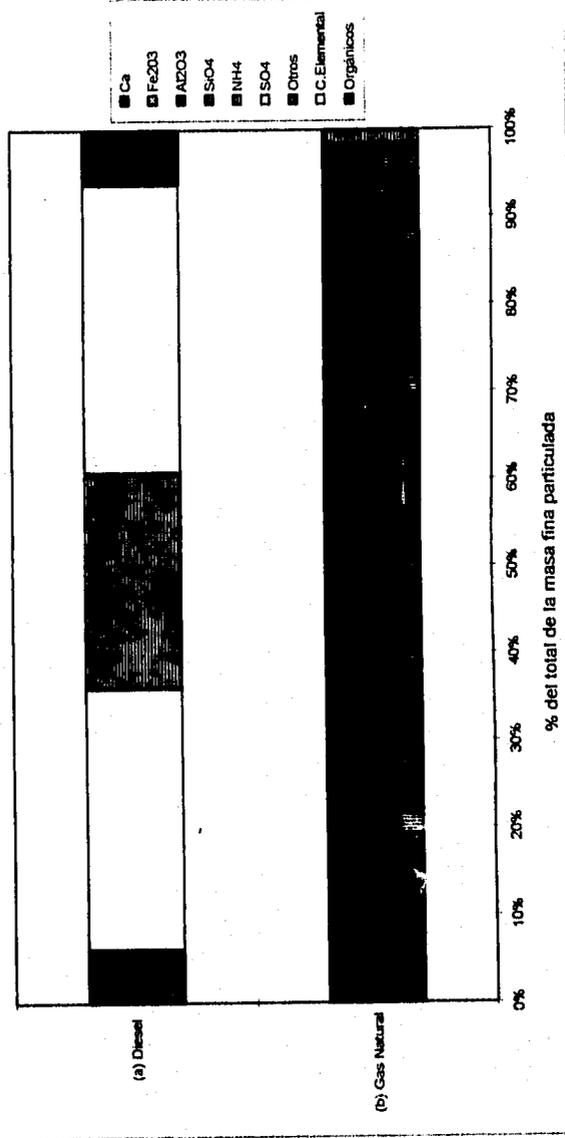


Tabla 27. Emisiones de aerosol fino de compuestos orgánicos provenientes de la combustión de diesel en calderas industriales.

	Nivel emisión ^a en pg/kJ		Compuesto ID ^{**}
	Experimento		
	No.2	No.5	
n-Alcanos			
n-nonadecano	416.80	82.50	a
n-eicosano	654.60	112.30	a
n-heneicosano	718.60	170.60	a
n-docosano	587.70	266.80	a
n-tricosano	428.20	358.00	a
n-tetracosano	318.40	322.00	a
n-pentacosano	226.00	234.20	a
n-hexacosano	114.80	119.00	a
n-heptacosano	86.90	98.20	a
n-octacosano	49.90	45.10	a
n-nonacosano	65.10	92.20	a
n-triacontano	50.80	78.30	a
n-hentriacontano	19.30	47.00	a
n-dotriacontano	9.70	13.30	a
n-tritriacontano	7.10	4.00	a
Total clase:	3733.90	2023.50	
Acidos n-alcánicos^{**}			
ácido n-nonaico	184.80	n.d.	a
ácido n-decanoico	337.30	58.40	a
ácido n-undecanoico	195.50	n.d.	a
ácido n-dodecanoico	1349.40	157.20	a
ácido n-tridecanoico	83.40	n.d.	a
ácido n-tetradecanoico (ácido mirístico)	879.80	283.80	a
ácido n-pentadecanoico	264.90	78.20	a
ácido n-hexadecanoico (ácido palmítico)	5717.30	1956.20	a
ácido n-heptadecanoico	148.60	75.70	a
ácido n-octadecanoico (ácido esteárico)	2104.40	715.30	a
ácido n-nonadecanoico	71.20	n.d.	a
ácido n-eicosanoico	66.30	41.00	a
ácido n-heneicosanoico	16.00	n.d.	a
ácido n-docosanoico	33.40	15.10	a
ácido n-tricosanoico	9.00	n.d.	a
ácido n-tetracosanoico	35.20	18.10	a
ácido n-pentacosanoico	6.80	n.d.	a
ácido n-hexacosanoico	10.80	n.d.	a
Total clase:	11512.10	3399.00	
Acidos aromáticos			
ácido benzoico	898.70	1443.70	b
ácido 1,3-bencendicarboxílico	217.40	243.40	a
ácido 1,4-bencendicarboxílico	180.40	143.70	a
Total clase	1296.50	1830.80	

continúa Tabla 27

Hidrocarburos clorados			
1-cloro-4-hidroxibenceno	1035.70	58.10	b
1,3-dicloro-2-hidroxibenceno	183.20	179.40	b
ácido 3-clorobenzoico	2124.70	172.20	b
ácido 2,5-diclorobenzoico	349.80	55.90	b
Total clase	3673.40	485.60	

Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH)			
fenantreno	75.90	19.10	a
antraceno	4.90	1.20	a
metil-(fenantrenos, antracenos)	105.00	26.70	b
dimetil-(fenantrenos, antracenos)	84.30	29.60	b
fluoranteno	119.40	9.00	a
pireno	133.20	7.30	a
benzo(g)fluoranteno	88.40	5.00	b
benz(a)antraceno	118.70	1.50	a
criseno/trifenileno	414.60	11.00	a
benzo(k)fluoranteno	105.30	n.d.	a
benzo(b)fluoranteno	99.40	n.d.	a
benzo(e)pireno	47.80	n.d.	a
benzo(a)pireno	3.30	n.d.	a
Total clase	1400.20	110.40	

Cetonas policíclicas aromáticas y Quinonas			
9H-fluoren-9-ona (fluorenona)	32.30	25.00	a
2-metilfluoren-9-ona	174.70	59.80	b
9,10-antracenediona (antraquinona)	297.90	48.50	a
1-H-benz(de)antracen-1-ona	8.80	3.50	b
7-H-benz(de)antracen-7-ona	24.10	4.00	b
Total clase	537.80	140.80	

Esteranos regulares			
20R-5a(H),14a(H),17a(H)-clorestano	22.10	18.10	a
20S&R-5a(H),14b(H),17b(H)-ergostano	50.40	34.80	b
20S/R-5a(H),14b(H),17b(H)-cistolano	23.10	13.60	b
Total clase	95.60	64.50	

Triterpanos pentacíclicos			
22,29,30-Irisnomochofano	20.70	9.50	b
17a(H),21b(H)-29-norofano	28.80	12.90	b
17a(H),21b(H)-hofano	42.10	24.20	b
22S-17a(H),21b(H)-30-homohofano	13.50	5.70	b
22R-17a(H),21b(H)-30-homohofano	7.20	4.80	b
22S-17(H),21b(H)-30-bishomohofano	5.50	n.d.	b
22R-17a(H),21b(H)-30-bishomohofano	3.80	n.d.	b
Total clase	121.80	57.10	

*n.d., no detectado; las determinaciones exactas fueron desarrolladas tanto para compuestos estándar polares, como para no polares; mostrando que las desviaciones estándar relativas se encontraban entre 4 y 8% dependiendo de los compuestos estándares inyectados.

**a, positivo; b, probable; c, posible; d, tentativo.

Tabla 28. Emisiones de aerosol fino de compuestos orgánicos provenientes de la combustión de gas natural en hogares.

	Nivel emisión* en pg/kJ			Compuesto ID**
	HEPA-Dilución	1er. filtro	2o. filtro	
n-Alcanos				
n-nonadecano	3.20	n.d.	4.60	a
n-eicosano	8.40	13.30	12.00	a
n-heneicosano	16.80	50.90	26.60	a
n-docosano	13.10	108.40	39.80	a
n-tricosano	7.10	164.60	26.80	a
n-tetracosano	3.20	112.40	6.20	a
n-pentacosano	1.40	55.20	2.90	a
n-hexacosano	1.20	23.80	1.50	a
n-heptacosano	0.75	32.20	n.d.	a
n-octacosano	0.84	12.70	n.d.	a
n-nonacosano	0.81	50.20	n.d.	a
n-triacontano	0.24	6.00	n.d.	a
n-hentriacontano	0.26	16.60	n.d.	a
n-dotriacontano	n.d.	1.10	n.d.	a
n-tritriacontano	n.d.	0.70	n.d.	a
Total clase:	57.10	648.10	124.40	
Acidos n-alcanolcos***				
ácido n-octanoico	16.2	152	118.9	a
ácido n-nonaico	32.60	225.2	482.6	a
ácido n-decanoico	2.90	119.5	131.30	a
ácido n-undecanoico	n.d.	43.2	19.4	a
ácido n-dodecanoico(ácido láurico)	8.90	120.7	56.20	a
ácido n-tridecanoico	n.d.	16	4.8	a
ácido n-tetradecanoico (ácido mirístico)	3.70	59.6	29.90	a
ácido n-pentadecanoico	0.96	14.3	8.50	a
ácido n-hexadecanoico (ácido palmítico)	9.70	310.4	56.80	a
ácido n-heptadecanoico	n.d.	12.5	4.10	a
ácido n-octadecanoico (ácido esteárico)	2.80	61.8	n.d.	a
ácido n-nonadecanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido n-eicosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido n-heneicosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido n-docosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido n-tricosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido n-tetracosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido n-pentacosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido n-hexacosanoico	n.d.	5.3	n.d.	a
ácido n-heptacosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido octacosanoico	n.d.	4	n.d.	a
ácido nonacosanoico	n.d.	n.d.	n.d.	a
ácido triacontanoico	n.d.	1.4	n.d.	a
Total clase:	75.56	1165.9	910.5	

continúa tabla 28

Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH)				
fenantreno	0.20	6.3	3.20	a
antraceno	0.22	1.9	0.26	a
fluoranteno	0.19	685.3	251.70	a
pireno	0.56	759.3	146.00	a
benzacenoflino	n.d.	1.6	n.d.	b
2-fenilnaftaleno	n.d.	13.6	6.10	b
metil-(fluoranteno,pirenos)	n.d.	49.3	10.50	b
benzo(a)fluoreno/benzo(b)fluoreno	n.d.	13.3	1.10	a
benzo(g)fluoranteno	n.d.	397.7	130.70	b
benzo(c)fenantreno	n.d.	125.5	48.90	a
benz(a)antraceno	n.d.	497.7	6.70	a
criseno/triflino	n.d.	1922.7	524.80	a
metil-(benz(a)antracenos, crisenos, triflilos)	n.d.	75.8	5.60	b
dimetil-(fluorantenos,pirenos)	n.d.	10.8	n.d.	b
1,2;2-1;-2,2-binaftalenos	n.d.	139.7	9.00	b
benzo(k)fluoranteno	n.d.	393.8	6.00	a
benzo(b)fluoranteno	n.d.	284.4	5.40	a
benzo(e)pireno	n.d.	116	1.9	a
Total clase	1.19	5494.50	1157.86	
Cetonas policíclicas aromáticas y Quinonas				
9H-fluoren-9-ona (fluorenona)	n.d.	55.1	49.20	a
1H-fenalen-1-ona	n.d.	618.4	3.00	a
metilfluorenonas	n.d.	159.5	93.90	b
9,10-fenantrenodiona (fenantrenquinona)	n.d.	12.1	4.50	a
9,10-antracenediona (antraquinona)	n.d.	1978.8	39.10	a
2-metil-9,10-antracenediona (2-metilanttraquinona)	n.d.	89.7	0.47	a
penantrona/antrona	n.d.	21.4	1.20	a
9H-xanten-9-ona (xantona)	n.d.	49.3	15.60	a
4-clcopenta(de)fenantren-4-ona	n.d.	920.2	501.90	b
1-H-benz(de)antracen-1-ona	n.d.	132	2.90	b
7-H-benc(de)antracen-7-ona	n.d.	94.7	0.62	a
benc(e)antreceno-7,12-diona	n.d.	123.7	104.10	a
Total clase		4232.9	616.69	
Aza y Tiarenos				
benzo(h)quinolina	n.d.	38.60	30.6	a
benzo(f)quinolina	n.d.	25.90	1.7	b
fenantridina	n.d.	48.40	1	a
acridina	n.d.	7.40	n.d.	a
aza-arenos con MW203(d)****	n.d.	124.30	26.6	b
benzo(b)naftotiofenos	n.d.	325.40	103.5	b
Total clase		568.00	183.40	

continúa tabla 28

Triterpanos pentacíclicos			
22,29,30-trisnorneohofano	20.70	9.50	b
17a(H),21b(H)-29-norofano	28.80	12.90	b
17a(H),21b(H)-hofano	42.10	24.20	b
22S-17a(H),21b(H)-30-homohofano	13.50	5.70	b
22R-17a(H),21b(H)-30-homohofano	7.20	4.80	b
22S-17(H),21b(H)-30-bishomohofano	5.50	n.d.	b
22R-17a(H),21b(H)-30-bishomohofano	3.80	n.d.	b
Total clase	121.60	57.10	

*n.d., no detectado; las determinaciones exactas fueron desarrolladas tanto para compuestos estándar polares, como para no polares; mostrando que las desviaciones estándar relativas se encontraban entre 4 y 8% dependiendo de los compuestos estándares inyectados.

**a, positivo; b, probable; c, posible; d, tentativo.

***Detectado como metil ester.

****Isómeros como indeno(1,2,3-l,i)isoquinolina; 4-azapireno.

Tabla 29. Análisis químico de las emisiones de partículas de la Planta de Cemento

Nivel de emisión en Kg/ton clinker

	Pracipilador Electrostatico	Filtro
Compuestos Inorgánicos		
Plata (Ag)	0	0.0372
Aluminio (Al)	780	0
Arsénico (As)	0.78	0.72
Bario (Ba)	21.6	27.6
Berilio (Be)	0	0.0396
Calcio (Ca)	14400	0
Cadmio (Cd)	0.504	0.132
Cloro (Cl)	40800	132
Cromo (Cr)	0.488	8.4
Cobre (Cu)	312	0
Flúor (F)	54	0
Hierro (Fe)	1020	0
Acido clorhídrico (HCl)	3000	8760
Mercurio (Hg)	13.2	1.44
Potasio (K)	1080	0
Manganeso (Mn)	51.6	0
Amoniaco (NH ₃)	0	612
Amonio (NH ₄)	6480	0
Nitrato (NO ₃)	276	0
Sodio (Na)	2400	0
Plomo (Pb)	43.2	4.56
Trióxido de azufre (SO ₃)	5040	0
Sulfato (SO ₄)	12000	432
Selenio (Se)	9	12
Talio (Ta)	0	0.324
Titanio (Ti)	22.8	0.324
Zinc (Zn)	32.4	20.4
Total clase	87837.55	10011.98
Contaminantes Orgánicos		
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	0	0.0000132
Bencenos C ₃	0.156	0
Bencenos C ₄	0.36	0
Bencenos C ₆	0.0552	0
Acenaftileno	0	7.08
Acetona	22.8	0
Benzaldehído	1.44	0
Benceno	192	960
Benzo(a)antraceno	0	0.00252
Benzo(a)pireno	0	0.0078
Bnzo(b)fluoranteno	0	0.0336
Benzo(g,h,i)ferileno	0	0.00468
Benzo(k)fluoranteno	0	0.00924
Acido benzoico	216	0
Bifenilo	0.372	0
bis(2-etilhexil)ftalato	5.76	0
Bromometano	2.64	0
Disulfuro de carbono	6.6	0
Total clase	448.18	967.14

Continúa tabla 29

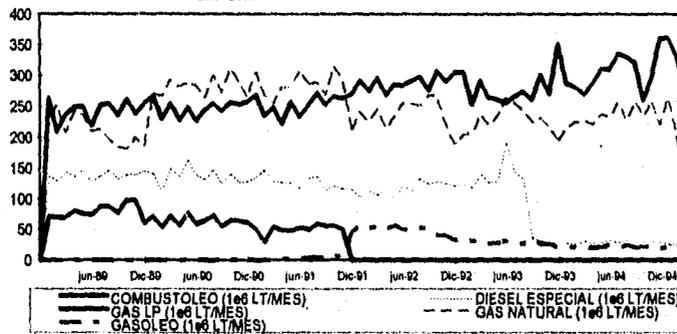
Contaminantes Orgánicos		
Clorobenceno	0.96	0
Clorometano	22.8	0
Criseno	0	0.00972
di-n-Butilftalato	2.52	0
debenz(a)antraceno	0	0.0372
Etilbenceno	1.14	0
Fluoranteno	0	0.528
Fluoreno	0	1.128
Formaldehído	0	27.8
Freón 113	3	0
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0	0.00516
Metilacetona	1.8	0
Colometileno	30	0
Metilnaftaleno	0.252	0
Naftaleno	13.2	102
Fenantreno	0	24
Fenol	6.6	0
Pireno	0	0.264
Estireno	0.09	0
Tolueno	12	0
Xilenos	7.8	0
Total clase	102.16	155.57
TOTAL	88387.90	11134.69

CAPITULO 4
DISCUSION DE RESULTADOS.

4.1 Consumo de combustibles.

La situación histórica de los combustibles industriales muestra una tendencia a la baja como se observa en la Figura 25. Salvo en el caso del gas l.p. que ha seguido aumentando. Este combustible usado principalmente en los hogares, aumenta en el trimestre noviembre-enero que es el periodo invernal. En febrero baja y vuelve a aumentar en marzo. En abril disminuye nuevamente. Son diciembre de 1994 y enero, febrero de 1995 los meses en que se ha alcanzado el nivel de consumo más alto.

Figura 25. Consumo de combustibles en fuentes fijas en la ZMCM.



El consumo de gas natural disminuyó en el último bimestre de 1994. Después de haber analizado el consumo de gas natural de las diferentes bases de datos, se estableció una nueva distribución del uso por sector. Se que el sector eléctrico ha aumentado el consumo de este combustible, en cambio en el sector industrial ha disminuido. Respecto al sector comercial y residencial, se conservó la distribución establecida con anterioridad, los datos de consumo de gas natural en estos sectores se deben tomar como teóricos ya que las redes de distribución de este combustible, aún no llegan totalmente a todas las delegaciones y municipios que conforman la ZMCM. Todas las fuentes puntuales, excepto una, utilizan gas natural. En estas fuentes se incluyen dos

termoeléctricas que consumen el 96% del sector eléctrico. Las fuentes restantes son industrias, su consumo representa el 12% del total de gas natural destinado al sector industrial. Esto es significativo porque se está hablando de sólo ocho

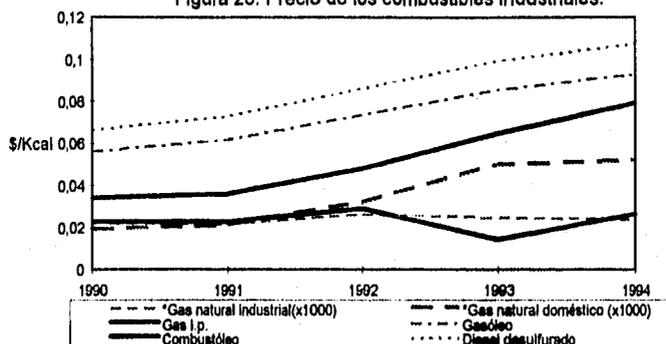
El gasóleo no es muy usado en la ZMCM, su consumo es el más bajo respecto a los demás combustibles. El contenido de azufre (2%), explica en parte lo anterior. Antes de la crisis económica de diciembre de 1994 el consumo de gasóleo había caído, lo cual indica que el sector industrial donde se consume no ha crecido en los últimos años. La fuente que consume gasóleo representa a su vez el 20% .

Para los demás combustibles no hubo cambio ya que los porcentajes se conservaron. La distribución del consumo de combustibles por sector se tiene que estar actualizando en base a los cambios socio-económicos que se susciten en la ZMCM.

El consumo de combustóleo en la ZMCM no es una cifra oficial porque ningún sector está autorizado a utilizarlo. Sin embargo se sabe que la planta de cementos es una excepción. El consumo de combustóleo registrado en la base de datos del Instituto Nacional de Ecología de 1994 no está actualizado y contempla cuatro fuentes industriales que también consumen este combustible. Por ello, estos datos se deben manejar con cierta incertidumbre. El consumo en el sector industrial de combustóleo es tan bajo como el de gasóleo.

La cantidad de diesel especial utilizado en la ZMCM cayó drásticamente en agosto de 1993 debido a la introducción del diesel sin. Cabe mencionar que el bajo consumo de este combustible se debe a que su costo por kilocaloría es el más alto respecto a los demás combustibles, como se ve en la figura 26.

Figura 26. Precio de los combustibles industriales.



4.2 Factores de emisión.

Los factores de emisión calculados no consideran equipos de control de emisiones debido a la falta de información sobre las fuentes para cada sector. Sólo en el caso de la planta de cementos se tiene datos exactos sobre el tipo y eficiencia de los controles de emisión. El nivel de partículas generadas por la elaboración de cemento se ha reducido hasta en un 90% desde 1989. Los factores utilizados para el cálculo de las emisiones de la planta de cementos se tomaron del manual AP-42 de 1995, única sección de esta edición actualizada de que se disponía. Los factores para las demás fuentes de área y puntuales se basaron en la edición de 1985 por lo que se deben actualizar.

Se consideró que la mayoría de las PST generadas por la quema de gas i.p. son partículas con un diámetro de $10\mu\text{m}$ y por lo tanto se incluyen las de tamaño 2.5. En el caso de equipos de combustión grandes, la relación PM-10/PST son mayores que para los equipos instalados en comercios y/o residencias.

Los factores utilizados están basados en el AP-42, sin embargo en estudios anteriores se han medido las emisiones en equipos de combustión en nuestro país, y los factores medidos caen dentro de los reportados por dicho manual [20].

4.3 Emisiones.

4.3.1 Partículas Suspendidas Totales (PST).

En la tabla 30 se hace una comparación de los inventarios anuales de partículas suspendidas totales por combustión en fuentes fijas. De 1989 a 1992 las emisiones se redujeron aproximadamente en un 70% debido a las medidas que entonces se adoptaron y de las cuales se mencionó en el primer capítulo. De 1992 a 1995, se observa un aumento en las emisiones del sector eléctrico. El factor de emisión empleado en ambos inventarios es el mismo, sin embargo en 1995 este sector aumentó su consumo de gas natural, de acuerdo a la distribución del uso de combustibles presentada en esta tesis.

Tabla 30. Comparación de las emisiones de PST para tres inventarios.

Emisiones de PST (ton/año)			
Sector/año	1989	1992	1995 ^(a)
Eléctrico	4135.69	47.51	64.20
Industrial	2889.82	1537.93	1238.16
Comer./serv.	1182.56	710.54	266.40
Residencial	408.41	368.76	178.56
Total	8616.48	2664.74	1747.32

^(a) Emisiones estimadas a partir de febrero.

En el sector industrial se ve que las PST disminuyeron, esto se explica porque la disminución en el consumo de combustibles industriales. Se incluyen las emisiones de veinticinco fuentes litográficas que provienen del tipo de proceso empleado, estas representan el 13.2% de las PST para el sector industrial. Las partículas de estas fuentes no se consideraron en el inventario de PM-10 y PM-2.5 porque no se tiene información sobre la distribución por tamaño de partícula para cada tipo de proceso.

Después del combustóleo, el gasóleo es el combustible que genera niveles de PST más altos, ya que el 2% de azufre que contiene es cuatro veces mayor que el contenido en el diesel industrial. El sector industrial contribuye con un 70% de las partículas suspendidas totales para el inventario de 1995. La planta de cemento emite 88.38

toneladas provenientes de los equipos de producción, lo cual indica que esta fuente tiene que dar un mantenimiento adecuado a sus controles de emisión.

4.3.2 Partículas PM-10 y PM-2.5.

Del inventario de PM-10 y PM-2.5, es el sector industrial quien genera 65% de las PM-10 y de PM-2.5. Estas cifras nos dicen que el problema en este sector viene de la falta de equipos de control, deficiencia tecnológica, relación aire/combustión inadecuada. Existe un porcentaje muy bajo de industrias que tienen sistemas de control, la mayoría carece de ellos. Los factores de emisión se han calculado considerando que no hay equipos que controlen la salida de partículas.

El sector residencial aporta el 19% de las emisiones de PM-10 por combustión en fuentes estacionarias. Gran parte de las cuales se deben a la combustión de gas l.p.

Para el caso de combustión en fuentes fijas, la relación de emisiones de PM-10 a emisiones de PST es del orden de 0.5. Dado este factor, se puede inferir que la reducción de aproximadamente 6870 ton/año de PST desde 1989 a la fecha ha significado una reducción de 3435 ton/año de PM-10. En el caso de la relación PM-2.5/PST, el cociente es de 0.4 y da una reducción de 2748 ton/año. Sin embargo estos resultados se deben tomar con precaución dado que la crisis económica de principios de 1995, hizo que el consumo de combustibles disminuyera.

De las 12 fuentes puntuales, incluyendo la planta de cemento emiten por combustión 15.6 y 9.75 toneladas de PM-10 y PM-2.5 respectivamente, esto es el 20% y 17% del total en la ZMCM. Las emisiones de PM-10 y PM-2.5 provenientes de la fabricación de cementos representan más del 50% de las emisiones totales por combustión en la ZMCM.

4.4 Distribución espacial.

La mayor densidad industrial se encontró en el noroeste de la ZMCM, principalmente en Azcapotzalco, Gustavo A. Madero, los municipios de Xalostoc y Tlalnepantla. Las partículas PM-10 y PM-2.5 del sector industrial recaen principalmente en las celdas donde se localiza la planta de cementos y la zona industrial de Xalostoc.

La distribución espacial de las emisiones de partículas PM-10 y PM-2.5 para el sector comercial guarda una relación con las zonas más pobladas en la ZMCM (figuras 18-21), concentrándose en la zona centro y municipios como Tlalnepantla, Naucalpan y Nezahualcóyotl.

4.5 Variación temporal.

Con relación a la variación temporal del sector industrial, el nivel de emisión de partículas aumenta a partir de las 7:00 a.m. llegando a una distribución casi uniforme hasta las 20:00 hrs. En adelante las emisiones disminuyen, debido a que las actividades en parte de este sector también lo hacen.

Para el sector residencial debe mencionarse que los resultados obtenidos están delimitados por lo siguiente: se realizaron encuestas sobre las actividades diarias a el personal de la Gerencia de Ciencias del Ambiente que tiene características específicas, por lo que sólo se representa cierto sector de la población total de la ZMCM. La variación temporal así obtenida nos muestra que el mayor pico de emisión de partículas es de las 6:00 a las 8:00 de la mañana debido a que en este lapso las personas hacen mayor uso de los calentadores de agua y de la estufa para prepararse a iniciar sus labores. Después entre las 14:00 y 16:00 vuelve a aumentar el pico, no tan alto como en la mañana debido a que las personas sólo utilizan el combustible para cocinar y/o calentar sus alimentos. Finalmente un tercer pico se observa por la noche. Esta variación temporal toma en cuenta cinco días, siendo diferente para los fines de semana, también cambia dependiendo de las estaciones del año.

4.6 Composición química.

Los componentes orgánicos son lo que se emiten en mayor cantidad en la combustión de gas natural. Esto cambia cuando se quema diesel. En las partículas originadas por la combustión de diesel, los compuestos más abundantes el carbono elemental y los sulfatos.

La combustión incompleta de los materiales derivados del petróleo generan hidrocarburos polinucleares, derivados de la estructura molecular del antraceno los cuales son carcinógenos. La caracterización del diesel presentada en la tabla 27 muestra que se generan compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos, que son los más tóxicos, ya que algunos como el 3,4-benzopireno, tienen actividad carcinógena (induce rápidamente la formación de carcinomas en diferentes órganos) y causan mutaciones. Otros de los carcinógenos más potentes son derivados del 1,2-benzantraceno, el benzopireno que se ha relacionado con el desarrollo de cáncer de pulmón en los seres humanos también es encontrado en las emisiones por combustión.

La caracterización química de las emisiones de partículas en la fabricación de cemento presentadas en la tabla 29 y que consideran la implementación de un precipitador electrostático en los hornos de calcinación muestran que los compuestos inorgánicos más abundantes son el calcio, el cloro y los sulfatos, esto se explica por las materias primas utilizadas (calcita; CaCO_3 ; yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, entre otros) y el combustible usado, (3.6% de azufre), se observa también productos de la combustión incompleta, que se consideran dañinos. Los compuestos orgánicos no son significativos.

CAPITULO 5 **CONCLUSIONES**

- Las emisiones de PST por combustión en fuentes fijas de 1989 a la fecha han disminuido considerablemente en aproximadamente 6870 toneladas. Esto se debe a la sustitución de combustóleo por gas natural en las termoeléctricas y parte del sector industrial. Se introdujo el gasóleo y diesel industrial, cuya formulación contiene menos azufre que los combustóleos que se consumían en 1989. Además el consumo de los combustibles industriales se ha ido reduciendo, debido en parte a la situación económica que predomina en el país.
- El sector industrial contribuye con el 65% de las emisiones de partículas PM-10 por combustión en fuentes fijas, así como el 60% de las PM-2.5.
- El sector residencial contribuye con cerca del 20% de las emisiones de partículas PM-10 por combustión en fuentes fijas y con el 25% de las PM-2.5.
- Debido a su consumo en los sectores industrial y comercial, el gasóleo contribuye en mayor medida a la emisión de partículas PM-10 por combustión en fuentes fijas seguido del gas l.p. usado principalmente en el sector residencial.
- De las 12 fuentes puntuales, incluyendo la planta de cemento emiten por combustión el 20% y 17% de las PM-10 y PM-2.5 respectivamente del total en la ZMCM. Las emisiones de PM-10 y PM-2.5 provenientes de la fabricación de cementos representan más del 50% de las emisiones totales por combustión en la ZMCM.
- La distribución espacial de las emisiones de partículas para el sector industrial muestra una mayor concentración en las zonas noroeste y noreste de la ZMCM.

En el caso de las emisiones del sector comercial y residencial, las zonas con mayor nivel se encuentran en el centro de la ciudad y los municipios con mayor densidad de

población. Debido a que es en la ZMCM donde se concentran la mayor parte de las actividades comerciales y centros de trabajo, es necesario hacer una mejor distribución de las industrias en las zonas donde haya las condiciones adecuadas para dicha ubicación, fuera de la ZMCM. Con lo que se evitaría que la población esté viviendo a unos pasos de las industrias, con los riesgos que ello conlleva. Todo este estudio socio-económico debe realizarse por las autoridades respectivas y aplicar rigurosamente las políticas que ayuden a mejorar la calidad del aire en la ZMCM.

- El análisis químico de las emisiones de partículas presenta incertidumbre, por lo que los resultados deben tomarse como preliminares hasta contar con una especiación más exacta para las características de los combustibles quemados en la ZMCM.
- Finalmente, los objetivos planteados en esta tesis se cumplieron.

RECOMENDACIONES.

- Se recomienda seguir trabajando en el establecimiento de la distribución por tamaño de partícula para los factores de emisión. Es remarcable el hecho de que la metodología para el cálculo de los factores para fuentes fijas que se ha empleado en este inventario es americana, realizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) y que data del año de 1985. Aunque la EPA publica correcciones y mejoras a sus documentos con relativa frecuencia, la metodología de cálculo de los factores de emisión de partículas no ha sido actualizado. Sería conveniente contar con factores de emisión medidos en la ZMCM.
- Con respecto a la composición química de las emisiones se recomienda seguir la investigación con mucha más profundidad. De hecho, sería preferible que sea realizado especialmente para las condiciones de la ZMCM en base a las composiciones de los combustibles que se consumen y al tipo de procesos industriales que se llevan a cabo dentro de la zona.

- En esta tesis se abarcó emisiones por combustión, aún queda por evaluar las emisiones de partículas provenientes por tipo de proceso industrial, fuentes naturales como son erosión de terrenos descubiertos, polvos de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, incendios forestales, quema de basura a cielo abierto, etc.

BIBLIOGRAFIA

1. Albert, Lilia A. 1990. *Curso básico de toxicología ambiental*. Editorial Limusa. México, D.F.
2. Bravo, Humberto Alvarez. 1987. *La contaminación en México*. Editorial Universo Veintiuno. México, D.F.
3. Buonicore, Anthony J. 1992. *Air Pollution Engineering Manual*. Air & Waste Management Association. E.U.A.
4. Comisión Metropolitana para la Praveción y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. 1994. *La contaminación Atmosférica en el Valle de México. Acciones para su Control 1988-1994*. México, D.F.
5. Departamento del Distrito Federal (DDF). 1990. *Air Quality Management Program for the Mexico City Metropolitan Area*. México, D.F.
6. Departamento del Distrito Federal (DDF). 1995. *Inventario de fuentes área precursoras de ozono y CO para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Secretaría del Medio Ambiente. México, D.F.
7. Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Salud. Marzo de 1996. *Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1995-2000*. México, D.F.
8. Departamento del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Dirección Financiera. 1995. *Información sobre ventas de combustibles industriales en la ZMCM*. México, D.F. (Comunicación directa).
9. Diario Oficial de la Federación. 1993. *Normas Ambientales*. Viernes 22 de octubre de 1993. Segunda sección. México, D.F.
10. Environmental Protection Agency (EPA-U.S.). 1985. *Compilation of air pollutant emission factors. Volume I: Stationary point and area sources AP-42*. Fourth Edition. (and supplements).
11. Environmental Protection Agency (EPA-U.S.). 1987. *PM10, State implementation plan. Development Guideline*.
12. García-Colín, Leopoldo Scherer. 1996. *Contaminación atmosférica, compiladores*. Colegio Nacional. México, D.F.
13. Guía Roji. 1995. *Ciudad de México, área metropolitana y alrededores*. México, D.F.

14. Hildemann, Lynn M., Gregory R. Markowski, Glen R. Cass. 1991a. *Chemical Composition of Emission from Urban Sources of Organic Aerosol*. Environmental Science and Technology, 25, 744-759.
15. Hildemann, Lynn M., Monica A. Mazurek, Glen R. Cass, Bernd R.T. Simoneit. 1991b. *Quantitative Characterization of Urban Sources of Organic Aerosol by High-Resolution Gas Chromatography*. Environmental Science and Technology, 25, 1311-1325.
16. Instituto Nacional de Ecología. 1994. *Sistema nacional de información de fuentes fijas*. México, D.F.
17. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI). 1990. *Censo de Población*. México, D.F.
18. Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Gerencia de Ciencias del Ambiente. 1994 *Alto contenido de propano y butano en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. México, D.F.
19. Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), LNLA. 1994. *Estudio Global de la Calidad del Aire (EGCA)*, informe conjunto. Volumen III, Modelos y Simulación. México, D.F.
20. Japan International Cooperation Agency (JICA). 1991. *The study on the air pollution control plan of stationary sources in the Metropolitan Area of City of Mexico*. Final report. Mexico, D.F.
21. Japan International Cooperation Agency (JICA). 1994. *The study on the combustion technologies for the air pollution control of stationary sources in the metropolitan area of the city of Mexico in the United Mexican States*. Interim report.
22. Kennet W.; C.F. Warner. 1992. *Contaminación del aire. Origen y control*. Editorial Limusa, México.
23. Lacy, Rodolfo. 1993. *La calidad del aire en el Valle de México*. Colegio de México. México, D.F.
24. Petróleos Mexicanos (PEMEX), Gerencia Comercial de gas natural. 1995. *Consumos del Valle de México 1995*. México, D.F. (Comunicación directa).
25. Petróleos Mexicanos (PEMEX). 1995. Gerencia Corporativa de Evaluación e Información. *Anuario estadístico*. México, D.F.
26. Petróleos Mexicanos (PEMEX-Refinación). 1994. *Seminario sobre la calidad de los combustibles en México*. Instituto Mexicano del Petróleo. México, D.F.

27. Rogge, Wolfgang Fritz. 1993. *Molecular tracers for sources of atmospheric carbon particles: Measurements and model predictions*. University Microfilms International (U.M.I) Dissertation Services. Pasadena, California.
28. Secretaría de Energía, Minas e Industrias Paraestatales (SEMIP). 1993. *Balance nacional de energía 1993*. Edición de la Subsecretaría de Hidrocarburos. México, D.F.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

**ANEXO A METODOLOGIA DE CALCULO PARA LOS FACTORES DE
EMISION DE PST, PM-10 Y PM-2.5.**

El cálculo de los factores de emisión de partículas correspondientes al tamaño de 10 y 2.5 μm se realizó tomando en cuenta el % respecto a las partículas suspendidas totales que es un total de 100.

- **DIESEL.**

De acuerdo a la bibliografía [3] se encontró que el diesel mexicano es similar al combustóleo destilado No. 2 que se vende en Estados Unidos, según se muestra en la siguiente tabla comparativa.

Propiedades	Combustóleo Destilado No.2	Diesel mexicano
%S	0.4-0.7	0.500
ρ	0.865	0.837

por lo tanto se aplicará la distribución del F.E correspondiente a este tipo de combustóleo.

Sector	F.E. PST kg/m ³	F.E. PM-10 kg/m ³	F. PM-2.5 kg/m ³
Industrias	0.24	$0.50 \cdot 0.24 = 0.12$	$0.12 \cdot 0.24 = 0.03$
Comercios y servicios	0.24	$0.55 \cdot 0.24 = 0.13$	$0.42 \cdot 0.24 = 0.10$

Fuente: EPA, 1985.

Se observa que para grandes calderas 25% de las PM-10 son PM-2.5. Para pequeños equipos 77% de las PM-10 son PM-2.5.

- **Gasóleo.**

Al igual que con el diesel, se presenta una tabla comparativa con el combustóleo residual reportado en la bibliografía antes mencionada.

Propiedades	Combustóleo Residual Ligero	Gasóleo mexicano
%S	2 máx.	2
ρ	0.89	0.89

De esta tabla se observa que el gasóleo es similar al combustóleo residual ligero grado No.5. Los factores de emisión por tamaño de partícula se multiplican por "A" y dado que se trata de un combustible de grado No.5, "A"=1.25 [10].

La distribución por tamaño de partícula varía de acuerdo con la capacidad del equipo de combustión. El sector industrial es el principal emisor de PM-10 y PM-2.5, como se observa en la siguiente tabla:

	F.E. PST kg/m ³	F.E. PM-10 kg/m ³	F.E. PM-2.5 kg/m ³
Industrias	2.88	0.86A= 1.075	0.56A= 0.700
Comercios	2.88	0.62A= 0.775	0.23A= 0.288
Residencial	-	-	-

Fuente: EPA, 1985.

- Gas L.P.

Para calcular el factor de emisión del gas l.p. mexicano, se debe conocer su composición como se muestra en la siguiente tabla:

Componente	% mol
Metano	0.08
Etano	1.19
Propano	52.10
iso Butano	12.98
n Butano	25.40
Olefinas en C4	6.44
iso Pentano	1.28
n Pentano	0.34
Hexanos + pesados	0.19

Fuente: IMP, Gerencia de Ciencias del Ambiente, 1994.

De acuerdo al AP-42 los factores de emisión reportados para este combustibles son:

F.E. Butano (kg/m ³)	F.E. Propano (kg/m ³)
0.07-0.06	0.07-0.05

Fuente: EPA, 1985.

Para calderas industriales se toma el valor más alto, F.E= 0.07 kg/m³.

Para calderas comerciales, se toman los factores de emisión más pequeños, tanto de butano como de propano, para calcular un factor común. Para lo cual se consideran los % mol de ambos hidrocarburos y se normalizan, de lo que resulta:

$$\% \text{mol butano} = 0.424$$

$$\% \text{mol propano} = 0.576$$

$$F.E = (0.06(0.4242) + 0.05(0.5758)) = 0.054 \text{ kg/m}^3$$

Para este combustible no se tiene una distribución clara del tamaño de partícula pero se considerará que la mayoría de las PST emitidas por combustión de gas l.p. sean PM-10 y por lo tanto PM-2.5. Los factores de emisión finales para este caso se muestran en la siguiente tabla.

	F.E. PST kg/m ³	F.E. PM-10 kg/m ³	F.E. PM-2.5 kg/m ³
Industrias	0.070	0.070	0.070
Comercios	0.055	0.054	0.054
Residencial	0.055	0.054	0.054

Fuente: EPA, 1985.

- Gas natural.

Los factores para el gas natural se tomaron del AP-42 según la siguiente tabla:

Equipo	F. E. PST (kg/1e6 m ³)	F.E. *PM filtrable (kg/1e6 m ³)
Calderas industriales grandes	48.00	48.00
Calderas industriales chicas	99.00	99.00
Calderas comerciales	72.00	72.00
Calderas residenciales	48.00	2.80

* Aunque no fueron medidas, todas las PM han sido estimadas menores a 1µm de diámetro esto es son PM-2.5 y por lo tanto PM-10.

Fuente: EPA, 1985.

La masa de partículas está compuesta de fracciones filtrables y condensables, basados en el método de muestreo de la EPA. La relación de emisiones filtrables y condensables es del mismo orden de magnitud para calderas industriales. Para hornos residenciales, muchas de las PM están en forma de materia condensable.

- Combustóleo.

Dado que el combustóleo se consume sólo en el sector industrial, a continuación se presentan los factores de emisión.

Sector	F.E. PST kg/m ³	F.E. PM-10 kg/m ³	F. PM-2.5 kg/m ³
Industrias	4.88	0.86*4.88=4.197	0.56*4.88=2.733

Fuente: EPA, 1985