

N=17
ZKJ



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**ESTUDIO SOBRE LOS FACTORES FISICOS UTILIZADOS
EN LOS MODELOS MATEMATICOS DE DISPERSION
ATMOSFERICA "HOTMAC" Y "RAPTAD", PARA SU
USO EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA
CIUDAD DE MEXICO**

EXAMEN DE TITULACION
FAC. DE QUIMICA

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA QUIMICA

PRESENTADA POR:

CECILIA CARBAJAL SANCHEZ

MEXICO, D. F.

1992

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	PROF.	RODOLFO TORRES BARRERA
VOCAL	PROF.	RINA AGUIRRE SALDIVAR
SECRETARIO	PROF.	HUMBERTO RANGEL DAVALOS
1ER SUPLENTE	PROF.	VICTOR MANUEL LUNA PABELLO
2DO SUPLENTE	PROF.	CELESTINO MONTIEL MALDONADO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM.

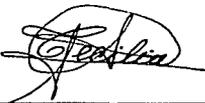
NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL ASESOR DEL TEMA:

RINA AGUIRRE SALDIVAR



NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL SUSTENTANTE:

CECILIA CARBAJAL SANCHEZ



P R E F A C I O

Este trabajo se realizó como parte del convenio UNAM-IMP.CIC-25, establecido entre el Instituto Mexicano del Petróleo y la Universidad Nacional Autónoma de México para el desarrollo del "Estudio Global de la Calidad del Aire en la Ciudad de México", dentro del proyecto 0335 "Implementación y validación de los modelos de dispersión atmosférica", del Instituto de Ingeniería de esta Universidad.

LISTA DE TABLAS

NUMERO	TITULO	PAGINA
1.1	Principales contaminantes atmosféricos	6
1.2	Equipo de Control	9
1.3	Normas mexicanas de calidad del aire	14
1.4	Normas internacionales de calidad del aire	15
1.5	Tabla de clasificación del IMECA	16
1.6	Estaciones que integran la red automática de monitoreo atmosférico	18
1.7	Porcentaje de días con violaciones durante el mes de agosto, 1988-1991	19
1.8	Número de días con registros mayores a 200 IMECA para cualquier contaminante, Enero-agosto 1991	20
2.1	Composición química de la atmósfera	23
2.2	Capas de la atmósfera	24
2.3	Clasificación de las velocidades de viento	32
2.4	Clasificación de direcciones de viento	32
2.5	Clasificación de estabilidad atmosférica	37
3.1	Distribución de la superficie de la Cuenca de México según las entidades federativas que la forman	46
3.2	Uso del suelo en el Distrito Federal, 1986	52

3.3	Usos del suelo en los municipios conurbados del Estado de México, 1985	52
3.4	Parques Nacionales de la ZMCM	54
3.5	Distribución de áreas verdes	55
3.6	Altura de la capa de inversión en la ZMCM, agosto-diciembre, 1971	63
3.7	Número de inversiones térmicas y hora de ruptura promedio (1986-1987)	64
3.8	Zona Metropolitana de la Ciudad de México	69
3.9	Número de fábricas por sectores y delegaciones en el Distrito Federal (1980-1985)	73
3.10	Número de fábricas por sectores en los municipios del Estado de México, 1989	74
3.11	Emisiones atmosféricas en la ZMCM	76
3.12	Contaminantes producidos y combustible consumido por vehículo en la ZMCM, 1970-2000 (diarios)	77
3.13	Características del sistema de transporte en la ZMCM, 1985	80
3.14	Viajes dentro de la ZMCM	81
3.15	Principales movientos dentro de la ZMCM	81

LISTA DE FIGURAS

NUMERO	TITULO	PAGINA
1.1	División de la ZMCM para el reporte del IMECA	17
2.1	Inclinación del eje de rotación de la tierra respecto a la eclíptica	22
2.2	Gradiente vertical de temperatura en la atmósfera	24
2.3	Escalas de tiempo y espacio de varios fenómenos atmosféricos	25
2.4	Estructura de la tropósfera	26
2.5	Flujo convectivo	27
2.6	Efecto de las zonas urbanas sobre los patrones de viento	28
2.7	Escala global de circulación del aire	31
2.8	Variación media del viento con la altura sobre terrenos de diferente rugosidad	33
2.9	Efecto Valle-montaña	35
2.10	Estabilidad atmosférica	38
2.11	Inversión térmica por topografía	40
2.12	Efecto de la inversión térmica sobre emisiones contaminantes	42
3.1	Cuenca de México	47
3.2	Zona Metropolitana de la Ciudad de México	48

3.3	Porcentaje de áreas verdes en los municipios y delegaciones de la ZMCM	56
3.4	Climas en la ZMCM	57
3.5	Zonificación según precipitación media anual	59
3.6	Frecuencia de heladas (días/año)	60
3.7	Variación mensual de las temperaturas mínimas y máximas (°C) en dos puntos de la Ciudad de México	61
3.8	Temperatura mínima promedio (°C), noviembre 1981	62
3.9	Líneas de flujo de aire a las 6 horas en los meses de octubre 1975-abril 1976	66
3.10	Líneas de flujo de aire a las 14 horas en los meses de octubre 1975-abril 1976	67
3.11	Area poblada dentro de la ZMCM	70
3.12	Distribución de fuentes fijas en la ZMCM	72
3.13	Localización de las calles y avenidas en la ZMCM, 1983	79
4.1	Distribución normal de concentración	87
5.1	Corrección de alturas	93
5.2	Mallas de cálculo	99
5.3	Capas de inversión	101
6.1	Coordenada vertical corregida	107
6.2	Campo del viento para la ZMCM	111
6.3	Comparación de la dirección del viento calculada y observada	112
6.4	Comparación de la concentración horaria de CO calculada y observada	113
6.5	Simulación de emisiones contaminantes	116

NOMENCLATURA

UNIDADES

A, B, C	Parámetros de radiación (ec 5.8)	adimensional
\mathcal{C}	Concentración	Según ec.
C_p	Capacidad calorífica a presión constante	J/cal·mol
C_v	Capacidad calorífica a volumen constante	J/cal·mol
D	Difusividad molecular	m ² /s
f	Parámetro de coriolis	m ⁻¹
G	Flujo de calor a través del suelo	W/m ²
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
h	Humedad	g/Kg
h	Altura física de la fuente de emisión	m
H	Flujo de calor sensible	W/m ²
H	Altura efectiva de emisión	m
k	Constante de von Karman, igual a 0.4	adimensional
$K_{i,j}$	Coficiente de difusividad turbulenta	m ² /s
LE	Flujo de calor latente	W/m ²
P	Presión	mb
Q	Gasto de emisión	kg/s
Q	Vapor de agua	Kg
Q_v	Humedad relativa	
R	Flujo de energía por radiación	W/m ²
S	Término fuente	Según ec.
Sc	Número de Schmith, $\mu/\rho D$	adimensional
T	Temperatura	K
t	Tiempo	s
t_{L1}	Escala integral lagrangiana de tiempo	s
u	Velocidad de fricción	m/s
u_i	Velocidad del viento	m/s
u'_i	Velocidad turbulenta	m/s
X, Y, Z	Coordenadas del punto a estudiar	m
x_i	Ejes coordenados	m
x_k, y_k, z_k	Posición de la késima partícula	
z	Altura	m

SÍMBOLOS GRIEGOS

α	Angulo de inclinación de la superficie	grados
β	Coefficiente de expansión térmica	
γ	Relación de capacidades caloríficas	adimensional
Γ	Coefficiente de difusividad turbulenta	m^2/s
Γ_a	Gradiente adiabático seco teórico	$0.987 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$
$\delta_{i,j}$	Función delta de Dirac	adimensional
Δh	Elevación de la pluma	m
ϵ	Emisividad de la superficie	
θ	Temperatura potencial	K
μ	Viscosidad	m^2/s
ζ	Número aleatorio generado por una distribución gaussiana, con media 0 y variancia 1	adimensional
π	3.1416	adimensional
ρ	Densidad	Kg/m^3
σ_{ij}	Tensor de esfuerzos	Nw/m^2
σ_{ul}	Variancia de la fluctuación de velocidad u_l	
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Desviaciones estándar	
τ	Constante de Stefan-Boltzman	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/m^2 \text{ K}^4$
ϕ	Variable escalar	Según ec.
Ω	Angulo horario solar	

SUBÍNDICES

a	Aire
D	Domnio del modelo
g	Nivel del suelo
i, j, k	Notación tensorial
L	Radiación de onda larga
max	Valor máximo
p	Partícula
s	Radiación de onda corta
s	Suelo
v	Valor virtual
x, y, z	Ejes coordenados

- Cantidad escalar
- o Valor sobre la superficie
- Orden de magnitud

SUPERINDICE

- g Condición geostrófica
- Variable corregida
- ' Fluctuación por turbulencia

OPERADORES

- <...> Valor promedio en el plano horizontal
- ... Valor promedio

I N D I C E

PAGINA

PREFACIO	
AGRADECIMIENTOS	
LISTA DE TABLAS	
LISTA DE FIGURAS	
NOMENCLATURA	
INTRODUCCION	1
I GENERALIDADES	5
1.1 Fuentes de emisión	6
1.1.1 Clasificación	6
1.1.2 Equipo de control	8
1.2 Receptor	9
1.2.1 Efectos de la contaminación	9
1.2.2 Normas de la calidad del aire	13
1.2.2.1 Indice Metropolitano de la calidad del aire (IMECA)	15
II MEDIO DE DISPERSION	21
2.1 Atmósfera	22
2.1.1 Capa límite planetaria	26
2.1 Vientos	29
2.2.1 Efecto de la topografía en los vientos	32
2.2.1.1 Efecto valle-montaña	34
2.3 Temperatura	36
2.3.1 Estabilidad atmosférica	36
2.3.2 Inversión térmica	39
2.3.3 Temperatura potencial	42
2.4 Humedad	43

III	CARACTERISTICAS FISICAS DE LA ZMCM	45
3.1	Geografía física	45
3.1.1	Topografía	51
3.1.2	Uso del suelo	51
3.1.2.1	Areas verdes	52
3.1.3	Clima	56
3.1.3.1	Humedad	58
3.1.3.2	Precipitación	58
3.1.3.3	Temperatura	59
3.1.3.4	Vientos	64
3.2	Geografía humana	68
3.2.1	Industria	71
3.2.2	Vialidad	75
IV	MODELOS MATEMATICOS DE DISPERSION	82
4.1	Generalidades	82
4.1.1	Ecuaciones generales de transporte	83
4.1.2	Clasificación	86
4.2	Modelo Gaussiano	86
4.3	Modelos diferenciales de turbulencia	90
V	HOTMAC Y RAPTAD	92
5.1	HOTMAC	92
5.1.1	Ecuaciones fundamentales	92
5.1.2	Condiciones de frontera e iniciales	95
5.1.3	Malla de cálculo y variables de entrada	98
5.2	RAPTAD	103
5.2.1	Ecuaciones fundamentales	103
5.2.2	Variables de entrada	104

VI	MANEJO DE CARACTERISTICAS FISICAS	106
6.1	Geografia física	106
6.1.1	Topografía	106
6.1.2	Usos del suelo	108
6.1.3	Clima	109
6.2	Geografía humana	113
6.2.1	Fuentes de contaminación	114
6.2.2	Fuentes de calor	115
VII	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
APENDICE	LISTA DE VARIABLES COMPUTACIONALES	120
BIBLIOGRAFIA		125

INTRODUCCION

Profundizar en el conocimiento del medio ambiente, implica explorar las características físicas, económicas y socio-culturales del sistema en el que se desarrolla la vida de los pueblos, ya que la interacción hombre-naturaleza impone una relación causa-efecto; de aquí la preocupación central de preservar el medio ambiente como patrimonio único e irremplazable de la humanidad.

Esta relación lleva al análisis de la visión que tiene el hombre de sí mismo respecto al cosmos, y a aceptar la necesidad inmediata de preservar el medio ambiente, ya que de no hacerlo se cerrarán los caminos a la solución de los problemas ambientales.

Asumiendo la responsabilidad que los profesionales de la química tenemos con nuestro entorno, hago uso de esta pequeña "ventana" para conocer un poco más del problema de contaminación ambiental y contribuir al desarrollo de esta área, principalmente para el establecimiento de medidas de control de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México.

Actualmente, la forma más adecuada de abordar el problema de la contaminación atmosférica, es mediante el uso de modelos matemáticos que predigan la calidad del aire que permitan evaluar medidas de control sin la necesidad de que éstas sean llevadas a la práctica.

Es por esto que, uno de los objetivos de esta tesis, es conocer las condiciones tanto geográficas y meteorológicas de la ZMCM, como las fuentes principales de contaminación, para, posteriormente, analizar la manera en que esta información se incluye dentro de los modelos matemáticos que se usarán en nuestra ciudad (*HOTMAC* y *RAFTAD*).

Del análisis de esta información se alcanzará el objetivo principal de esta tesis: establecer si la representación de los factores físicos que se incluyen dentro de estos modelos matemáticos es suficiente y adecuada.

En el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), junto con el Laboratorio Nacional de los Alamos (LANL), y la colaboración de Petróleos Mexicanos (PEMEX), Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), Departamento del Distrito Federal (DDF) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), entre otras instituciones, se lleva a cabo un proyecto denominado "*Estudio Global de la Calidad del Aire en la Ciudad de México*", cuyo propósito es conocer a fondo las condiciones que provocan la alta contaminación atmosférica, para con esto evaluar el efecto que tendría en la calidad del aire la aplicación de medidas de control para, en caso necesario y bajo la autoridad correspondiente, tomar las decisiones más adecuadas.

Dentro de éste proyecto se emplearán 3 programas de cómputo desarrollados por investigadores del Laboratorio Nacional de los Alamos, estos son:

HOTMAC:	Modelo meteorológico
RAPTAD:	Modelo de dispersión atmosférica
CIT:	Modelo de reacciones químicas

No se mencionará nuevamente el modelo CIT cuya predicción quedan fuera del objetivo principal de esta tesis, analizando solamente los dos primeros: *HOTMAC* y *RAPTAD*. *HOTMAC* es un modelo meteorológico y fué desarrollado para terrenos de topografía compleja, como lo es la ZMCM que se encuentra localizada dentro de una cuenca prácticamente cerrada donde la parte central tiene variadas formas y elevaciones, mientras que *RAPTAD* calcula la dispersión de contaminantes gaseosos.

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, se analizó la información disponible sobre contaminantes atmosféricos, características físicas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, fundamentos y estructura de los modelos matemáticos seleccionados. El resultado de dicho análisis se presenta aquí de

acuerdo a la distribución siguiente.

En el capítulo I (*Generalidades*) de este documento estudiaremos las bases teóricas de la contaminación atmosférica, con el fin de tener los conocimientos necesarios para entender esta tesis. Se presentan brevemente los tres puntos de vista primordiales desde los cuales se puede analizar la contaminación ambiental: fuente de emisión, medio de dispersión y receptores.

Por ser de mayor importancia para el desarrollo de este tema de tesis el medio de dispersión, se analiza más ampliamente en un capítulo separado.

En el capítulo II (*Medio de dispersión*), se estudia el comportamiento del aire, por ser éste el medio de dispersión de los contaminantes atmosféricos. Este comportamiento puede ser referido como dinámica atmosférica o características meteorológicas.

En el capítulo III (*Características físicas de la ZMCM*), se plantean las condiciones geográficas, meteorológicas y fuentes principales de contaminación dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El capítulo IV (*Modelos matemáticos de dispersión*) describe brevemente algunos modelos de calidad del aire y las ecuaciones de transporte que emplean, así como el modelo más usado para la dispersión de contaminantes: "Modelo gaussiano". Finalmente introduce a la turbulencia por medio de sus ecuaciones fundamentales con el objeto de abordar las ecuaciones que conforman HOTMAC y RAPTAD.

Después de presentadas las ecuaciones fundamentales de transporte, en el capítulo V (*HOTMAC y RAPTAD*), se presentan las ecuaciones en las que se basan los modelos HOTMAC y RAPTAD, y se analizan los factores físicos que en éstos se consideran.

En el capítulo VI (*Manejo de las características físicas*), se presentan los resultados obtenidos de la revisión de los factores físicos en la ZMCM y los utilizados por los programas de cómputo.

Por último, en el capítulo VII (*Conclusiones y recomendaciones*), se concluye este trabajo resumiendo los principales aciertos y deficiencias de los modelos computacionales en la representación de características físicas, y se recomiendan las posibles acciones a seguir para el mejoramiento de la misma.

Para completar este documento se han anotado todas las referencias que se consultaron durante el desarrollo de esta investigación, además de incluir a (manera de apéndice) una lista de las variables principales de los programas de cómputo, sus dimensiones y significado físico.

CAPITULO I

GENERALIDADES

La *contaminación ambiental* es la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos, que perjudique o resulte nocivo a la vida, la flora o la fauna, o que degrade la calidad de la atmósfera, del agua, del suelo o de los bienes y recursos naturales en general, NOM-AA-23-1986.

Un *contaminante* es toda materia o energía en cualquiera de sus aspectos físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento ambiental, altere o modifique su composición natural o degrade su calidad, NOM-AA-23-1986.

La contaminación ambiental tiene tres perspectivas diferentes de análisis: producción y fuente de emisión; mecanismo de transporte y transformación; e impacto sobre el medio ambiente y seres vivos. Y, sólo mediante la conjugación de estos tres aspectos es posible tomar medidas efectivas para el control de la contaminación.

El objetivo principal de esta tesis, es el estudiar los factores físicos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México que influyen sobre la dispersión de contaminantes y la manera en que estos parámetros son considerados dentro de los modelos matemáticos que se emplean para su representación. Por lo tanto, el estudio del medio de dispersión en el cual se transforman y transportan las especies contaminantes es, en este trabajo el aspecto de mayor importancia por ser la base de los dos modelos matemáticos a estudiar.

El capítulo siguiente está dedicado a analizar los factores físicos determinantes en la dispersión de los contaminantes atmosféricos, por lo que a continuación se plantean solo generalidades sobre las fuentes de emisión de contaminantes y sus efectos sobre el medio receptor; cerrando el capítulo con la mención de las normas oficiales establecidas en nuestro país con el fin de minimizar dichos efectos.

1.1 Fuentes de emisión

Una fuente de emisión es el sitio o área donde se efectúa la descarga de sustancias a la atmósfera. Cada proceso que se lleva a cabo en las industrias, el tipo de combustible que se usa y las condiciones de operación, determinan los productos contaminantes que serán emitidos. Los principales contaminantes atmosféricos, por encontrarse en alta concentración en la atmósfera, son presentados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Principales contaminantes atmosféricos

Contaminante	Fuente principal
SO ₂	Industria
Partículas	Industria
	Automóviles
	Tolvaneras
CO	Combustión
NO _x	Combustión
HC	Combustión
Pb	Automóviles
O ₃	Procesos
	fotoquímicos

1.1.1 Clasificación

Los contaminantes se clasifican en función de su estado físico, estructura química, origen o del tipo de fuente del cual fueron emitidos.

a) En función de su estado físico

1) Gases: Su tamaño es tan pequeño (menor a 0.0005μ) que nunca se depositan y su comportamiento es el mismo que el del aire. Como ejemplo tenemos: óxidos de azufre (SO_x), ácido sulfhídrico (H_2S), óxidos de nitrógeno (NO y NO_2), amoníaco (NH_3), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos ligeros (HC), ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF), ozono (O_3) y peroxiacilnitratos (PAN).

2) Partículas: Se encuentran dispersas en el medio ambiente, en estado sólido o líquido. Su diámetro está entre 0.0005 y 500μ . Las de mayor diámetro se depositan cerca de la fuente, mientras que las que tienen menor diámetro son transportadas por el viento, Bravo (1987).

b) En función de su estructura química

1) Orgánicos: Son los compuestos que contienen enlaces C-H (carbono-hidrógeno), como por ejemplo: hidrocarburos, aldehídos, cetonas, hidrocarburos clorados, alcoholes, etc.

2) Inorgánicos: Son los que no contienen enlaces C-H, como: óxidos de carbono (CO_x), NO_x , SO_x , ácido sulfúrico (H_2SO_4), HF y HCl , NH_3 , cloro (Cl), polvo, humo y aerosoles de diversas composiciones.

c) En función de su origen

1) Primarios: Son los detectados en la atmósfera en el mismo estado en el que fueron emitidos como resultado de un proceso específico: CO , CO_2 , SO_x , NO_x y HC son algunos ejemplos.

2) Secundarios: Son los contaminantes producidos en la atmósfera por procesos físicos o químicos entre contaminantes u otras sustancias presentes, NOM-AA-23-1986; como por ejemplo: ozono y peroxiacilnitratos.

d) En función del tipo de fuente

1) Naturales: Son los originados por la naturaleza: tales como los provenientes de erupciones volcánicas, incendios forestales, tolvaneras, o saturación de sales en el aire de las costas por acción

de la brisa del mar, Stern et al (1984).

2) Antropogénicos: Son los originados por las actividades del hombre, como: servicios (incineración de basura, generación de energía eléctrica, transporte público); fuentes personales (estufas, calefacción, automóviles), y fuentes industriales (química, solventes, refinerías, etc.). Ver Stern et al (1984).

También, de acuerdo con el tipo de fuente, se establece la siguiente clasificación:

1) Fuentes fijas: Son las fuentes emisoras que no presentan desplazamiento. Están constituidas por instalaciones fabriles, refinerías, termoeléctricas, erupciones volcánicas, tolvaneras, etc.

2) Fuentes móviles: Lo conforman los vehículos automotores de combustión interna, aviones, locomotoras, barcos, motocicletas y similares. Los vehículos automotores es el tipo de fuente que contribuye con la mayor parte del monóxido de carbono y de óxidos de nitrógeno que se emiten a la atmósfera, Bravo (1987).

1.1.2 Equipo de control

Como equipo de control de la contaminación se considera cualquier dispositivo o aditamento que prevenga, reduzca o anule las emisiones de acuerdo a los límites establecidos por las normas correspondientes, NOM-AA-23-1986.

La tecnología desarrollada para controlar la contaminación del aire se divide en dos grandes grupos, para emisiones que se encuentran en estado gaseoso y para material particulado. Para gases, la tecnología utilizada está en relación con las operaciones unitarias de absorción, adsorción y combustión; para partículas se utiliza la sedimentación, la aceleración tangencial, filtración, etc. La tabla 1.2 presenta los principales equipos de control usados actualmente.

Tabla 1.2 Equipo de control

Partículas	Gases
<ul style="list-style-type: none"> - Cámaras de sedimentación - Ciclones - Filtros de bolsas - Precipitadores electrostáticos 	<ul style="list-style-type: none"> - Torres empacadas - Torres de platos - Lavadores húmedos

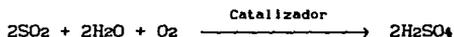
1.2 Receptor

Receptor es todo aquello que se ve afectado negativamente por causa de la contaminación. Los efectos que se presentan en los receptores son muy diversos, van desde la irritación en los ojos hasta la muerte; o bien del cambio del pH en cuerpos de agua hasta la disminución de la transmisión de energía radiante en la atmósfera, Stern et al (1984).

1.2.1 Efectos de la contaminación

A continuación se presentan las características y efectos principales que causan los contaminantes atmosféricos, presentados en la tabla 1.1, sobre los seres humanos, animales y medio ambiente.

El *bióxido de azufre* (SO₂), es un gas incoloro que puede ser detectado por su sabor (de 0.38 a 1.15 ppm); en concentraciones arriba de 3.0 ppm tiene un olor irritante. Se disuelve con facilidad en el agua (con la humedad del medio ambiente) formando ácido sulfuroso (H₂SO₃), y con el oxígeno del aire se oxida lentamente formando ácido sulfúrico (H₂SO₄); en presencia de catalizadores, tales como sales de hierro, manganeso, sulfatos y cloruros (normalmente presentes en la atmósfera como partículas suspendidas), esta reacción se lleva a cabo mucho más rápidamente:



También reacciona fotoquímicamente en fase gaseosa con otros contaminantes para formar trióxido de azufre, ácido sulfúrico y sulfatos.

El SO_2 se emite por fuentes naturales en erupciones volcánicas, y antropogénicamente durante la quema de combustibles fósiles como combustóleo y otros hidrocarburos pesados que contienen altos porcentajes de azufre, de 2 a 4%, Bravo (1987)

Varias especies animales, incluyendo al hombre, responden al SO_2 sufriendo problemas cardíacos y en las vías respiratorias.

Sobre los vegetales se ha observado el efecto dañino por la absorción de SO_2 , provocando que el crecimiento y la población se vean menguadas. Además el SO_2 es uno de los principales componentes de la formación de lluvia ácida.

Las partículas suspendidas, de un diámetro muy pequeño son inhaladas y penetran profundamente en las vías respiratorias causando desde sequedad en la nariz, boca y garganta, hasta el agravamiento de padecimientos cardiopulmonares, alergias y cáncer nasal o laringeal, entre otras muchas enfermedades. Como ejemplo tenemos: humos, aerosoles, vapores, polvos y nieblas, incluyendo bacterias, polen, hongos y esporas, además de metales pesados y materiales minerales como el asbesto, SEDUE (1987).

Entre las partículas más contaminantes se encuentran las de plomo, con un diámetro aproximado entre 2 y 10 μ ; este es un metal pesado, blando, de color azulado y maleable, que expuesto al aire se oxida fácilmente. Se emite a la atmósfera principalmente a través del escape de los automóviles por la combustión de la gasolina con plomo. La forma de ingestión en el organismo humano y animal es por medio de agua, alimentos contaminados y por la inhalación de plomo del aire. En el hombre el problema principal ocasionado por el plomo es la enfermedad conocida como saturnismo. Además de sus efectos sobre la salud, las partículas alteran el medio ambiente disminuyendo la visibilidad.

Las partículas obstaculizan la transmisión de los rayos solares, reduciendo la temperatura de la tierra (esto produciría a largo plazo un efecto contrario al atribuido al CO_2).

El *monóxido de carbono* (CO), es un gas incoloro e inodoro, que se genera por la quema incompleta de combustibles fósiles.

La Norma de Calidad de Aire para este gas es de 13ppm; sin embargo, en una ciudad con vialidad deficiente, la concentración de CO puede exceder 44 ppm. Dentro de un automóvil, en el que se está fumando, se alcanzan concentraciones de 88 ppm y en túneles y pasos a desnivel la concentración de CO ha llegado a 218 ppm, Bravo (1987).

La afinidad de la hemoglobina por el monóxido de carbono es de 210 veces más que por el oxígeno, formándose carboxihemoglobina y reduciéndose la cantidad de oxígeno transportado a todos los órganos y tejidos del cuerpo. Esto provoca la disminución de los reflejos en individuos saludables y amenaza la vida de los que padecen enfermedades cardíacas, Bravo (1987).

Los individuos con anemia, enfisema y otras enfermedades pulmonares, así como fumadores o aquellos que viven en grandes altitudes, son más susceptibles a los efectos del CO. Aún en concentraciones relativamente bajas puede tener efectos sobre las funciones mentales, agudeza visual y reflejos.

Los *óxidos de nitrógeno* (NO y NO₂) se generan durante la quema, a altas temperaturas, de combustibles. Se emiten principalmente a la atmósfera en forma de NO, que posteriormente se oxida a NO₂, por una reacción directa con el oxígeno del aire y/o por medio de procesos fotoquímicos. El NO₂, que es el que afecta más la salud, es un gas de color rojo-naranja-café, de olor repugnante característico, corrosivo y muy oxidante; es además precursor, junto con los hidrocarburos y la radiación solar, de oxidantes fotoquímicos como el ozono y peroxiacilnitratos.

Tanto para los animales como para el hombre, la exposición al NO₂ en concentraciones mayores a 100 ppm es letal, pues produce edema pulmonar.

Los *hidrocarburos* emitidos a la atmósfera por fuentes naturales o artificiales son prácticamente imposibles de enumerar. Los más importantes son los que favorecen la velocidad de oxidación del NO, como olefinas, aldehidos, cetonas, la mayoría de las parafinas,

compuestos aromáticos y acetilenos de cadena larga.

Estos compuestos entran a la atmósfera por diversas fuentes, a saber:

-Por el escape de los automóviles que utilizan combustibles fósiles, de los cuales una buena cantidad no se quema o se quema parcialmente.

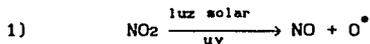
-Al llenarse los depósitos de combustible, se emiten vapores a la atmósfera, en especial cuando se trata de compuestos volátiles como la gasolina.

-En la industria se utilizan disolventes orgánicos que también se evaporan al aire, como por ejemplo en la fabricación de bases para pinturas y en las tintorerías durante el lavado en seco, Seinfeld (1978).

Como los hidrocarburos tiene la capacidad de promover la formación de contaminantes fotoquímicos (O_3 y PAN), los efectos que causan sobre la salud, están relacionados principalmente con la cantidad que se forme de estos contaminantes. Además, los compuestos aromáticos irritan a las mucosas en concentraciones mayores a 25ppm, Dobbins (1979).

El *Ozono* es un oxidante fotoquímico que resulta de una serie compleja de reacciones atmosféricas que tienen lugar por efecto de la luz solar.

Las siguientes reacciones, son algunos de los posibles pasos en la formación del ozono:



donde O^\bullet es un átomo energizado y M un hidrocarburo reactivo, Seinfeld (1978).

Otras fuentes de ozono son las descargas eléctricas en la estratósfera por acción de la radiación ultravioleta, representando concentraciones significativas cerca de los 20 km de altura.

Entre los efectos que se asocian con la contaminación por ozono se habla de irritación en los ojos, pero aún no se ha establecido una relación efecto-causa; sin embargo, el rendimiento de atletas y estudiantes se ha visto disminuido cuando la concentración de ozono se encuentra entre 0.03-0.3 ppm. También se ha observado, un incremento en la frecuencia de ataques de asma en las personas que padecen este mal cuando la concentración excede 0.13 ppm. Por otra parte, en estudios de exposición realizados en áreas de trabajo, con concentraciones de hasta 0.25ppm no fueron detectados cambios en la función pulmonar, Bravo (1987).

1.2.2 Normas de la Calidad del Aire

La calidad del aire además de ser función directa de la emisión de contaminantes, depende de las características meteorológicas del medio, y se establece bajo dos criterios diferentes: para el interior de una industria o lugar de trabajo y para el aire ambiente exterior.

Los criterios de calidad del aire para cada contaminante, representan una relación entre la concentración en el aire del contaminante en cuestión y los efectos sobre el hombre y su medio ambiente, creando así las bases para establecer las normas de calidad del aire.

Los criterios de calidad del aire son descriptivos, es decir, describen los efectos en la salud y en el medio ambiente que, a nivel local o internacional, se han detectado como perniciosos. Se observan los daños que sufre la población sensible (niños y ancianos) cuando se exponen a diferentes niveles de contaminación durante periodos específicos. Para desarrollar estos criterios se consideran diferentes variables como: características fisicoquímicas del contaminante, tiempo de exposición, humedad relativa, temperatura, etc.

Las normas de la calidad del aire se establecen a partir de los criterios de la calidad del aire y se clasifican en primarias y secundarias: las primarias son las que, con un margen adecuado de seguridad, protegen la salud de la población; las secundarias especifican un nivel de concentración máximo permisible de cada contaminante necesario para proteger el bienestar público contra cualquiera de los aspectos peligrosos, conocidos o previstos, asociados con la presencia de dichos contaminantes en el aire, están relacionadas con los daños causados sobre las cosechas, la vegetación, los animales salvajes, la visibilidad, el clima y la economía. Estas normas son o deben ser sujetas a revisión periódica y ser modificadas en caso necesario, Seinfeld (1978).

Las normas de calidad del aire indican la concentración de un contaminante o un conjunto de contaminantes, que no debe excederse en un período dado. Estas normas pueden tener aplicación nacional, estatal y/o local. La tabla 1.3 presenta las normas mexicanas de calidad del aire, Diario Oficial (1982).

Tabla 1.3 Normas mexicanas de calidad del aire

Contaminante	Tiempo (horas)	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ppm	
Partículas Suspensas Totales (PST)	24	275	—
Dióxido de Azufre (SO_2)	24	341	0.13
Monóxido de Carbono (CO)	8	14,950	13.00
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	1	395	0.21
Ozono (O_3)	1	216	0.11

Con propósitos comparativos, en la tabla 1.4 se muestran algunas normas internacionales de calidad del aire, Bravo (1987).

Es interesante observar en esta tabla que, mientras México tiene una norma diaria para partículas suspendidas totales (PST) de $275\mu\text{g}/\text{m}^3$, Italia tiene como norma $100\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el SO_2 , México y Estados Unidos tienen normas muy laxas, 341 y $365\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que Checoslovaquia e Italia tienen $150\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el ozono no todos los países cuentan con norma, México considera como norma horaria $216\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que Japón sólo permite $118\mu\text{g}/\text{m}^3$. En conclusión, podemos observar que México es uno de los países que tiene

las normas menos estrictas, además de no contar con norma para hidrocarburos totales y plomo.

Tabla 1.4 Normas internacionales de calidad del aire

Pais	Partículas suspendidas totales	Dióxido de Azufre	Ozono	Monóxido de Carbono	Oxidos de Nitrogeno (como NO _x)	Hidrocarburos totales	Plomo
México	275 µg/m ³ /24 h	341 µg/m ³ /24 h (0.13 ppm)	216 µg/m ³ /1 h (0.11 ppm)	14 950 µg/m ³ /d h (13 ppm)	395 µg/m ³ /1 h (0.21 ppm)		
Estados Unidos	260 µg/m ³ /24 h	80 µg/m ³ /maa (0.03 ppm)	240 µg/m ³ /1 h (0.12 ppm)*	10 000 µg/m ³ /8 h (9 ppm)	100 µg/m ³ /maa (0.05 ppm)	160 µg/m ³ /3 h (0.24 ppm/3 h)	1.5 µg/m ³ /3 meses
	75 µg/m ³ /mga	365 µg/m ³ /24 h (0.14 ppm)		40 000 µg/m ³ /1 h (35 ppm)			
Checoslovaquia	150 µg/m ³ /24 h /media anual	150 µg/m ³ /24 h /media anual (0.057 ppm)		1 000 µg/m ³ /24 h /media anual (0.87 ppm)	100 µg/m ³ /24 h /media anual (0.05 ppm)		0.7 µg/m ³ /24 h /media anual
Italia	100 µg/m ³ /24 h	150 µg/m ³ /24 h (0.057 ppm)		23 000 µg/m ³ /24 h (20 ppm)	200 µg/m ³ /24 h (0.1 ppm)		10 µg/m ³ /24 h
Japón	100 µg/m ³ /1 h	100 µg/m ³ /1 h media diaria (0.04 ppm)	118 µg/m ³ /1 h (0.06 ppm)	11 500 µg/m ³ /media diaria (10 ppm)	75-113 µg/m ³ /1 h/media diaria (0.04-0.06 ppm)		
	200 µg/m ³ /1 h	262 µg/m ³ /1 h (0.1 ppm)					
maa - media aritmética anual						mga - media geométrica anual	

1.2.2.1 Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)

Para informar a la ciudadanía sobre la calidad del aire en la Ciudad de México se diseñó el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), que a partir del mes de enero de 1986 se publica diariamente, expresando en forma accesible para toda la población las condiciones prevaletientes de contaminación atmosférica.

El IMECA tiene un intervalo de variación de 0 a 500, dividido en 4 categorías, a cada una de las cuales se ha asignado una clasificación referente a la calidad del aire y el efecto esperado sobre la salud, ver tabla 1.5, D.D.F (1991).

Tabla 1.5 Tabla de clasificación del IMECA

CONTAMINANTE Y TIEMPO DE PROMEDIO							
IMECA	CALIDAD DEL AIRE	PST (24 hrs)	PM10 (24 hrs)	SO ₂ (24 hrs)	NO ₂ (1 hora)	CO (8 hrs)	O ₃ (1 hora)
0 - 100	Satisfactoria	275 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.13 ppm	0.21 ppm	13 ppm	0.11 ppm
100-200	No satisfactoria	546 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.35 ppm	0.66 ppm	22 ppm	0.23 ppm
200-300	Mala	637 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	420 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.56 ppm	1.10 ppm	31 ppm	0.35 ppm
300-500	Muy mala	1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.00 ppm	2.00 ppm	50 ppm	0.60 ppm

Para reportar el IMECA, la ZMCM se divide en 5 áreas, dentro de las cuales se localizan 25 estaciones de monitoreo ver figura 1.1 y tabla 1.6, las que proporcionan información sobre la calidad del aire para O₃, SO₂, NO₂, CO, PST y PM10 (partículas menores a 10 μ).

De acuerdo al IMECA es posible analizar el comportamiento de la calidad del aire en la Ciudad de México. De 1988 a 1991, ver tabla 1.7, podemos observar que la contaminación de SO₂ en agosto no violó la norma, en tanto que el ozono ha excedido en ese mes continuamente la norma de calidad establecida.

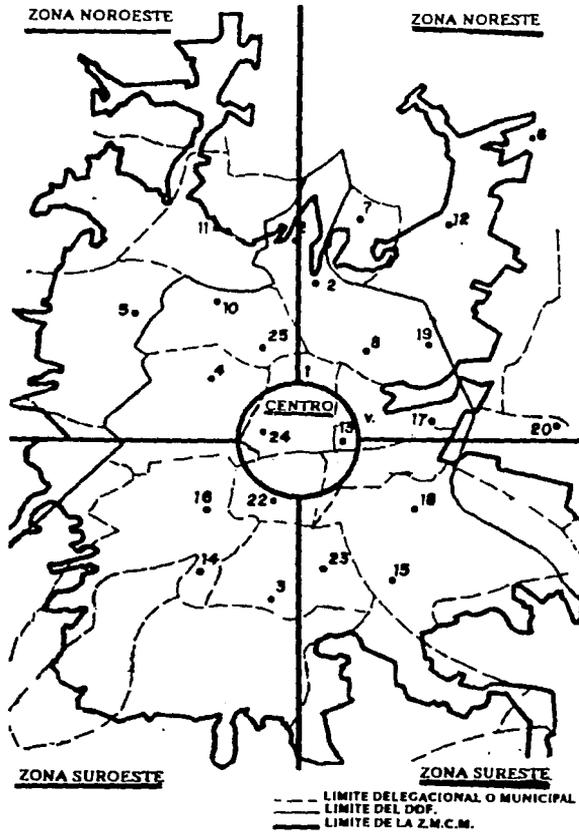


Figura 1.1 División de la ZMCM para el reporte del IMECA

Tabla 1.6 Estaciones que integran la red automática de monitoreo atmosférico

ESTACION	CONTAMINANTES MEDIDOS					PARAMETROS METEOROLOGICOS		
	SO ₂	NO ₂	NO _x	CO	O ₃	HC	WD	WS
1. LAGUNILLA				*				
2. VALLEJO	*							
3. STA. URSULA	*							
4. TACUBA	*					*	*	*
5. ENEP ACATLAN	*						*	*
6. LOS LAURELES	*							
7. LA PRESA	*							
8. LA VILLA	*							
9. SAN AGUSTIN	*				*			
10. AZCAPOTZALCO	*				*			
11. TLALNEPANTLA	*	*	*	*	*		*	*
12. XALOSTOC	*	*	*	*	*		*	*
13. MERCED	*	*	*	*	*	*	*	*
14. PEDREGAL	*	*	*	*	*		*	*
15. C DE LA ESTRELLA	*	*	*	*	*		*	*
16. PLATEROS				*	*		*	*
17. HANGARES	*					*	*	*
18. UAM IZTAPALAPA				*				
19. ARAGON				*				
20. NEZAHUALCOYOTL				*				
21. I.M.P.				*				
22. BENITO JUAREZ				*				
23. TAXQUEÑA				*				
24. INSURGENTES				*				
25. CUITLAHUAC				*				

Tabla 1.7 Porcentaje de días con violaciones durante el mes de agosto, 1988-1991

	OZONO	SO ₂	NO ₂	CO	PST*	PM10*
1988	81	0	0	0	NR	NR
1989	97	0	0	0	NR	NR
1990	90	0	3	0	33	66
1991	100	0	0	3	100	50

* Durante agosto de 1990, el monitoreo de PST y PM10 solo se midió en 3 días y durante 1991 en 2.

NR = No registrado

De la misma fuente de información, DDF (1991), es posible observar, ver tabla 1.8, el número de veces que durante este año (enero-agosto 1991) los 200 puntos del IMECA han sido rebasados por cualquiera de los contaminantes monitoreados. Es interesante hacer notar que el mes que registra la mayor contaminación es mayo, siguiéndole un mes de gran limpieza, junio, registrando solo una violación. Además de ser claro que es la zona suroeste donde la calidad del aire se encuentra más deteriorada.

Tabla 1.8 Número de días con registros mayores a 200 IMECA para cualquier contaminante. Enero-agosto de 1991.

	SUROESTE	SURESTE	CENTRO	NOROESTE	NORESTE	CUALQUIER ZONA
enero	3	7	8	7	4	18
febrero	8	3	2	5	3	13
marzo	10	4	6	9	4	17
abril	7	2	4	4	5	14
mayo	15	6	18	8	5	23
junio	0	1	0	0	1	1
julio	12	4	3	3	2	16
agosto	13	0	5	3	1	16
TOTAL	68	27	46	39	25	118

De acuerdo con el IMECA, el grado de contaminación más elevado que se ha reportado en la Ciudad de México, es el día lunes 16 de marzo de 1992 con 400 puntos de ozono en el sector suroeste, y de acuerdo a reportajes en los principales noticieros de radio y televisión (24 horas, ECO, muchas noticias, etc.) se puso en acción el segundo nivel del Plan de Contingencias; el cual indica que el tránsito vehicular se debe de agilizar para evitar congestionamientos, la disminución en la producción industrial en un 30%, la aplicación del plan "hoy no circula" extendido a las calcomanías rosa y azul y la no asistencia de los niños de kinder, primaria y secundaria a la escuela. Este sistema de emergencia ha prevalecido hasta la fecha (2 de abril de 1992), y es debido al estado del tiempo que permanece en calmas.

Es evidente que ante los altos valores de contaminación que día a día se registran en nuestra ciudad, es necesario aplicar medidas de control las cuales hayan sido previamente evaluadas y aprobada su efectividad. Siendo, para esta evaluación, que se recomienda el uso de modelos matemáticos, cuyas bases teóricas y manejo de parámetros físicos sea tal que sus resultados puedan ser aceptados como prueba de validación.

CAPITULO II

MEDIO DE DISPERSION

El medio de dispersión de los contaminantes es el aire, y su comportamiento es regido por la dinámica atmosférica, que a su vez está determinada por el *clima*.

Clima, etimológicamente procede del griego *clima*, que significa inclinación, aludiendo a la inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto a la órbita que describe alrededor del sol llamada eclíptica, ver fig 2.1. Según la Organización Meteorológica Mundial, clima es el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas, caracterizado por el estado y la evolución del tiempo, en el curso de un período suficientemente largo en un dominio espacial determinado. W. Thornthwaite, definió clima como la integración de los factores meteorológicos y geográficos que ocurren para dar a una región su carácter e individualidad.

Los dos tipos de movimientos que tiene la Tierra están estrechamente ligados con el clima y sus variaciones: el de rotación, que es el que efectúa el planeta sobre su propio eje produciendo el día y la noche; y el de traslación, que es el que realiza la tierra alrededor del sol originando las estaciones del año.

La luz y calor procedentes del sol no calientan de manera homogénea toda la superficie de la Tierra, de manera que en la superficie del suelo y en el aire, existen gradientes térmicos que provocan diferentes climas en cada región, país y continente. Esto se debe a varios factores: a la inclinación del eje terrestre, la excentricidad de la órbita, la no esfericidad del planeta, además de que la superficie de la Tierra no es uniforme (distribución de vegetación, tipos de suelo y cuerpos de agua).

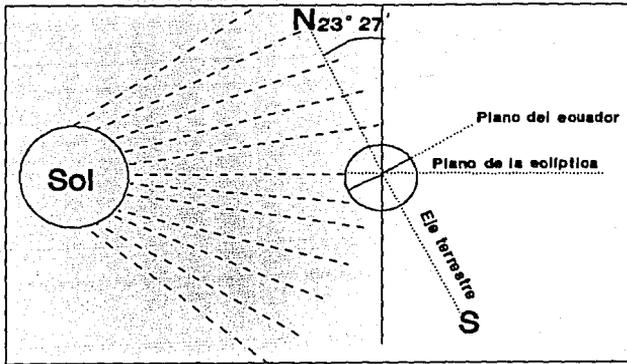


Figura 2.1 Inclinación del eje de rotación de la tierra respecto a la eclíptica

2.1 Atmósfera

La Atmósfera es la envoltura gaseosa que protege a la Tierra de las radiaciones solares, regula la temperatura evitando que existan grandes contrastes entre el día y la noche (como sucede en los astros que carecen de ella) además de ser la base de la vida terrestre, Llaugé (1976).

En una misma zona, la presión atmosférica no siempre es igual, porque ésta varía con la humedad, altura y temperatura. La densidad del vapor de agua es menor que la del aire y cuando éste está presente en alta concentración, el peso de la atmósfera es menor formándose una zona de baja presión. Con la altura disminuye la presión y por lo tanto la densidad del aire de acuerdo con la ley de los gases ideales; la temperatura también influye sobre la presión pues son directamente proporcionales. Como base de estudio se emplea la composición química de aire seco a nivel del mar (ver tabla 2.1) dada por Moran y Morgan (1989), la cual varía considerablemente cuando existe contaminación atmosférica.

Tabla 2.1 Composición química de la atmósfera

Componente	Porcentaje (volumen)
Nitrógeno	78.08
Oxígeno	20.95
Argón	0.93
Dióxido de carbono	0.035
Neón	0.0018
Helio	0.00052
Metano	0.00014
Criptón	0.00010
Oxidos de nitrógeno	0.00005
Hidrógeno	0.00005
Ozono	0.000007
Xenón	0.000009

El límite de la atmósfera no está bien determinado, debido a la poca fuerza de gravedad que se ejerce sobre las últimas capas. Sin embargo, para fines prácticos, la atmósfera se ha limitado y dividido en zonas o capas de acuerdo a su altitud y composición, ver tabla 2.2, Llaugé (1976).

En cada una de las capas atmosféricas el comportamiento de la temperatura es muy distinto, Moran y Morgan (1989) presentan el perfil de temperatura en toda la atmósfera (figura 2.2).

Tabla 2.2 Capas de la atmósfera

1000	EXOSFERA	Vacío casi absoluto. Zona de circulación de satélites geofísicos.
400	MESOSFERA	Producción de iones. Transformación de rayos cósmicos primarios en secundarios.
80	IONOSFERA	Producción de iones. Capas electrizadas que reflejan ondas de radio.
25	QUIMIOSFERA ESTRATOPAUSA	Presencia de la capa de ozono. Aire prácticamente en calma.
10	ESTRATOSFERA TROPOPAUSA	Fenómenos meteorológicos.
0	TROPOSFERA	

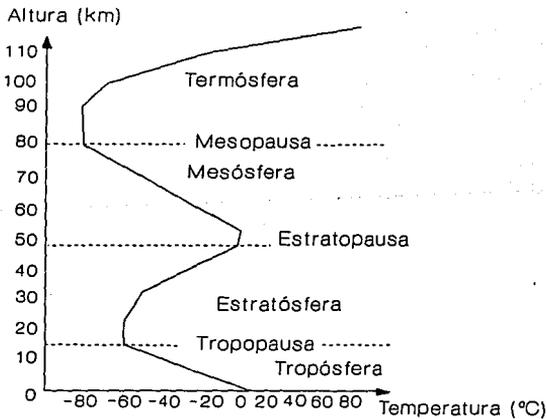


Figura 2.2 Gradiente vertical de temperatura en la atmósfera

La tropósfera se extiende desde la superficie de la tierra hasta aproximadamente 10 km; en el ecuador alcanza un valor máximo de 20 km y en los polos un valor mínimo, 8 km. Esta primera capa es la de mayor importancia para los procesos de contaminación ambiental, pues es en ella en donde se llevan a cabo los fenómenos meteorológicos como nubes, viento, lluvia, *capa límite planetaria*, *inversión térmica* y es donde se desarrolla la vida aerobia.

Los fenómenos que ocurren en la atmósfera se caracterizan por las escalas de tiempo y espacio en las que se desarrollan. En la figura 2.3 se puede observar algunos fenómenos que ocurren en la tropósfera y su escala correspondiente, Oke (1987).

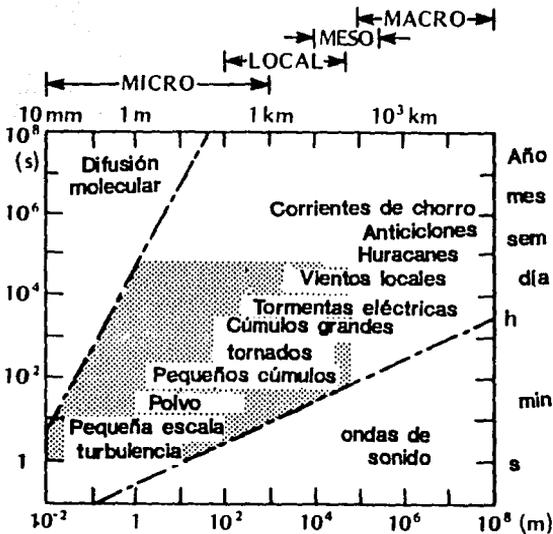


Figura 2.3 Escalas de tiempo y espacio de varios fenómenos atmosféricos

Los fenómenos meteorológicos deben por tanto, analizarse dentro de la escala atmosférica en que ocurren, esto es:

Micro-escala	10^{-2} a 10^3 m
Local-escala	10^2 a 5×10^4 m
Meso-escala	10^4 a 2×10^5 m
Macro-escala	10^5 a 10^8 m

En el estudio de la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se utiliza la meso-escala, puesto que los procesos importantes ocurren dentro de la *capa límite*, (2000 m de altura) y en un área de 2500 km^2

2.1.1 Capa límite planetaria

Se llama *capa límite planetaria* a la capa atmosférica dentro de la cual los patrones de viento son afectados por las irregularidades del terreno; se localiza dentro de la tropósfera, en ella se dispersan los contaminantes y ocurren los principales fenómenos meteorológicos de interés para este estudio, ver figura 2.4, Oke (1987).

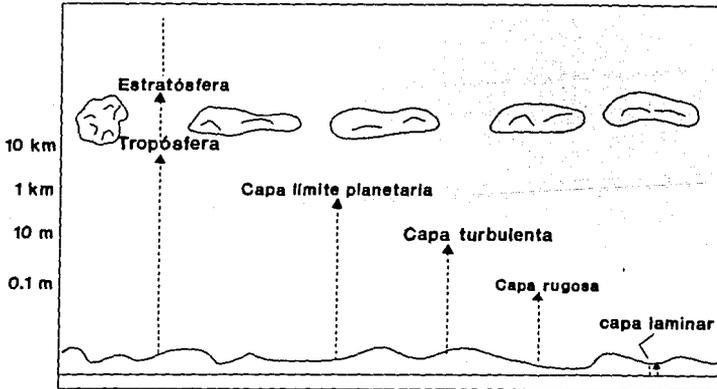


Figura 2.4 Estructura de la Tropósfera

Esta capa está caracterizada por un buen mezclado (en flujo turbulento), originado por los dos mecanismos siguientes:

1) Flujo convectivo. Bajo condiciones normales del gradiente térmico atmosférico, existe un ascenso de aire caliente desde la superficie terrestre y descenso de aire frío, provocándose un movimiento de convección natural, ver figura 2.5, Oke (1987).

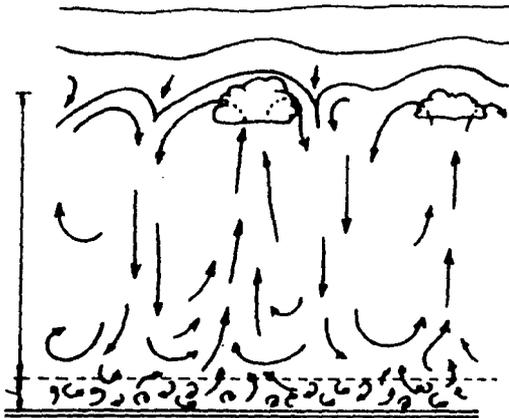


Figura 2.5 Flujo convectivo

2) Fricción, efecto de rugosidad y rigidez del terreno sobre los patrones de viento. Edificios, casas, chimeneas, postes, árboles, personas, autos, etc., forman pequeños remolinos que a su vez generan remolinos más grandes (turbulencia) mejorando el mezclado, ver figura 2.6, Parker (1983).

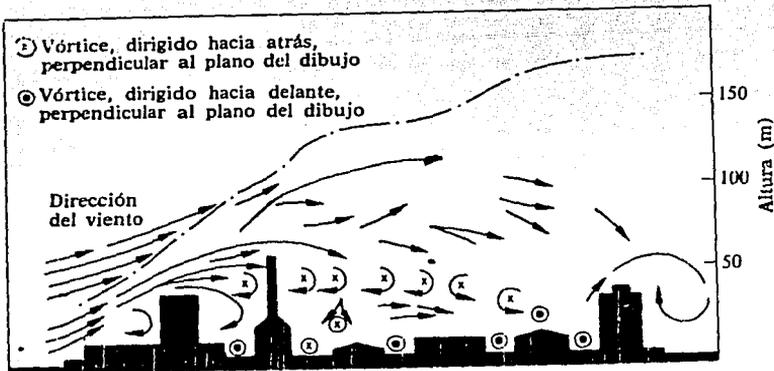


Figura 2.6 Efecto de zonas urbanas sobre los patrones de viento

La altura de la capa límite no es constante, depende de la fuerza de mezclado. Durante el día, cuando la superficie de la tierra es calentada por el sol, se genera un flujo convectivo vigoroso, provocando que la capa límite se extienda entre 1 y 2 km de altura, alcanzando su valor máximo pasando el medio día. Durante la noche sucede lo contrario, la superficie de la tierra se enfría más rápidamente que el aire y el gradiente térmico se invierte, desapareciendo el flujo convectivo y la capa límite se reduce notablemente, aproximadamente a 100 m, tomando su valor mínimo poco antes de la salida del sol. Así, la capa límite crece y disminuye rítmicamente respondiendo al ciclo solar diario, coincidiendo esto con las concentraciones mínimas y máximas de contaminantes.

Dentro de la capa límite se identifican tres capas atmosféricas de interés:

Capa turbulenta, se caracteriza por un intenso mezclado debido a la turbulencia generada por efectos de fricción, (principalmente por la superficie rugosa del terreno). Durante el día se extiende cerca de los 50 m y por la noche solo alcanza unos cuantos metros.

La capa rugosa se extiende solo unos cuantos metros, su altura varía con la de las casas, árboles, arbustos y otras pequeñas irregularidades (representativa de la altura de estos accidentes).

La capa laminar se encuentra en contacto con la superficie del terreno y solo mide unos cuantos milímetros.

2.2 Vientos

Se conoce como viento al desplazamiento horizontal de aire, y es el resultado de la acción de varias fuerzas, en especial las fuerzas de presión y fricción.

Las variaciones de presión ejercida sobre la superficie terrestre provocan el desplazamiento de aire (de zonas de mayor a menor presión), tratando de alcanzar el equilibrio mecánico. Cuanto mayor sea la diferencia de presiones, mayor será la velocidad del viento.

Las características topográficas del terreno provocan fricción modificando los patrones de viento. La velocidad del viento también depende de la distribución superficial de calor debido a la incidencia irregular de los rayos solares; de manera que el aire en una zona caliente se desplazará hacia una zona fría.

El viento no sopla con regularidad, sino a ráfagas o pulsaciones; su velocidad y dirección varía constantemente, diciéndose que existe calma cuando la velocidad es menor a 1.5 m/s.

La dirección del viento depende de patrones globales de circulación, determinados por la radiación solar. En las regiones ecuatoriales la temperatura es mayor que en las polares; el aire caliente asciende y disminuye la presión cerca del suelo, aumentando la presión por encima de éste, y en los polos el aire se concentra en la superficie del suelo formando un sistema de alta presión en la superficie. El resultado es que cerca de la superficie terrestre, la presión es mayor en los polos que en el ecuador y en las capas elevadas sucede lo contrario, por lo que las masas de aire cercanas a la superficie se desplazan de los polos al ecuador (vientos alisios) y en las capas altas, se desplazan del ecuador hacia los polos (vientos

contraalísios), formándose una gran celda convectiva, ver figura 2.7a, Moran y Morgan (1989).

Este movimiento sería único si la Tierra estuviera estática y de superficie uniforme, pero debido al movimiento de rotación, los vientos en el hemisferio norte se desvían hacia la izquierda, de noreste a suroeste y en el hemisferio sur, van del sureste al noroeste. A este fenómeno se le conoce como *efecto de Coriolis*, ver figura 2.7b.

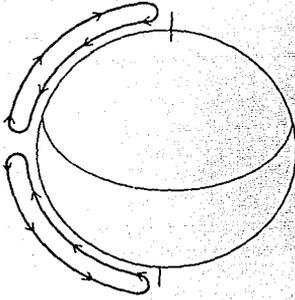
Como el aire que se desplaza del ecuador hacia los polos en las capas altas de la atmósfera se enfría antes de llegar a éstos, desciende a la superficie terrestre; una parte retorna al ecuador (región constante de baja presión) formando una pequeña celda convectiva entre el ecuador y los 30° de latitud, y el resto sigue hasta acercarse a los polos donde se encuentra con masas de aire más frías y densas sobre las que se eleva, ver figura 2.7c.

Es importante notar que cuando los vientos superficiales convergen, ascienden y se expanden provocando enfriamiento, la formación de nubes y precipitaciones, originando un cinturón de baja presión en las latitudes 0° y 60°. Cuando estos vientos divergen, el aire desciende y se comprime, provocando un calentamiento y clima templado, formando un cinturón de alta presión. Esto sucede en los polos y en las latitudes 30° norte y sur.

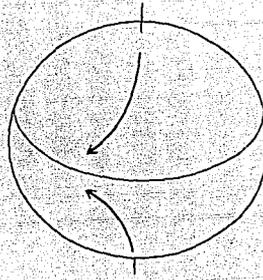
Existen otros factores que determinan los vientos locales, como son: diferencia de temperaturas entre la superficie de cuerpos de agua (océanos, mares, lagunas etc.) y tierra firme e irregularidades del terreno; por lo tanto, es complejo determinar la dirección de vientos locales, por lo que es indispensable contar con estaciones meteorológicas que registren las variaciones locales de flujo.

De lo anterior podemos concluir que a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) le corresponden vientos globales del noreste, pues se localiza entre los paralelos 19°01'10" y 20°09'12" de latitud norte. En efecto, los vientos dominantes en la ZMCM, van de norte a sur, pero existen variaciones locales, que son registradas por el Servicio Meteorológico Nacional y por las 25 estaciones de monitoreo de calidad del aire de la SEDUE.

a)



b)



c)

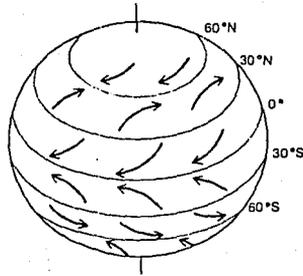


Figura 2.7 Escala global de circulación del aire debido a:
a) Temperatura b) Rotación y c) Gradiente de presión

Los datos de dirección del viento son reportados en grados y la velocidad en metros por segundo (m/s). Para facilitar el manejo de esta información la velocidad se ha clasificado en 6 intervalos y se manejan 16 direcciones, ver tabla 2.3 y 2.4 respectivamente, Aguirre (1989). Sin embargo los modelos que aquí se manejan, HOTMAC y RAPTAD, no requieren hacer uso de estas clasificaciones.

Tabla 2.3 Clasificación de las velocidades del viento (m/s)

Clase	Intervalo de velocidad	Promedio
1	0 - 1.5	0.75
2	1.6 - 3.3	2.45
3	3.4 - 5.5	4.45
4	5.6 - 8.2	6.90
5	8.3 - 10.8	9.55
6	10.9 - 14.0	12.45

Tabla 2.4 Clasificación de direcciones del viento

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N

De los párrafos anteriores es fácil deducir los efectos de la velocidad y dirección de viento sobre la contaminación ambiental: de la velocidad del viento dependerá el grado de dilución de los contaminantes, de manera que a baja velocidad, el mezclado es mínimo y por lo tanto la dilución también; mientras que de la dirección del viento depende el área de afectación de los gases contaminantes.

Por ejemplo, en el caso de la ZMCM, tenemos que las zonas industriales más grandes se localizan al norte de la ciudad (Xalostoc, Vallejo, Naucalpan y Tlalnepantla), y como los vientos dominantes vienen del norte, los gases emitidos en esta zona son barridos sobre la ciudad y acumulados en el sur de la misma donde se encuentra la sierra del Ajusco que impide su salida.

2.2.1 Efecto de la topografía en los vientos

Existen desviaciones en la trayectoria del viento provocadas por el relieve.

choque con obstáculos que se encuentran en su camino; éstos pueden ser montañas, lomeríos, edificios, casas, árboles, etc. Por ejemplo en una zona urbana con gran número de edificios altos, casas, postes, etc., las corrientes serán menos uniformes que en un campo abierto o en el mar.

A estos obstáculos, generalmente se les denomina *rugosidad* del terreno, y de acuerdo con su altura se generan remolinos (turbulencias) dentro de la corriente, que afectan el mezclado y al perfil vertical del viento. En la figura 2.8, Turner (1967), se puede observar que, en una zona urbana de edificios altos, el perfil de viento se ha desarrollado en un 77% aproximadamente a los 300m, mientras que en una zona rural a esa misma altura se ha alcanzado el 90%, y en el mar se tiene un desarrollo total.

El desarrollo de estos perfiles de velocidad se debe a los efectos de fricción que cada tipo de terreno tiene sobre la corriente de aire.

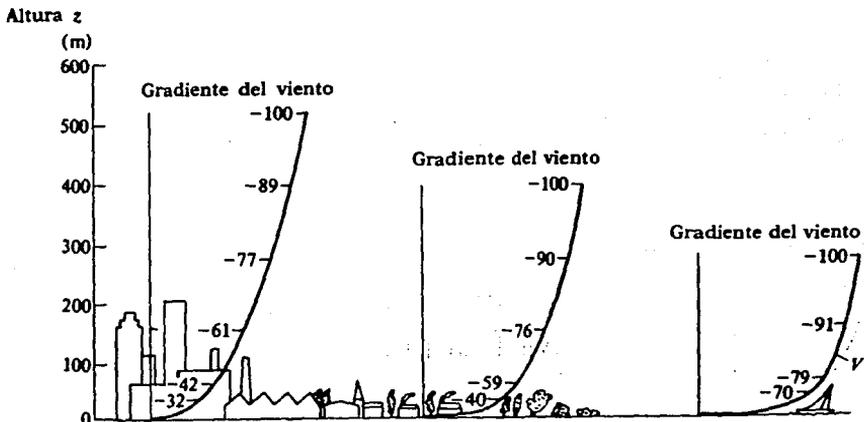


Figura 2.8 Variación media del viento con la altura sobre terrenos de diferente rugosidad

2.2.1.1 Efecto valle-montaña

Se llama así a la trayectoria local del viento debido a características topográficas. Dentro de una zona en donde existe un valle y una montaña, la velocidad y dirección del aire están determinados por la presión atmosférica y el gradiente térmico local existentes.

Existen dos direcciones diferentes de movimiento del aire en este efecto, diurno y nocturno.

a) Movimiento diurno

Debido a que sobre el valle se ejerce una mayor presión atmosférica que en la cima de la montaña (por la diferencia de alturas), el aire del sistema buscará alcanzar el equilibrio y para ello se desplaza de la zona de mayor hacia la de menor presión, del valle hacia la montaña, subiendo por la ladera de la misma; de esta manera, se formará un sistema temporal de baja presión en el valle, que produce el descenso de capas de aire superior, ver figura 2.9a.

Por otro lado, se tiene que el calentamiento del suelo es homogéneo, en la montaña y en el valle, y la temperatura del aire disminuye con la altura (durante el día); por lo que, la temperatura será mayor en la cima de la montaña que sobre el valle a esa misma altura, provocando que el aire de la cima de la montaña se desplace horizontalmente hacia el valle, y baje a éste debido al sistema de baja presión previamente formado; completándose así un ciclo de circulación de aire valle-montaña.

b) Movimiento nocturno

La circulación general nocturna es contraria: el aire de la montaña baja hacia la superficie del valle deslizándose por la ladera, debido a que durante la noche la temperatura del aire aumenta con la altura, de modo que la temperatura sobre la cima de la montaña es menor que sobre el valle a esa misma altura haciendo que el aire se desplace de la parte superior del valle hacia la montaña, y desplace el aire frío de esta zona el cual, por densidad desciende hacia el valle, formándose así un ciclo montaña-valle, ver figura 2.9b.

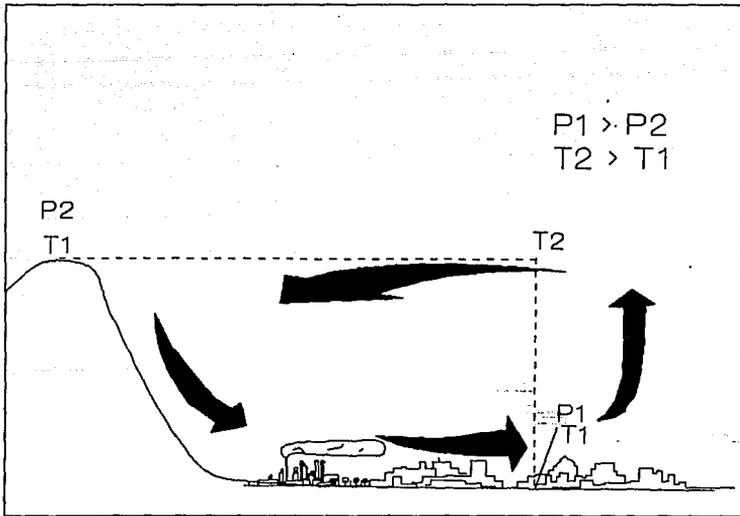
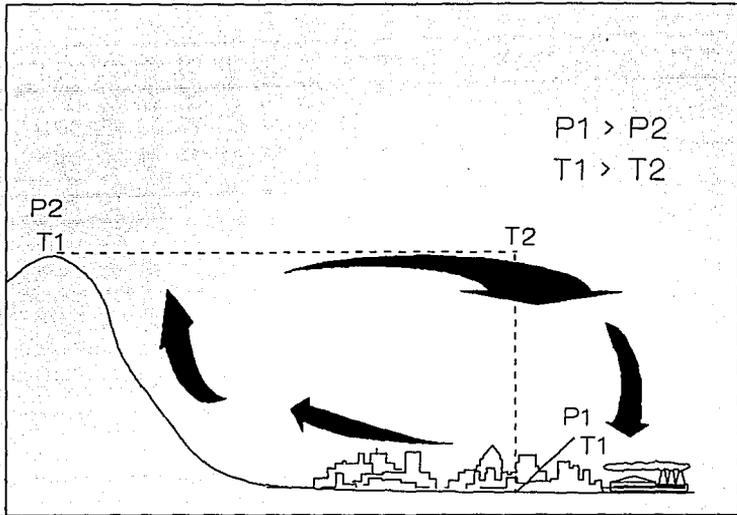


Figura 2.9 Efecto Valle-Montaña a) Movimiento diurno
 b) Movimiento nocturno

Durante el día es más fuerte el gradiente de presiones atmosféricas que el gradiente térmico y por eso la circulación está regida por el gradiente de presiones, formándose un sistema valle-montaña. Durante la noche el gradiente térmico del aire predomina sobre la diferencia de presiones atmosféricas y por ello la circulación del aire está determinada por el gradiente térmico del aire, formándose así un sistema montaña-valle.

2.3 Temperatura.

El comportamiento de la temperatura en las capas de aire cercanas a la superficie de la tierra es muy heterogénea, tanto horizontal como verticalmente. El gradiente vertical de temperatura se genera porque la tierra se calienta más rápidamente que el aire o agua y el aire en contacto con el suelo está más caliente que el que se encuentra más alejado. Por lo tanto, el gradiente de temperatura dentro de la capa límite disminuye conforme aumenta la altura, $dT/dz < 0$.

Este gradiente sucede en el día, pero durante la noche la situación se invierte, pues la tierra se comporta como un cuerpo negro que al ya no recibir energía la comienza a ceder, enfriándose más rápidamente que el aire, hasta que ocasionalmente el gradiente térmico vertical observado es inverso al que sucede durante el día, conociéndose a este proceso como *inversión térmica*, $dT/dz > 0$.

2.3.1 Estabilidad Atmosférica

Se conoce como estabilidad atmosférica a la capacidad que tiene la atmósfera para suprimir o acrecentar los movimientos convectivos del aire, principalmente originados por el gradiente térmico de la misma, Aguirre (1989).

La estabilidad atmosférica es muy utilizada por los modelos tradicionales de dispersión, ya que a partir de ella se calculan los valores numéricos de otras variables de cálculo, tales como desviación estandar, altura efectiva de emisión, etc.

Generalmente se maneja el concepto de estabilidad atmosférica de acuerdo a la clasificación establecida por Pasquill, que se presenta en la tabla 2.5, Turner (1967).

Tabla 2.5 Clasificación de estabilidad atmosférica

Categorías de Pasquill	Descripción	Gradiente térmico °C/100 m
A	Extremadamente inestable	< -1.9
B	Inestable	-1.9 a -1.7
C	Ligeramente inestable	-1.7 a -1.5
DD	Neutra	-1.5 a -0.5
DN	Ligeramente estable	-0.5 a 1.5
E	Estable	1.5 a 4.0
F	Extremadamente estable	>4.0

Cuando un volumen de aire seco asciende verticalmente sin intercambio de calor con los alrededores (adiabáticamente), el aire al ascender se expande y enfría, debido a la disminución de presión con la altura, esta disminución es equivalente a 0.986°C para cada 100 m, y se le conoce como *gradiente adiabático seco*, Γ_a . Una forma de clasificar la estabilidad atmosférica, es mediante la comparación del gradiente térmico con este gradiente adiabático seco, pudiéndose presentar 3 diferentes casos, Parker (1983):

- 1) $dt/dz < \Gamma_a$: La temperatura disminuye rápidamente con la altura y tanto el mezclado como la dispersión de los contaminantes son mayores. La atmósfera en estas circunstancias se considera como *inestable*, ver figura 2.10a.
- 2) $dt/dz = \Gamma_a$: Esto indica que el gradiente térmico observado es igual a $-0.986^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, y por lo tanto el mezclado y dispersión son muy escasos. La atmósfera bajo estas condiciones se le considera *neutra*, ver figura 2.10b.

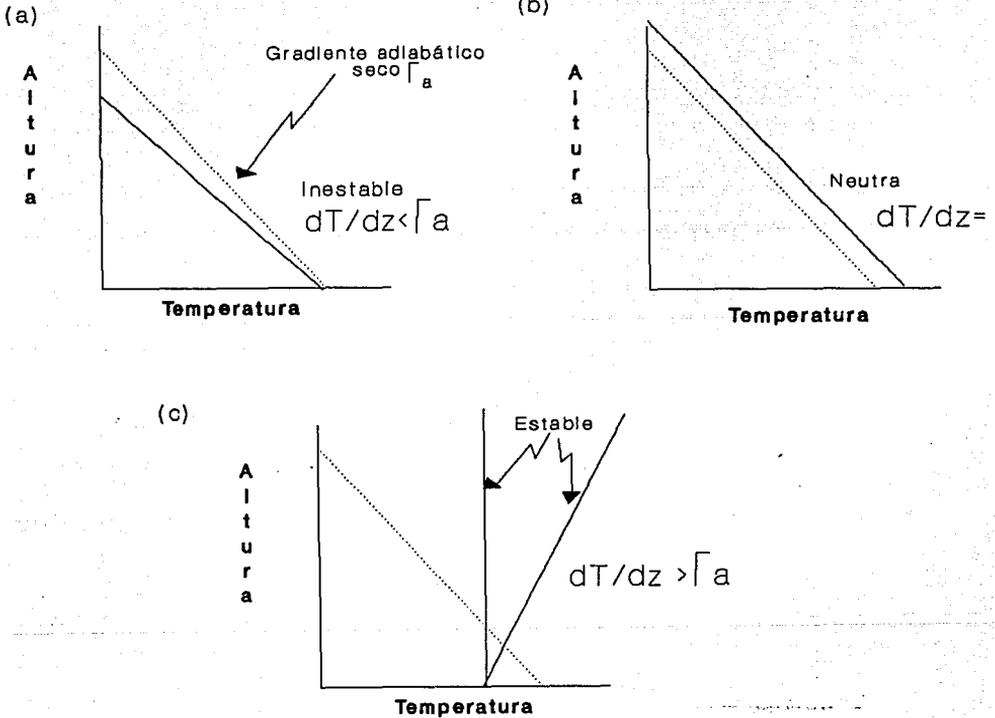


Figura 2.10 Estabilidad atmosférica : a) Inestable, b) Neutra
c) Estable

- 3) $dt/dz > \Gamma_a$: La disminución de la temperatura con la altura es mínima o inclusive puede aumentar, por lo que el movimiento de las capas de aire se inhibe. El mezclado es casi nulo cuando el gradiente térmico se aproxima a cero y nulo completamente cuando es positivo generándose una *inversión térmica*. La atmósfera en estas circunstancias de poco mezclado, se le considera como *estable*, ver figura 2.10c.

2.3.2 Inversión Térmica

En el inciso 2.3, se explicó el comportamiento del gradiente térmico del aire y con ello la inversión de temperatura, ahora sólo añadiremos las diferentes causas por las que puede originarse, IPCAJ (1989):

Por topografía

También llamado efecto valle-montaña (ver inciso 2.2.1.1.), se forma en el fondo de un valle o cuenca, por estancamiento de flujos de aire frío que bajan de las montañas. El flujo es mínimo y el movimiento horizontal está limitado por las paredes que forman el valle. En este caso la concentración de contaminantes alcanza niveles muy elevados, ver figura 2.11.

Frontal

Se forma cuando se encuentran dos frentes de aire a diferente temperatura, la que se encuentre más caliente se elevará sobre la que esté más fría, misma que quedará atrapada formándose una inversión.

Por anticiclón

Un anticiclón es una zona de alta presión, alrededor de la cual el aire circula. El aire en el centro del anticiclón es desplazado hacia afuera, siendo sustituido por aire frío superior, formándose de esta manera una zona de inversión de temperatura.

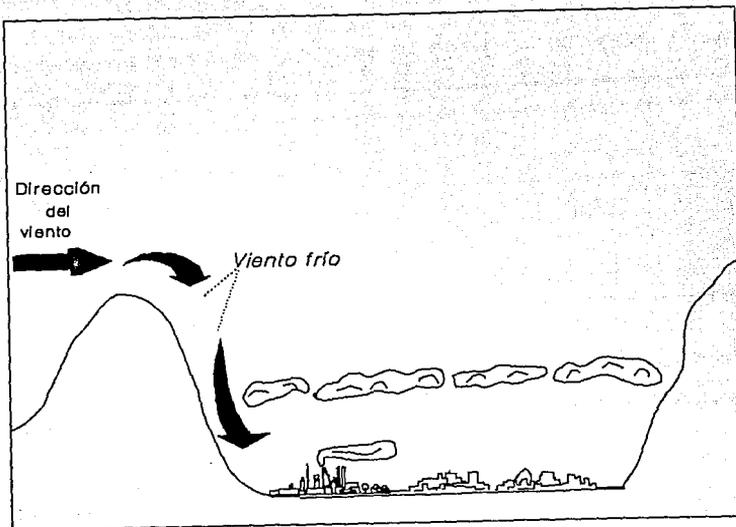


Figura 2.11 Inversión térmica por topografía

Por radiación

Sucede durante la noche, por la rápida pérdida de calor que sufre el suelo. Este fenómeno se presenta con mayor frecuencia durante el invierno, cuando la cantidad de calor que almacena la tierra durante el día es reducida.

Por advección

Se forma cuando el aire fluye horizontalmente (advección) por una superficie de terreno frío. En este tipo de inversión, la niebla es frecuente, IPCAJ (1989).

La altura que puede tener una inversión térmica es muy variada e impacta de manera diferente sobre el medio ambiente.

La trayectoria de la pluma de emisión estará determinada, entre otros muchos factores, por altura de la capa de inversión, ver figura 2.12, IPCAJ (1989). En el caso del inciso (a) existe una inversión térmica con una altura menor a la altura de la chimenea y la pluma no bajará por debajo de ésta; esta situación es benéfica porque la contaminación no llega a nivel de piso y no afecta la salud de los habitantes. En el segundo caso (b), la altura de la chimenea es menor a la altura de la capa de inversión; esto es lo más común y el peor de los casos, puesto que la inversión forma una *cubierta* que no permite que la pluma se disperse hacia arriba, aumentando la concentración de contaminantes a nivel del piso. Desde luego la dilución no es solución, lo recomendable es aumentar la eficiencia del proceso para disminuir la concentración de los contaminantes emitidos, y a éstos, hacerlos pasar por un equipo de control, pues no a todas las chimeneas es posible aumentarles la altura lo suficiente como para rebasar el nivel máximo de inversión térmica registrado en esa zona.

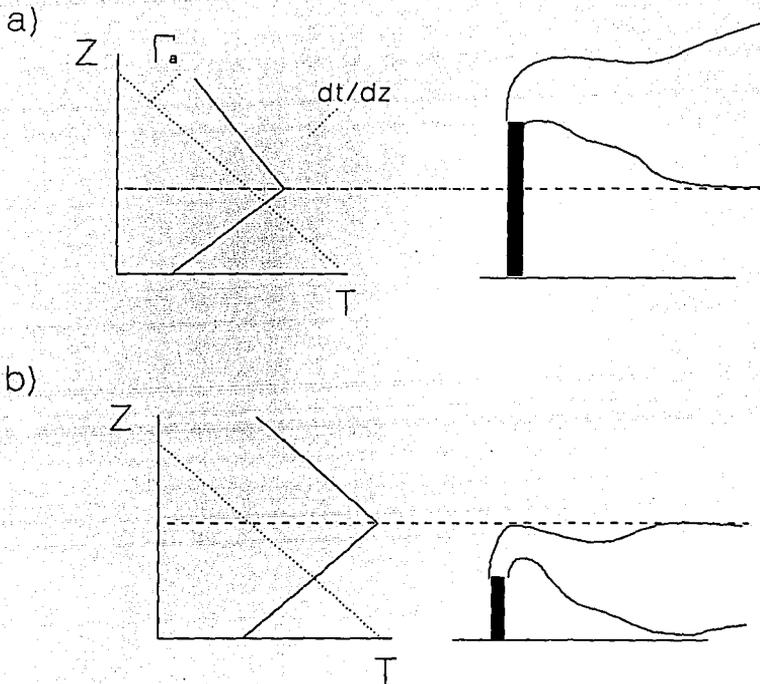


Figura 2.12 Efecto de la inversión térmica sobre emisiones contaminantes. a) inversión baja, b) inversión alta

2.3.3 Temperatura potencial

El concepto de temperatura potencial (θ), es importante en este trabajo porque es este el concepto de temperatura que se maneja dentro del cálculo de los modelos que aquí se presentan. Ésta se define como la temperatura que tendría una parcela de aire al ser llevada adiabáticamente a una presión igual a 100 kpa (aproximadamente la que se tiene a nivel del mar).

La temperatura potencial se calcula con base en la ley de los gases ideales, mediante la ecuación:

$$\theta = T (P_0 / P)^{(\gamma - 1) / \gamma}$$

Donde γ es igual a la relación de las capacidades caloríficas del aire a presión y volumen constantes (C_p/C_v) y P_0 es la presión de referencia (100 kpa). Para el cálculo de la temperatura potencial se usa $(\gamma-1)/\gamma$ igual a 0.288 como valor promedio para el aire atmosférico.

El gradiente adiabático seco atmosférico corresponde a una línea vertical cuando se emplea la temperatura potencial para su representación.

2.4 Humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua en un volumen de aire seco. Existen diversas formas de expresar la humedad; la que se emplea en este trabajo es la *humedad relativa*, que indica cuanto vapor de agua existe expresado como porcentaje de la cantidad máxima que el aire puede contener a una temperatura y presión dadas.

El contenido de vapor de agua en la atmósfera depende principalmente de la temperatura, cuanto más caliente esté el aire más agua puede contener. Cuando contiene la mayor cantidad posible de vapor sin llegar a condensar, el aire se encuentra saturado. Si por alguna circunstancia se aumenta la humedad en el aire o la temperatura desciende, lo suficiente como para alcanzar la temperatura de rocío, el vapor de agua condensará, apareciendo la lluvia.

La atmósfera terrestre contiene cantidades variables de vapor de agua, la mayor parte del mismo se encuentra en los primeros 5km, dentro de la tropósfera, y procede de la evaporación de diversas fuentes terrestres. La fuente principal son los mares, lagos y ríos y se conoce como *evaporación física*; otra fuente es la evaporación que se lleva a cabo por la transpiración de los vegetales y otros seres vivos, conocida como *evaporación fisiológica*, Llaugé (1976).

El vapor de agua no es un contaminante, pero por alterar el medio ambiente su evaluación es de importancia dentro de un estudio de contaminación atmosférica. La humedad del aire afecta la visibilidad, además de actuar pasiva o activamente en más de un proceso fisicoquímico productor de contaminantes.

CAPITULO III

CARACTERISTICAS FISICAS DE LA ZMCM

Es importante el estudio de las características físico-geográficas de la Cuenca de México, para después analizar las de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), ya que esta última forma parte de todo un contexto geográfico que determina y condiciona sus características, las que a su vez determinan el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera.

La mayor parte de la información que se va a presentar en este capítulo es tomada del Atlas de la Ciudad de México, publicado por el Colegio de México y el Departamento del Distrito Federal, ya que éste presenta en forma de cartas la información tanto de la topografía, uso del suelo y áreas verdes, así como de la distribución del clima: precipitación, temperatura, humedad y vientos para toda la ZMCM. La información presentada dentro de este capítulo que no presente referencia, es por haber sido tomada, de esta fuente de información.

3.1 Geografía física

La Cuenca de México se encuentra comprendida entre los paralelos $19^{\circ}01'18''$ y $20^{\circ}09'12''$ de latitud norte y entre los meridianos $98^{\circ}31'58''$ y $99^{\circ}30'52''$ de longitud oeste, a una altitud mínima de 2,235msnm y máxima de 3,960msnm, contando con una superficie de $9,560\text{km}^2$.

En la tabla 3.1 se muestran las entidades federativas que comparten el territorio de la Cuenca de México, siendo el Estado de

México al que corresponde una mayor superficie. Comprende además la mayor parte del Distrito Federal, el oeste de Tlaxcala, una pequeña porción del oeste de Puebla y el sur del estado de Hidalgo.

Tabla 3.1
Distribución de la superficie de la Cuenca de México
según las entidades federativas que la forman

Entidad	Superficie (km ²)	Porcentaje
Estado de México	4800	50
Hidalgo	2500	26
Distrito Federal	1320	14
Tlaxcala	840	9
Puebla	100	1
Total	9560	100

Por estar la Cuenca de México en una región geográfica rodeada de sierras, constituye una cuenca cerrada o endorreica, es decir, aquella en que los ríos y arroyos que escurren desde las partes altas desagan, en una llanura lacustre dando lugar a ciénegas.

Datos geológicos prueban que la Cuenca de México es de origen tectónico, de ahí que la denominación correcta de esta depresión sea la de *cuenca* y no la de *valle* como comúnmente se le ha llamado. Cuenca y valle denotan depresiones topográficas de génesis diferentes: cuenca es un hundimiento de orden tectónico (endógeno) y valle corresponde a la depresión formada por la acción de un río (exógeno).

La presencia de sierras es uno de los aspectos físicos más importantes que caracterizan y limitan la Cuenca de México, que se comporta como una *olla* que impide la salida de las masas de aire. En la figura 3.1 se muestra a la ZMCM localizándose al sureste de la Cuenca de México, y por esta posición geográfica una gran parte de su territorio queda comprendida en partes bajas y de escaso relieve, generalmente en partes antiguamente ocupados por lagos.

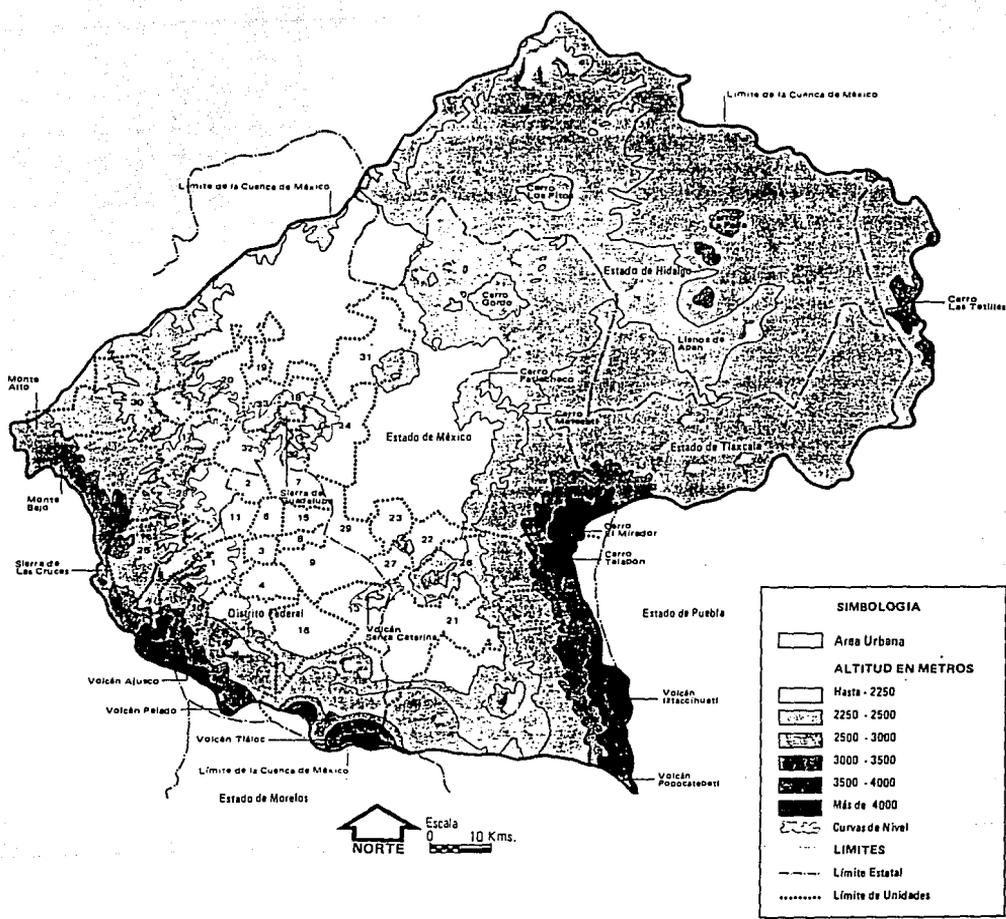
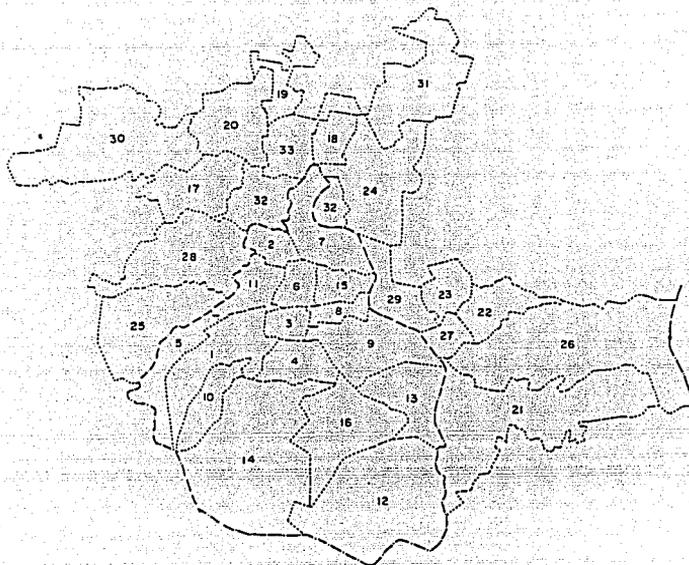


Figura 3.1 Cuenca de México

En donde los números que aparecen en esta figura, corresponden a las delegaciones y municipios presentados en la figura 3.2.



--- Límite Distrito Federal

Distrito Federal
Delegaciones

Estado de México
Municipios Conurbados.

1. Alvaro Obregón
2. Azcapotzalco
3. Benito Juárez
4. Coyoacán
5. Cuajimalpa
6. Cuauhtémoc
7. Gustavo A. Madero
8. Iztacalco
9. Iztapalapa
10. Magdalena Contreras
11. Miguel Hidalgo
12. Milpa Alta
13. Tláhuac
14. Tlalpan
15. Venustiano Carranza
16. Xochimilco

17. Atizapan de Zaragoza
18. Coacalco
19. Cuautitlán
20. Cuautitlán Izcalli
21. Chalco
22. Chicoloapan
23. Chimalhuacán
24. Ecatepec
25. Huixquilucan
26. Ixtapaluca
27. La Paz
28. Naucalpan de Juárez
29. Netzahualcoyotl
30. Nicolás Romero
31. Tecamác
32. Tlalneantla
33. Tultitlán

Figura 3.2 Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Los ríos y arroyos que bajan de las sierras escurren principalmente de la porción oeste de la cuenca, destacando por su caudal los ríos Magdalena de la Piedad, Remedios y Cuautitlán; éstos, más otros ríos de menor importancia, depositaban sus aguas en la parte baja de la cuenca y formaban los lagos de Chalco, Xochimilco, Texcoco, Xaltocan y Zumpango. Actualmente gran parte de esos lagos se han secado y el resto ha sido entubado y conducido artificialmente para abastecer a la Ciudad de México.

La topografía que ha sido el elemento determinante en la distribución mesoclimática de la zona, de la depresión lacustre a la cima de las sierras existe una graduación climática que va de subhúmedo al húmedo y del cálido al frío. Por la altitud a la que se encuentra la cuenca, su clima es tropical de montaña, es decir, que aunque la temperatura es menguada por la gran altura a la que se encuentra, otras características de las zonas de los trópicos se hacen presentes, como la intensidad y regularidad de lluvias; y por su latitud corresponde a la zona tórrida.

Durante el invierno, la cuenca se encuentra bajo la influencia de masas de aire polar, como cualquier otra región templada ubicada fuera de los trópicos, y bajo esta característica el clima de la Ciudad de México (como de la mayor parte del país), está determinado por los sistemas atmosféricos tropicales y extratropicales, distinguiéndose así, dos estaciones climáticas bien definidas: medio año de secas durante el invierno (noviembre-abril) y medio año de lluvias (mayo a octubre).

Durante el período de secas, las masas de aire polar continental que llegan a la cuenca son bastante secas y producen tiempo frío y ventoso con poca nubosidad. La circulación del aire sobre el valle se origina desde tres puntos principalmente: oeste, noroeste y sudoeste.

En la tropopausa los vientos alcanzan velocidades de 27m/s formando la llamada *corriente de chorro* que circunda el planeta, y que en invierno llega a su posición máxima austral en Norteamérica (en nuestro país esta zona se localiza al norte de la Ciudad de México). Mientras los vientos fuertes del oeste soplan en las alturas, en los niveles cercanos al suelo llegan masas de aire procedentes de las regiones polares de Norteamérica y del Pacífico del Norte.

El descenso del aire asociado a la circulación anticiclónica prevalenciente, origina en la cuenca cielos despejados y períodos de calma en niveles inferiores (en los primeros 100 a 200 m), especialmente por la noche y la mañana.

Las perturbaciones que en forma de ondulaciones viajan en el seno de la corriente aérea que proviene del oeste, ocasionan una intensificación del viento cuando pasan por la Cuenca de México, levantando tolvaneras especialmente en la segunda mitad del período de secas, es decir, de febrero a abril (Jauregui, 1971). Estas tolvaneras que afectan a la ciudad, pueden también tener su origen en una aglomeración de nubes convectivas que se desarrolla normalmente después de mediodía hacia el centro de la cuenca. Las corrientes turbulentas descendentes que obran por debajo de éstas, levantan espesos muros de polvo al pasar los campos secos y desnudos de vegetación donde antes existió una zona lacustre. Impulsadas por los vientos generales (que en los niveles inferiores son del este), las nubes y el polvo avanzan luego sobre la ciudad agravando los niveles de contaminación por algunas horas.

Las acciones como el Plan de Texcoco (pastización de aproximadamente 6,000 ha) y la creación de cuerpos de agua como el Nabor Carrillo (900 ha), han contribuido a reducir la erosión eólica y por lo tanto la frecuencia de las tolvaneras en el noreste de la ciudad. Pero, debido a la creciente sobrepoblación con calles sin pavimento en el perímetro de la ciudad, así como la tala de árboles, se generan nuevas fuentes de polvo en la cuenca.

En el período de lluvias, que normalmente comienza a fines de abril, cambia la circulación atmosférica, los vientos invernales del oeste desaparecen, prevaleciendo la corriente húmeda tropical de los vientos alisios, la que profundiza hasta llegar a la tropopausa (13 km aproximadamente); originando los aguaceros de verano.

En un día típico después de una mañana soleada, se desarrollan al pie de las montañas cúmulos que avanzan sobre la ciudad. Pasando el medio día, éstas nubes alcanzan su máximo crecimiento, y ayudadas por la energía calorífica de la ciudad, se precipitan en forma de verdaderos chubascos, especialmente hacia el sur y el poniente de la ciudad, Jáuregui (1974).

3.1.1 Topografía

Más de la mitad del territorio de la ZMCM presenta un relieve accidentado: hacia el norte formando la Sierra de Guadalupe; al este la Sierra de Santa Catarina, y al suroeste las Sierras de las Cruces, Ajusco y Chichinautzin. Dentro de éstas sierras las mayores elevaciones se presentan al sur y al norte: al sur con la Cruz del Marqués a 3960 msnm, el Pico del Aguila a 3880 msnm que forman los picos del volcán Ajusco, el Tláloc de 3690 msnm y el volcán Pelado de 3500 msnm, entre otros; al norte, en la sierra de Guadalupe, con los cerros Chiquihuite y Zacatenco de 2730 y 2550 msnm respectivamente.

El resto de la ZMCM son terrenos semiplanos formados por lo que fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. Dentro de esta planicie, que se localiza a una elevación promedio de 2235 msnm, se encuentran prominencias topográficas aisladas, como el Cerro de la Estrella, El Peñón, y el Cerro de Chapultepec entre otros de menor elevación.

3.1.2 Usos del Suelos

En el Distrito Federal el 51.52% de su superficie total corresponde al área urbana ocupada, dentro de la cual los usos del suelo se encuentran distribuidos de la siguiente manera: se observa un predominio del uso habitacional con casi la mitad de la superficie urbana (49.1%) y sigue en importancia el uso dedicado a la vialidad (27.55%), ver tabla 3.2.

Tabla 3.2 Uso del suelo en el Distrito Federal (1986)

USO DEL SUELO	SUPERFICIE (ha)	PORCENTAJE RELATIVO DEL AREA URBANA OCUPADA
Habitacional	27,197	49.09
Industrial	2,936	5.30
Servicios	5,069	9.60
Espacios Abiertos	4,936	8.91
Vialidad	15,263	27.55
Total	55,401	100.00

En lo que corresponde al Estado de México Metropolitano, el 75.642% es superficie urbanizada, en la que resalta el uso habitacional con el 58.1%; entre reservas, cuerpos de agua y áreas verdes tienen el 31.6%, el resto lo abarca principalmente el uso industrial con el 9.4%, ver tabla 3.3.

Tabla 3.3 Usos del suelo en los municipios conurbados del Estado de México, 1985.

USO DEL SUELO	SUPERFICIE (ha)	PORCENTAJE RELATIVO DEL AREA URBANA OCUPADA
Habitacional	41,528	58.1
Industrial	6,732	9.4
Equipamiento	682	0.9
Áreas verdes	12,863	18.1
Cuerpos de agua	908	1.3
Reservas	8,765	12.2
Total	71,478	100.0

3.1.2.1 Áreas verdes

La localización y estudio de las áreas verdes forma parte del diagnóstico ecológico de la ZMCM. Los árboles en zonas urbanas son importantes porque en su follaje se depositan y absorben una gran

cantidad de partículas que flotan en el medio, filtran los rayos solares, amortiguan el ruido y son una fuente muy importante de purificación del aire. Los prados, tienen la propiedad de absorber y adsorber gases, lo que es muy importante para disminuir la concentración de contaminantes a nivel del piso. En general, la vegetación modifica parámetros ambientales como el régimen térmico, la humedad del aire, la velocidad y dirección del viento, la cantidad de sólidos suspendidos y la dispersión del ruido principalmente; además de ser importantes *sumideros* de la contaminación ambiental (eliminan del ambiente los contaminantes).

La vegetación también disminuye la erosión del suelo por la acción del viento y el agua, favorece la captación de agua de lluvia hacia los mantos acuíferos y permite la presencia de fauna en aire, tierra y agua.

De acuerdo a la manera como se relaciona el ambiente urbano con las áreas verdes se pueden clasificar como:

- Parques Nacionales o reservas naturales
- Terrenos de uso agropecuario
- Parques, jardines, glorietas y camellones
- Espacios abiertos

Los Parques Nacionales son las últimas zonas de vegetación natural en la ZMCM, ver tabla 3.4, encontrándose en condiciones aceptables únicamente el Desierto de Los Leones, Cumbres del Ajusco y Miguel Hidalgo y Costilla, localizados en la parte sur-suroeste de la ciudad; ocupando una superficie total de 4,536 ha, esto representa solamente un 1.265% de la superficie total de la ZMCM.

La ocupación de terrenos agropecuarios para usos urbanos (proceso difícil de revertir), agrava por un lado las condiciones ecológicas y por otro implica elevados costos de urbanización.

El crecimiento horizontal de la ZMCM presenta una serie de problemas en el uso del suelo: tenencia de la tierra, servicios e infraestructura, conflictos en las zonas conurbadas, usos sobre áreas de reserva ecológica, etcétera.

Tabla 3.4 Parques Nacionales de la ZMCM

Nombre	Localización	Superficie (ha)
Desierto de los Leones	Cuajimalpa y Alvaro Obregón	1,866
Cumbres del Ajusco	Tlalpan	920
Fuentes Brotantes de Tlalpan	Tlalpan	129
El Tepeyac	Gustavo A. Madero	294
Cerro de la Esrella	Iztapalapa	1,100
El Coyoacán Histórico	Coyoacán	584
Molino de Belem	Miguel Hidalgo	17
Lomas de Padierna	Alvaro Obregón	670
Miguel Hidalgo y Costilla	Cuajimalpa y Huixquilucan	1,750
Los Remedios	Naucalpan	400
total		7,730

Los espacios abiertos, que son los que están cubiertos por pasto como los campos deportivos, los cementerios y lotes baldíos, son muy poco frecuentes en la Ciudad de México, en cambio el Estado de México cuenta con grandes extensiones que actualmente se ven amenazadas por la necesidad de servicios y vivienda.

No existe actualmente un parámetro ecofisiológico que permita asignar un número de metros cuadrados por habitante, dado que cada área verde cumple una función en el sistema urbano, no pueden sumarse de manera simple, de tal manera que los metros cuadrados por habitante no reflejan la distribución, frecuencia, disponibilidad y accesibilidad para la población. En la tabla 3.5 y de acuerdo a la figura 3.3, se puede apreciar el tipo de suelo, cantidad de áreas verdes por habitante, y la precipitación para cada sector de la ZMCM.

Tabla 3.5

Distribución de áreas verdes

Sector	Tipo de suelo	Precipitación (mm)	Área verde (m ² /hab)
Centro	Urbanizado	600	1.2
Centro-sur	Urbanizado	600	1.2, 8.5 ⁺
Oeste-sureste	Pedregal		
	Áreas verdes	800-1200	4.6, 199.4 ⁺
Sur-sureste	Pedregal	800-1200	328.4 ⁺
	Áreas verdes		2.8, 8.8 ⁺
Este	Áreas erosionadas	600	651.2 ⁺⁺
Centro-norte	Urbanizado	700	0.6
	Áreas erosionadas	700	1.7
Norte	Pedregal		
	Agropecuario	700	—

+ Además de la superficie de parques, jardines, camellones y glorietas se agregan los Parques Nacionales.

++ A lo anterior se agregan los terrenos agropecuarios.

Si se toma en cuenta sólo las superficies de parques, jardines, glorietas y camellones es de 2.3 m²/hab, cuando se incluye también la extensión de parques nacionales resulta de 7.3 m²/hab y si sumamos los terrenos agropecuarios es de 97.9 m²/hab. Atendiendo al primer indicador, por ser el que está más en contacto con la población, podemos decir que el área metropolitana cuenta con un índice de áreas verdes de 2.3 m²/hab para el Distrito Federal y 5.2 m²/hab para toda el área. Estos índices se encuentran por debajo de los 16 m²/hab recomendados por la ONU.

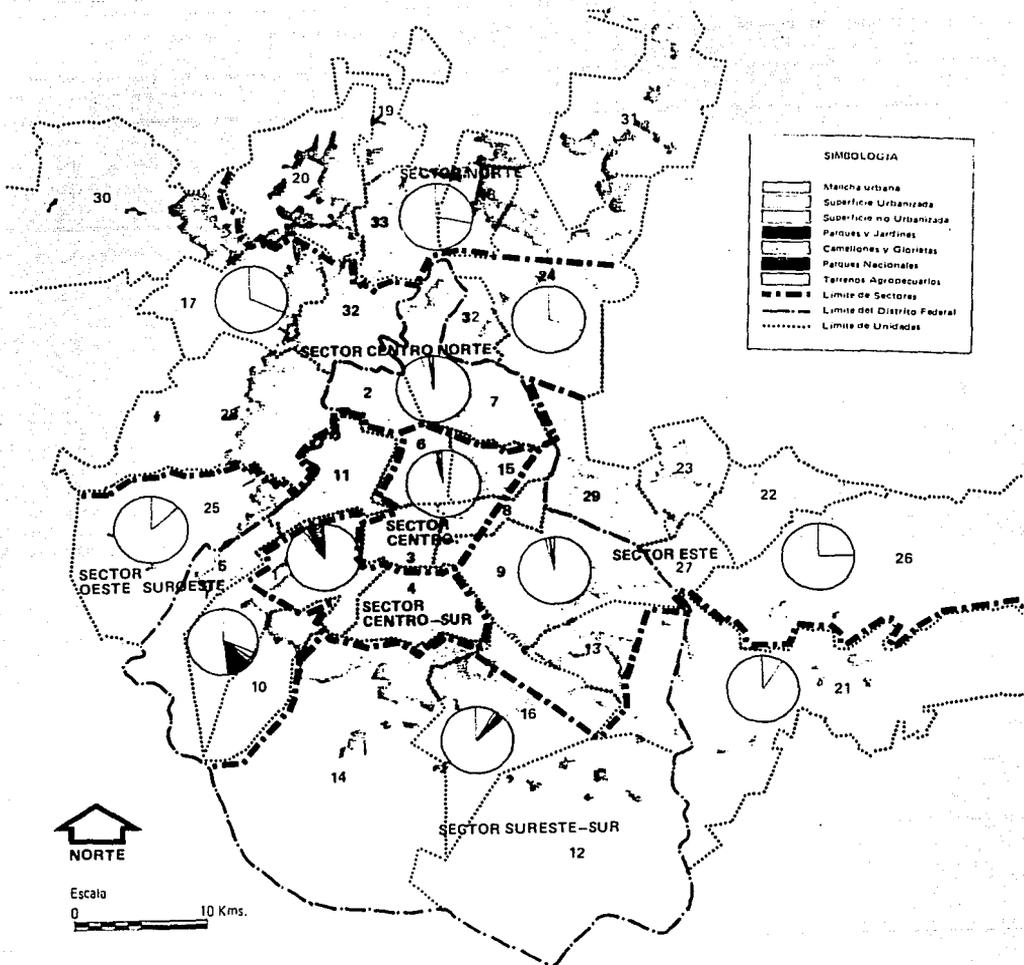


Figura 3.3 Porcentaje de áreas verdes en municipios y delegaciones de la ZMCM

3.1.3 Clima

En este inciso estudiaremos algunos de los factores meteorológicos que son de importancia para el conocimiento del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, como son: humedad, precipitación, gradiente térmico y vientos.

Haciendo una clasificación por climas en las diferentes zonas de la ciudad de México y de acuerdo a la clasificación que hizo W. Koeppen, podemos observar que se encuentran climas muy variados debido a la topografía de la zona, pues existe una diferencia aproximada de 1,600 metros (2,235-3,960), entre la parte más baja y la más alta de la zona, en la figura 3.4 se observa dicha clasificación.

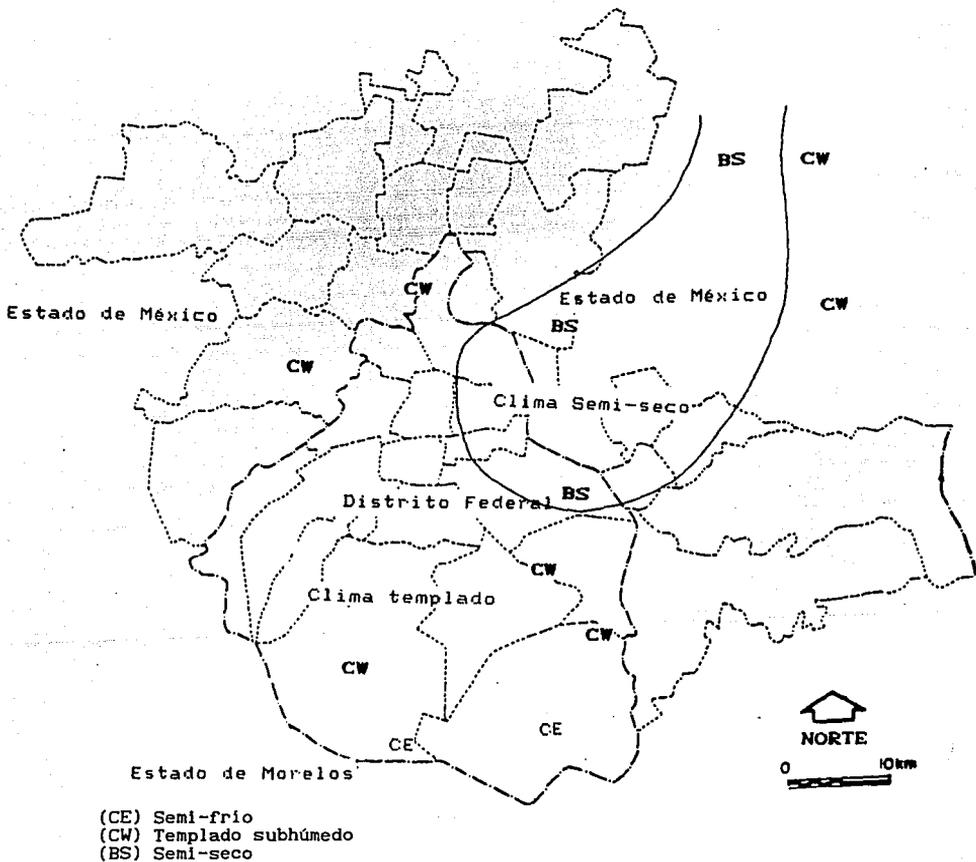


Figura 3.4 Climas en la ZMCM

3.1.3.1 Humedad

En la Ciudad de México la humedad relativa es menor que en los campos vecinos, debido a la escasez de fuentes de humedad (áreas verdes y cuerpos de agua). En la tabla 3.4 se observaron las superficies de la ZMCM que cuentan con áreas verdes y donde existe una mayor humedad, pudiendo añadir a esa lista el parque de Chapultepec, San Juan de Aragón, Zoológico de Tlalpan y otros de menor importancia dada su pequeña superficie.

Haciendo una clasificación climática de la ZMCM, se tiene que en el noreste el clima es semiseco, BS, ver figura 3.4; en la zona centro y oriental el clima es templado subhúmedo, CW, con aumento en la humedad a medida que se avanza hacia el sur. En la zona sur y sureste el clima es semifrío y subhúmedo, CE, y en la zona sur, en las partes altas de la sierra el clima es semifrío, CE.

Durante la estación lluviosa, la humedad aumenta pero el agua se escurre rápidamente por el pavimento y azoteas hasta el drenaje profundo disminuyendo la cantidad de agua evaporada, impidiendo que esta pase al ambiente rompiendo con el ciclo natural del agua.

3.1.3.2 Precipitación

Atendiendo a los regímenes de lluvia se considera que el clima de una gran parte de la Ciudad de México es templado subhúmedo (CW) con algunas variaciones en el contenido de humedad.

La disminución de las lluvias hacia el centro de la cuenca es tan acentuada, que el clima de los suburbios al oriente de la capital (norte de Iztapalapa), presenta zonas semiáridas (clima seco BS), ver figura 3.5, recibiendo una cantidad menor a 600 mm como promedio anual de precipitación.

Al sur y sureste la precipitación total anual varía entre los 1200mm y un poco más de 1500mm. En las partes altas de las sierras al sur de la ciudad, la precipitación anual promedio es superior a los 1500mm, ver figura 3.5.

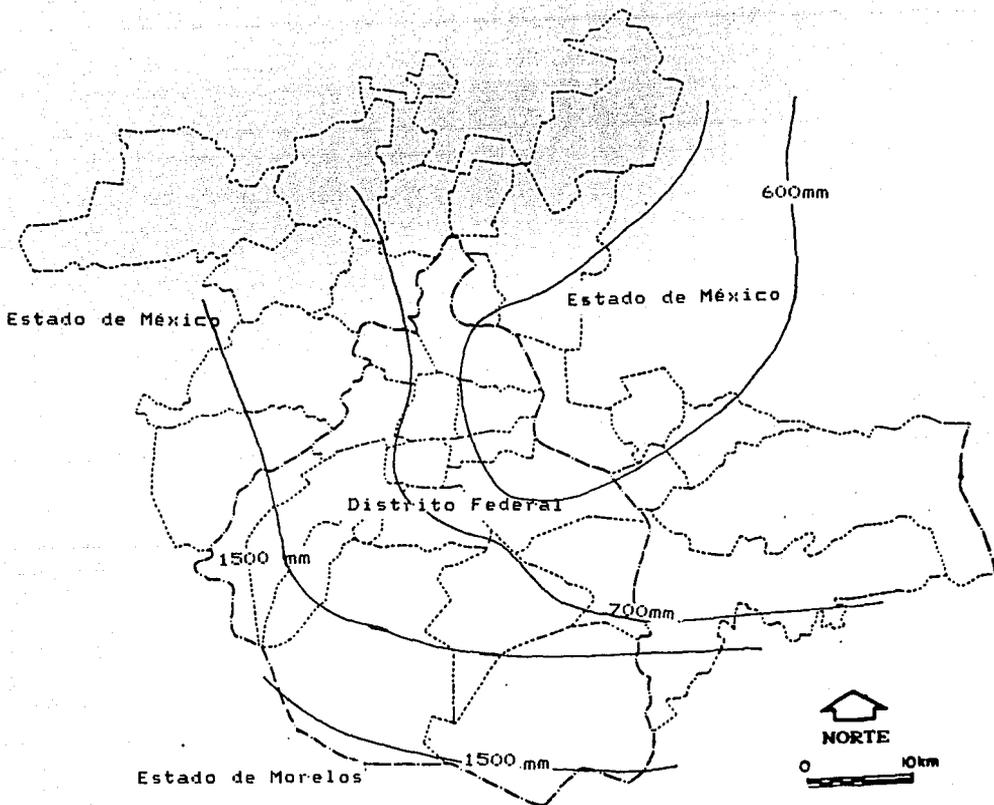


Figura 3.5 Zonificación según precipitación media Anual

3.1.3.3 Temperatura.

El calor provocado por la combustión de los vehículos, las fábricas, así como las grandes aglomeraciones humanas son fuentes importantes de calor en las áreas urbanas. A esto se une el efecto que

causan las calles rodeadas de edificios, que actúan como profundas cañadas donde las paredes irradian calor hacia sus alrededores, y por la cercanía entre ellas se manifiesta una elevación en la temperatura local, formando una *isla térmica*.

Debido a este fenómeno las temperaturas mínimas registradas en el centro de la ciudad, ver figura 3.6, son generalmente mayores a las de zonas rurales e inclusive a las medidas en las zonas periféricas de la misma ciudad.

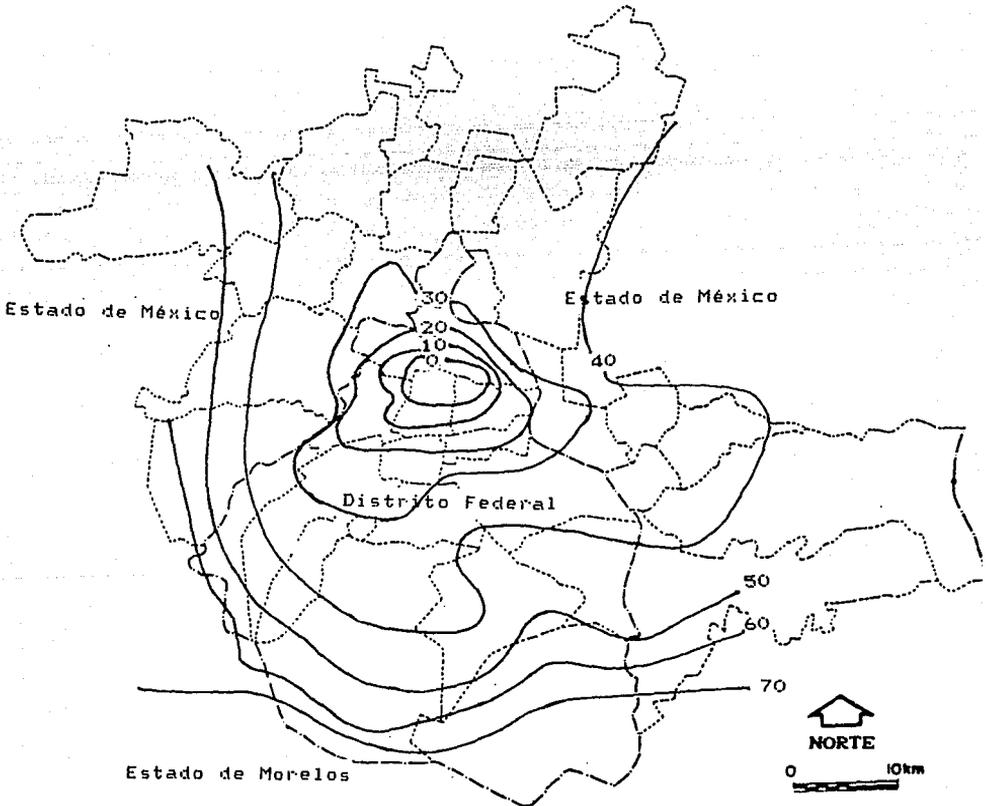


Figura 3.6 Frecuencia de heladas (Días/año)

En la figura 3.7 se muestran las variaciones de temperatura en dos rumbos de la ciudad: en el centro (edificio de la Comisión Federal de Electricidad), y en un suburbio del este de la capital (Iztapalapa); de acuerdo con esta tabla los meses más calurosos son marzo, abril, mayo y junio, cuando la temperatura llega a 30°C, y los más fríos son diciembre, enero y febrero, con temperaturas menores a 0°C, ambas registradas en la estación ubicada fuera del centro capitalino (Iztapalapa). En algunos casos las temperaturas registradas en la periferia de la ciudad son mayores que la registradas en el centro durante el día, porque domina el efecto de la nube de impurezas interceptando la radiación solar (hasta en un 15%). Por la noche esa nube impide las pérdidas de calor por radiación, lo que hace que la temperatura no descienda tan rápidamente como en las periferias de la ciudad. Normalmente las temperaturas más bajas se registran principalmente en los suburbios, ver figura 3.8, en donde se muestra la distribución de las temperaturas mínimas promedio registradas durante el mes de noviembre de 1981.

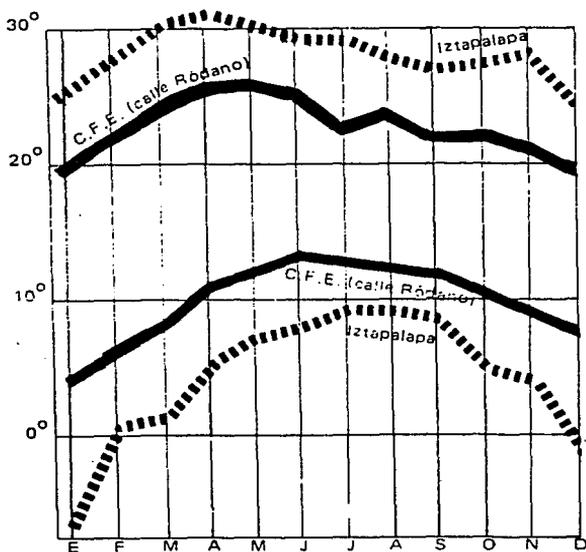


Figura 3.7 Variación mensual de las temperaturas mínimas y máximas (°C) en dos puntos de la Ciudad de México

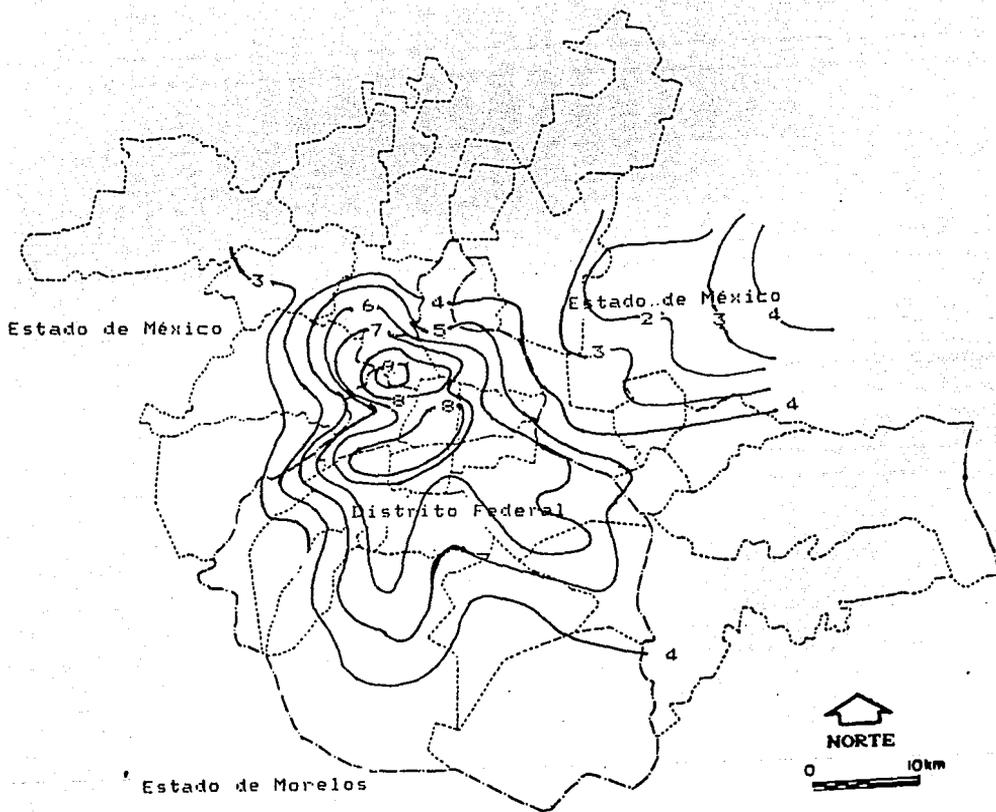


Figura 3.8 Temperatura mínima promedio ($^{\circ}\text{C}$), noviembre de 1981

Las temperaturas medias anuales en la zona noreste están entre los 14 y 12°C , en el sector sureste-sur se registran temperaturas medias anuales entre 8 y 12°C y el sector sur, en las partes altas de las sierras, se registran temperaturas entre los 5 y 12°C .

Las temperaturas más bajas son registradas en las mañanas de invierno: de 4 a 8°C en el centro y de -3 a -5°C en el borde oriente de la ciudad.

La inversión térmica es un fenómeno natural (ver capítulo II) en la ZMCM, en donde se presentan dos tipos de ellas: una es a consecuencia de su posición dentro de una cuenca, presentándose la inversión por *topografía* o efecto valle-montaña y la otra es por la pérdida de calor por radiación, conocida como inversión por *radiación*, Bravo (1987). Actualmente este fenómeno ha tomado gran importancia porque el estancamiento de la capa superficial de aire frío sobre la ciudad provoca graves problemas por estar altamente contaminado.

Las inversiones térmicas normalmente no duran más de cinco horas después de que el sol ha salido. Cuando se prolongan, puede dar lugar a situaciones graves especialmente cuando su duración es mayor de 24 horas. Cuando la Cuenca de México se ve invadida por masas de aire polar continental, durante el invierno, es frecuente que las inversiones térmicas duren más de 5 horas y su altura sea pequeña, requiriendo de más tiempo de calentamiento solar para romperse. La *cobija* que forman los contaminantes bajo estas condiciones, disminuye la intensidad de la radiación solar. En la tabla 3.6 se muestran las diferentes profundidades de la inversión durante agosto a diciembre de 1971, Bravo (1987), encontrándose la altura más común entre 100 y 400 m con un (72 %).

Tabla 3.6 Altura de la capa de inversión en la ZMCM, agosto-diciembre, 1971.

Altura de la capa de inversión (m)	%
0-100	17
101-200	34
201-400	38
más de 400	11

En la tabla 3.7, se muestran los datos de inversiones térmicas en la ZMCM correspondientes a los años de 1986 y 1987, reportados por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (sin año).

Tabla 3.7 Número de inversiones térmicas y hora de ruptura promedio (1986 y 1987)

1986			1987	
	Número de inversiones térmicas	Hora de ruptura promedio	Número de inversiones	hora de ruptura promedio
Ene	24	10:13	30	9:55
Feb	28	9:22	21	9:34
Mar	26	8:34	23	8:58
Abr	19	8:16	23	8:46
May	20	8:24	18	7:42
Jun	4	7:17	14	7:40
Jul	7	6:54	3	8:13
Ago	6	9:33	9	7:49
Sep	7	6:49	6	7:52
Oct	18	8:15	19	8:29
Nov	20	9:42	23	9:31
Dic	25	9:26	26	9:34
Total	204		215	

En esta última tabla se puede observar que las inversiones térmicas durante la primavera y verano se rompen más temprano que durante los meses fríos (otoño a invierno); esto es lógico, pues la radiación solar es más intensa en los meses de marzo a octubre y hacen que la tierra se caliente más rápidamente.

Es muy interesante observar que durante las horas pico de la mañana (07:00-10:00), las inversiones térmicas persisten, haciendo que los índices de contaminación lleguen a niveles alarmantes, por lo que es recomendable evitar los congestionamientos vehiculares y no realizar ejercicio durante esas horas.

3.1.3.4 Vientos

En la Cuenca de México, la intensidad del viento se ve debilitada al atravesar por las montañas circundantes, y la alta concentración de edificios en el centro de la Ciudad provocan bajas velocidades de vientos y con frecuencia tiempos de calma. Sin embargo la ventilación mejora notablemente en toda el área urbana, cuando los vientos regionales se intensifican como resultado del paso de las masas de aire

polar sobre la Cuenca, entonces la ventilación llega a ser tan enérgica que barre todas las impurezas que flotan en el aire citadino, al grado que el aire recupera su transparencia temporalmente, ya que la rapidez de emisión de contaminantes es tal, que bastan solo de 6 a 12 horas para que se enturbie nuevamente el ambiente una vez que dejan de soplar estos vientos.

En las figuras 3.9 y 3.10 se muestra la circulación local del viento superficial por la mañana y después de medio día durante los meses de octubre de 1975 a abril de 1976; estos datos fueron tomados de cuatro estaciones de monitoreo de SEDUE, ubicadas en cuatro esquinas de la ciudad. Por la mañana los vientos débiles que bajan de las montañas producen una convergencia del flujo hacia el centro de la ciudad (efecto valle-montaña), siendo esta situación desfavorable para la dispersión de contaminantes atmosféricos porque tienden a concentrarse en el centro de la capital en las horas de mayor actividad vehicular, entre las 7 y 10 horas, teniendo la inversión del viento en nuestra ciudad entre las 9 y 10 horas. Por la tarde se establece un flujo de viento mayor, generalmente es de norte a sur, acarreado la nube de impurezas hacia el sur de la Ciudad donde, sólo en algunas ocasiones logra rebasar la Sierra del Ajusco.

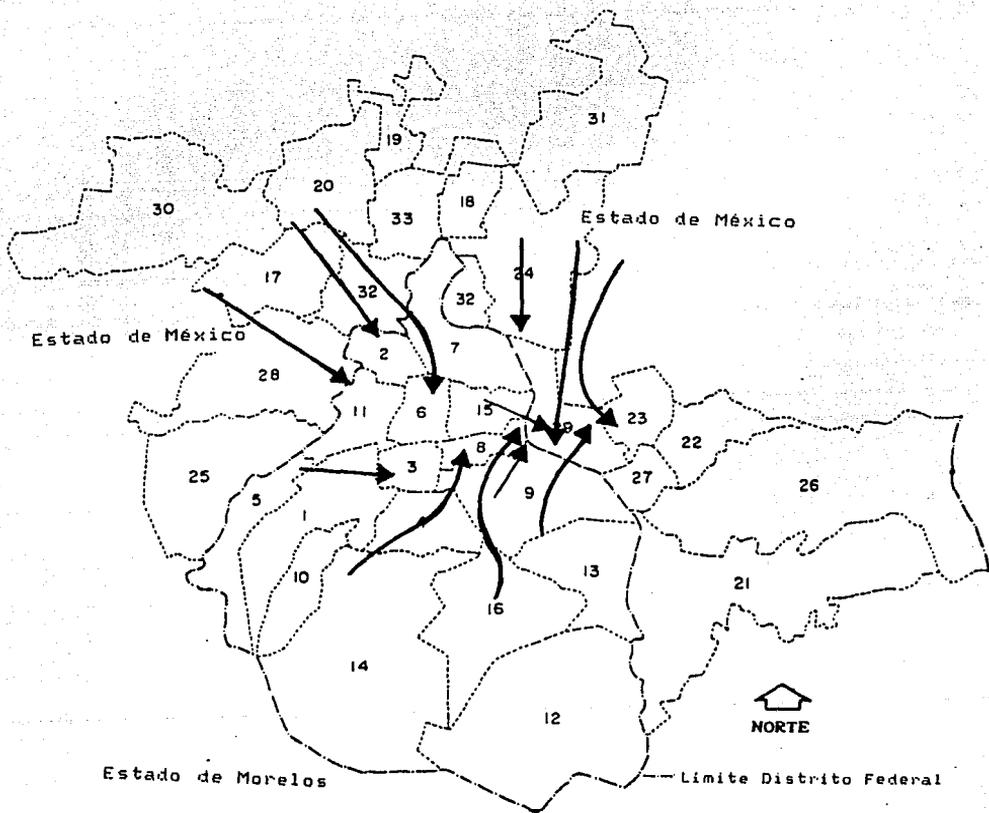


Figura 3.9 Líneas de flujo de aire a las 6 horas en los meses de octubre 1975-abril 1976

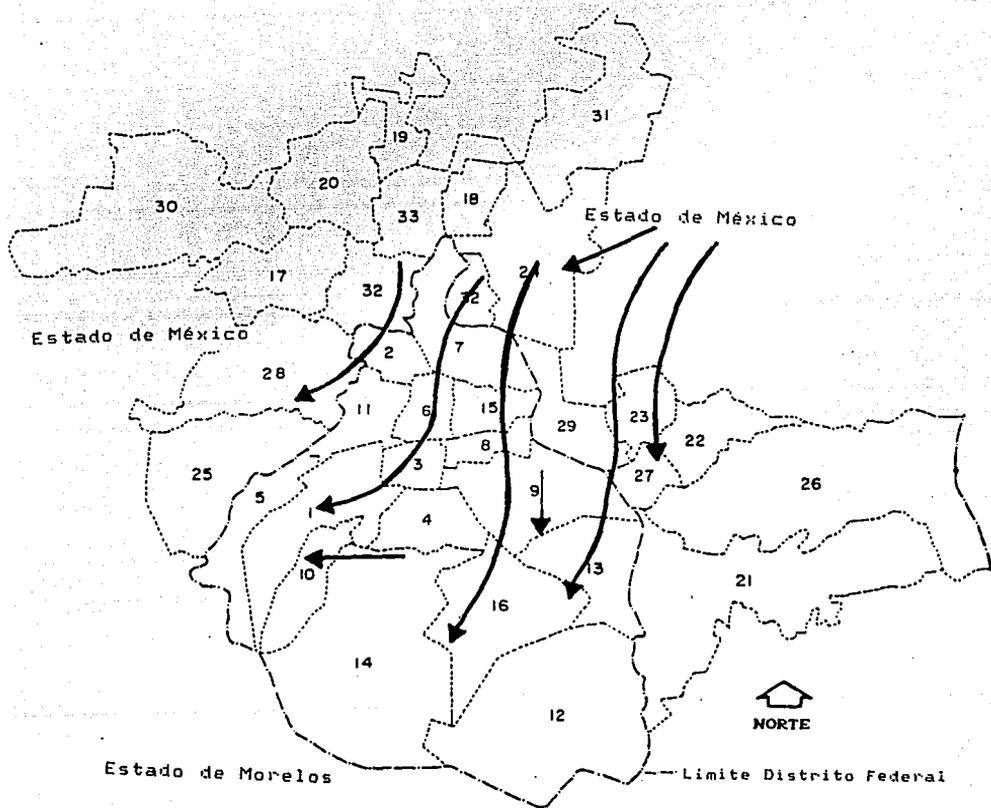


Figura 3.10 Líneas de flujo de aire a las 14 horas en los meses de octubre 1975-abril 1976

3.2 Geografía humana

En este inciso veremos lo concerniente a la constitución política, población, tendencia de crecimiento, cantidad y distribución industrial y por último la actividad vial, con el objeto de saber la cantidad y distribución de fuentes fijas y móviles de contaminación.

En la tabla 3.8 se señala la población, delegaciones y municipios que forman la ZMCM, (figura 3.2) y se indica su constitución política, pudiendo dividir este territorio en dos grandes zonas: Distrito Federal y el Estado de México Metropolitano. La primera zona, como se puede ver en esta tabla, está mucho más poblada y su territorio es menor que el perteneciente al Estado de México, lo cual desafortunadamente indica, que existe una mayor concentración de vehículos, fábricas y gases contaminantes emitidos a la atmósfera, además de que se consumen grandes cantidades de energéticos en un espacio reducido, provocando un aumento en la temperatura de la zona, originando el efecto de isla térmica.

Es interesante saber qué partes de la ZMCM se encuentran más densamente pobladas y el tipo de actividad que predomina en cada zona (industrial, vial, habitacional, recreativa, escolar, hospitalaria, etc.), para saber con esto, el consumo de energía, fuentes de calor y de emisión de contaminantes que pueden ser asociadas a cada sitio.

Finalmente, es importante observar que no toda la ZMCM se encuentra urbanizada, que existen lugares dentro del Distrito Federal que aún no se han poblado, como en las delegaciones de Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y en general, en toda la periferia de la ZMCM, ver figura 3.11, debiéndose planear cuidadosamente el uso que habrá de darse a esas zonas. En el Estado de México, se cuenta con una superficie no urbanizada de 160,272 ha, representando el 75.8 % de su territorio; en el Distrito Federal, son 75,642 ha no urbanizadas, siendo el 51.52 % aproximadamente. En toda la ZMCM se cuenta con una superficie no urbanizada de 235,914 ha, representando el 65.8 % aproximadamente.

*Esta información se tomó de la carta de porcentajes de áreas verdes de la ZMCM (Atlas de la Ciudad de México), no existe dicha información en forma directa.

Tabla 3.8 Zona Metropolitana de la Ciudad de México

UNIDAD POLITICO-ADMINISTRATIVA	POBLACION	SUPERFICIE
Alvaro Obregón	663 156	8 660
Azcapotzalco	623 433	3 300
Benito Juárez	563 996	2 600
Coyoacán	621 193	5 440
Cuajimalpa	95 059	3 200
Cuauhtémoc	843 283	7 700
Gustavo A. Madero	1 569 714	8 700
Iztacalco	591 445	2 360
Iztapalapa	1 315 063	11 940
Magdalena Contreras	179 986	6 900
Miguel Hidalgo	561 999	4 600
Milpa Alta	55 706	27 400
Tláhuac	153 061	8 900
Tlalpan	384 613	30 100
Venustiano Carranza	717 221	3 300
Xochimilco	226 208	12 500
Distrito Federal	9 165 136	147 600
Atizapan de Zaragoza	211 624	9 034
Coacalco	102 204	3 480
Cuautitlán	41 296	3 077
Cuautitlán Izcalli	179 920	11 952
Chalco	81 533	28 820
Chicoloapan	28 548	6 006
Chimalhuacán	64 510	3 795
Ecatepec	819 578	15 482
Huixquilucan	81 395	14 250
Ixtapaluca	81 043	28 834
La Paz	103 795	3 692
Netzahualcoyotl	1 396 854	6 240
Nicolás Romero	117 338	25 967
Naucalpan de Juárez	759 457	19 661
Tecamac	87 954	15 542
Tlalnepantla	809 967	8 505
Tultitlán	142 625	6 618
Estado de México Metropolitano	5 109 610	210 965
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	14 274 796	358 555

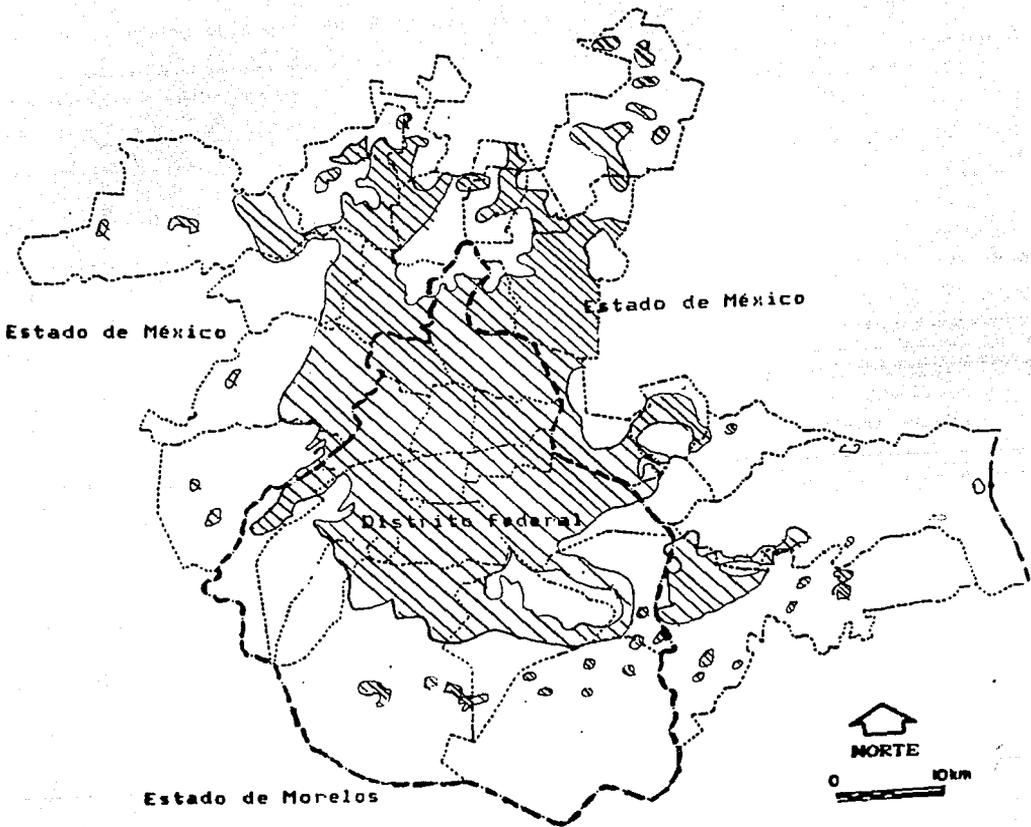


Figura 3.11 Area poblada dentro de la ZMCM

El crecimiento de la mancha urbana de la Ciudad de México, ha sido de tal magnitud que se han ocupado algunas sierras, como la del Ajusco y la de Las Cruces en el Distrito Federal, y las sierras de Monte Alto y Monte Bajo en los terrenos del Estado de México.

La ZMCM presenta actualmente tres tendencias de crecimiento: una hacia el norte, pues en cuanto rodeó la sierra de Guadalupe se dispuso de la llanura lacustre del Estado de México (municipios de Tlanepantla, Ecatepec, Tultitlán, Coacalco y Naucalpan), donde existen importantes desarrollos industriales y habitacionales; la segunda se presenta en la zona sur-oeste en las delegaciones de Tlalpan, Magdalena Contreras, Milpa Alta y Tláhuac; y la tercera se presenta en la zona este en los municipios de Netzahualcoyotl, La Paz, Zaragoza y Huixquilucan.

El patrón de crecimiento en la ZMCM en los últimos cuatro decenios ha sido muy irregular, ya que no sólo se han detectado asentamientos humanos a los largo de las principales vías de comunicación, sino también en espacios de difícil acceso, surgiendo como respuesta a una necesidad de suelo más barato para la población de menores recursos.

Junto con el crecimiento de la población, nace la necesidad de la creación de nuevas fuentes de trabajo, ya sea en forma particular o dependiente, en pequeña o gran escala, que son necesaria y desgraciadamente fuentes importantes de contaminación, por lo que es importante el estudio de la cantidad, tipo y distribución de las dos fuentes antropogénicas de contaminación ambiental: fuentes fijas (industriales) y móviles (viales)

3.2.1 Industria

En esta sección estudiaremos las fuentes fijas de contaminación del aire en la ZMCM, con el fin de saber su ubicación, situar sus emisiones contaminantes.

En la figura 3.12, se muestra la distribución gráfica de las fábricas localizadas en la ZMCM, por delegaciones y municipios. Estos datos son tomados de las tablas 3.9 y 3.10; para el D.F. se tomaron los datos de 1985 y para el Estado de México de 1989.

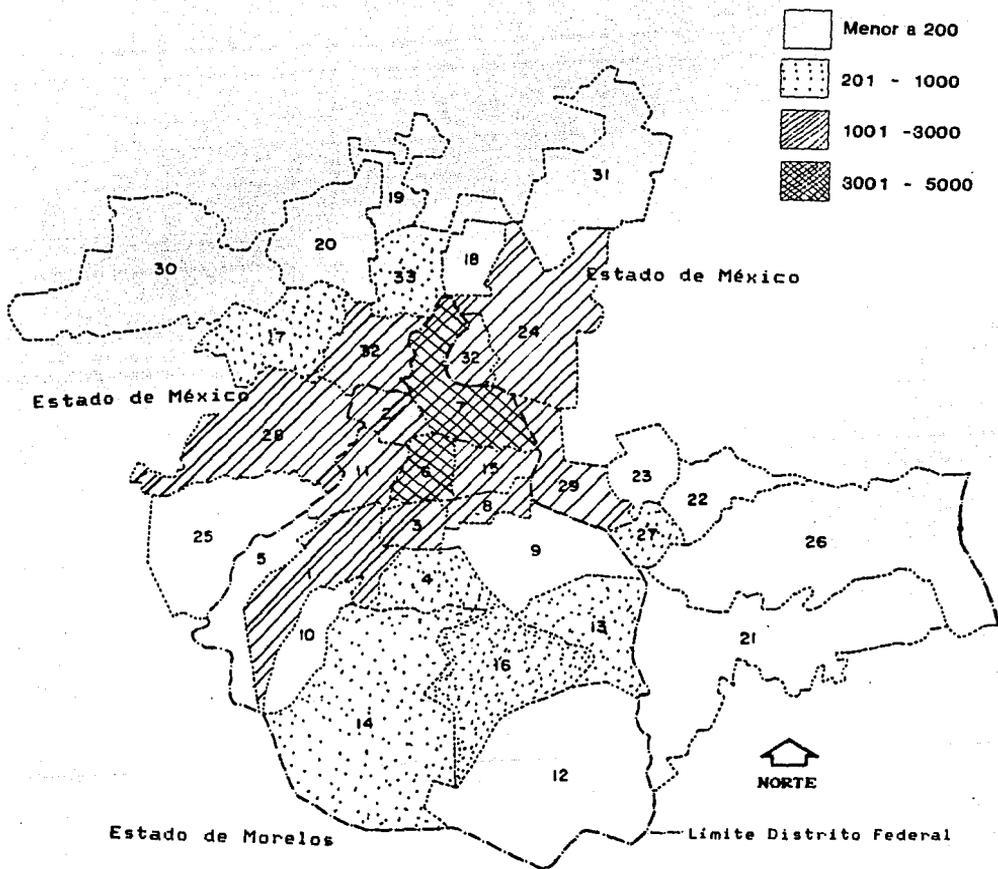


Figura 3.12 Distribución de fuentes fijas en la ZMCM

Tabla 3.9 Número de fábricas por sectores y delegaciones en el Distrito Federal, 1980-1985

Sector	1980																D. F.	1985
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Alimentos	445	536	486	370	93	894	1243	486	952	116	544	101	108	227	760	201	7562	7118
Bebidas	-	5	7	5	-	12	6	4	7	-	6	-	-	-	4	-	56	51
Tabaco	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	9	9
Textil	40	52	124	24	3	302	77	122	84	10	66	-	3	15	106	-	1028	852
Prendas de vestir	58	81	354	87	6	1994	204	183	117	10	179	3	5	11	241	11	3580	2268
Calzado y cuero	3	20	24	3	3	186	48	31	18	-	23	-	-	3	180	-	542	415
Productos de madera	7	38	48	12	-	79	47	33	38	-	25	-	4	4	48	3	386	465
Muebles y acc. madera	114	165	419	99	7	534	416	204	234	15	204	3	18	46	286	23	2787	2262
Papel	-	38	22	12	-	38	29	25	37	-	23	-	4	6	29	-	263	246
Editor. e Imprenta	48	118	426	69	3	1337	230	121	131	7	196	-	7	15	159	4	2871	2345
Química	39	88	145	49	-	109	68	38	86	5	73	-	6	19	30	14	769	719
Prod. carbón petróleo	-	6	-	-	-	8	5	3	6	-	3	-	-	-	4	-	35	23
Hule y plástico	38	92	76	27	3	125	101	85	128	6	80	-	4	15	43	9	832	858
Mín. no metálico	58	58	31	23	13	51	75	32	128	16	48	-	16	6	12	18	585	561
Metálica básica	3	16	7	-	-	9	22	4	22	-	14	-	-	4	3	-	104	259
Productos metálicos	170	336	229	128	22	385	551	309	495	27	203	9	37	56	258	40	3255	2856
Hdq. y Eq. no electric	39	175	126	24	4	380	219	92	152	-	124	-	10	8	150	12	1515	1253
Hdq. y Ap. electricos	25	96	90	12	3	192	89	67	73	-	76	-	-	9	54	-	786	644
Equipo de Transporte	15	60	30	6	-	46	69	24	36	-	21	-	-	-	32	4	343	326
Inst. y Eq. precisión	-	14	27	11	-	106	18	14	16	-	17	-	-	-	6	-	229	167
Otras Manufact.	25	37	44	13	-	460	48	28	39	-	37	-	-	6	50	3	790	433
Total	1127	2034	2715	974	160	7247	3601	1905	2799	212	1962	116	222	450	2458	345	28327	24130
Total(1985)	1031	1902	2236	870	165	4359	3288	1670	3179	186	1722	121	396	609	2000	396	24130	

Tabla 3.10 Número de fábricas por sectores en los municipios del Estado de México, 1989

Sector	1989																	Total
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
Alimentos	43	18	8	21	28	14	24	234	5	21	43	154	379	25	20	163	33	1233
Bebidas	-	-	-	2	-	-	-	3	-	1	4	3	28	-	-	10	1	53
Tabaco	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Textil	8	1	8	10	3	-	3	37	-	9	9	161	26	3	3	92	7	380
Prendas de vestir	6	1	4	2	3	2	7	58	2	2	12	126	121	7	3	52	6	414
Calzado y cuero	2	1	1	1	-	-	1	4	-	-	-	20	9	-	1	10	1	51
Productos de madera	4	2	1	3	2	2	1	27	1	4	2	30	47	4	-	34	4	168
Muebles y acc. madera	37	7	1	12	8	2	3	147	3	3	13	116	236	11	4	143	16	762
Papel	4	-	-	2	-	-	-	28	-	7	11	21	3	2	1	39	1	119
Editor. e imprenta	9	3	6	5	3	1	1	43	1	4	6	73	63	6	2	54	2	282
Química	17	1	3	14	-	-	1	85	2	4	9	143	14	-	-	113	14	420
Petroquímico	-	-	-	1	-	-	-	4	-	-	1	-	-	-	-	3	-	9
Refinación	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	2
Petróleo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Prod. carbón petróleo	2	1	-	-	-	-	-	4	-	-	2	12	1	-	-	6	-	28
Hule y plástico	26	1	1	20	1	1	2	47	-	2	6	148	51	1	1	89	19	415
Min. no Metálica	28	6	2	2	3	76	5	78	5	92	13	70	55	8	5	51	19	518
Metálica básica	10	-	3	7	1	-	-	58	-	4	10	43	11	1	2	96	15	261
Productos metálicos	72	22	14	38	19	29	19	314	19	21	40	213	390	37	16	328	67	1668
Máq. y Eq. no electric	14	7	6	11	4	-	-	105	1	3	9	136	55	1	1	151	21	525
Máq. y Ap. electricos	17	2	4	17	3	2	3	40	-	4	2	111	37	-	2	86	11	340
Equipo de Transporte	19	3	3	11	4	-	-	22	-	3	8	44	45	2	1	90	6	241
Inst. y Eq. precisión	2	1	1	2	-	-	-	3	-	1	1	25	5	-	-	8	1	50
Otras	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Manufactura	1	-	-	1	-	-	-	5	1	-	3	29	11	1	-	20	-	72
Obscuras	3	-	-	-	-	-	-	27	-	-	-	56	4	-	-	7	11	108
Total	324	76	67	182	92	119	80	1373	40	185	205	1734	1571	109	62	1646	256	8121

Como industria se considera a la micro, pequeña, mediana, grande y macro industria, formando un total de 32,251 industrias en toda la ZMCM; en el D.F. se encuentran 24,130, que es el 74.82 %. Las fábricas se concentran principalmente en la zona norte de la ZMCM, alrededor de la delegación Cuauhtemoc, Gustavo A. Madero, Benito Juárez, Miguel Hidalgo e Iztacalco y de los municipios Ecatepec, Tlalnepantla, Naucalpan y Nezahualcoyotl, repercutiendo en los niveles de contaminación.

En el D.F. 2,936 hectáreas de suelo, aproximadamente 5.3 % del área urbana es utilizada como área industrial. En la tabla 3.9, JICA (1990), se muestran el número de fábricas y tipo de industrias por delegaciones en el D.F. para 1980 y 1985, pudiendo observar que para 1985, las delegaciones con mayor número de industrias son Cuauhtemoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Benito Juárez, Venustiano Carranza, Azcapotzalco, Miguel Hidalgo e Iztacalco, con 4,359, 3,288, 3,100, 2,236, 2,000, 1,900, 1,720 y 1,620 industrias respectivamente.

La tabla 3.10, JICA (1990), muestra el número y tipo de industria por sectores y municipios en el Estado de México en 1989. Los municipios que tienen un mayor número de fábricas son: Naucalpan (1,734), Tlalnepantla (1646), Nezahualcoyotl (1571) y Ecatepec (1373); los demás municipios cuentan con menos de 300. En total el Estado de México metropolitano cuenta con 8121 fábricas.

3.2.2 Vialidad

Por vialidad se entiende el conjunto de servicios pertenecientes a las vías públicas; en este inciso incluiremos tanto lo correspondiente a la red de calles, avenidas y ejes viales, así como a los vehículos que circulan en la ciudad que son las fuentes móviles de contaminación.

Actualmente, la red de comunicaciones dentro de la zona metropolitana es insuficiente, pues normalmente se encuentra saturada aún fuera de las horas pico (más de seis horas al día). La sobresaturación vehicular se debe a muchos factores, entre ellos destacan: el uso excesivo de los vehículos particulares, la carencia de vías alternas, las constantes remodelaciones y reparaciones de las calles y avenidas, el estacionamiento en doble y triple fila y el poco

apoyo por parte tanto de la ciudadanía como de las instituciones correspondientes, al uso de un tipo de transporte que utilice menos espacio y que no contamine (como por ejemplo la bicicleta que actualmente sólo es usado en el centro histórico de la Ciudad de México como "taxis" y como transporte particular).

En la tabla 3.11 se muestran los principales contaminantes y la cantidad de ellos que son emitidos a la atmósfera por fuentes fijas y móviles, pudiendo observar que el 82% en masa de los contaminantes emitidos, es aportado por fuentes móviles. Es importante hacer notar que, de acuerdo a esta tabla, de las emisiones totales calculadas (4,942,400 ton/año), el 75 % son de monóxido de carbono (3,720,000 ton/año), Bravo (1987).

Tabla 3.11 Emisiones atmosféricas en la ZMCM

Contaminante	Fuentes fijas		Fuentes móviles		Total	
	Ton/año	%	Ton/año	%	ton/año	%
Partículas	141,000	16	12,800	0.3	153,800	3.0
CO	120,000	13	3,600,000	89.0	3,720,000	75.0
Hidrocarb	140,000	16	385,000	9.5	525,000	11.0
SO ₂	400,600	45	11,000	0.3	411,000	8.0
NO _x	93,000	10	39,000	0.9	132,000	3.0
Total	894,660	18.1	4,047,800	81.9	4,942,400	100.0

Puente y Legorreta (1988), afirman que el 82.3 % del total de los contaminantes es emitido por los vehículos automotores. Por otro lado, haciendo una estimación de datos generales sobre el número de vehículos y combustible consumido entre los años de 1970 y 2000, indica un incremento proporcional al aumento de la concentración de contaminantes emitidos en su tiempo, ver tabla 3.12.

Tabla 3.12 Contaminantes producidos y combustible consumido por vehículo en la ZMCM, 1970-2000 (diarios)

Año	Vehículos (millones)	Contaminantes Ton/día	Combustible (10 ⁶ litros/día)		
			Total	Gasolina	Diesel
1970		3,745	9.0	8.5	0.5
1971		4,233	9.3	8.2	1.1
1975			11.4	9.6	1.8
1978	1.6				
1980	2.0		16.4	13.4	3.0
1981					
1983	2.8	11,089			
1984			18.2	14.1	4.1
1985			19.2	14.9	4.3
1986	3.5	12,789	19.9	15.3	4.6
2000	6.8	20,735	29.6	21.7	7.9

De acuerdo con esta tabla, se puede observar que se consumen 4.33 veces más gasolina que diesel. Es muy importante saber el tipo y cantidad utilizada de estos combustibles, ya que cada uno emite diferentes concentraciones de contaminantes; la gasolina emite principalmente plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), y óxidos de nitrógeno (NO_x), éstos dos últimos en la atmósfera por reacción fotoquímica forman ozono (O₃); mientras que el diesel emite principalmente NO_x y partículas, Bravo (1987).

De aquí que la contaminación atmosférica producida por los motores de combustión interna es hoy en día un problema muy complejo, que depende de: la gran cantidad de vehículos, el tipo y la cantidad de combustible utilizado, la lentitud y concentración vial, la antigüedad de los autos, las condiciones geográficas de la ZMCM que hacen deficiente el proceso de combustión y la gran cantidad de combustible que se evapora al ambiente durante el almacenamiento y llenado de tanques.

El sistema vial principal en la ZMCM, se encuentra constituido por dos anillos concéntricos, vías radiales y ejes viales transversales que forman una retícula.

Los anillos concéntricos son: el anillo periférico con 78.5 km de longitud total planeada, de los cuales están construidos a la fecha

31.8 km, y el circuito interior, que tiene una longitud total planeada de 34.5 km, con 16.8 km en operación. Las vías radiales son: Río San Joaquín, calzada Ignacio Zaragoza y Avenida Aquiles Serdán y los ejes viales con una red prevista de 533 km, actualmente más de la mitad se encuentran en operación. Este ramaje de comunicación ortogonal de norte a sur y de oriente a poniente ha permitido comunicar los extremos de la ciudad.

Entre otras vías importantes se encuentran: el viaducto Miguel Alemán, las calzadas de Tlalpan y de los Misterios; las avenidas de Los Insurgentes, de los 100 metros, Paseo de la Reforma, de los Constituyentes, Instituto Politécnico Nacional, División del Norte y Universidad, ver figura 3.13.

• Los vehículos automotores que circulan por estas vías se clasifican en tres grupos: *transporte privado* (automóvil particular, camión, bicicleta y motocicleta), *transporte de alquiler* (taxi colectivo, taxi libre) y *transporte público masivo* (metro, autobús urbano, suburbano y escolar, trolebús y tranvía).

En la ZMCM se encuentran concentrados la mayor parte de los vehículos de toda la República Mexicana, en especial en el Distrito Federal con un 32% del total. En la tabla 3.13, se muestra la cantidad de vehículos que circulan en el área metropolitana y los viajes por persona al día que se realizan.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

VIALIDAD EN LA CIUDAD DE MEXICO Y AREA METROPOLITANA EN EL AÑO DE 1983

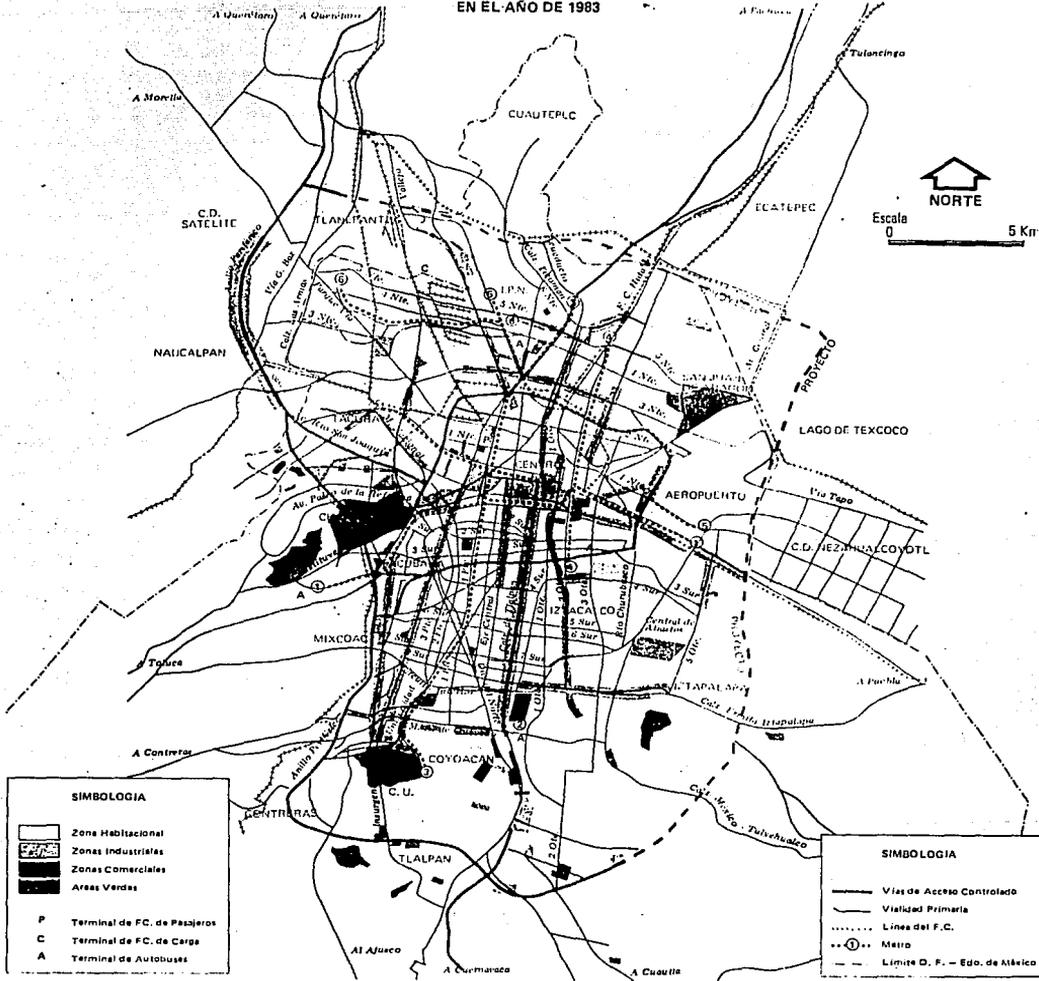


Figura 3.13 Localización de calles y avenidas en la ZCM, 1983

Tabla 3.13 Características del sistema de transporte en la ZMCM, 1985

Medio de transporte	Cantidad	%	Viajes/persona/día millones (%)	
Automóvil	2,570,000	94.8	4.64	23.4
Taxi	84,500	3.12		
Taxi colectivo	40,500	1.49	2.11	10.8
Autobús suburbano	7,000	0.26	3.20	15.2
Autobús urbano				
Ruta 100	6,631	0.244	5.30	27.2
Trolebús (STE)**	298	0.010		
Tren ligero (STE)	16	5.4E ⁻⁴	0.60	2.9
Metro	2,080	0.076	4.6	18.5
Total	2,711,025	100	19.45	98.0

* No suman 100%, por haberse excluido medios menores de transporte (bicicleta, motocicleta, tranvía y camión).

** Sistema de Transporte Eléctrico.

El vehículo automotor que más contribuye a la contaminación ambiental es el de uso particular, que ocupa el 70% de la vialidad y consume 15 veces más combustible por persona que el sistema colectivo, Puente y Legorreta (1988).

La mayor parte de los viajes se realizan hacia la Zona Rosa, la Basílica, el Zócalo, Naucalpan y Ecatepec como los cinco primeros lugares más concurridos; los principales movimientos que generan son entre los distritos de Nezahualcóyotl sur y el Aeropuerto, la Basílica y Ecatepec, la Zona Rosa y el Zócalo, Tlalneantla y Naucalpan, y Basílica y Zona Rosa, indicando con ello los sitios en donde más tránsito vehicular hay y por lo tanto, en donde se encuentra la mayor concentración de contaminantes debido a las fuentes móviles, ver tablas 3.14 y 3.15.

Tabla 3.14 Viajes dentro de la ZMCM

Destino	Generación de viajes/persona/día
Zona Rosa	1,317,775
Basilica	1,290,057
Zócalo	1,113,274
Naucalpan	1,109,238
Ecatepec	1,099,063
Tlanepantla	982,143
Nezahualcóyotl sur	826,324
Iztacalco	694,950
San Angel	599,757
Coyoacán	572,937
Tlalpan	565,299
Acueducto de Guadalupe	593,350
Iztapalapa	458,944
Culhuacán	485,459
Benito Juárez	386,663
Restantes	7,436,902
Total	19,528,134

Tabla 3.15 Principales movimientos dentro de la ZMCM

Movimientos entre distritos	viajes/persona/día
Nezahualcóyotl sur-Aeropuerto	273,858
Basilica-Ecatepec	180,790
Zona Rosa-Zócalo	176,888
Tlanepantla-Naucalpan	112,110
Basilica-Zona Rosa	106,953
Basilica-Nezahualcóyotl sur	97,568
Basilica-Montevideo	95,947
Tlanepantla-Atizapán	92,739
Basilica-Zócalo	86,883
Montavideo-Acueducto de Guadalupe	85,878

CAPITULO IV

MODELOS MATEMATICOS DE DISPERSION

4.1 Generalidades

Existen varias formas de representar y analizar los fenómenos que ocurren a nuestro alrededor en materia de contaminación ambiental. En este documento abordaremos únicamente la representación de estos fenómenos por medio de modelos matemáticos.

Los modelos de calidad del aire se dividen en dos grupos: experimentales (o de laboratorio) y matemáticos. Los primeros analizan los procesos atmosféricos de interés, por medio de una representación generalmente a escala reducida del problema real; como ejemplo tenemos al túnel de viento y a las cámaras de nieblumo con serias limitantes, el primero no reproduce correctamente las escalas de turbulencias de la atmósfera, y el segundo no simula la variabilidad de emisión de contaminantes ni la difusión atmosférica). Los modelos matemáticos pueden representar los complejos procesos atmosféricos relacionados con el comportamiento de los contaminantes mediante ecuaciones de transporte de masa, momento y energía

Existen modelos matemáticos de diferentes grados de dificultad, su empleo estará en función de la aproximación que se desee obtener y de la información disponible para su elaboración.

En el presente estudio se emplea el modelo matemático HOTMAC (Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation) que es un modelo diferencial de segundo orden que resuelve las ecuaciones de

conservación de masa, momento, temperatura y humedad, junto con las ecuaciones de cerradura (correlaciones de turbulencia a segundo orden); y posteriormente esta información se alimenta al modelo estocástico RAPTAD (Randon Particle Transport And Diffusión). Resulta adecuado definir HOTMAC como un modelo meteorológico, mientras que RAPTAD cumple con las características de un modelo de dispersión atmosférica.

Es importante señalar que los modelos de calidad del aire son aquellos usados para predecir la concentración de un contaminante en la atmósfera; y por tanto la pareja HOTMAC-RAPTAD solo podrá incluirse en esta clasificación cuando el contaminante de interés sea no-reactivo.

Los modelos meteorológicos se dividen en dos grupos:

a) Diagnóstico.- Se basan en el análisis estadístico de datos obtenidos previamente por una red de monitoreo para predecir el posible conpotamiento que se espera.

b) Pronóstico.- Se basan en la descripción fundamental del transporte y en los procesos fisicoquímicos que gobiernan la atmósfera. Resolviendo las ecuaciones del modelo y con datos experimentales, se puede pronosticar el comportamiento atmosférico para una escala temporal determinada.

Por la facilidad de retroalimentación y ajuste que ofrece HOTMAC, y por los fundamentos sobre los que ha sido construido, posee características de ambos grupos, lo cual que aumenta su potencialidad.

4.1.1 Ecuaciones generales de transporte

Desde el punto de vista aerodinámico, el fenómeno de dispersión atmosférica de contaminantes, en su forma más general, corresponde a la difusión tridimensional de una nube de gases dentro de una corriente de flujo turbulento, sin despreciar alguno de los posibles mecanismos de transferencia: convección, difusión molecular y turbulenta y la existencia de *fuentes y sumideros*.

Para la modelación de la dispersión atmosférica se considera que:

El regimen de flujo es siempre subsónico y todos los fluidos presentes se consideran incompresibles.

Las condiciones de presión y temperatura son tales que todos los gases presentes siguen un comportamiento *ideal*.

Las ecuaciones generales de flujo son:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho u_1) = 0 \quad (4.1)$$

(1) (2)

Ecuación de transporte de momento:

$$\frac{\partial \rho u_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_1) = \frac{\partial \sigma_{1j}}{\partial x_j} - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x_1}} + g_1 \quad (4.2)$$

(1) (2) (3) (4)

donde el tensor de esfuerzos (σ_{1j}) está definido como:

$$\sigma_{1j} = \mu \left[\frac{\partial u_1}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_1} \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{1j} \quad (4.3)$$

Siendo μ , la viscosidad del fluido constante para las condiciones de trabajo del presente modelo.

Ecuación de transporte de escalares:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Sc} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi \quad (4.4)$$

(1) (2) (3) (4)

Debe hacerse notar que la última ecuación corresponde a todas aquellas propiedades escalares del fluido, ϕ , que son transportadas junto con éste (calor, concentración de especies, energía cinética, temperatura, humedad, etc). En este sistema de ecuaciones x_1 y u_1 representan los tres ejes coordenados y las tres componentes de velocidad respectivamente, Aguirre (1989).

En las ecuaciones anteriores se pueden distinguir cuatro clases de términos:

(1) **Término temporal:** Es aquel que aparece del lado izquierdo de estas ecuaciones y representa la evolución con el tiempo del parámetro respectivo, $\partial / \partial t$.

(2) **Término convectivo o advectivo:** Generalmente es el término de mayor valor numérico y representa el transporte debido a la velocidad del flujo. Segundo término del lado izquierdo de las ecuaciones, $\partial u_1 / \partial x_1$.

(3) **Término difusivo:** Representa el transporte de una propiedad debido a la existencia de gradientes. Este término es de gran importancia en flujos a muy baja velocidad.

(4) **Término fuente:** Dentro de este término se incluyen todos aquellos efectos que transtornen el flujo y no queden incluidos dentro de los términos anteriores, como pueden ser: fuerzas de cuerpo que afectan el flujo de momento (fuerza gravitacional o flotación), pérdidas de calor dentro de la ecuación de temperatura (sistema no adiabático), creación o destrucción de especie o especies químicas (reacción), disminución en la concentración de contaminantes por la existencia de áreas verdes (absorción y adsorción), etc.

Cuando el contaminante no sufre transformaciones químicas, el término fuente de la ecuación de concentración, S_ϕ , es igual a cero, de otra manera será igual a la velocidad de reacción y estará dado, por ejemplo, por una expresión del tipo Arrhenius. Para el caso de un proceso no-adiabático, el término fuente para la ecuación de temperatura, será evaluado mediante el uso de un modelo térmico. Cuando el término fuente es de signo negativo, esto es, un efecto que merma el transporte, se le conoce como *sumidero*.

Agrupar todas estas ecuaciones en cuatro términos fundamentales, resulta de gran utilidad, ya que es posible obtener ecuaciones numéricamente similares que pueden ser promediadas, simplificadas, discretizadas y resueltas, empleando una misma técnica para todas ellas.

4.1.2 Clasificación

Las ecuaciones (4.1), (4.2) y (4.4) corresponden a los principios de conservación en que se basan los modelos matemáticos de dispersión atmosférica. Sin embargo, debido a la complejidad matemática de los mismos y la información que de ellos es requerida, se simplifican o reestructuran a fin de, restándoles generalidad, correspondan directamente al sistema en estudio.

De acuerdo con el tratamiento que reciben estas ecuaciones el producto que de ellas se obtiene se clasifica dentro de dos grupos diferentes:

a) modelos algebraicos. Establecen a priori la forma de variación de las variables involucradas e integran las ecuaciones diferenciales dentro de estos límites de variación. Entre los más comunes están los llamados los modelos gaussianos y los modelos puff que preestablecen un coeficiente normal (gausiano) de dispersión.

b) modelos diferenciales. Conservan la naturaleza diferencial de las ecuaciones, promediándolas y estableciendo principios de *cerradura* que permitan su solución. Estos modelos se clasifican generalmente de acuerdo a su complejidad, como de cero, primero o segundo orden, etc.

El modelo HOTMAC que aquí se presenta es un modelo diferencial de segundo orden, mientras que RAPTAD puede ser considerado como un modelo de tipo gaussiano.

4.2 Modelo gaussiano.

En la figura 4.1 se ve la trayectoria, elevación y dispersión de una pluma con distribución normal (gausiana), a partir de una fuente de emisión puntual elevada.

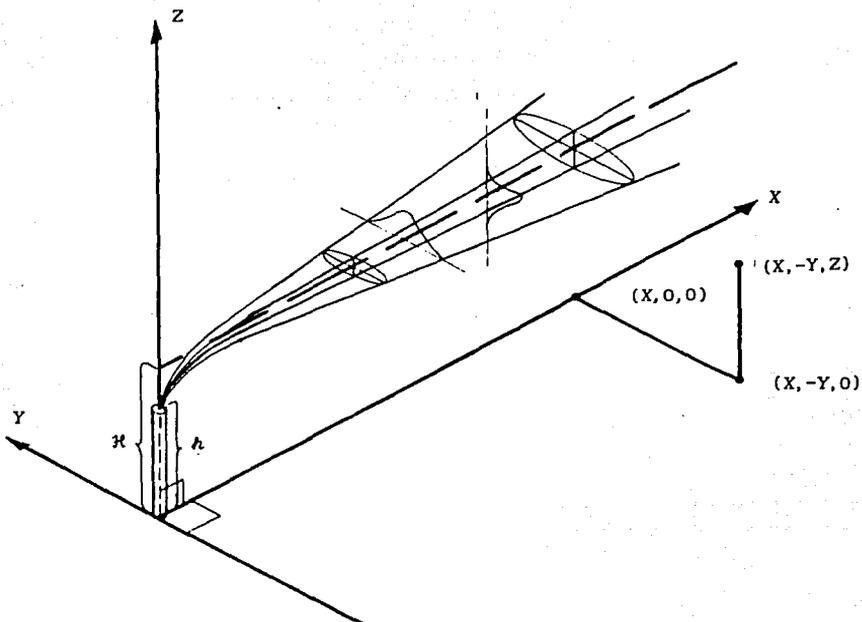


Figura 4.1 Distribución normal de concentración

El modelo gaussiano de dispersión atmosférica, parte de la forma instantánea de la ecuación de transporte de concentración (ec 4.4), y establece las siguientes suposiciones:

- o Propiedad que se transporta, ϕ , es igual a la concentración del material contaminante C .
- o Densidad del medio constante, $\rho = \text{cte}$.
- o Emisión estacionaria de contaminantes $\partial C / \partial t = 0$
- o Velocidad de viento constante, $u_1 = u = \text{cte}$
- o Componentes transversales de velocidad despreciables, $u_2 = u_3 = 0$
- o Coeficientes de difusividad constantes, $D_y = \text{cte}$ y $D_z = \text{cte}$
- o Difusividad despreciable en la dirección del flujo, $D_x = 0$
- o No existen procesos fuentes o sumideros, $S = 0$

Mismas que conducen a la expresión:

$$u \frac{\partial \mathcal{C}}{\partial x} = \mathcal{D}_y \frac{\partial^2 \mathcal{C}}{\partial y^2} + \mathcal{D}_z \frac{\partial^2 \mathcal{C}}{\partial z^2} \quad (4.5)$$

Considerando que la difusividad en las direcciones Y y Z es de tipo gaussiano (distribución normal) y función únicamente de la distancia de la fuente y la velocidad del viento, la ec 4.5 tiene la siguiente solución:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}(X, Y, Z) = & \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left\{ -\frac{Y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(Z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} \right. \\ & \left. + \exp \left\{ -\frac{Y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(Z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} \right] \quad (4.6) \end{aligned}$$

Donde las desviaciones estándar, están relacionadas con las difusividades a través de las expresiones siguientes:

$$\sigma_y^2 = 2\mathcal{D}_y (X/u) \quad (4.7a)$$

$$\sigma_z^2 = 2\mathcal{D}_z (X/u)^2 \quad (4.7b)$$

Una vez conocidas las condiciones meteorológicas del lugar, es posible evaluar los términos de desviación estándar a partir de tablas, gráficas o ecuaciones publicadas por la E.P.A., Turner (1967); y calcular directamente, mediante la ec. 4.6, la concentración de especies contaminantes emitidas con un gasto Q a partir de una fuente de emisión de altura efectiva H, que a su vez se estima con la siguiente ecuación:

$$H = h + \Delta h \quad (4.8)$$

en donde h es la altura física de la fuente de emisión y Δh es la altura de ascenso de la pluma, evaluada mediante ecuaciones empíricas, como Briggs (1975) y Echols, (1976) entre otros.

Resulta obvio que las características meteorológicas no permanecen estables por largos períodos y por tanto la ecuación (4.6) no es de gran utilidad cuando se desea conocer la concentración promedio de una zona. Además, estos modelos gaussianos emplean valores típicos de parámetros como la desviación estándar por lo que es importante considerar las condiciones bajo las cuales éstos fueron obtenidos, ya que varían en función de condiciones meteorológicas, topográficas, tiempo de muestreo o características del contaminante. Para aclarar la forma en que estos valores son obtenidos, se puede consultar las gráficas de evaluación de Turner (1967).

Las características fisicoquímicas del terreno son también de importancia en la evaluación de la concentración de gases contaminantes a nivel del piso. Principalmente debe considerarse la capacidad de absorción y adsorción del terreno, ya que de ser esta baja, el piso actuará como una fuente reflectora de los contaminantes, los cuales permanecerán mayor tiempo en el aire ambiente. La simulación de este fenómeno se logra en los modelos gaussianos, mediante la suposición de una fuente virtual de emisión bajo el nivel del piso, la cual emite la misma concentración de contaminantes que la fuente real. Esta aproximación proporciona resultados aceptables cuando existe 100% de reflexión; sin embargo, para la mayoría de los casos de interés no existen superficies totalmente absorbentes o totalmente reflectivas, debiéndose ajustar la concentración de emisión de la fuente virtual para representar las propiedades absorbivas que se esperan en la superficie.

Los resultados proporcionados por los modelos de tipo gaussiano son, en la mayoría de los casos, una buena aproximación y permiten realizar estudios ingenieriles satisfactorios sobre los niveles de contaminación esperados; sin embargo, debido al excesivo uso de parámetros empíricos y la limitación en el manejo de topografía y variaciones meteorológicas, resulta inadecuado para un estudio como el que se pretende realizar en la ZMCM.

4.3 Modelos diferenciales de turbulencia

La dispersión* turbulenta se refiere al transporte de cualquier propiedad en un flujo bajo régimen turbulento, es decir, cuando la magnitud y dirección del flujo varían rápidamente a causa de alta velocidad o de la rugosidad de la superficie. Este transporte no es realmente producido por un fenómeno de difusión (colisiones moleculares por diferencia de concentraciones), sino que es el resultado de un movimiento rápido e irregular de porciones macroscópicas del flujo (llamadas remolinos). El mezclado por difusividad turbulenta es mucho mayor que por difusividad molecular, siendo ésta última prácticamente despreciable para regímenes turbulentos.

Debido a la naturaleza turbulenta de la atmósfera, principalmente de las capas inferiores donde se realiza el mezclado y difusión de contaminantes, es necesario considerar este fenómeno dentro de las ecuaciones de modelación.

La capa turbulenta, dentro de la capa límite planetaria, varía con la velocidad del viento, la rugosidad del terreno y el gradiente térmico, Seinfeld (1978). Y dentro de un flujo en régimen turbulento, existen cambios desordenados en escalas muy pequeñas (micro-escala) en tiempo y espacio.

La naturaleza aleatoria y cambiante de las propiedades del flujo turbulento, obligan al empleo de valores promedios para caracterizar el flujo de interés. La descripción de estos flujos se inicia a partir de las ecuaciones generales de transporte, ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.4, en las cuales se sustituyen las variables instantáneas de flujo por:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (4.9a)$$

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (4.9b)$$

donde \bar{u}_i y $\bar{\phi}$ son valores promedio y u_i' y ϕ' son las fluctuaciones debidas a la turbulencia. Las ecuaciones resultantes de esta sustitución se promedian en el tiempo obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones:

* Dispersión, es la suma del transporte difusivo y convectivo.

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho \bar{u}_1) = 0 \quad (4.10)$$

(1) (2)

Ecuación de momento

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \bar{u}_1) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{1j} - \overline{\rho u'_1 u'_j}) - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_1} + \bar{g}_1 \quad (4.11)$$

(1) (2) (3) (4)

Ecuación de escalares

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} (\rho \bar{u}_1 \bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_1} - \overline{\rho u'_1 \phi'} \right] + \bar{S}_{\phi} \quad (4.12)$$

(1) (2) (3) (4)

en donde aparecen nuevos términos dentro del llamado término de difusión. Estos términos representan la contribución por turbulencia y se denominan: esfuerzos de reynolds, $\overline{\rho u'_1 u'_j}$, para el caso de momento y transporte turbulento, $\overline{\rho u'_1 \phi'}$, para el caso de escalares. Debido a la aparición de estos nuevos términos, el sistema de ecuaciones 4.10 a 4.12, no forman un sistema cerrado (existen mas incógnitas que número de ecuaciones) por lo que no pueden resolverse directamente, y es por tanto necesario evaluar aproximadamente algunos de sus términos; esto es *modelarlos*. En este caso, los términos a modelar son: *los esfuerzos de Reynolds, el transporte turbulento de propiedades escalares y, de existir, los términos fuentes de la ecuación 4.12.*

Las aproximaciones matemáticas o físicas que se empleen para modelar cada uno de estos términos dependerán del problema a resolver, del grado de exactitud requerido y de los datos disponibles para la construcción del modelo; sin olvidar las posibles limitaciones que puedan existir en la capacidad de cálculo.

En el capítulo siguiente se indicarán las consideraciones propuestas dentro de los modelos HOTMAC y RAPTAD para cerrar el sistema de ecuaciones propuesto y resolver para las variables de interés.

CAPITULO V

HOTMAC Y RAPTAD

En el capítulo anterior se presentaron las ecuaciones fundamentales de transporte y conservación, junto con las expresiones correspondientes para el caso de flujo turbulento. En este capítulo se presentarán las ecuaciones de trabajo de los programas de cómputo HOTMAC y RAPTAD, con el fin de establecer el manejo correcto de los principios de conservación, a la vez que se analiza la forma de la malla de cálculo, condiciones de frontera y algunas variables del programa.

5.1 HOTMAC

HOTMAC es un modelo tridimensional transitorio en el tiempo que fué originalmente desarrollado por Tetsuji Yamada (Williams y Streit, 1990). Su nombre significa "*Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation*", que puede ser traducido como: *Modelo de Alto Orden de Turbulencia para la Circulación Atmosférica*. Este modelo meteorológico fué desarrollado para predecir: gradiente térmico, presión atmosférica, humedad y velocidad y dirección del viento, especializándose en zonas donde la topografía es compleja (como es el caso de la ZMCM).

5.1.1 Ecuaciones fundamentales

La forma matemática en que se expresan los principios de conservación y transporte bajo régimen turbulento dentro del programa HOTMAC es la siguiente:

Ecuación de transporte de momento

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= f(\bar{u}_j - u_j^g)(1 - \delta_{1j}) + g \frac{z_D - z^*}{z_D} \left[1 - \frac{\langle \theta_v \rangle}{\theta_v} \right] \frac{\partial z_g}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_{1j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \\
 (1) \quad (2) & \qquad \qquad (4)'' \qquad \qquad (4)' \qquad \qquad (3) \\
 & + \frac{z^*}{z - z_g} \left[\frac{\partial \bar{u}_i^g}{\partial z^*} \right] \qquad \qquad \qquad (5.1) \\
 & (3)
 \end{aligned}$$

en donde i hace referencia solo a las componentes horizontales de viento (este-oeste y norte-sur) y la coordenada vertical es representada por la variable z^* que incluye el efecto topográfico mediante la siguiente corrección de alturas (cambio de coordenadas):

$$z^* = z_D \frac{z - z_g}{z_{\max} - z_g} \qquad (5.2)$$

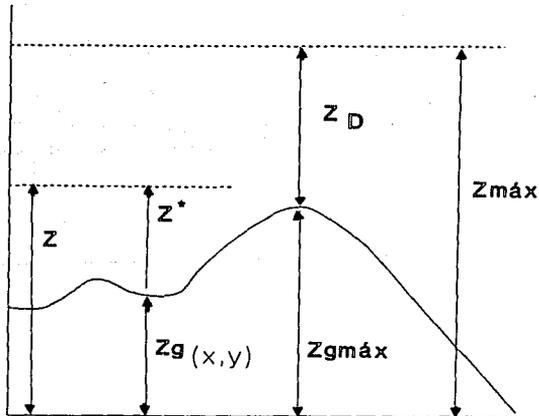


Figura 5.1. Corrección de alturas

La estructura de los términos temporal, convectivo y difusivo (1, 2 y 3 respectivamente) en esta ecuación de transporte de momento (ec 5.1), es muy semejante a la de los términos de la ecuación 4.11; mientras que el término fuente (4), se encuentra enfatizando las características de la estructura de la atmósfera: el efecto de gravedad y temperatura potencial (flotación) se correlacionan en (4)', y la fuerza de coriolis (4)", también se considera por ser la una fuerza externa de importancia.

Es importante señalar aquí que el término correspondiente al efecto turbulento (último término de la ecuación) es estrictamente un término fuente, sin embargo en este trabajo y en otros muchos modelos se incluye dentro del término difusivo en atención a la expresión matemática a partir de la cual se evalúa (ver Bradshaw, 1971).

Ecuación de conservación de masa

La siguiente ecuación se deriva de la aproximación hidrostática y de la ecuación de continuidad, resuelve la componente vertical de la velocidad:

$$\frac{\partial \bar{u}_3}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{1}{z - z_g} \left[\bar{u}_j \frac{\partial z_g}{\partial x_j} \right] = 0 \quad (5.3)$$

Ecuación de escalares

Los escalares para los cuales se plantea este modelo son temperatura potencial y contenido de humedad, esto es:

Temperatura potencial

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right] + \frac{z}{z - z_g} \left[\frac{\partial}{\partial z} (-\bar{u}_3 \theta^r) \right] + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial R_N}{\partial z} \quad (5.4)$$

(1) (2) (3) (3) (4)

En donde todos los términos conservan la estructura característica de sus orígenes (ec. 4.12) y el término fuente (4) se evalúa como una función de la energía radiante atmosférica (ver inciso 5.1.2)

Ecuación de contenido de humedad

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_j \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \right] + \frac{z}{z-z_0} \left[\frac{\partial}{\partial z} (-u_3' \bar{h}') \right] \quad (5.5)$$

(1) (2) (3)

en la que posibles contribuciones de fuentes y sumideros han sido consideradas despreciables.

Las ecuaciones 5.1, 5.3, 5.4 y 5.5 forman un sistema abierto de ecuaciones, en las cuales los términos fuentes de coriolis y radiación térmica se evalúan a partir de la formulación meteorológica estándar, Pielke (1984), mientras que los términos de turbulencia $\overline{u_1' u_3'}$, $\overline{u_3' \theta'}$ y $\overline{u_3' h'}$ se aproximan empleando un modelo de turbulencia de segundo orden.

La formulación matemática del modelo de segundo orden empleado no se incluye en este trabajo, por la naturaleza del mismo, pudiéndose consultar en Mellor y Yamada (1982) o Yamada et al (1989). A continuación se presentan las condiciones de frontera que emplea este modelo, las cuales incluyen como frontera inferior de cálculo la superficie del área de estudio (suelo), en donde se introduce la mayor cantidad de información sobre las características físicas analizadas en el capítulo III.

5.1.2 Condiciones de frontera e iniciales

Para resolver las ecuaciones anteriores, es necesario definir un dominio de cálculo, y fijar de antemano los valores o forma de variación de cada parámetro en las paredes que delimitan ese dominio.

La *frontera inferior* del área de cálculo, se ajusta a la superficie del terreno mediante la ecuación de corrección de alturas (ec. 5.2) y las variables de cálculo toman en ella los valores correspondientes a una superficie homogénea, Yamada (1981); siendo importante destacar que en esta frontera la energía térmica tiene su mayor contribución, la cual depende directamente de la irradiación solar y las características físicas del suelo (vegetación, cuerpos de agua, etc.).

La temperatura en esta frontera se estima resolviendo la ecuación de transporte de calor para la capa superior del terreno, esto es:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left[K_s \frac{\partial T_s}{\partial z_s} \right] \quad (5.6)$$

donde la coordenada z_s es la distancia por debajo de la superficie del terreno y K_s es la difusividad térmica característica del tipo de suelo.

Para resolver la ecuación (5.6), también es necesario establecer condiciones de frontera apropiadas, así como el tiempo de integración que permita suponer constante el valor de estas fronteras (el tiempo de integración empleado en este modelo es igual a 1 min). La condición de frontera corresponde al balance de energía calorífica en la capa superior del terreno, esto es:

$$R_s + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} = H_s + LE + G_s \quad (5.7)$$

donde R_s es la radiación solar de onda corta que se absorbe en la superficie del suelo, $R_{L\downarrow}$ y $R_{L\uparrow}$ son las radiaciones de onda larga que entran y salen respectivamente, H_s es el flujo de calor sensible superficial, LE es el flujo de calor latente y G_s es el flujo de calor a través del suelo. Para evaluar cada uno de estos términos se emplean las ecuaciones siguientes:

$$R_s = R_0 [A + B \cos \Omega + C \sin \Omega] \quad (5.8)$$

$$R_{L\downarrow} = R_0 \downarrow \cos \alpha \quad (5.9)$$

$$R_{L\uparrow} = \epsilon \tau T_G^4 + (1 - \epsilon) R_{L\downarrow} \quad (5.10)$$

$$H_s = -\rho_a C_p u_s T_s \quad (5.11)$$

$$LE = -\rho_a C_p u_s Q_s \quad (5.12)$$

$$G_s = -K_s \frac{\partial T_s}{\partial z_s} \Big|_g \quad (5.13)$$

Las cuales contienen variables que caracterizan la posición geográfica del área de estudio (Ω , α), que representan el efecto de las condiciones meteorológicas sobre la superficie (ρ_s , u_s , T_s , Q_s) o que están directamente relacionadas con las características de esta superficie (c , K_s).

El desarrollo de esta formulación (ecs. 5.8 a 5.13) y la manera de resolverla ha sido ampliamente analizado y discutido en Yamada et al (1989), siendo importante hacer notar aquí, que es solamente a través de la variable de emisividad, c , y difusividad del terreno, K_s , que es posible distinguir las características físicas antes mencionadas tales como: uso del suelo y fuentes de calor.

La *frontera superior* se fija en una altura sobre el terreno, dentro de la que se considera que la capa límite planetaria queda perfectamente incluida (máximo 2km), y los efectos de mezclado ya no son perceptibles (en el caso de la Ciudad de México se fijó a 4km).

En esta frontera las componentes horizontales de viento se suponen iguales al viento geostrofico:

$$u_1 = u_1^g \quad (5.14)$$

mientras que la componente vertical y los efectos de turbulencia se presuponen iguales a cero; y para la temperatura potencial y humedad se asignan valores constantes iguales a los valores promedio de la zona, registrados mediante radiosondeo.

Las cuatro *fronteras laterales* se ubican en lugares adecuados para que las condiciones meteorológicas sean suficientemente estables. Esto permite obtener los valores de frontera integrando las ecuaciones 5.1, 5.4 y 5.5 despreciando las variaciones en la horizontal (esto es para la malla gruesa, y para la fina son los valores entregadas por la malla gruesa).

Además de establecer las condiciones de *frontera* (las cuales permanecen inalterables durante el proceso de cálculo), se deberán proporcionar al programa condiciones *iniciales* que, aunque son modificadas continuamente, son indispensables para arrancar el proceso numérico de solución.

Las condiciones iniciales de viento se fijan iguales a un perfil logarítmico construido a partir de un valor asignado de 0.2 m/s para 10cm sobre el nivel del piso. La temperatura potencial se supone constante en la horizontal, y con un incremento lineal con la altura.

Para las variables de cierre: energía cinética de turbulencia y longitud de mezclado, se calculan los valores correspondientes para el campo de vientos y temperatura supuestos (ver Yamada, 1975).

5.1.3 Malla de cálculo y variables de entrada

Como se mencionó anteriormente, para resolver las ecuaciones de este modelo, es necesario establecer un dominio de cálculo, dentro del cual se define una malla formada por celdas o volúmenes de control. *HOTMAC* hace uso de la técnica conocida como *anidamiento*, que permite definir más de una malla de cálculo (una dentro de otra). En el "Estudio Global de la Calidad del Aire en la Ciudad de México" se fijaron dos mallas en el plano horizontal [ngmax=2]^{*}.

La primera malla, con dimensiones de 120x150 km, seccionada en celdas de 6x6 km [xintv1=6000; yintv1=6000], y con origen en el punto 430 y 2080 km, de coordenadas transversas de mercator [utmx=430; utmy=2080km], comprende un área de 18,000 km² limitada al norte por Pachuca, al sur por Cuernavaca, los volcales al este y Toluca al oeste (ver figura 5.2).

La segunda malla es más fina, y cubre sólo la ZMCM (2,268km²). Dentro de esta malla cada una de las celdas mide 2 km por lado, permitiendo detallar las características de esta área. Esta malla se divide en 21 celdas sobre el eje x y 27 en el eje y, mientras que en la malla gruesa se emplean 20 y 25 celdas respectivamente [imax=20,21; jmax=25,27]. En este caso la malla fina se inicia en la celda (7, 8) de la malla gruesa [ibgn=7; jbgn=8].

* Todos los nombres entre corchetes, indican el nombre de la variable dentro del programa de computadora.

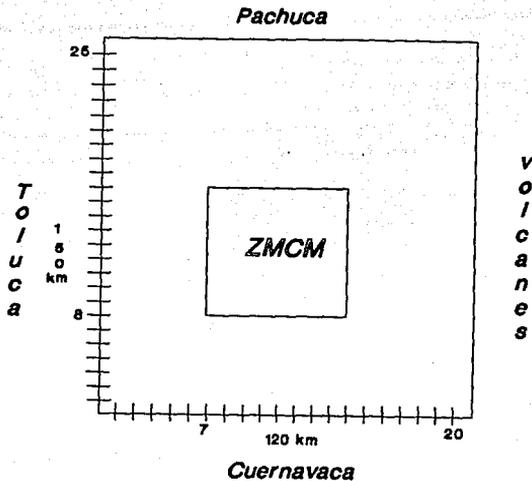


Figura 5.2 Mallas de cálculo

En la dirección vertical, el modelo considera 15 niveles de cálculo [kmax=15] de altura variable; las primeras 5 celdas [ktrans=5] se encuentran espaciadas regularmente a cuatro metros [dzdksi=4]; y las diez siguientes se separan cada vez más (polinomio de segundo orden). Además, se consideran 5 niveles por debajo del nivel del piso [ksmax=5], para evaluar la temperatura y flujo de calor en esta frontera (ec. 5.6).

Cuando se emplea más de una malla de cálculo, las condiciones de frontera de las mallas anidadas varían, estableciéndose iguales a los valores calculados (en esa iteración) para la celda correspondiente de la malla gruesa limitante.

Es importante resumir en este punto la información que ha sido proporcionada al programa de cálculo, y establecer aquellos datos que aún no han sido proporcionados. Una vez desarrollado el sistema de ecuaciones por resolver, se planteó el dominio de solución del mismo

por medio de las condiciones de frontera a satisfacer; y posteriormente se dieron valores numéricos a las variables del sistema (condiciones iniciales) que permitieran arrancar el proceso de cálculo.

El tamaño y características de la malla permitieron saber en cuantos puntos el sistema de ecuaciones debe ser resuelto, además de que en forma interna se ha establecido el valor de otros parámetros matemáticos requeridos por el método de solución a emplear. Por tanto, sólo falta mencionar las variables y valores que, siendo particulares del problema que desea estudiarse, se introducen a los programas de cálculo como *datos de entrada*.

Williams y Streit (1990), clasificaron las variables de entrada manejadas en HOTMAC en dos grandes grupos: meteorológicas y topográficas.

Meteorológicas:

Fecha. Día juliano, de 1 a 365 [day0 =].

Tiempo local. Tiempo local estándar [alst =], y diferencia con el meridiano de Greenwich [delgmt=], en horas.

Temperatura potencial. Temperatura potencial al nivel del mar [ptemp0 =]; gradientes de temperatura [tgamma1=, tgamma2=, tgamma3=]; y altura de cambio de gradiente térmico [elvinv1=, elvinv2=]. En la figura 5.3 se presentan los datos correspondientes al día 3 de febrero a las 18 horas de 1988, para la ciudad de México.

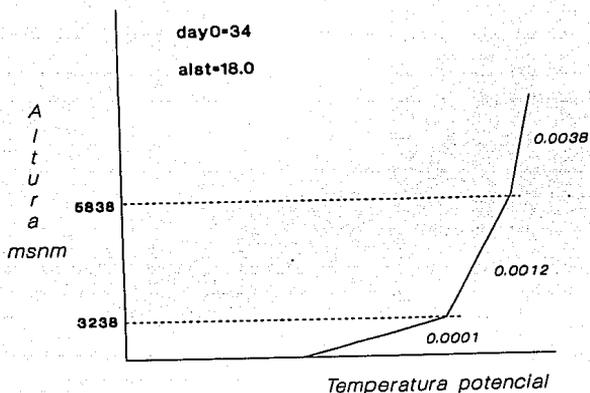


Figura 5.3 Capas de inversión

Presion. Presión sobre el nivel del mar [psea0 =].

Vientos. Dirección [dwind =] en grados, y velocidad máxima inicial a 10 metros de altura [umax0 =].

Humedad. Humedad relativa inicial del suelo [rhinit0 =] y sobre el nivel del suelo [rhinit =], además de la profundidad óptica de la atmósfera, en por ciento, debido a la cantidad de vapor de agua presente [optpww=].

Topográficas:

Elevación del terreno. La altura media de la celda [terra =], y la altura máxima en el área de estudio [zgmax =].

Parámetros del terreno y de la malla. Latitud y longitud del centro de cada malla [clat = 19.491; 19.436] y [clong = 99.095; 99.124] para el caso del Estudio Global de Calidad del Aire. Y posición de la esquina inferior izquierda de la malla gruesa [utmx = 430.0] y [utmy = 2080.0].

Zona arbolada. Se indica la fracción cubierta por árboles en cada celda [ftree =], y se caracteriza la zona mediante la altura promedio de los árboles, altura y diámetro normalizados de la copa (canopy and dead branch base) y densidad media y máxima del follaje [htree =, treez1 =, treez2 =, atree =, almax =].

Cuerpos de agua. En cada una de las celdas de cálculo se deberá indicar la presencia o ausencia de cuerpos de agua [lwater = 1 o 0] respectivamente.

Zonas urbanas. De la misma forma que en el parámetro anterior, se asigna una variable [iurb =] a cada celda, para indicar la existencia de zonas urbanas (casas habitación, plantas industriales, carreteras, etc), cuyas características de absorción de radiación y humedad hacen indispensable su consideración.

Albedo. Es la razón de la intensidad de radiación reflejada a la total incidente. Este parámetro es importante porque indica el tipo de suelo que se tiene, por ejemplo las zonas verdes [albedot = 0.1], absorben más energía que las zonas urbanas [albedog = 0.3].

Densidad y conductividad del suelo. Se distinguen solamente dos tipos de suelo: urbano y no urbano. La densidad para el suelo urbano es de $2,300 \text{ kg/m}^3$ [rhusu = 2.3e3] y 1,500 para el no urbano [rhos = 1.5e3]; la conductividad en el primer caso es de $2.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ y 4.44×10^{-7} para el segundo [edkscu = 2.3e-6] y [edksc = 4.44e-7] y al calor específico se le asigna el valor de: $0.88 \times 10^{-3} \text{ J/m}^3 \text{ }^\circ\text{K}$ y 1,125 respectivamente, esto es [csu=0.88e3] y [cs=1.256e3].

Además de las variables anteriores HOTMAC requiere datos adicionales para representar capas superiores en la vertical, para resolver la ecuación de transferencia radiativa, absorción y dispersión de radiación de onda larga. Generalmente se emplean 10 capas adicionales [kadd=10], separadas entre sí 1000m [delzr = 10*1000], con un gradiente térmico constante de 0.0033°C/m [dtdzadd = 0.0033], pérdida de vapor de agua de 0.007 g/kg m [dqdzadd = -0.007] y flujo neto de radiación de 85 W/m^2 [topradf=85].

5.2 RAPTAD

RAPTAD, cuyas siglas significan *R*Andon *P*article *T*ransport *A*nd *D*iffusion (difusión y transporte aleatorio de partículas), es un programa dedicado para la predicción de la concentración de contaminantes gaseosos que se difunden y transportan en la atmósfera. Está basado en el uso de la técnica de Monte Carlo para la estimación del transporte de pseudo-partículas* (ver Brusasca et al, 1989).

5.2.1 Ecuaciones fundamentales

Cada una de estas pseudo-partículas es transportada con la velocidad instantánea:

$$u_{pi} = \bar{u}_i + u'_i \quad (5.15)$$

donde u_{pi} es la velocidad instantánea de la partícula en la dirección x_i y el término de fluctuación u'_i se genera aleatoriamente empleando la variancia de las fluctuaciones de la velocidad del viento para la posición de la pseudo-partícula, esto es:

$$u'_i(t + \Delta t) = au_i(t) + b\sigma_{ui}\zeta + \delta_{i3}(1 - a)t_{Lx_i} \frac{\partial}{\partial x_i}(\sigma_{ui}^2) \quad (5.16)$$

y el cambio de posición de la pseudo-partícula se calcula como:

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + u_{pi}\Delta t \quad (5.17)$$

En la ecuación (5.16), a y b se calculan como función de la escala de tiempo t_{Lx_i} , ζ es un número aleatorio y σ_{ui} es la variancia de la fluctuación de velocidad en la posición de cálculo. El origen de la ecuación (5.16) y la forma de resolver estas tres últimas ecuaciones, a partir de los datos de velocidad media, \bar{u}_i y variancia de la componente vertical de la velocidad, σ_i , proporcionados por HOTMAC, se detalla en Yamada et al (1989).

Una vez estimada la posición de *transporte* de cada pseudo-partícula, la concentración del contaminante en el punto (X,Y,Z), se calcula sumando la concentración, en ese punto, debida a

* Una pseudo-partícula es manejada en RAPTAD, como el centro de masa de una nube de contaminantes.

cada pseudo-partícula o núcleo de difusión. La distribución de concentraciones dentro de cada núcleo (*kernel*) no es una función conocida por lo que su forma deberá ser asignada; dentro de RAPTAD se ha empleado la función *normal* de distribución, esto es:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}(X, Y, Z) = & \frac{Q \Delta t}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x_k - X)^2}{\sigma_x^2} \right] \\
 & \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(y_k - Y)^2}{\sigma_y^2} \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(z_k - Z)^2}{\sigma_z^2} \right] + \right. \\
 & \left. \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(z_k + Z - 2z_g)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (5.18)
 \end{aligned}$$

donde (x_k, y_k, z_k) es la localización de la pseudo-partícula k , y σ_x, σ_y y σ_z son las desviaciones estándar de una distribución gaussiana.

Para resolver las ecuaciones empleadas en RAPTAD, no se emplea ninguna técnica numérica, sino simplemente técnicas de interpolación, ya que los datos de velocidad y fluctuaciones necesarios, son proporcionados por HOTMAC sobre coordenadas fijas de la malla de cálculo (ver para mayores detalles Córdova, 1992 y Yamada et al, 1989).

5.2.2 Variables de entrada

Campo de vientos. Las componentes de la velocidad media, \bar{u}_1 y la variancia de la velocidad vertical σ_1 se obtienen directamente de la salida de HOTMAC.

Tiempo de emisión. El período de cálculo (tiempo de dispersión), el día y hora de inicio y lapso de tiempo para cada iteración se determinan de acuerdo con el caso que se desea representar [plumt=, ipday=, iphour=, delt=]. La hora de inicio de la emisión [ipstar =] y la duración de esta [tcut =], deben estar incluidas dentro del tiempo total de cálculo.

Localización de la fuente de emisión. Las fuentes de emisión se localizan mediante sus coordenadas transversas de mercator [utmxs0 =;

utmyso =].

Características de la fuente. RAPTAD maneja las emisiones como un conjunto de pseudo-partículas, todas de igual radio [sigp0 =], que no puede exceder el radio máximo de cálculo [rmax =]; estas partículas son liberadas a una altura [zshift = 0.0], con una velocidad vertical inicial de 0.0m/s [wp = 0.0] y una temperatura y flujo de emisión conocidos [tp0 =; emiss =]. Además se indica el número de partículas liberadas en cada emisión, la duración de esta y su frecuencia [np =; tcut =; ndeltp =].

Cuando se representan fuentes de área, el radio de la pseudo-partícula [sigp0 =] corresponde a la desviación estándar inicial de la distribución de concentración dentro de esa área.

En este capítulo se han presentado únicamente las ecuaciones fundamentales de los modelos y las variables que en ellos se manejan, cumpliendo con uno de los objetivos de esta tesis. En el siguiente capítulo se completará este trabajo comparando estas variables contra los factores físicos relevantes para el estudio de la ZMCM.

CAPITULO VI

MANEJO DE CARACTERISTICAS FISICAS

En este capítulo se presentan los resultados de la revisión de la manera en la cual los parámetros físicos de importancia en la ZMCM han sido, considerados dentro de los modelos de simulación, HOTMAC y RAPTAD, que se emplean en el Estudio Global de Calidad del Aire en la Ciudad de México.

Para apreciar claramente el análisis de información que aquí se presenta, se recomienda revisar los capítulos III y V de este documento. Del primero se toma el orden en el cual fueron presentadas las características físicas de la ZMCM, y del segundo las variables numéricas con las cuales estas características son representadas dentro de los programas de cálculo.

6.1 Geografía física

En este inciso se comparan los resultados obtenidos referentes a la topografía, uso del suelo, áreas verdes y clima.

6.1.1 Topografía

La *topografía* es uno de los parámetros de mayor importancia para la simulación de patrones de viento y en HOTMAC se incluye detalladamente esta información. Los datos para la ZMCM fueron alimentados cada km, y cada 3km para el resto de la Cuenca de México. La variable que maneja la información de la topografía dentro del

modelo HOTMAC es z_g [terra =], a partir de la cual se corrige la altura de la malla de cálculo (ecuación 5.2).

La máxima altura corregida, z^* , sobre el nivel del suelo que se emplea en este programa es de 4,000m [zkmaxp1 = 4000] con lo cual se garantiza que la capa límite planetaria estará totalmente incluida dentro de la zona de estudio; y por debajo de esta altura se emplean 15 niveles paralelos al relieve del terreno (ver figura 6.1).

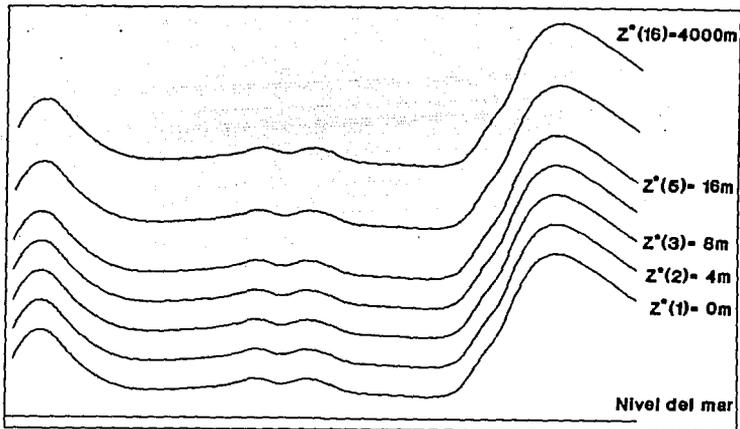


Figura 6.1 Coordenada vertical corregida.

Para este estudio, la máxima elevación de terreno considerada para la corrección de altura, es de 4581msnm [zgmax = 4581]; siendo importante aclarar que, aunque las cimas de los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl están por arriba de este valor (5,200 y 5,400m respectivamente), no cubren totalmente el área de una celda de cálculo ($36km^2$).

6.1.2 Usos del suelo

Las variables numéricas relacionadas con usos del suelo (tipos de terreno) son sólo aquellas que aparecen en las ecuaciones 5.7 a 5.13, que se emplean para resolver la ecuación de balance de energía del suelo (ec 5.6). Entre estas variables, las de mayor importancia son la emisividad de la superficie, ϵ , y su difusividad térmica, K_s , que son específicas de cada material (concreto, arcilla, agua, pasto, follaje, etc).

Para calcular la temperatura del suelo mediante la ecuación 5.6 es necesario conocer la posición geográfica de la zona de estudio a partir de la cual se evalúa la radiación solar incidente. Ya que esta ecuación no maneja términos fuente, no es posible considerar la existencia de *puntos calientes* (fuentes artificiales de calor: industrias, centros urbanos, etc)

Solo se distinguen tres usos de suelo en HOTMAC: cuerpos de agua, árboles y zonas urbanas. Esta información se introduce al programa, para cada celda, mediante índices o fracciones de cobertura, los cuales no permiten discernir en la mayoría de los casos la composición real de la celda. Esto es, en una celda de 36 km^2 , solamente podrá indicarse la ausencia, 0, o presencia, 1, de cuerpos de agua y zonas urbanas, y la fracción de cobertura de árboles; y lagos pequeños, zonas industriales o tipo de vegetación no serán posible identificar.

Dentro de los datos que actualmente se manejan en el Estudio Global, no se incluye algún cuerpo de agua dentro de la zona (aún los lagos de Zumpango y de Guadalupe fueron despreciados).

Dentro de estos mismos datos tampoco se incluyen zonas arboladas, a pesar de que es posible manejar fracciones de celda. Sin embargo, partiendo de los datos presentados en el capítulo III, es obvio que las siguientes zonas deben tomarse en cuenta: de acuerdo con la carta topográfica de la Ciudad de México (1981), existe una superficie cubierta por áreas verdes de 1130.4 km^2 en la malla gruesa (31.4 % de las celdas); y tomando además la información presentada por el Atlas de la Ciudad de México, dentro de la malla fina se encuentran: el Bosque

de Aragón, Bosque de Chapultepec, Ciudad Universitaria, Cerro de la Estrella, San Luis Tlaxialtenango, el Desierto de los Leones, Cumbres del Ajusco y Miguel Hidalgo y Costilla que cubren una superficie de 62.96 km² (2.77% de las celdas).

Es importante destacar que, en una ciudad como la nuestra, no solo es de importancia el uso del suelo, sino también el tipo de material involucrado para cada uso, así como las características de la actividad relacionada con el mismo; esto es, energía liberada (varía con el nivel de vida), retención de humedad (tipo de vegetación), constante de emisividad (material de construcción), etc.

6.1.3 Clima

Aquí se analizará la manera en la cual los parámetros que modifican el clima de una zona, tales como humedad, temperatura y vientos, son manejados dentro de HOTMAC.

Humedad. Se estima mediante un balance de la humedad relativa (ec. 5.5), en el cual a pesar de no incluir un término matemático que represente la existencia de fuentes o sumideros, se considera la formación y destrucción de *nubes* con la altura, lo cual equivale parcialmente a este término. Sin embargo, para el caso de un país tropical como el nuestro sería deseable incluir además un término fuente que considerara cabalmente la evaporación de cuerpos de agua.

Temperatura. La temperatura potencial se estima con la ecuación 5.4, en la cual se incluyen los efectos de calentamiento o enfriamiento debidos a la superficie del terreno mediante el término fuente. Pero, dadas las características de pronóstico de este modelo no es posible incluir el efecto de fenómenos estocásticos (frentes fríos, huracanes, etc).

Además del término fuente por radiación, se ha incluido una subrutina de cálculo que permite evaluar el enfriamiento local debido a sombras topográficas, pero su influencia sobre el patrón general de temperaturas no ha sido aún cuantificada.

La temperatura del medio ambiente, evaluada en HOTMAC, es

utilizada dentro del programa RAPTAD para compararla con la temperatura de la emisión y estimar el efecto de flotación. Sin embargo, esta última no modifica de manera alguna el campo de temperaturas de la zona de estudio.

Vientos. Las ecuaciones 5.1 y 5.3 proporcionan el campo de vientos (componentes vectoriales de velocidad) para la malla de cálculo, siendo posteriormente empleado por RAPTAD para estimar la trayectoria y dispersión de las especies contaminantes de interés.

El campo de vientos evaluado a partir de estas ecuaciones deberá satisfacer los principios de conservación y continuidad que rigen el fenómeno, y producir un campo de temperatura y humedad acorde con las condiciones físicas de la zona; sin embargo no deberá esperarse que sea posible pronosticar corrientes de chorro, masas de aire polar u otros movimientos sinópticos de aire.

Dentro del Estudio Global de Calidad del Aire en la Ciudad de México, ya ha sido empleado el modelo HOTMAC para reproducir el campo de vientos para las condiciones de la ciudad de México (Williams y Porch, 1991), pudiendo observarse en las figuras 6.2 y 6.3 que los resultados obtenidos a nivel del piso reproducen satisfactoriamente (en dirección y magnitud) los datos reportados por SEDUE. En este ejemplo de aplicación se emplearon como datos iniciales las condiciones meteorológicas del día 3 de febrero de 1988 (que SEDUE clasificó como día malo desde el punto de vista de contaminación atmosférica), y los resultados que se presentan en las figuras de comparación corresponden al día 4 de febrero.

En la figura 6.2 se presenta el campo de velocidades calculado a 10 metros de altura, y los valores medidos en siete de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo de la SEDUE. La magnitud de los datos calculados y los medidos es semejante a excepción de la Estación ENEP Acatlán (G), la cual por su posición puede estar sujeta a efectos locales no considerados en el programa de cálculo. En esta figura además, es posible observar la convergencia de flujo hacia el centro de la ciudad, característica del régimen matutino invernal (ver inciso 3.1.3.4). La figura 6.3 presenta la comparación de las direcciones observadas y calculadas en la estación Y, cercana al aeropuerto capitalino, siendo sorprendente su correlación.

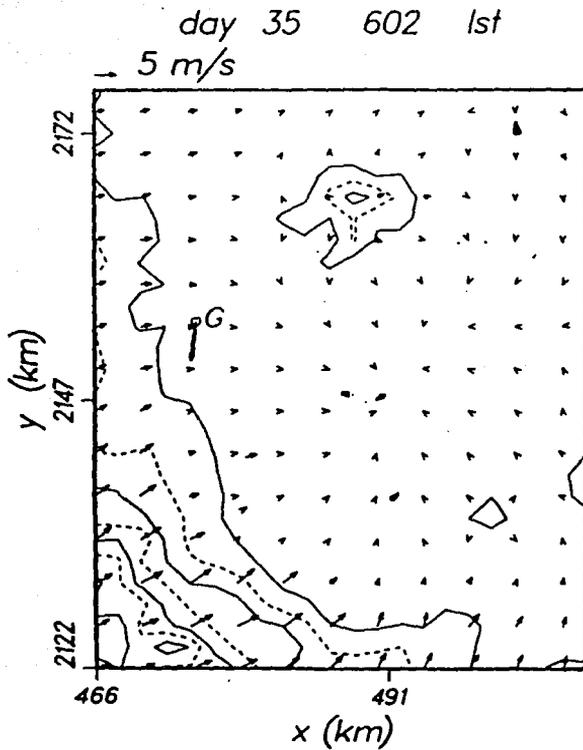


Figura 6.2 Campo de viento para ZMCM (4 de febrero 1988, 6:00)

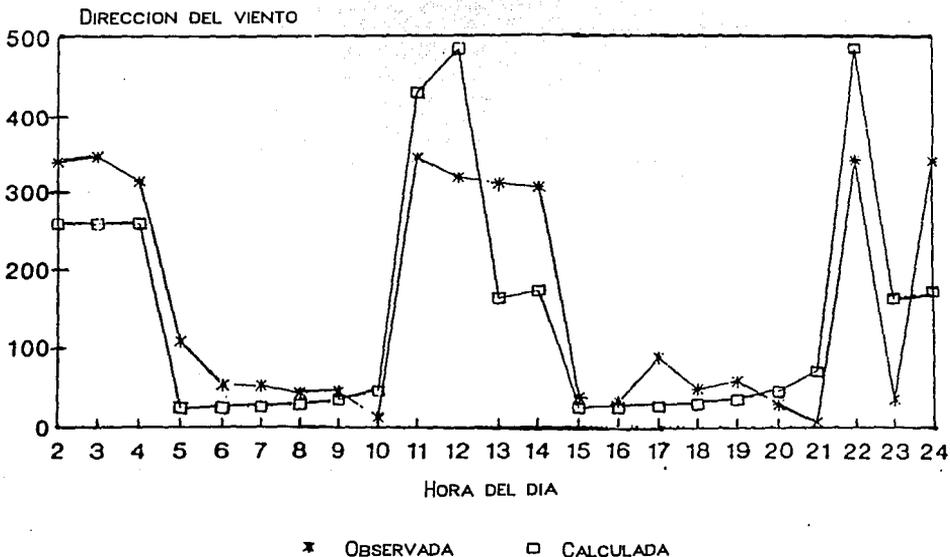


Figura 6.3 Comparación de la dirección del viento calculada y observada. Estación Y, 4 de febrero de 1988, 6:00 a 14:00

En el trabajo de Williams y Porch (1991), también se reportan datos de concentración de CO evaluados con RAPTAD, a partir de este campo de vientos; en la figura 6.4 se comparan estas concentraciones con las medidas por SEDUE para la estación Cuiclahuac (A), donde se registró la mayor concentración horaria de CO para ese día. En esta figura es posible observar que también el comportamiento general de la concentración de CO se describe adecuadamente.

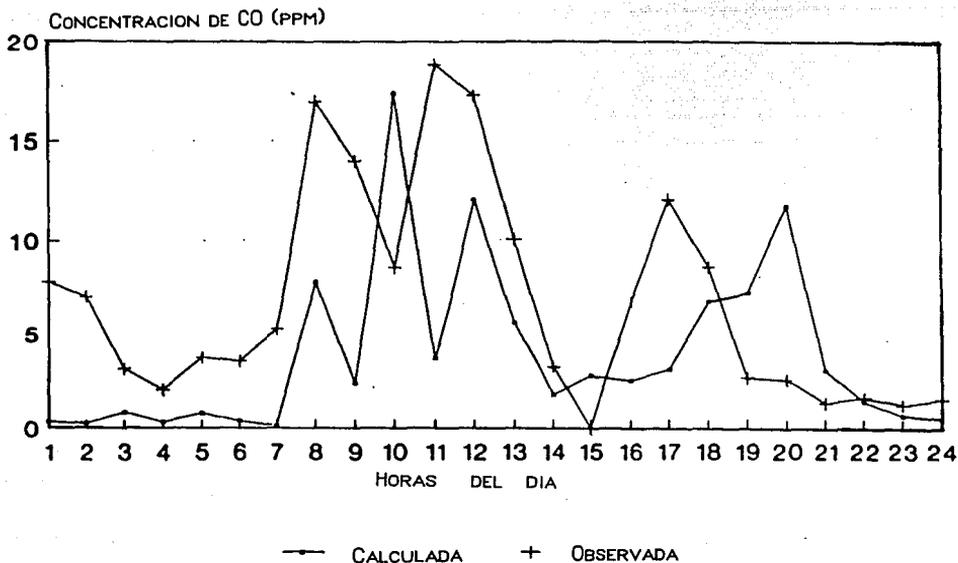


Figura 6.4 Comparación de la concentración horaria de CO calculada y observada. Estación A, 4 febrero de 1988.

6.2 Geografía humana

La satisfacción de las necesidades humanas como: vivienda, alimentación, educación, transporte y producción de bienes y servicios, tiene como consecuencia lógica la emisión de elementos ajenos al ecosistema y/o la sobreproducción de algunas sustancias que a pesar de formar parte del mismo alteran sus ciclos naturales. La distribución de asentamientos humanos y la actividad de los mismos es por tanto determinante dentro del análisis de la problemática ambiental.

Los dos parámetros considerados anteriormente dentro de este subcapítulo (industria y vialidad), serán aquí agrupados atendiendo a la especie contaminante que producen.

6.2.1 Fuentes de contaminación

Debido a las características del modelo de dispersión RAPTAD, no es posible considerar en esta etapa aquellos contaminantes altamente reactivos como: SO_2 , NO_x e hidrocarburos, ni tampoco aquellos que se forman en la atmósfera (O_3 y PAN). Para la modelación de estos se revisa actualmente el modelo CIT.

La emisión de partículas sólidas, que sedimentan rápidamente, tampoco ha sido incluida en la versión actual de RAPTAD; sin embargo la consideración de este fenómeno, empleando la velocidad de sedimentación de Stokes, no sería difícil de introducir dentro del mismo (ver Turner, 1967).

Por tanto, las fuentes de emisión de mayor interés en este estudio serán los procesos de combustión, principales productores de monóxido de carbono. De aquí que no sea conveniente seguir separando los procesos industriales de las fuentes móviles de contaminación.

A pesar de lo expuesto anteriormente, no debe considerarse a RAPTAD como un modelo limitado, ya que siempre será necesario usarlo para estimar la dispersión inicial de contaminantes (gases o partículas); aún de aquellos que posteriormente estarán sujetos a procesos de descomposición química o de sedimentación.

Las emisiones contaminantes en el centro de la Ciudad de México solo han sido representadas en RAPTAD por fuentes de área a nivel del piso de 10,000m de radio, principalmente por la carencia de inventarios de emisiones actualizados; sin embargo, es posible modelar industria aisladas. Para el caso de automóviles, se deberá localizar en el mapa de vialidad las zonas en donde la densidad de calles, ejes viales y avenidas sea importante, para estimar la emisión global de la zona y predecir el comportamiento de dicha emisión.

En el inciso anterior se presentó el resultado de una corrida realizada por Williams y Porch (1991), en la cual se estimaron las fuentes de emisión de CO a partir de los datos de concentración existentes. Con estos datos de emisión y el campo de vientos proporcionado por HOTMAC, se estimó la evolución de la concentración de este gas en la atmósfera, que se presentó en la figura 6.4.

La información disponible sobre concentración de CO, se empleó además para identificar zonas urbanas (urban canopy) y la cantidad de calor liberado por las mismas. Por tanto, el refinamiento del inventario de usos del suelo en la ZMCM permitirá mejorar los resultados de este modelo.

Además del ejemplo anterior, se han realizado algunos experimentos numéricos para visualizar el comportamiento de contaminantes dentro de la Cuenca de México. La figura 6.5 presenta dos etapas de la simulación de una secuencia de lanzamiento de pseudo-partículas, desde el centro de la ciudad, para las condiciones meteorológicas del 4 de febrero. En cada una de estas fotografías se presenta la posición de las pseudo-partículas en dos momentos distintos de la simulación: cuando las partículas aún están siendo liberadas, 9:30; y cuando, cuatro horas después, han sido transportadas lejos del punto de emisión e inclusive algunas han sobrepasado la sierra del Ajusco.

Finalmente, es importante señalar que en esta etapa del estudio no ha sido incluida la presencia de sumideros, como son: áreas verdes y cuerpos de agua; los cuales no sería difícil incluir, siguiendo la práctica de los modelos gaussianos clásicos (Turner, 1967).

6.2.2 Fuentes de calor

Anteriormente ya se han mencionado las limitaciones de estos programas de cálculo, en lo referente a la representación de fuentes de calor. Además, es importante recordar la existencia del efecto de isla de calor en zonas urbanas, que produce una distribución irregular de la temperatura: temperaturas extremas se registran en la periferia de la ciudad, donde no hay nubes de impurezas que intercepten los rayos solares y eviten el calentamiento de la zona durante el día o su rápido enfriamiento por la noche. Debiéndose mencionar que es altamente improbable que este efecto pueda representarse adecuadamente por los modelos que aquí se han presentado.

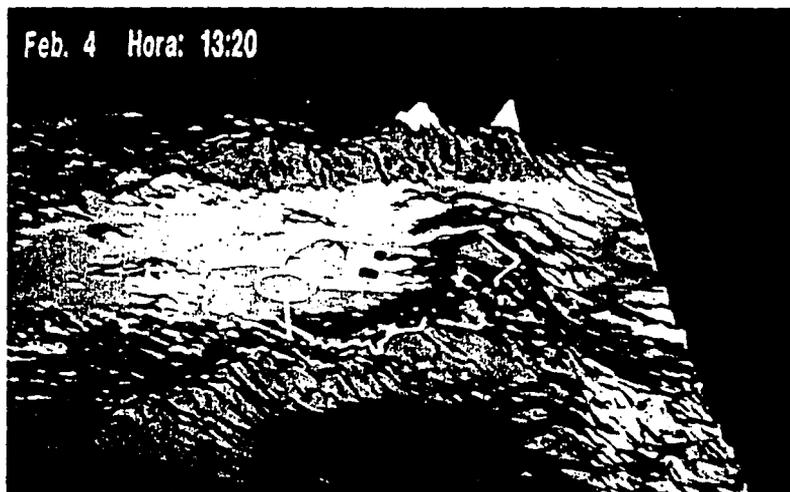
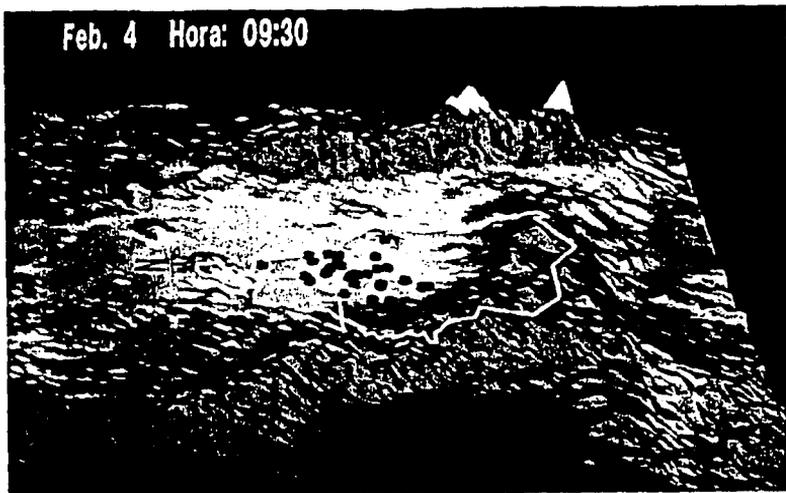


Figura 6.5 Simulación de emisiones contaminantes (cortesía del IMP)

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al iniciar este trabajo, se estableció como objetivo principal el análisis de las características físicas de la ZMCM y su representación dentro del modelo de dispersión atmosférica HOTMAC-RAPTAD, a fin de concluir si existe una correspondencia adecuada.

En el capítulo anterior ya se ha establecido la relación, uno a uno, entre los parámetros físicos relevantes para el estudio de la Cuenca de México, presentados en el capítulo III, y las variables numéricas en HOTMAC-RAPTAD (capítulo V). Por lo tanto, en este último capítulo, solo se presentarán las principales conclusiones arrojadas de esta comparación, y algunas sugerencias para el posible mejoramiento de las predicciones que con estos modelos se realicen.

Desafortunadamente, no existen datos meteorológicos suficientes para validar correctamente los valores de viento calculados por HOTMAC. En la figura 6.2 se compararon satisfactoriamente los campos de viento, medido y calculado, a una altura de 10 metros sobre el nivel del piso; sin poder realizar una comparación semejante a otras alturas. Sin embargo, los perfiles verticales para estos cálculos corresponden a la estructura atmosférica típica observada por los radiosondeos matutinos que se realizan en el aeropuerto de la Ciudad de México (Williams y Streit, 1990).

El principal factor que determina la estructura vertical del viento (dentro de la capa límite planetaria) es la topografía, la cual es uno de los parámetros mejor representados dentro del modelo meteorológico; sin embargo no es obvio que las diferentes alturas de

casas y edificios que se encuentran en la ZMCM, no afecte los patrones de viento en los primeros niveles del volumen de cálculo, (ver figura 2.8) y por lo tanto la topografía urbana deberá considerarse en este modelo; en una zona donde existe una concentración considerable de edificios altos (centro, que sobrepasa los 16 primeros metros que considera el modelo) el perfil del viento no será igual al de una zona en donde abundan las casas de menor altura (Ciudad Netzahualcoyotl).

De lo anterior podemos concluir que el modelo meteorológico empleado predice *aproximadamente* el campo global de vientos en nuestra ciudad, siendo indispensable contar con las mediciones adecuadas para validar dicho modelo y cuantificar la aproximación de los cálculos.

Al igual que para los campos de viento, no existe aún información suficiente contra la cual comparar las predicciones de temperatura y humedad, principalmente en dirección vertical, pudiendo concluir solamente que los valores obtenidos son *cualitativamente* satisfactorios.

Debido a la gran dependencia del modelo de dispersión, RAPTAD, de las condiciones meteorológicas (HOTMAC), es difícil establecer la bondad de este modelo. Y, a pesar de que los resultados obtenidos a la fecha, figura 6.4, son cualitativamente aceptables, no debemos olvidar que el inventario de emisiones empleado fue supuesto.

Tomando en cuenta las conclusiones anteriores, es necesario recomendar la realización de campañas de monitoreo intensivas (existen datos de dos campañas realizadas por el IMP, septiembre de 1990 y febrero de 1991) que permitan validar los modelos aquí presentados.

Aún cuando los resultados de la validación fuesen satisfactorios, es obvio recomendar el refinamiento de la representación actual de los cuerpos de agua y áreas verdes dentro de la malla de cálculo, así como la identificación y localización adecuada de las fuentes de calor y emisión de las especies contaminantes de interés. Se han mediciones de percepción remota y se trabaja en la interpretación de datos de satélite para uso del suelo y distribución de energía de fuentes antropogénicas, (IMP). De esta información es muy recomendable obtener los posibles sumideros de especies contaminantes (captación de CO₂ por las plantas).

Atendiendo a la necesidad de mejorar la representación de los factores físicos que inciden directamente sobre los patrones locales de clima (microclima), es recomendable experimentar con una malla fina *menor* que la actualmente empleada (por ejemplo: 0.5 x 0.5 km), sobre la que sea posible representar áreas verdes; como las cincuenta hectáreas que existen en Ciudad Universitaria, cuyo efecto local es bien conocido.

Al analizar las recomendaciones anteriores es clara la necesidad de continuar con este trabajo para contar con un modelo adecuado para el análisis y predicción de los procesos contaminantes de la Ciudad de México, obtener la información adecuada para la validación del mismo y simultáneamente formar cuadros humanos de alta calidad que puedan evaluar y/o presentar posibles soluciones de este problema.

Para finalizar este trabajo deseo mencionar que es necesario realizar un gran esfuerzo, por todos y cada uno de los habitantes del orbe, para encontrar alternativas *económicas* que resuelvan el grave problema de la contaminación atmosférica. Ya no es posible proponer únicamente soluciones rápidas y baratas; es necesario conocer profundamente el problema al cual nos enfrentamos y elaborar un inventario de emisiones que identifique claramente los puntos de contaminación en cada industria, para entonces poder establecer las medidas de control necesarias en cada fuente.

Para el control de las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles (gasolina, diesel, combustóleo, gas natural, etc.), principalmente empleados por el parque vehicular; la solución inmediata depende en nuestro país de un solo fabricante, PEMEX, quien ha iniciado ya un programa de mejoramiento de la calidad de combustibles (reducción de azufre y plomo), pero del que aún se espera mayor participación para lograr realmente abatir los niveles actuales de contaminación.

Estas, además de la descentralización, el mejoramiento del transporte público, el apoyo a medios de transportes no contaminantes (bicicleta, tranvía, metro, etc.) y el uso de fuentes alternas de energía (solar, eólica, etc.) son, desde mi punto de vista, las soluciones inmediatas para la reducir las emisiones que contaminan nuestro aire.

A P E N D I C E
LISTA DE VARIABLES COMPUTACIONALES
(CIUDAD DE MEXICO, 4 DE FEBRERO DE 1988)

HOTMAC

Variable	Descripción	valor	unidades
albedog	Albedo de suelo	0.3	adimensional
albedot	Albedo de árboles	0.1	adimensional
almax	Máxima densidad de superficie cubierta por hojas en árboles	1.0	m ⁻¹
alst	Tiempo local estándar	18.0	horas
asmax	Máxima densidad de superficie no cubierta por hojas en árboles	0.05	m ⁻¹
atree	Fración cubierta por árboles	0.8	adimensional
boweng	Relación de Bowen para el suelo	0.2	adimensional
bowmax	Valor máximo de la relación de Bowen	10.0	adimensional
bowmin	Valor mínimo de la relación de Bowen	-10.0	adimensional
bratio	Relación de Bowen para la cubierta	1.5	adimensional
clat	Latitud del centro de la malla (ngmax valores)	19.491, 19.436	
clog	Longitud del centro de la malla (ngmax valores)	99.095, 99.124	
constr	Constante de aproximación de la fracción cubierta por nubes	0.8	adimensional
cs	Calor específico del suelo	1.256e3	cal/g C
csu	Calor específico urbano	0.88e3	cal/g C
day0	Día juliano	34	
delgmt	Tiempo de diferencia entre el meridiano de Greenwich y el tiempo local estándar		horas
deltma	Paso máximo de tiempo	278.0	s

delzr	Incrementos de z en zonas adicionadas	10*1000	m
dqdzadd	Incremento del vapor de agua sobre capas adicionales	-0.007	g/kg/m
drag	Coefficiente de fricción de Drag	0.2	adimensional
drghmax	Valor máximo de coeficiente de fricción	0.5	adimensional
dtzadd	Incremento de la temperatura capas adicionales	0.0033	grados/m
dwind	Dirección inicial del viento	30.0	grados
dzdksi	Resolución de la malla en la la capa superficial	4.0	m
edksc	Difusividad térmica del suelo	4.44e-7	m ² /s
edkscu	Difusividad térmica urbana	2.3e-3	m ² /s
edmax	Viscosidad máxima turbulenta	500.0	m ² /s
edmin	Viscosidad mínima turbulenta	2.0e-5	m ² /s
elvinvl1	Altura de la primera capa de inversión	3238.0	msnm
elvinvl2	Altura de la segunda capa de inversión	5838.0	msnm
emissig	Emisividad del suelo	0.98	
excoef	Coefficiente de extinción	0.6	
gnudge	Coefficiente de <i>empuje</i>	0.000	
htree	Altura de árbol	15.0	m
lbgn	Indice <i>i</i> para iniciar malla fina (ngmax-1 valores)	7	
iintvl	Incremento <i>i</i> para imprimir (ngmax valores)	3.3	
iflgs	Bandera para cálculo de sombra	1	
imax	Número de celdas en la dirección x (ngmax valores)	20, 21	
irept	Número de iteraciones en el tiempo, malla gruesa	750	
jbgm	Indice <i>j</i> para iniciar malla fina (ngmax-1 valores)	8	
jintvl	Incremento <i>j</i> para imprimir (ngmax valores)	3	
jmax	Número de celdas en dirección y (ngmax valores)	25, 27	
kadd	Número de celdas superiores a	10	

kintvl	Incremento k para imprimir	1	
kmax	Número de celdas en la dirección z	15	
ksmax	Número de capas del suelo	5	
ktrans	Número de celdas lineales en la dirección z	5	
ngmax	Número de mallas	2	
nlimit	Límite de interacciones para el viento w	15	
optpwv	Profundidad óptica del vapor de agua (visibilidad)	0.3	
ptemp0	Temperatura potencial a nivel medio del mar	47.0	C
psea	Presión a nivel del mar	672.0	mb
qminadd	Vapor de agua en las capas adicionales	1.0	g/kg/m
reducu	Factor de escalamiento de la velocidad escalar u	1	
reducv	Factor de escalamiento de la velocidad escalar v	1	
relax	Coefficiente de relajación	0.30	
rhinit	Humedad relativa inicial sobre el suelo	0.2	
rhinit0	Humedad relativa inicial en el suelo	0.2	
rhos	Densidad del suelo	1.5e3	Kg/m ³
rhosu	Densidad del suelo urbano	2.3e3	Kg/m ³
smooth	Factor de suavizado	0.5	%
tgamma1	Perfil de temperaturas en la capa baja de inversión	0.0001	grados/m
tgamma2	Perfil de temperatura en la capa media de inversión	0.0012	grados/m
tgamma3	Perfil de temperatura en la capa alta de inversión	0.0038	grados/m
tolera	Tolerancia	0.1	
topradf	Flujo de radiación en la zona adicionada	85	W/m ²
treez1	Altura normalizada a la base de la copa de árbol	0.1	adimensional

treez2	Altura normalizada de la base de la rama muerta	0.05	adimensional
twater	Temperatura del agua	13.8	C
umax0	Velocidad máxima inicial del viento	2.0	m/s
utmx	Posición utm e-w de la esquina sw (malla gruesa)	430	km
utmy	Posición utm n-s de la esquina sw (malla gruesa)	2080	km
wdobs	Dirección del viento observada	30	grados
wsobs	Velocidad del viento observada	3.0	m/s
xintvl	Dimensión en x de la celda (malla gruesa)	6000	m
yintvl	Dimensión en y de la celda (malla gruesa)	6000	m
zgmax	Altura máxima del terreno	4581	msnm
zkmaxpl	Altura máxima de cálculo en el sistema de coordenadas corregido	4000	msnp
zobs	Altura de observación del viento	7000	msnm

R A P T A D

plumti	Período de cálculo	360	min
ipday	Día de inicio del cálculo	35	
iphour	Hora de inicio del cálculo, tls*	1920	
delt	Lapso de tiempo para cada iteración	20	s
utmso	Localización de la fuente de emisión		km
ipstar	Inicio de la emisión		tls
tcut	Duración de la emisión	10,800.00	s
sigp0	Radio de la fuente	10,000	m
rmax	Radio máximo de la fuente	15,000	m
zshift	Altura de emisión	0	m
wp	Velocidad vertical inicial	0.0	m/s
tp0	Temperatura de emisión	285	K
emiss	Flujo de la emisión	104,000	g/s
np	Número de partículas emitidas	1	
ndeltp	Frecuencia de emisión de las partículas	2	
klev	Número de muestras en el nivel vertical	1*1	
samptim	Frecuencia del muestreo	1*60	min
dbz	Distancia entre cada muestra	1*50	m
sumt	Localización de los sitios de muestreo	487, 2145	km

*Tiempo local estandar

BIBLIOGRAFIA

- Aguirre R. (1989)
"Aplicación de modelos de turbulencia para predecir la dispersión de contaminantes en la atmósfera".
DEPFI-UNAM, (en preparación)

- Atlas de la Ciudad de México (1987)
Departamento del Distrito Federal (DDF) y El Colegio de México (CM)

- Bradshaw P. (1977)
"Momentum transfer in boundary layer".
Ed McGraw-Hill

- Bravo H. (1987)
"La contaminación del aire en México".
Ed. Universo Veintiuno

- Briggs S.A. (1975)
"Plume rise predictions".
ATDL, Contribution file no. 75/15,
U.S. Department of Commerce, NOAA.

- Brusasca G., Tinarelli g., Anfossi D. (1989)
"Comparison between the result of a Monte Carlo atmospheric diffusion model and tracer experiments".
Atmospheric Environment, Vol 13, No. 6, pp 1236-1280

- Córdova A. (1992)
"Aplicación de modelos matemáticos como herramienta de evaluación de alternativas para el control de la contaminación ambiental en la Ciudad de México".
Tesis de Licenciatura, Facultad de Química-UNAM, (en preparación).

-DDF (1991)

"Reporte mensual sobre la contaminación ambiental en la Ciudad de México".

Departamento del Distrito Federal, septiembre.

-Diario Oficial (1982)

Diario Oficial de la Federación, lunes 29 Noviembre.

-Dobbins R. (1979)

"Atmospheric motion and air pollution".

John Wiley & Sons

-Echols T. (1976)

"A short course on plume rise computations".

Meteorology Section Texas Air Control Board

-IPCAJ (1989)

"Air and Water".

Industrial Pollution Control Association of Japan

Vol 1.

Ed Brainwork

-Jáuregui E. (1971)

"Erosión eólica en los suelos vecinos al lago de Texcoco".

Ingeniería Hidráulica en México. Vol. 25, pp 103-117.

-Jáuregui E. (1974)

"La isla de la lluvia de la Ciudad de México".

Ingeniería Hidráulica en México. Vol 3(2), pp 138-151

-JICA (1990)

"Study on the air pollution control plan of stationary sources in the metropolitan area of the Mexico city".

Japan International Corporation Agency

-Llaugé F. (1976)

"La meteorología?...Pero si es muy fácil!".

Ed. Marombo

- Mellor y Yamada T. (1982)
 "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems".
 Reviews of geophysical and space physics. Vol. 20, No 4,
 pp 881-875, November.
- Moran M. y Morgan D. (1989)
 "Meteorology".
 Ed Macmillan Publishing Company
- NOM-AA-23-1986
 "Protección al ambiente- Contaminación Atmosférica- Terminología".
 Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de
 Normas. Norma Oficial Mexicana.
- Oke T.K. (1987)
 "Boundary layer climates".
- Parker A (1983)
 "Contaminación del aire por la industrial".
 Ed Reverté
- Pielke R. A. (1984)
 "Mesoscale Meteorological Modelling".
 Ed Academic Presss
- Puentes S., Legorreta J. (1988)
 "Medio ambiente y calidad de vida".
 Colección Desarrollo Urbano.
- SEDUE (1987)
 "Políticas y estrategias de abatimiento y control de la
 contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de
 México".
 Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, reunión nacional,
 del 2 al 6 de noviembre, Metepec Puebla, México.

-SEDUE, (sin año)

"Contaminación atmosférica en el valle de México".
Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

-Seinfeld H. J. (1978)

"Contaminación atmosférica. Fundamentos físicos y químicos"
Instituto de Estudios de Administración Local, Madrid.

-Seinfeld H. J. (1988)

"Ozone air quality models a critical review"
Journal of Air Pollution Control Association, Vol. 38, No 5, May.

-Stern (1971)

"Air pollution"
Vol. I, Second edition
Academic Press Inc.

-Stern A., Bouel W., Turner B., Fox D. (1984)

"Fundamentals of air pollution".
Second edition, Ed Academic Press.

-Turner D. B. (1967)

"Workbook of atmospheric dispersion estimates".
U.S. Department of health, education, and National Center for Air
Pollution Control, Cincinnati, Ohio.

-Williams M. D., Porch W. (1991)

"Application of a Three-Dimensional, Prognostic Model to Mexico
City Air Quality studies".
84th Annual Meeting of the Air and Waste Management Association
Vancouver, BC, June 16-21.

-Williams M. D., Streit G. E. (1990)

"Atmospheric Modeling in Complex Terrain".
Los Alamos National Laboratory

-Yamada T. (1975)

"A three-dimensional second order closure numerical model of mesoscale circulation in the lower atmosphere".

Argonne, National Laboratory

-Yamada T. (1981)

"A numerical simulation of nocturnal drainage flow".

Journal of the meteorological society of Japan".

Vol 59, No. 1

-Yamada T., Williams M., Stone G. (1989)

"Chemical downwind hazard modeling study".

Los Alamos National Laboratory. U.S. Department of the health education and welfare.

LA-UR-89-1061