



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EXPERIMENTOS NUMERICOS DE
CIRCULACION ATMOSFERICA EN EL
VALLE DE MEXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

F I S I C O

P R E S E N T A

DAVID SALAS MONREAL



MEXICO, D. F.

2000

281015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

MAT. MARGARITA ELVIRA CHÁVEZ CANO
Jefa de la División de Estudios Profesionales
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:
"Experimentos numéricos de circulación atmosférica en el
Valle de México"

realizado por SALAS MONREAL DAVID

Con número de cuenta 9450343-4, pasante de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de tesis
Propietario

DR. VICTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA
Propietario

DR. ADOLFO MOLINA CRUZ
Propietario

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE
Suplente

DR. ARON JAZCILEVICH DIAMANT

Suplente
DR. LUIS ANTONIO DAVALOS OROZCO

Victor Orlando Magaña Rueda

Adolfo Molina Cruz

Patricia Goldstein Menache

Aron Jazcilevich Diamant

Luis Antonio Davalos Orozco

Consejo Departamental de Física

Patricia Goldstein Menache

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE
Coordinadora de Licenciatura



DEDICATORIA

A mis padres Adela y David por todo el cariño y dedicación que siempre me han demostrado y de quienes he aprendido no sólo en lo académico sino sobre todo en lo personal.

A Mayra por compartir conmigo los momentos felices.

A mis abuelos Tita y Güelo, a mi abuelita Petra y a la madrina, por el gran cariño que siempre recibo de ellos.

A mis tíos Sonia, Santiago, Elia, Carmela, Manuel, Gerardo, Roberto, Enrique, Margarita y Rosalinda al igual que a mis primos Roberto, Alex, Santiago, Elitania, Erendira, Martín, Manuel, Angélica, Alma, Manolo, María José, Rosalinda, Cintia y Gerardo, por ser una gran familia y estar siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Víctor O. Magaña Rueda por la dirección de esta tesis, por permitirme ser parte de su grupo de trabajo, por haber compartido sus conocimientos y experiencias y sobre todo por su paciencia y accesibilidad para con la gente como yo que iniciamos nuestra formación al terminar la licenciatura.

A los miembros del jurado a quienes menciono en orden alfabético, Drs. Luis Antonio Dávalos Orozco, Patricia Goldstein Menache, Arón Jazcilevich Diamant y Adolfo Molina Cruz ya que todos me brindaron apoyo con sus atinadas sugerencias y consejos y de quienes percibí en su trato un constante apoyo, lo que me hizo confirmar una frase que un día escuché: "Los grandes son gente sencilla y siempre tienen trato amable con los que iniciamos".

Al M. en C. José Luis Pérez López de quien tanto aprendí durante la realización de este trabajo, sobre todo a corregir errores y a rescatar programas.

Al Dr. Ernesto S. Caetano Neto por compartir conmigo sus conocimientos en modelación.

Al Fis. Miguel Ángel Villanueva Urrutia y al M. en C. José Agustín García Reynoso por facilitarme datos meteorológicos indispensables en este trabajo.

Al Sr. Luis Rodolfo Meza Pereda, a la Srita. Lilitiana Cisneros Cuellar y al Mat. Ignacio Palomar Morales por todo el soporte técnico.

A mis compañeros del CCA, Vladimir, Matías, Jorge, Joel, Misael, Gustavo y Oscar por los momentos alegres que le robamos inconscientemente al trabajo y por compartir sus conocimientos y esperanzas.

A todos mis compañeros de la Facultad de Ciencias a quienes para no dejar alguno fuera no menciono por sus nombres, pero ellos saben que están implícitos en este párrafo, por compartir los buenos momentos.

A los responsables del proyecto PAPIIT: Utilización de Pronósticos Climáticos Regionales (IN100697) Dr. Julián Adem Chahín y Dr. Víctor O. Magaña Rueda, por haberme otorgado una beca tesis.

RESUMEN

Las ciudades altamente pobladas e industrializadas como la ciudad de México, presentan un alto índice de contaminación, por lo que es necesario entender las condiciones atmosféricas que agravan el problema para poder actuar de forma preventiva en eventos extremos de contaminación.

La orografía del Valle de México provoca con frecuencia que la circulación de los vientos no sea capaz de renovar el aire en algunos lugares del Valle. Los vientos predominantes del norte transportan la contaminación hacia el suroeste donde se estancan. Además la altitud del Valle de México favorece la formación de ozono, lo cual agrava el problema de la contaminación.

En este trabajo se simuló la circulación atmosférica de mesoescala sobre el Valle de México mediante la aplicación del modelo numérico MM5, para identificar las condiciones que resultan en buena o mala dispersión de contaminantes.

Los resultados del modelo se compararon con observaciones de vientos y temperaturas de superficie obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA), mostrando que el Modelo (MM5), reproduce satisfactoriamente la circulación atmosférica a mesoescala sobre el Valle de México. Los resultados más relevantes muestran que la presencia de una línea de convergencia sobre el Valle de México inhibe la dispersión, debido a que los vientos descienden y se debilitan cerca de esta región, impidiendo que los contaminantes puedan ser transportados hacia otras regiones. En ocasiones, las montañas alrededor del Valle de México actúan como una fuente elevada de calor, inhibiendo la dispersión de los contaminantes.

Tanto la dirección como la intensidad del viento juegan un papel muy importante en la dispersión, pues cuando el viento se dirige hacia el sureste disminuye en gran medida la contaminación en el Distrito Federal, y viceversa cuando se dirige hacia el suroeste.

Para entender la importancia global de la contaminación en el Valle de México se deben hacer además de los estudios climatológicos estudios sociales y bioquímicos de tal forma que nos den una idea más precisa sobre los orígenes de los contaminantes y su dispersión.

INDICE

Introducción	2
Capítulo I	
Contaminación Ambiental	4
1.1 El problema de la contaminación en el Valle de México	4
1.2 Importancia de las circulaciones atmosféricas locales	7
1.3 Estabilidad atmosférica	8
1.4 Uso de modelos numéricos en problemas ambientales	8
Capítulo II	
Dinámica de la atmósfera	10
2.1 Ecuación de continuidad	10
2.2 Ecuación de momento	12
2.3 Ecuación de conservación de energía	13
2.4 La ecuación de estado	15
Capítulo III	
Datos y Metodología	17
3.1 Datos de la RAMA	17
3.1.1 Criterio de selección de eventos extremos	17
3.2 Datos de reanálisis NCEP/NCAR	19
3.3 Datos sinópticos del Sistema Meteorológico Nacional	20
3.4 Modelación numérica de la atmósfera	20
3.4.1 El modelo numérico (MM5)	20
3.5 Estabilidad atmosférica	24
Capítulo IV	
Resultados y Discusiones	26
4.1 Análisis sinóptico para los eventos extremos	26
4.2 Resultados del MM5	31
4.2.1 Circulación atmosférica de mesoescala para el día de máxima contaminación	31
4.2.2 Circulación atmosférica de mesoescala para el día de mínima contaminación	44
4.3 Análisis de la estabilidad atmosférica	52
4.4 Validación del modelo MM5	54
4.5 Comparación de eventos extremos	61
Conclusiones	62
Referencias	64

INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación atmosférica no es reciente. Los efectos de la contaminación se comenzaron a sentir desde la Revolución Industrial (siglo XVIII), cuando el uso de combustibles fósiles resultó en emisiones de contaminantes a la atmósfera. En este problema influyen factores de tipo socioeconómico relacionados con la cantidad de contaminantes producidos en un área determinada por actividades humanas, y de tipo meteorológico, que determinan la distribución espacial de dichos contaminantes.

La circulación atmosférica de niveles bajos es afectada por la orografía, ya que la presencia de las montañas actúa como barrera que evita la dispersión de contaminantes por los vientos. El uso del suelo también afecta los vientos a escala local, pues en zonas urbanas, como la Ciudad de México, el cambio de vegetación, por asfalto y concreto, genera contrastes térmicos que resultan en circulaciones locales (Jáuregui, 1993).

Las ciudades industrializadas y altamente pobladas presentan una elevada contaminación. Sin embargo, en algunos casos, como por ejemplo Amsterdam, Holanda, que se encuentra a nivel del mar, la ausencia de montañas y los vientos intensos, dispersan los contaminantes haciendo que el aire que respiran sus habitantes sea relativamente limpio.

Un mejor entendimiento de la circulación atmosférica en las ciudades y de los fenómenos involucrados en la generación y dispersión de contaminantes, permite actuar de forma que disminuyan los casos de alta contaminación. El predecir desastres ambientales en grandes ciudades debido a episodios de condiciones meteorológicas durante periodos de contingencia ambiental, como lo que ocurre en la Ciudad de México, resultará de gran ayuda. Para este efecto, el uso de modelos numéricos que simulan la circulación atmosférica de mesoescala se ha convertido en práctica común de los centros de predicción del tiempo. Aunque los modelos numéricos ya son capaces de reproducir circulaciones a escala sinóptica y de mesoescala, es aun necesario recurrir a técnicas adicionales de análisis para reproducir, de mejor manera, los microambientes de una ciudad.

Debido a que los contaminantes son transportados por los vientos y que los vientos influyen en su dispersión, es necesario contar con un modelo numérico capaz de simular la circulación atmosférica. Uno de los modelos de mayor aceptación entre los científicos es

el modelo de mesoescala de la Universidad Estatal de Pennsylvania y NACAR en su quinta versión (MM5), utilizado en esta tesis para simular los patrones de viento, así como los campos de presión y temperatura sobre el Valle de México.

El objetivo de esta tesis es mostrar que se puede simular la circulación atmosférica de mesoescala sobre el Valle de México, mediante la aplicación del modelo MM5, para identificar condiciones que resultan en buena o mala dispersión de contaminantes.

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera: En el Capítulo I se discute la importancia de las circulaciones atmosféricas en el problema de contaminación. En el Capítulo II se describe la dinámica de la atmósfera relacionada al modelo MM5. En el Capítulo III se describen los datos y metodología utilizadas en los análisis, incluyendo las características del modelo MM5 y las de las simulaciones. Los resultados de los experimentos para dos casos de estudio se analizan, evalúan y discuten en el Capítulo IV. Finalmente, se presentan conclusiones y se propone trabajo a futuro.

CAPITULO I

CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Debido a que las ciudades altamente pobladas e industrializadas, como la ciudad de México, presentan un alto índice de contaminación, es importante tratar de entender las condiciones que agravan el problema, para poder actuar de forma preventiva en eventos extremos de contaminación.

1.1.- El problema de la contaminación en el Valle de México

En 1991 se publicó la Ley Federal de Reglamento Sobre la Contaminación, que establece que cuando se alcanzan índices mayores a 250 imecas¹ (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire) se deben sacar de circulación, durante 24 horas, los vehículos que más contaminan (calcomanías uno y dos). De igual forma las fábricas que emiten una mayor cantidad de contaminantes a la atmósfera deben parar, ya que la salud de las personas se ve severamente afectada por los altos índices de contaminación. Para atacar este problema, no es suficiente conocer la cantidad de vehículos que circulan a diario y el número de fábricas operando, también es necesario tener en cuenta el comportamiento de factores meteorológicos, tales como presión, temperatura, rapidez y dirección de los vientos, precipitaciones, etc.

El Valle de México, situado a una altura aproximada de 2240 metros sobre el nivel medio del mar (S.N.M.M.), en la parte centro-sur del País (Fig. 1.1), está sujeto a la influencia de diversos sistemas meteorológicos de escala sinóptica, frentes y anticiclones generados tanto en el Golfo de México, como en el Océano Pacífico los cuales modifican la estabilidad atmosférica, llegando en ocasiones a inhibir el movimiento vertical del aire principalmente en invierno. En invierno, el Valle de México presenta un clima similar al de ciudades de latitudes medias, con lluvias esporádicas relacionadas con nortes (Vázquez-Aguirre, 2000). Lo más relevante en invierno, para cuestiones de contaminación, es la ocurrencia de las llamadas inversiones térmicas, cuando el perfil vertical de temperatura (T) aumenta en vez de disminuir ($dT/dz > 0$), que provocan el

¹ El IMECA da la calidad del aire, se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, dentro de una región determinada.

estancamiento de los contaminantes en la superficie. En verano, el clima es más de tipo tropical, lloviendo con cierta regularidad por las tardes, por causa de convección profunda en nubes cumulonimbus.

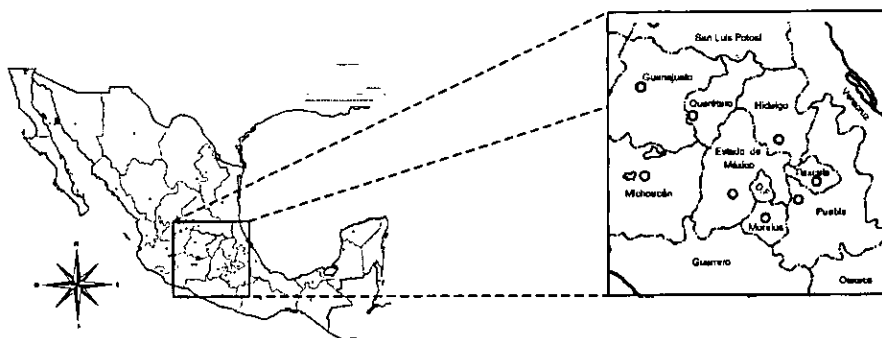


Figura 1.1.- Ubicación del Distrito Federal, en la zona centro-sur de la República Mexicana.

Modelar la circulación atmosférica del Valle de México es un reto, debido a su ubicación geográfica, pues está rodeada por montañas al sur, este y oeste (Fig. 1.2). Al sureste existen dos volcanes, el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, que en promedio están a 5000 m S.N.M.M. Al norte del Valle hay una serie de montañas de unos 3000 m S.N.M.M. Esta orografía provoca que con frecuencia, la circulación de los vientos no sea capaz de renovar el aire en algunos lugares del Valle. Los vientos predominantes del norte transportan la contaminación de la zona industrial hacia la zona suroeste donde se estancan (Fig. 1.3). La altitud a la que se encuentra el Valle de México favorece la formación de ozono (Pérez-García y Nickerson, 1997), que agrava el problema de la contaminación.

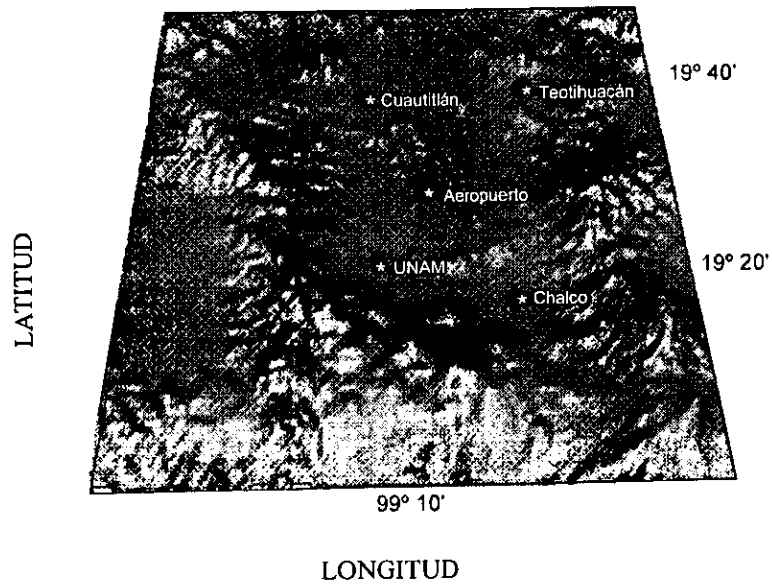


Figura 1.2.- Orografía del Valle de México

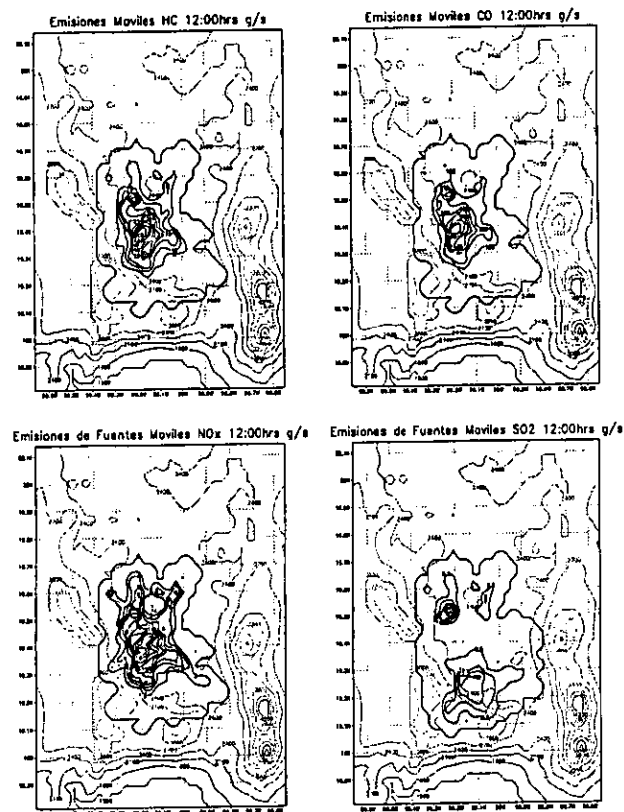


Figura 1.3.- Distribución de contaminantes (g/s) para un día promedio a las 12:00h, sobre la Ciudad de México. Simulada por el modelo numérico MEMO. (De Acuerdo a García-Reynoso, 1999).

1.2.- Importancia de las circulaciones atmosféricas locales

Para el Valle de México, se han realizado estudios con el fin de identificar la naturaleza y causa de las altas concentraciones de partículas con diámetro menor a $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), partículas con diámetro menor a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) y ozono (O_3). También se han analizado los procesos que predominan en la capa límite (capa en la cual el viento siente el efecto de la fricción) y que resultan en eventos de alta contaminación. La máxima concentración de contaminantes parece ocurrir cuando los vientos que provienen del noreste, cerca de la superficie durante la noche, y los perfiles matutinos de temperatura potencial (la temperatura que tendría una partícula si se encontrase a nivel del mar) presentan alta estratificación (Bossert, 1997).

Utilizando radio sondeos y un radar de 915-MHz, Doran et al. (1998) obtuvieron las direcciones dominantes del viento en el Valle de México, concluyendo que las concentraciones de ozono son mayores en el suroeste, debido a la orografía regional y a que los vientos en la capa límite son ligeros y afectables por las pequeñas variaciones de las condiciones sinópticas diarias. Los vientos nocturnos en el Valle de México, se caracterizan por un régimen estratificado estable. Al medio día, cuando se aprecian los máximos de contaminación, predomina el viento sinóptico (escala mayor a 500 km) que se sobrepone al viento local, debido a una transferencia de momento durante el periodo de máxima convección (Bossert, 1997).

Los vientos locales generados térmicamente en el Valle de México, tienden a restringir la ventilación del aire contaminado cerca de la superficie (Jáuregui, 1988). Esto, aunado al relieve topográfico que rodea al Valle contribuye a mantener un alto índice de contaminación. El viento en el Valle de México se caracteriza por viento de montaña durante la noche y la madrugada, ya que los vientos convergen sobre la superficie del Valle. Al mediodía, domina el viento de valle, cuando existe convergencia sobre las montañas, ligeramente debilitada por la turbulencia y los vientos locales.

Un suelo húmedo con una capa límite somera, térmicamente inestable e inicialmente seca, al irse calentando produce un incremento en las lluvias locales. Estas son menores cuando la atmósfera es relativamente húmeda y no existe un forzamiento térmico suficiente para iniciar un movimiento convectivo (Pan et al., 1996). La dispersión de contaminantes se ve favorecida por los movimientos convectivos. Para que éstos se

presenten debe existir una atmósfera inestable, por lo cual en este trabajo se debe analizar la estabilidad atmosférica.

1.3.- Estabilidad atmosférica.

El movimiento vertical de una parcela de aire, depende de la estabilidad atmosférica. Si la parcela no saturada se encuentra en equilibrio termodinámico e hidrostático con sus alrededores, la diferencia entre la temperatura de la parcela y la del medio o alrededores, debe ser cero, y el gradiente vertical de temperatura de aproximadamente 10 °C/km. En el caso de una atmósfera húmeda este valor es menor debido a que el calor específico de una parcela con vapor de agua es mayor que el calor específico de una parcela seca. Esto implica que una parcela húmeda puede mantener su temperatura a una altura mayor que una parcela seca (Panchev, 1985).

Debido a que sería imposible muestrear en todos los puntos de la ciudad para poder determinar la estabilidad atmosférica, es de gran ayuda contar con un modelo numérico de mesoescala para reproducir las condiciones meteorológicas diarias.

La filosofía detrás de los modelos de mesoescala es que es posible reproducir circulaciones de pequeña escala, resultado de contrastes en el uso de suelo y de la orografía. Para ello, la información de estos parámetros debe ser de alta resolución espacial, con el fin de que el flujo de gran escala, sienta los efectos de dichos forzantes de superficie, para que el modelo sea capaz de simular el complejo movimiento del viento de mesoescala, cerca de la superficie.

1.4.- Uso de modelos numéricos en problemas ambientales

Los usos de modelos de mesoescala incluyen predicción del tiempo, simulación de transporte de contaminantes (trazadores), cambios climáticos regionales, predicción y simulación de otros procesos ambientales, entre los que se encuentran: el estudio del origen y destino de la lluvia ácida; el estudio de desastres ambientales como los ocurridos durante los periodos de quema de los pozos petroleros en Kuwait; la determinación del viento nuclear creado por la explosión de una núcleo eléctrica como Chernovil; la determinación de las condiciones climáticas en el Valle de San Joaquín, California, en los días de mayor contaminación (Warner, 1997); el estudio de la influencia de la fricción

causada por la estructura urbana en la convergencia del viento sobre la ciudad de Denver, Colorado (Riehl y Herkhof, 1972), la simulación de un frente frío (Chen et al., 1997), la relación entre los campos de vientos y la distribución de ozono sobre el Valle de México en eventos extremos de contaminación (Pérez-García y Nickerson, 1997).

Entre los modelos numéricos de mesoescala más conocidos está el “Modelo de Mesoescala Versión 5” (MM5), desarrollado en la Universidad Estatal de Pennsylvania, por Anthes y Warner (1978), que fue enriquecido en el National Center for Atmospheric Research (NCAR). En México este modelo se ha implementado para el estudio de la dinámica atmosférica sobre la República Mexicana (Magaña y Pérez, 1998), y en la simulación del viento superficial y de altura en los alrededores de la Central Núcleo eléctrica de Laguna Verde (Hernández-Grajales, 1999). El MM5 ha demostrado ser de gran utilidad para estudios de pronóstico numérico del tiempo y de variabilidad climática en la República Mexicana, logrando predecir patrones de lluvias y de vientos de superficie (Magaña y Pérez, 1998).

Los modelos atmosféricos son cada vez más accesibles a la comunidad meteorológica mundial. Anteriormente se requería de computadoras muy sofisticadas, como supercomputadoras, tanto para la simulación como para la visualización. Hoy en día se dispone de paquetes como *Grid Analysis Display System* (GrADS) o *Vis5D* (Chen, 1996) de dominio público, que facilitan la visualización de resultados. Más importante aún es el hecho de que recientemente las microcomputadoras de la familia PENTIUM-III, son de gran capacidad y rapidez (600 MHz), por lo que basta una microcomputadora (PC), para correr el modelo, lo que ha permitido un aumento sustancial de estudios de meteorología de mesoescala en México.

CAPÍTULO II

DINAMICA DE LA ATMÓSFERA

En este capítulo se dan las bases del modelo, describiendo las ecuaciones que gobiernan la dinámica de un fluido geofísico, en un sistema de referencia en rotación. Las ecuaciones en las cuales se basa el estudio de la circulación atmosférica resultan de la aplicación de los principios de conservación de masa, de momentum y de energía.

2.1.- Ecuación de continuidad

El requerimiento de la conservación de masa de un fluido impone ciertas restricciones sobre el campo de la velocidad y aunque estas restricciones no son estrictamente cinemáticas es necesario tenerlas en consideración (Batchelor, 1967). La conservación de masa obtenida con base en la postulación de un volumen de control euleriano establece que

$$dM = \rho dV \Rightarrow M = \iiint \rho dV \quad (2.1)$$

donde M es la masa, V el volumen y ρ la densidad del fluido. Derivando la ecuación anterior respecto al tiempo (t).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint \rho dV \quad (2.2)$$

Utilizando el teorema del transporte de Reynolds o la regla de Leibnitz se obtiene

$$\frac{dM}{dt} = \iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint \rho (\hat{n} \cdot \vec{u}) dS \quad (2.3)$$

donde S es la superficie que envuelve el fluido y el vector \vec{u} representa la velocidad con la cual se mueve el fluido por la superficie.

Si la masa se conserva:

$$\iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint \rho (\hat{n} \cdot \vec{u}) dS = 0 \quad (2.4)$$

Aplicando el teorema de Gauss y simplificando se obtiene la ecuación de continuidad que expresa el principio de conservación de masa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u}) \quad (2.5)$$

El cambio total de la densidad, incluye su cambio local y su cambio advectivo

$$\frac{d\rho}{dt} = \vec{u} \cdot \nabla \rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.6-a)$$

$$\nabla \cdot \rho \vec{u} = \rho \nabla \cdot \vec{u} + \vec{u} \cdot \nabla \rho \quad (2.6-b)$$

Mediante las ecuaciones (2.6-a) y (2.6-b) se obtiene la ecuación de continuidad, la cual establece que el cambio total de la densidad es compensado por la divergencia de la velocidad

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.7)$$

Siendo $\frac{d(\)}{dt} = \frac{\partial(\)}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla(\)$

Si existen fuentes o sumideros de masa (Q_m), por ejemplo que entre humedad del océano o que halla precipitaciones. Entonces la ecuación (2.7) quedaría como:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = Q_m \quad (2.8)$$

2.2.- Ecuación de momento

La ecuación de balance de momento, es una expresión de la segunda Ley de Newton, la cual muestra que en mecánica de fluidos la densidad por la aceleración es igual a la fuerza neta por unidad de volumen aplicada sobre el fluido. En un sistema de referencia inercial fijo, denotado por el subíndice I en coordenadas cartesianas de forma vectorial, puede ser escrita como:

$$\rho \frac{d_I(\vec{u})}{dt} = \vec{F} \quad (2.9)$$

Cuando el cambio de momento del fluido es analizado desde un sistema en rotación, como en el caso de la tierra que rota con una velocidad angular ($\vec{\Omega}$) la ecuación (2.9) puede ser escrita como (e.g. Pedlosky, 1979):

$$\left(\frac{d\vec{u}}{dt} \right)_I = \left(\frac{d\vec{u}}{dt} \right) + 2\vec{\Omega} \times \vec{u} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} \quad (2.10)$$

el primer término de la derecha de la ecuación (2.10), es la aceleración ejercida sobre el mismo elemento observado desde el nuevo sistema de referencia. Los términos restantes son las aceleraciones aparentes, producto del cambio de sistema de referencia, conocidas como: aceleración de Coriolis, aceleración centrípeta y aceleración debida a la variación temporal de la velocidad de rotación de la tierra respectivamente. Esta última resulta despreciable en las escalas de tiempo que se consideran en este trabajo $\frac{d\vec{\Omega}}{dt} = 0$. Las fuerzas por unidad de masa que actúan sobre una parcela de fluido en un sistema inercial se obtiene (e.g. Pond y Pickard, 1983):

$$\left(\frac{d\vec{u}}{dt} \right)_I = \vec{g} + \frac{1}{\rho} \left\{ -\nabla p + \frac{\mu}{3} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2 \vec{u} \right\} \quad (2.11)$$

donde el primer término de la derecha es la aceleración debida a la gravedad, el segundo término es la aceleración del gradiente de presión (hidrostática) y los términos subsecuentes representan las fuerzas viscosas o friccionales por unidad de masa. Al igualar las ecuaciones (2.10) y (2.11), se llega a la ecuación de movimiento de un fluido en un sistema en rotación.

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{u} + \frac{1}{\rho} \left\{ -\nabla p + \frac{\mu}{3} \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2 \vec{u} \right\} + \vec{g}_a \quad (2.12)$$

Siendo $\vec{g}_a = \vec{g} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r})$

Esta ecuación es utilizada para describir la circulación de la atmósfera desde un sistema en rotación con velocidad angular ($\vec{\Omega}$), donde el término del lado izquierdo representa la aceleración de la parcela, en el lado derecho de la ecuación, el primer término representa la aceleración de Coriolis, el segundo el gradiente de presión, los dos términos subsecuentes son las fuerzas viscosas o de fricción y el ultimo término representa la aceleración debida a la gravedad (incluyendo la aceleración centrífuga), conocida como gravedad aparente (la cual depende de la latitud).

2.3.- Ecuación de conservación de energía

La conservación de energía o primera ley de la termodinámica, establece que la energía interna ganada por una parcela de fluido es igual al calor recibido menos el trabajo mecánico realizado por unidad de masa y unidad de tiempo.

$$\frac{dU}{dt} = Q - W = Q - p \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.13)$$

donde $U = C_v T$ es la energía interna por unidad de masa, Q es la razón de ganancia de calor por unidad de masa, W el trabajo, $\alpha = \frac{1}{\rho}$ el volumen específico y p la presión

termodinámica. Dado que los fluidos geofísicos no tienen una fuente interna de calor, el calor ganado de una parcela de fluido será el resultado de la difusión lateral. Substituyendo la energía interna y usando la ley de Fourier¹ para el calor se obtiene:

$$\rho \frac{d(C_v T)}{dt} = k \nabla^2 T - \rho p \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.14)$$

donde k es la conductividad térmica del fluido, C_v es la capacidad calorífica a volumen constante y T es la temperatura absoluta. Al derivar el último término de la derecha y considerando la capacidad calorífica a volumen constante como constante, se obtiene:

$$\rho C_v \frac{dT}{dt} - k \nabla^2 T = \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (2.15)$$

El término de la derecha puede ser sustituido de la ecuación de continuidad (2.10), resultando:

$$\rho C_v \frac{dT}{dt} + p(\nabla \cdot \vec{u}) = k \nabla^2 T \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16), indica que cambios en el campo de la temperatura producen modificaciones en el flujo compresible.

2.4.- La ecuación de estado

Para cualquier fluido, la densidad es una función de la presión y de la temperatura $\rho = \rho(P, T)$. El estado termodinámico de la atmósfera en cualquier punto se determina por los valores de la presión, la temperatura y la densidad en el punto. Dichas variables están relacionadas entre si por la ecuación de estado. En el caso del aire seco en la atmósfera la ecuación de estado se aproxima a la ecuación de un gas ideal (Holton, 1992):

¹ La ley de Fourier se expresa como (e.g. Cushman-Roainsin, 1994): $\rho Q = k \nabla^2 T$

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2.17-a)$$

donde R es la constante de los gases para el aire seco, $R = C_p - C_v$; siendo C_p y C_v la capacidad calorífica a presión (termodinámica) y volumen constante respectivamente; con valores de $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C_v = 718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y $R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Cushman-Roisin, 1994).

La termodinámica del aire seco, se basa en la ecuación (2.19). Obteniendo su derivada total (derivada lagrangiana):

$$P \frac{d\alpha}{dt} + \alpha \frac{dP}{dt} = R \frac{dT}{dt} \quad (2.17-b)$$

La ecuación de estado de un gas perfecto para el vapor de agua se puede escribir como (e.g. Gordon, 1965)

$$e\alpha_v = R_v T \quad (2.18)$$

Siendo $R_v = \frac{1}{\varepsilon} R = 461 \text{ KJ/ton/grado}$ donde ε es la razón del peso molecular del vapor de agua al del aire seco y es igual a 0.622. mientras que α_v es el volumen específico del vapor de agua, e es la presión parcial del vapor de agua, conocida mas generalmente como la tensión del vapor de agua.

El vapor de agua es un constituyente de la atmósfera junto con otros gases; su presencia en la atmósfera forma una mezcla llamada aire húmedo.

Para modelar la circulación atmosférica se deben resolver estas ecuaciones. Debido a la complejidad, se recurre a métodos numéricos. En el presente trabajo, se ha empleado el modelo MM5, que resuelve las ecuaciones anteriores expresadas en flujos de momento, de

masa y de calor, en coordenadas sigma. La coordenada vertical (σ) es la presión normalizada respecto a la superficie (Panchev, 1985):

$$\sigma = \frac{P - P_t}{P_s - P_t} \quad (2.19)$$

Donde, P_s es la presión en la superficie, P_t es la presión en el tope (100 HPa). La coordenada vertical sigma es adimensional y decrece monótonamente con la altura desde 1 hasta 0 en el límite de la atmósfera.

CAPÍTULO III

DATOS Y METODOLOGÍA

Para seleccionar los eventos extremos de contaminación se utilizaron datos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA). Posteriormente, con la finalidad de simular la circulación atmosférica en el Valle de México, se utilizaron datos para alimentar el MM5: los reanálisis del *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y del *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), (Kalnay et al., 1996). Finalmente el modelo se calibró utilizando datos de superficie de la RAMA y datos sinópticos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

3.1.- Datos de la RAMA

Los datos obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental, en sus 33 estaciones, son medias horarias de temperatura, humedad relativa, contaminantes, así como, dirección y magnitud del viento.

Para seleccionar los eventos extremos, utilizamos las concentraciones de ozono (O_3) y partículas suspendidas con diámetro menor a $10 \mu m$ (PM_{10}) los cuales son los elementos más importantes en los índices de contaminación metropolitana y son utilizados por la Secretaría del Medio Ambiente para implementar el plan de contingencia ambiental. Este establece que al existir concentraciones mayores a 250 imecas en ambos contaminantes, se debe poner en marcha el programa “doble no circula”.

Los experimentos numéricos usando el MM5, se realizaron para el Valle de México, haciendo un análisis de los días de máxima y mínima contaminación en el Distrito Federal y áreas conurbadas. Para ello se utilizan sólo las estaciones que contaban con los datos completos de O_3 y PM_{10} , de forma ininterrumpida durante el año de 1996.

3.1.1.- Criterios de selección de eventos extremos

Para estudiar la circulación atmosférica en el Valle de México, se seleccionaron cuatro estaciones meteorológicas: Pedregal y Plateros, puesto que se encuentran en una de las zonas más contaminadas de la Ciudad de México (Doran et al., 1998) y con gran

densidad de población. Tlanepantla es el tercer punto de análisis ya que esta situada en la zona noroeste, donde se encuentra gran parte de la industria del Valle de México. Finalmente se consideró Xalostoc situada en la zona noreste, de donde vienen los vientos dominantes (Bossert, 1997). Se hizo un promedio de la información de las cuatro estaciones, con la finalidad de seleccionar los eventos extremos de contaminación y determinar la circulación atmosférica de superficie para los días de máxima y mínima contaminación. La selección de estos días se realizó con los datos de la RAMA obteniendo los máximos y mínimos de las concentraciones de ozono (O_3), (Fig. 3.1) y de partículas suspendidas en el aire, con diámetro menor a $10 \mu m$ (PM_{10}), (Fig. 3.2), para 1996.

Los días de máxima y mínima contaminación seleccionados fueron el 29 de octubre y el 9 de agosto de 1996, respectivamente.

Para completar la información de la RAMA se utilizan los datos de temperatura y vientos superficiales de algunas estaciones del Sistema Meteorológico Nacional.

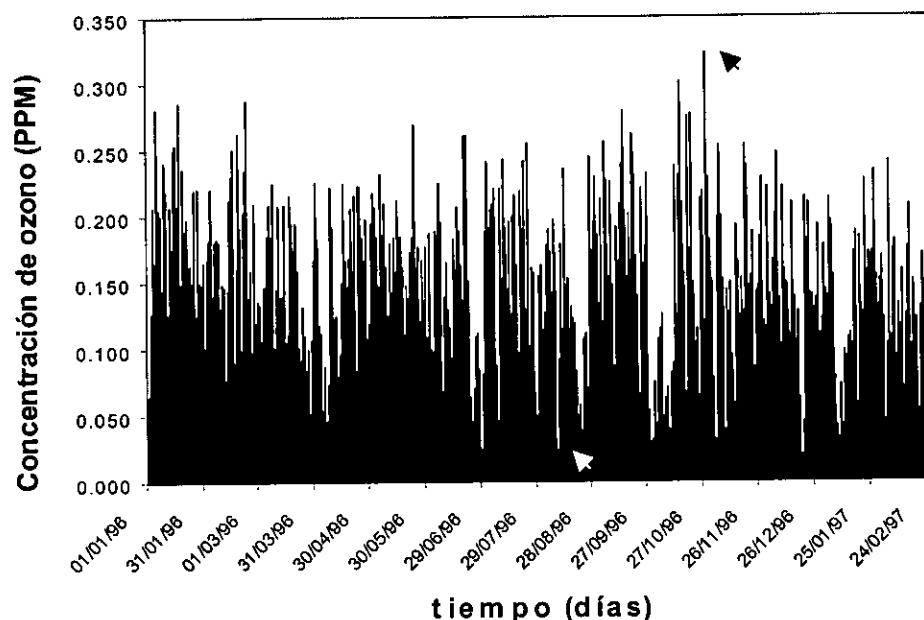


Figura 3.1.- Concentraciones de ozono (O_3) sobre el Distrito Federal durante 1996. Las flechas indican el día de mínima contaminación (flecha blanca), y el día de máxima contaminación (flecha negra).

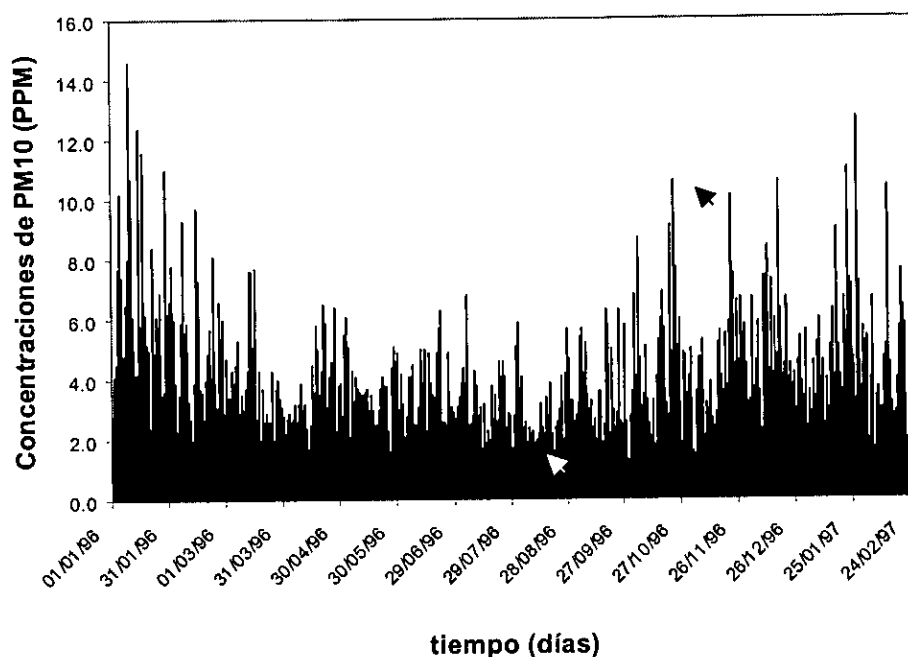


Figura 3.2.- Concentraciones de PM₁₀ sobre el Distrito Federal durante 1996. Las flechas indican el día de mínima contaminación (flecha blanca), y el día de máxima contaminación (flecha negra).

3.2.- Datos de reanálisis NCEP/NCAR

Para establecer los vientos y condiciones meteorológicas de escala sinóptica se utilizan los datos globales de Reanálisis NCEP/NCAR, y dispuestos en servidores de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), con medias diarias con una resolución de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Kalnay et al, 1996), los cuales sirven como condiciones iniciales y a la frontera para el MM5.

En el presente caso, se utilizaron datos tales como: altura geopotencial, presión reducida a nivel del mar, humedad relativa, temperatura, temperatura superficial del océano, al igual que los valores de las componentes zonal (u) y meridional (v) de los vientos. Algunos de ellos, se obtienen a diferentes presiones como 1000, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 150, 100 mb y a nivel de superficie.

Una vez realizadas las simulaciones con el MM5 es necesario validarlas por lo que se utilizan los datos de la RAMA y del SMN.

3.3.- Datos sinópticos del Sistema Meteorológico Nacional

Los datos sinópticos del Sistema Meteorológico Nacional, son valores respaldados cada seis horas para temperatura, humedad, presión, radiación, así como rapidez y dirección del viento. En este caso, se utilizaron dos estaciones de la Red Sinóptica Básica de Superficie del SMN, para los días 29 de octubre y 9 de agosto de 1996, que se encuentran en el área de estudio, estas son la 76675 en Toluca, Edo. Mex. y la 76727 en Cuautla, Mor.

3.4.- Modelación numérica de la atmósfera

El mecanismo que pone en movimiento a la atmósfera son los contrastes térmicos que generan gradientes de presión los cuales finalmente producen la circulación atmosférica.

La circulación de la atmósfera se puede simular mediante las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido geofísico; balance de momento, balance de la energía, balance de masa y la ecuación de estado, que describen el movimiento de un fluido geofísico sujeto a condiciones de frontera, como los océanos y las montañas, y sometido a efectos de fuentes de energía como la radiación solar. Por lo tanto, se puede describir la evolución de un fluido a partir de su estado inicial y tomando en cuenta los mecanismos físicos que influyen en él.

3.4.1.- El modelo numérico (MM5)

Para el estudio de la dinámica de la atmósfera en el Valle de México, se utilizó un modelo numérico de mesoescala MM5 (Mesoscale Model Versión 5), que resuelve sistemas atmosféricos mayores de 10 km., usando las ecuaciones primitivas no hidrostáticas (Dudhia et al., 1999). El modelo es capaz de simular los cambios locales, advectivos, tendencia de presión superficial, gradiente de presión, fuerza de Coriolis, gradiente de temperatura y las fuerzas viscosas.

La estructura del MM5 se muestra en la figura 3.3, y consiste en cuatro pre-procesadores: *Terrain* se encarga de definir el dominio de trabajo, la resolución del modelo, los dominios anidados, y de asignar los valores de la topografía y las características del uso de suelo. *Datagrid* asigna datos de viento, temperatura, humedad,

etc. a cada punto de los dominios de trabajo. Esta información puede ser histórica, obtenida de archivos meteorológicos, para estudios de diagnóstico y simulación, o en tiempo real para pronóstico operativo del tiempo, MM5 puede alimentarse con datos de la salida de modelos globales para estudios de variabilidad climática. *Rawins* realiza análisis objetivo de la información utilizando datos de radiosondeos o de estaciones de superficie para mejorar los campos de mesoescala utilizados como condición inicial. *Interp* interpola los datos iniciales de superficies de presión a superficies en coordenadas verticales sigma, las cuales permiten una representación más adecuada de la orografía.

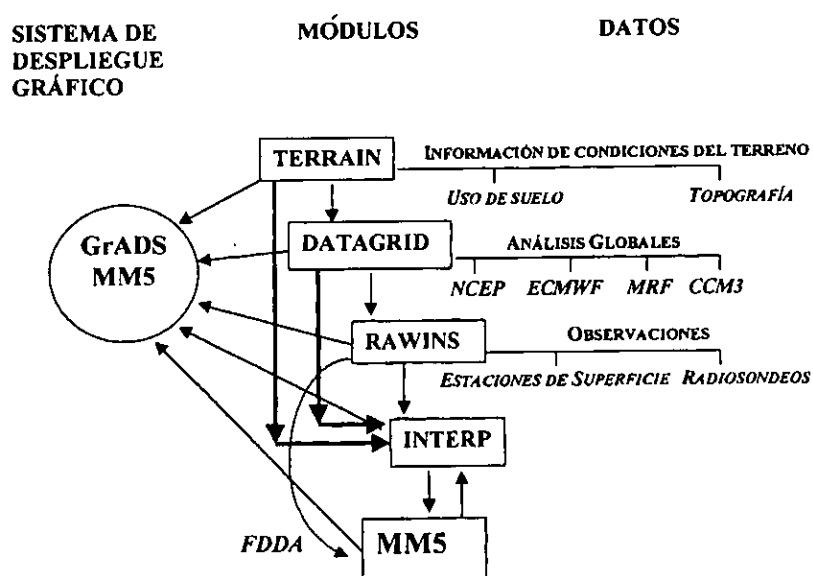


Figura 3.3. Diagrama de flujo del MM5
(de acuerdo a Magaña y Pérez, 1998)

Después de los procedimientos anteriores se tienen listos los datos para el modelo de mesoescala (Magaña y Pérez, 1998). Este resuelve las ecuaciones antes mencionadas expresadas en términos de flujos en coordenadas sigma, mediante diferencias finitas adelantadas, usando el método semi-implícito (Haltiner y Williams, 1979), sobre una malla numérica Arakawa tipo B (Fig. 3.4) e incluye parametrizaciones como son:

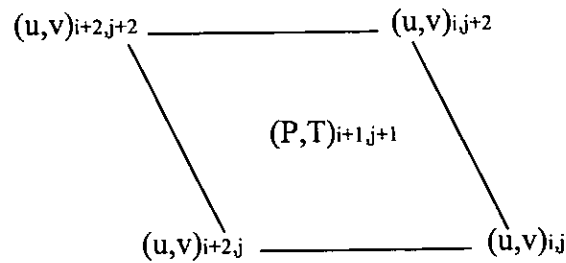


Figura 3.4.- Malla Arakawa - B.

- a) El esquema para nubes cúmulus desarrollado por Kuo (1971).
- b) El esquema de capa límite planetaria, desarrollada por Blackadar (1962) caracterizada por una capa de mezcla lineal en su capa superficial y limitada por un valor constante l_∞ de acuerdo con la siguiente relación.

$$l = \frac{kz}{1 + \frac{kz}{l_\infty}} \quad (3.1)$$

Donde l es el espesor de la capa de mezcla, z es la altura y k es la viscosidad turbulenta. Si l es muy pequeño, la relación tiende a ser lineal.

- c) El esquema de radiación atmosférica desarrollado por Kiehl (1978).

En el presente trabajo, se utilizaron dos mallas anidadas concéntricas (a razón de 3 a 1), tomando como centro los 19.5 °N y 99 °W. La malla de 8 km. para el Valle de México, cubre un área de 61,504 km², y la malla de menor resolución (24 km.) utilizada para sus alrededores, cubre un área de 553,536 km². Cada una de las mallas concéntricas es de 31 por 31 puntos en una proyección Lambert Conformal. La resolución de la topografía (Fig. 3.5) es de 5' (9.26 km.) y la del uso de suelo (Fig. 3.6) de 10' (18.52 km.).

Los valores iniciales y a la frontera fueron obtenidos de los reanálisis NCEP/NCAR. El paso de integración temporal utilizado en el MM5 es de 24 s.

La salida del modelo permite de inmediato visualizar los campos de superficie como son precipitación, temperatura, presión o vientos. Para los análisis de los campos de altura, generalmente se interpola de coordenadas sigma, en las que el modelo trabaja, a coordenadas de presión, utilizadas entre la comunidad meteorológica operativa (Magaña y Pérez, 1998).

Una vez que se obtienen los resultados al simular la circulación atmosférica a 24 o 48 h, se visualizan los campos de vientos, presiones, temperaturas o precipitaciones mediante el *Grid Analysis Display System* (Holt y Fiorino, 1995).

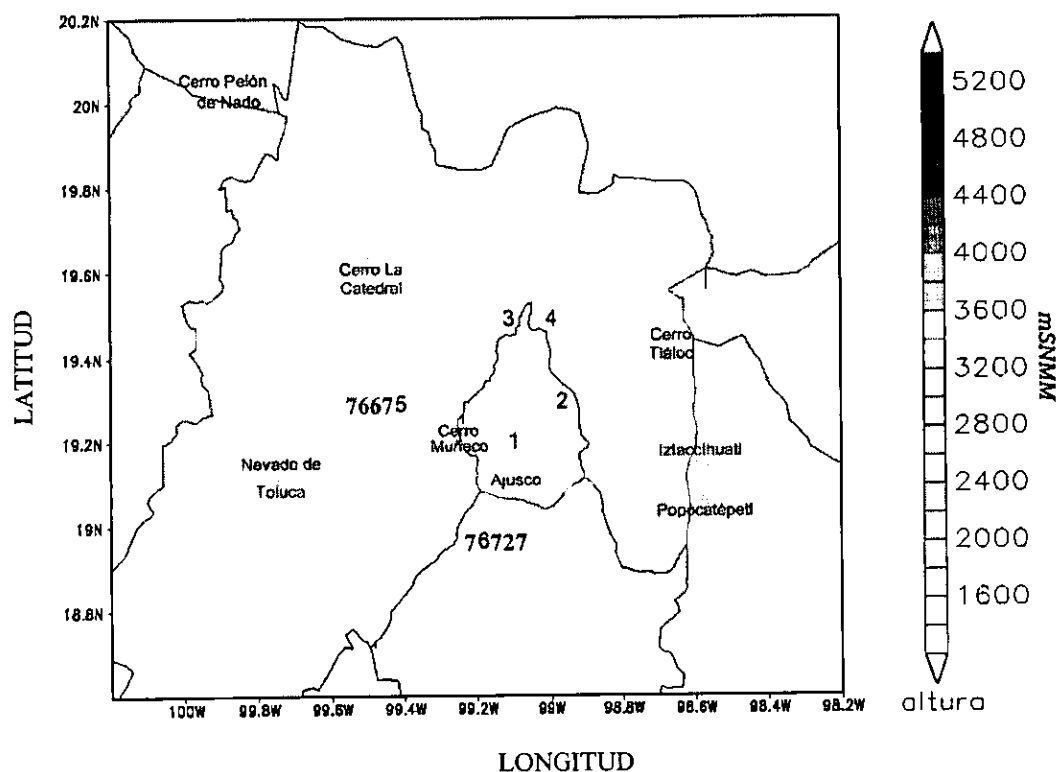


Figura 3.5.- Topografía del Valle de México (mSNMM): Ubicación de las cuatro estaciones de la RAMA: Pedregal (1), Hangares (2), Tlanepantla (3), Xalostoc (4) y ubicación de dos observatorios de la Red Sinóptica Básica de Superficie del SMN 76675 y 76727.

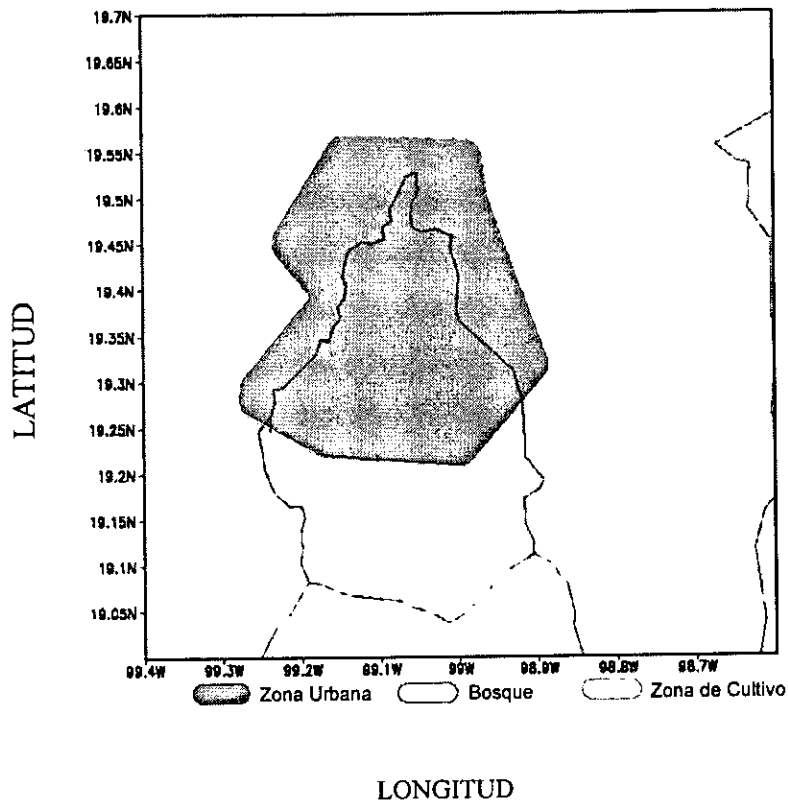


Figura 3.6.- Uso de suelo del Valle de México.

3.5.- Estabilidad atmosférica.

La dispersión de contaminantes depende en gran medida de los movimientos convectivos de la atmósfera, los cuales a su vez dependen de la estabilidad. En el caso de un sistema de coordenadas isobáricas, la estabilidad atmosférica es analizada mediante el parámetro de estabilidad (σ^*), expresado como (e.g. Holton, 1992):

$$\sigma^* = -\frac{\alpha}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (3.2)$$

Donde, θ es la temperatura potencial¹, α es el volumen específico y p es la presión hidrostática. La estabilidad atmosférica está asociada con los cambios verticales de masa de aire, bajo la influencia de la gravedad (Panchev, 1985). La ocurrencia de inestabilidad es muy importante en la dinámica de fluidos geofísicos, en particular en meteorología, pues a escala sinóptica la atmósfera se encuentra siempre con una estratificación estable debido a que cualquier región inestable que se desarrolle, es rápidamente estabilizada mediante procesos convectivos que son de gran interés a mesoescala.

En este trabajo, la estabilidad se analizó tomando en cuenta la evolución de los perfiles de temperatura desde la superficie hasta los 700 mb. Este análisis se llevó a cabo en un punto de la malla, en intervalos de seis horas, de las 06:00 h. a las 24:00 h. para cada uno de los eventos extremos de contaminación.

¹ La temperatura potencial $\theta = T \left(\frac{P_s}{P} \right)^{\frac{R}{C_p}}$. Aquí se tiene un estado definido para la presión P a la temperatura T hasta otro estado en donde la presión P_s y la temperatura θ .

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El modelo MM5 es utilizado para simular la circulación de mesoescala en el Valle de México, para los días de condiciones extremas de contaminación (9 de agosto y 29 de octubre, de 1996). El sistema se integró por tres días, resolviendo para el campo de viento, la temperatura y la presión reducida a nivel del mar. La información vertida por el MM5 se visualizó mediante el GrADS con el fin de analizar la evolución de los campos cada dos horas.

Con registros de concentraciones de monóxido de carbono (CO) e intensidad y dirección del viento obtenidos de las cuatro estaciones de la RAMA, se calibró el modelo.

Las condiciones sinópticas en la atmósfera influyen de manera determinante en la circulación atmosférica a mesoescala, por lo cual se analizan primero las condiciones sinópticas para los eventos extremos, antes de analizar las características de la circulación atmosférica a mesoescala.

4.1.- Análisis sinóptico para los eventos extremos

El campo de viento y la presión reducida a nivel del mar, para los eventos extremos de contaminación, se analizaron durante tres días (dos días antes y el día seleccionado). En el caso de mínima contaminación, se puede apreciar que el viento sinóptico sobre el Valle de México, se atenúa, mientras la onda de presión se desplaza del Golfo de México hacia el Valle (Fig. 4.1), quedando la dorsal o eje de simetría¹ sobre el Golfo. El 8 de agosto, los vientos que van hacia el suroeste del Valle se intensifican (Fig. 4.2), situación que se repite el día 9 (Fig. 4.3), cuando se presenta el mínimo índice de contaminación. La onda de presión se amplifica una vez que atraviesa la zona montañosa, apareciendo una segunda dorsal sobre la península de Baja California, y sobre el área de estudio donde se encuentra el valle de la onda de presión.

¹ La dorsal o eje de simetría es la línea que une todas las crestas en un grupo de ondas

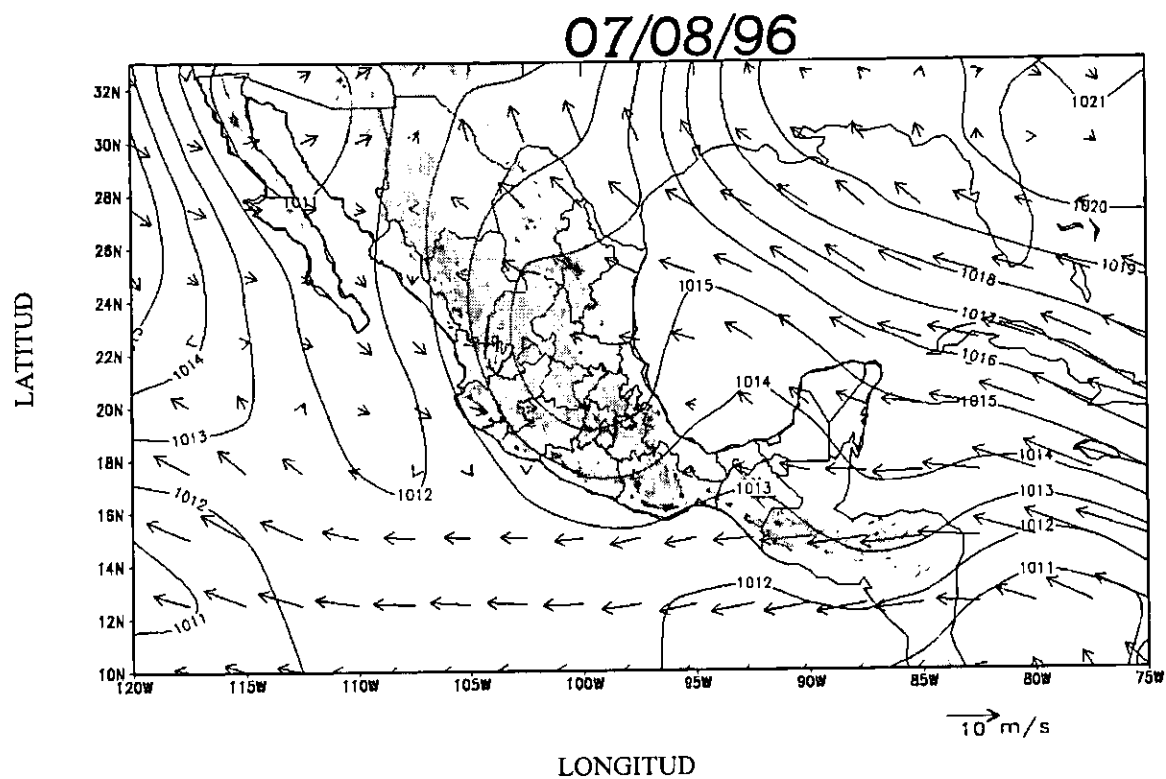


Figura 4.1.- Presión reducida a nivel del mar (mb) y viento sinóptico de superficie, para el día 7 de agosto de 1996.

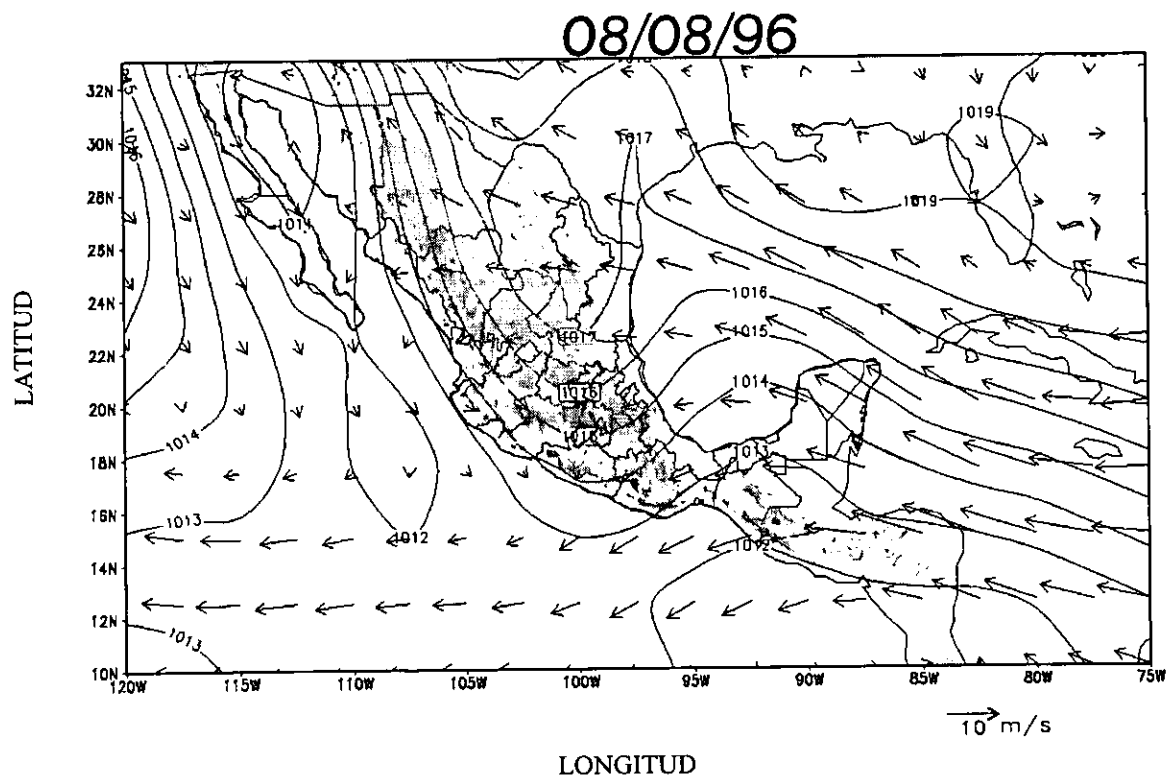


Figura 4.2.- Como en la figura 4.1 pero para el 8 de agosto de 1996.

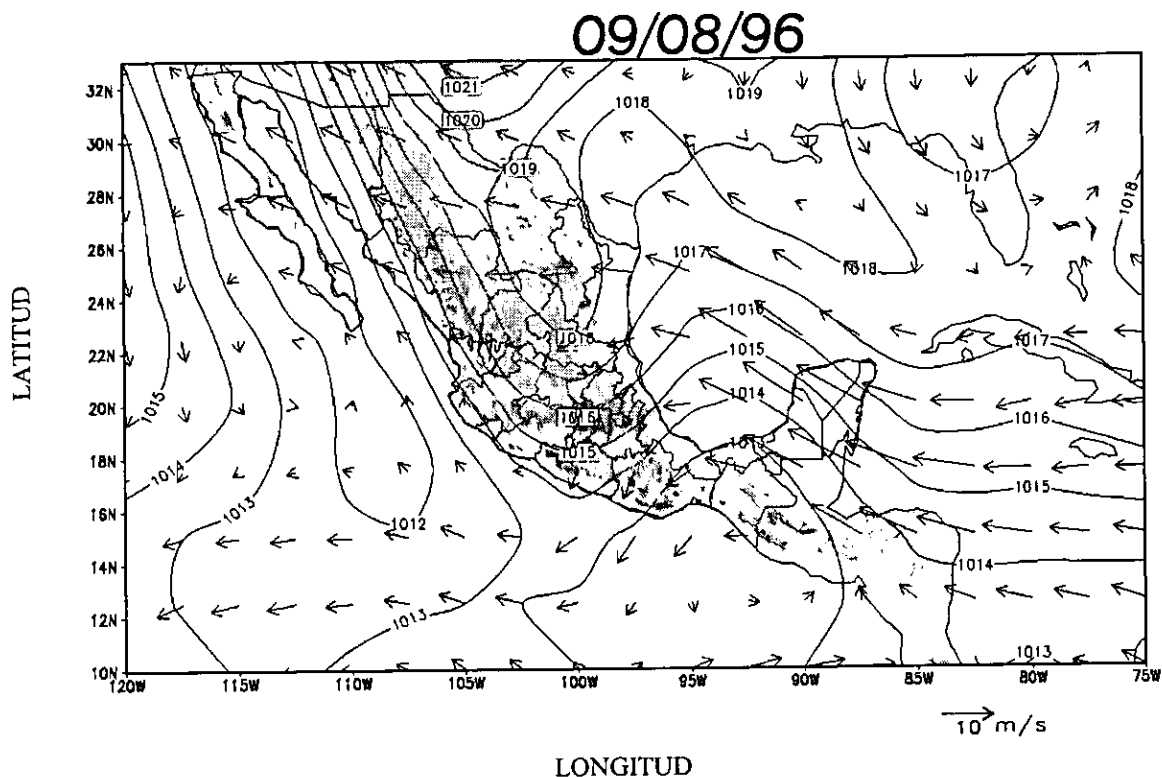


Figura 4.3.- Como en la figura 4.1 pero para el 9 de agosto de 1996.

En el caso de máxima contaminación, se observa que en los dos días previos a este evento, se encuentran dos centros de alta presión localizados sobre el centro de la República Mexicana y al norte de Florida, provocando vientos intensos del sureste (Fig. 4.4). La alta presión sobre Florida se desplazó hacia el oeste al día siguiente, y la presión sobre la República aumentó, generando un gradiente horizontal de presión más intenso (Fig. 4.5). En el día de máxima contaminación, la alta presión que se desplazo desde Florida comienza a debilitarse conforme avanza hacia la República Mexicana, además se observa una línea de convergencia² sobre el Valle de México (Fig. 4.6), la cual inhibe la dispersión de contaminantes.

² La línea de convergencia es un área donde se encuentran los vientos

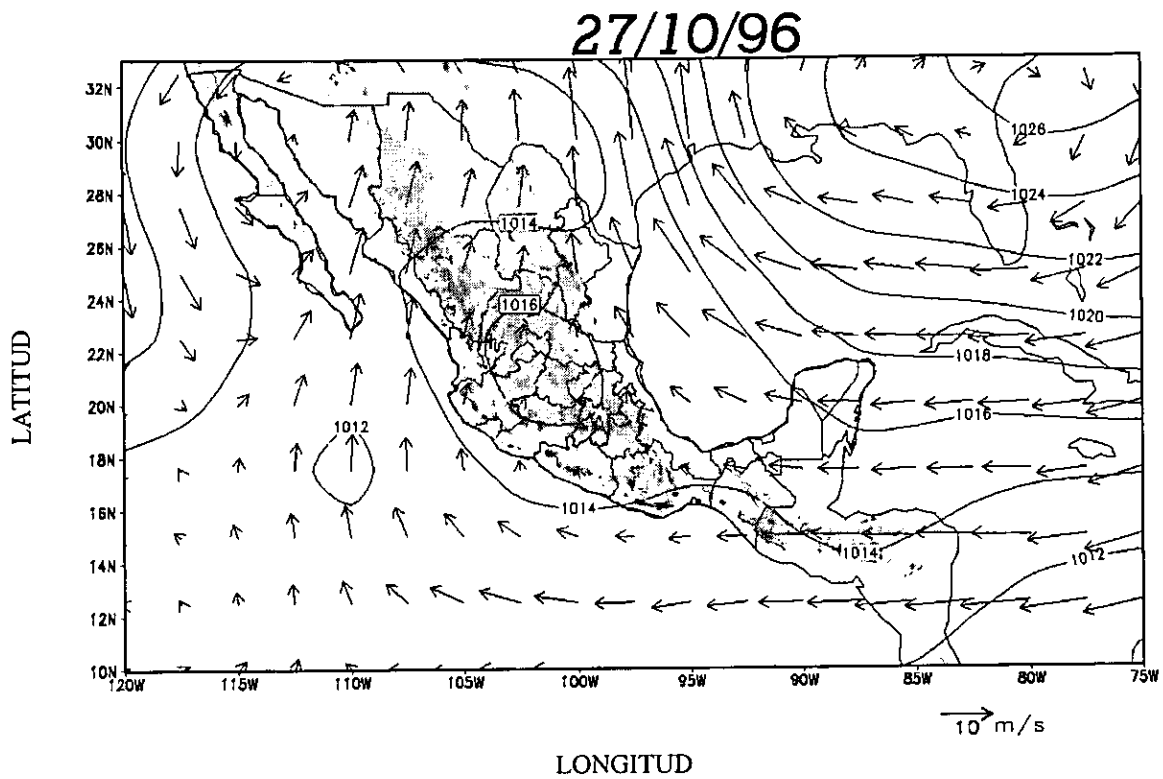


Figura 4.4.- Como en la figura 4.1 pero para el 27 de octubre de 1996.

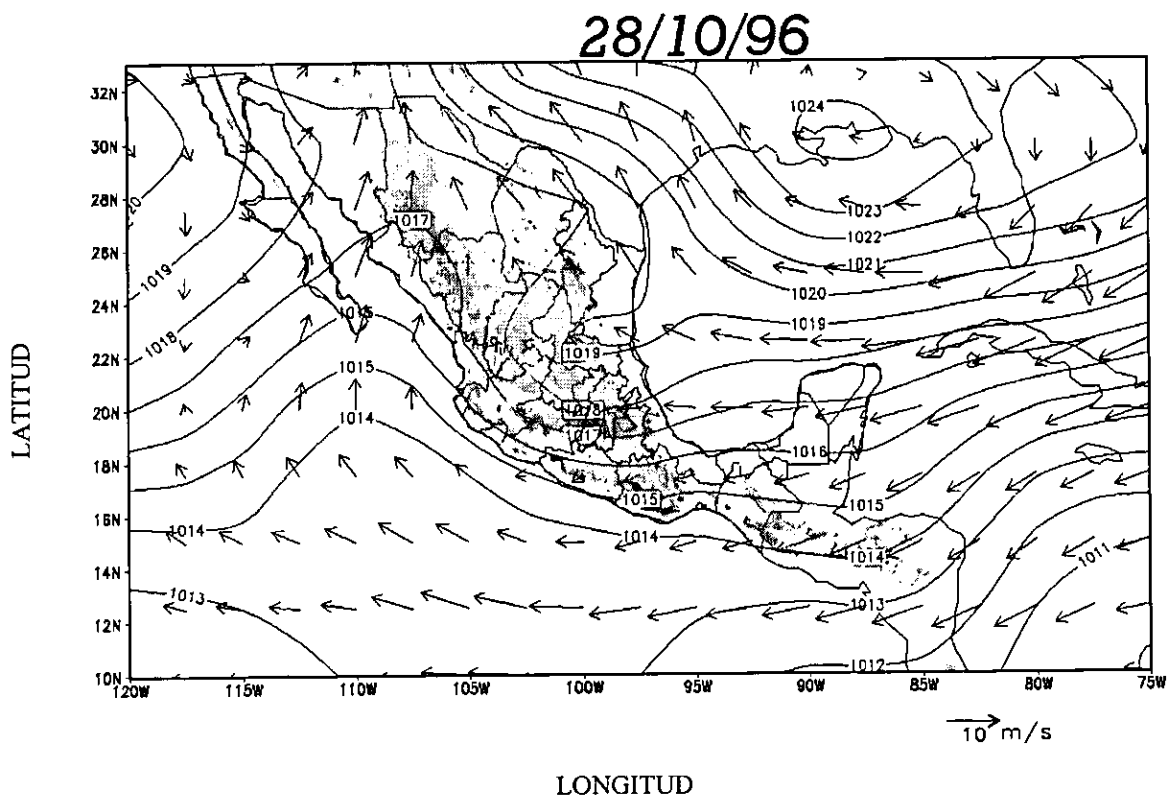


Figura 4.5.- Como en la figura 4.1 pero para el 28 de octubre de 1996.

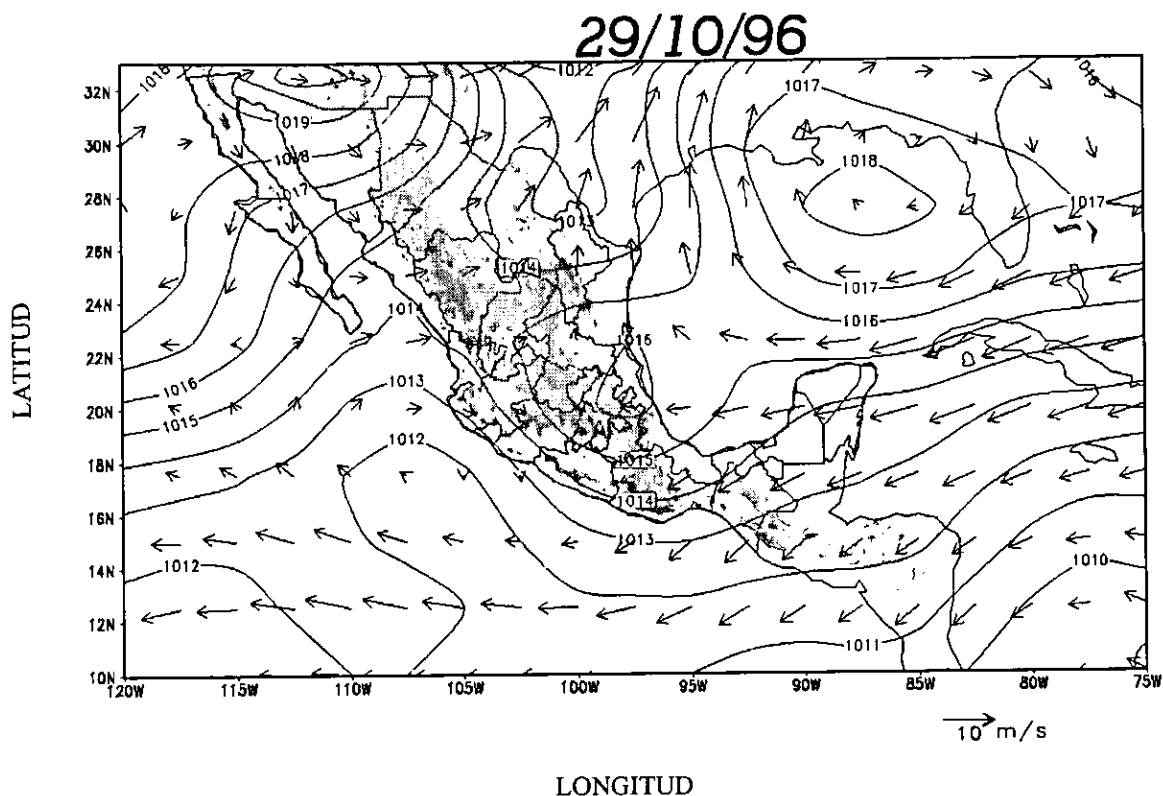


Figura 4.6.-Como en la figura 4.1 pero para el 29 de octubre de 1996.

En ninguno de los casos que se analizaron en este trabajo, a escala sinóptica, se pudo observar una baja presión sobre el Valle de México. Sin embargo, la posición e intensidad de las altas presiones, determinaron la trayectoria de los vientos, que inhiben o favorecen la dispersión de contaminantes. Los resultados más relevantes a escala sinóptica sobre el Valle de México, para los casos de mínima y máxima contaminación, son la presencia del valle de la onda y la línea de convergencia, respectivamente.

A escala sinóptica no es posible obtener la precisión requerida para describir la circulación atmosférica sobre el Valle de México, por lo que fue necesario recurrir a un modelo de mesoescala como el MM5 para modelar la circulación sobre esa área. Dicho modelo genera los campos de presión, de temperatura y de vientos, sobre el Valle de México.

4.2.- Resultados del MM5

Los campos de temperatura, presión y de vientos obtenidos por el modelo MM5, son de mayor resolución que los campos sinópticos, permitiendo realizar un mejor análisis de la circulación atmosférica sobre el Valle de México y su influencia sobre la dispersión de contaminantes.

Los resultados se muestran de la siguiente manera. El campo de viento horizontal calculado (flechas tenues), se graficó junto con los datos de las estaciones de la RAMA y del SMN (flechas oscuras), con el fin de comparar las simulaciones con observaciones. Las isotacas representan la componente vertical de la velocidad del viento, los valores positivos (líneas continuas) y negativos (líneas punteadas), indican movimiento ascendente y descendente respectivamente. El campo de temperatura calculada se graficó junto con los valores de CO observados en las cuatro estaciones de la RAMA. Finalmente, las líneas de corriente en secciones transversales (zonal y meridional) se grafican con el fin de analizar los movimientos verticales.

Aun cuando se analizaron los campos de viento, temperatura y presión cada dos horas, sólo se presentaron los campos con mayor contraste.

4.2.1- Circulación atmosférica de mesoescala para el día de máxima contaminación.

Analizando los resultados del modelo para el caso de máxima contaminación, que corresponde al 29 de octubre de 1996, se observa que inicialmente el aire presenta movimientos descendentes sobre las montañas (Fig. 4.7), debido a su baja temperatura comparada con la del Valle de México (Fig. 4.8). Lo anterior provoca que el viento del noreste, sea forzado a seguir la orografía al entrar al Valle, por lo que se crea un área de convergencia al sureste. Debido a que en el noroeste se localiza una zona industrial muy importante (Tlanepantla), al no contar con vientos intensos, los índices de contaminación en dicha zona son altos. En la región del Pedregal los índices de contaminación también son elevados debido a que los vientos al descender de las montañas no permiten la renovación del aire (actuando como una barrera).

Las líneas de corriente en un corte zonal, muestran la estructura de onda vertical influenciada por las montañas que actúan como un amplificador, presentando una convergencia al este del Valle (Fig. 4.9). Sobre el Valle a las 00:00 h. existe un viento de

montaña, que fluye de oeste a este e inhibe la dispersión de contaminantes. El viento que viene del norte, no logra atravesar las montañas, provocando que sobre la zona sur existan altas concentraciones de CO, pues aun cuando al norte logra alcanzar gran altura, existe un tope vertical, que obliga al viento a descender posteriormente sobre la zona sur del Valle (Fig. 4.10).

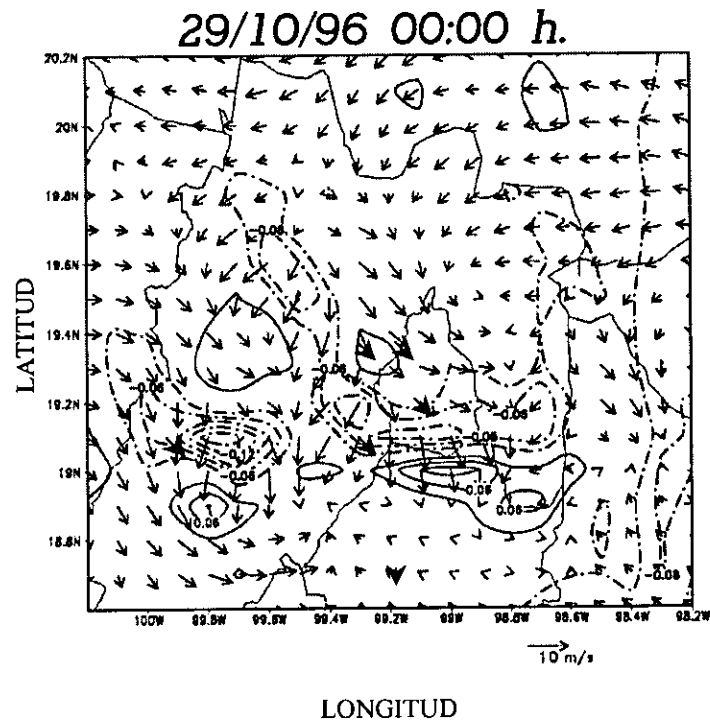


Figura 4.7.- Campo horizontal del viento superficial e isolneas de la velocidad vertical del viento (w^1), sobre el Valle de México, para el día 29 de octubre de 1996, a las 00:00 h.

¹ W es la velocidad vertical del viento (m/s)

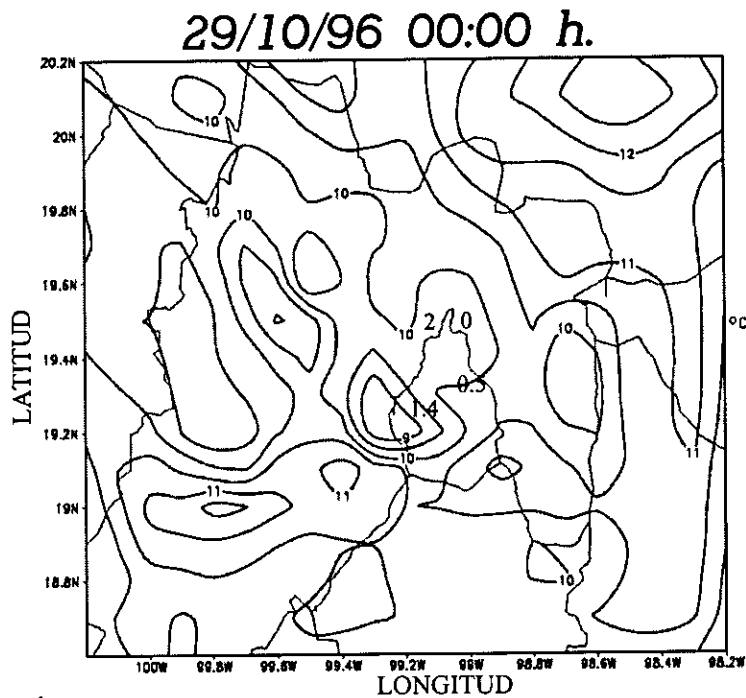


Figura 4.8.- Campo de temperatura (°C) sobre las montañas (750 mb) y concentración de CO (ppm), sobre el Valle de México, para el día 29 de octubre de 1996, a las 00:00 h.

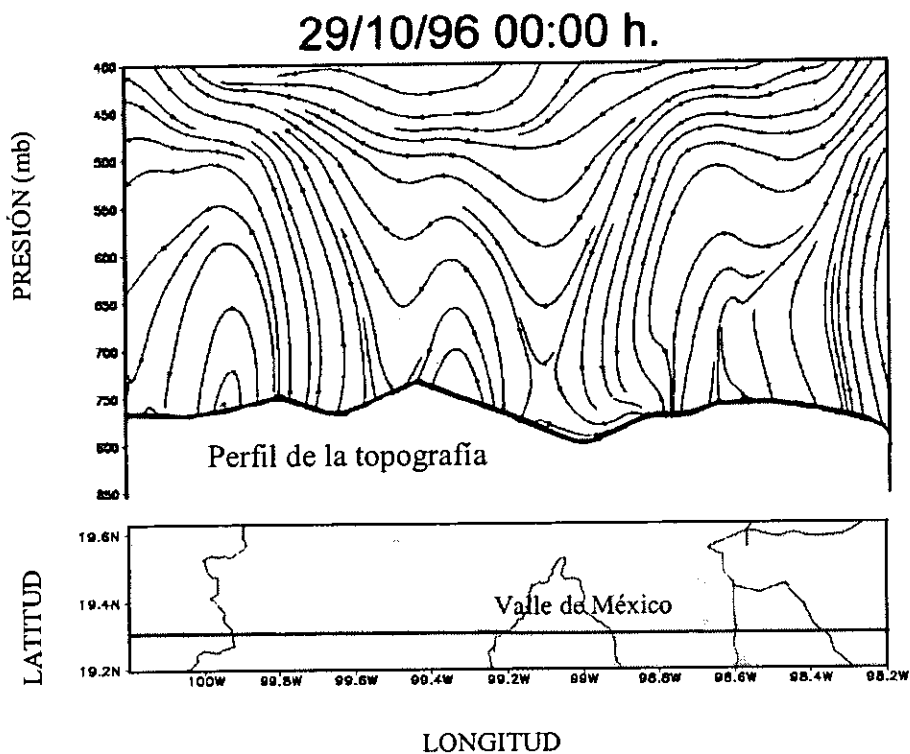


Figura 4.9.- Líneas de corriente (u:25w)² sobre los 19.3 °N, para el día 29 de octubre de 1996, a las 00:00 h.

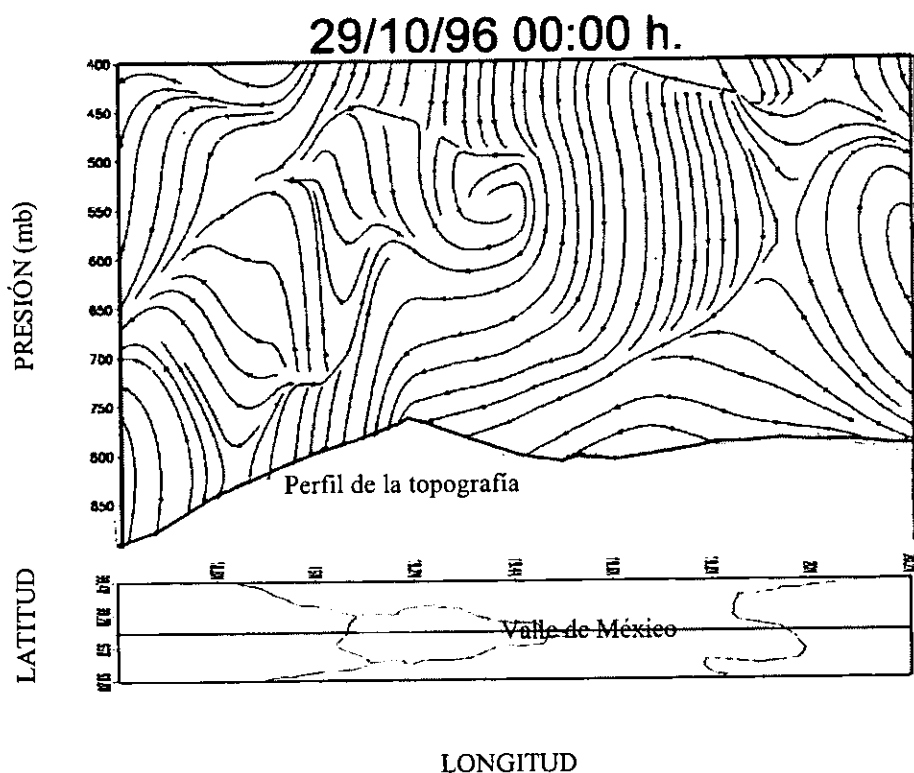


Figura 4.10.- Líneas de corriente ($v:25w$)² sobre los 99.1 °W, para el día 29 de octubre de 1996, a las 00:00 h.

Al medio día se aprecia una línea de convergencia al sur del Valle de México, que aunada a la disminución en la intensidad de los vientos superficiales (Fig. 4.11), favorece las altas concentraciones de monóxido de carbono (CO) sobre la zona del Pedregal (Fig. 4.12), al igual que en las estaciones de Xalostoc y Hangares, donde existe un movimiento descendente. A esta hora las montañas actúan como una fuente elevada de calor, ya que existen movimientos ascendentes sobre ellas. Al contar con una mayor temperatura sobre las montañas que sobre el Valle a 750 mb, se puede suponer que la cantidad de calor sobre las montañas es mayor, forzando circulaciones directa del tipo valle-montaña. Otra región con alta emisión de calor es la zona del Pedregal pues, aun a 750 mb., esta región cuenta con una alta temperatura comparada con sus alrededores debido al material volcánico que abunda en esta zona.

² La escala de la velocidad vertical está multiplicada por 25 para poder apreciar las líneas de corriente.

Al mediodía se presenta el máximo índice de contaminación y la menor intensidad del viento, el cual se dirige hacia el suroeste, donde se estanca debido a la orografía con una pendiente muy pronunciada.

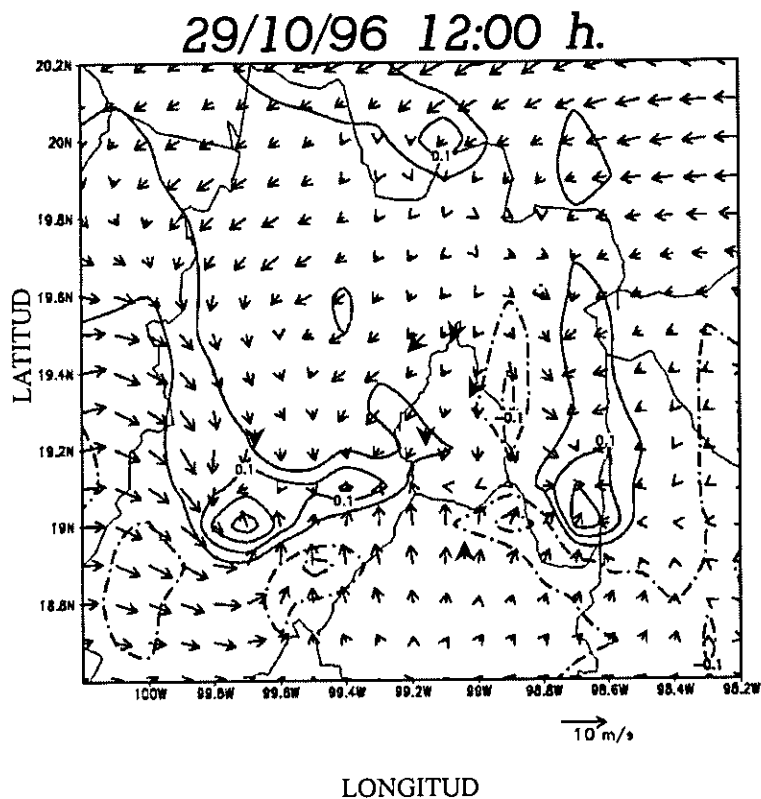


Figura 4.11.- Campo horizontal del viento, como en la figura 4.7 pero a las 12:00 h.

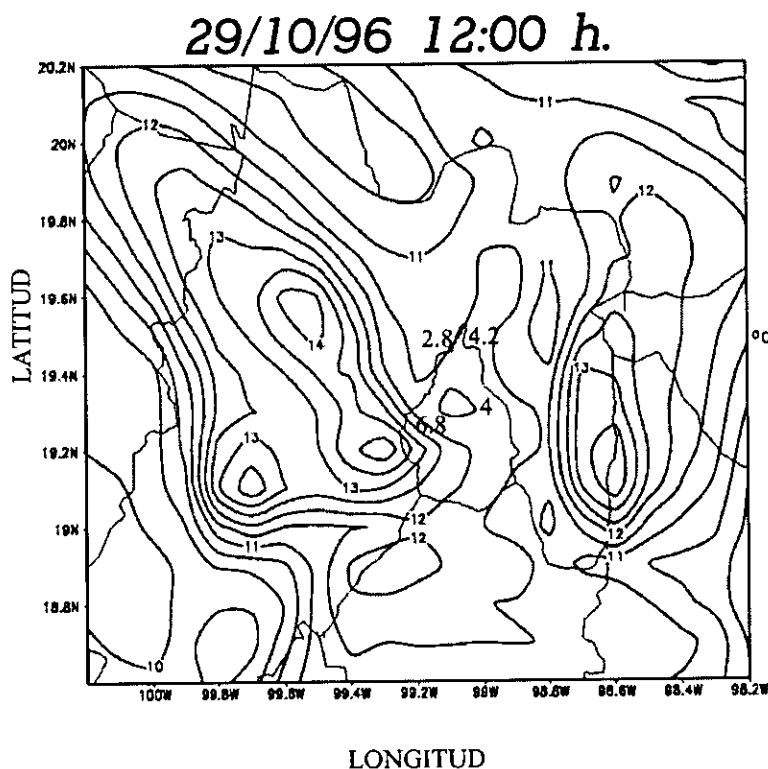


Figura 4.12.- Campo de temperatura, como en la figura 4.8 pero a las 12:00 h.

Dos horas más tarde (14:00 h.), el viento se intensificó sobre el Valle de México, aun cuando la línea de convergencia se desplazó hacia el norte (Fig. 4.13). El índice de contaminación disminuye (Fig. 4.14) sobre la estación de Xalostoc, pues a pesar de existir un movimiento descendente, el aire es rápidamente transportado hacia las montañas donde vuelve a ascender (Fig. 4.15) evitando que se presenten altos índices de CO. En el Pedregal la concentración de CO es mayor, ya que el viento que viene del norte no logra pasar encima de las montañas, debido a la línea de convergencia y a que las montañas actúan como una fuente elevada de calor creando una barrera para los vientos que vienen del norte (Fig. 4.16).

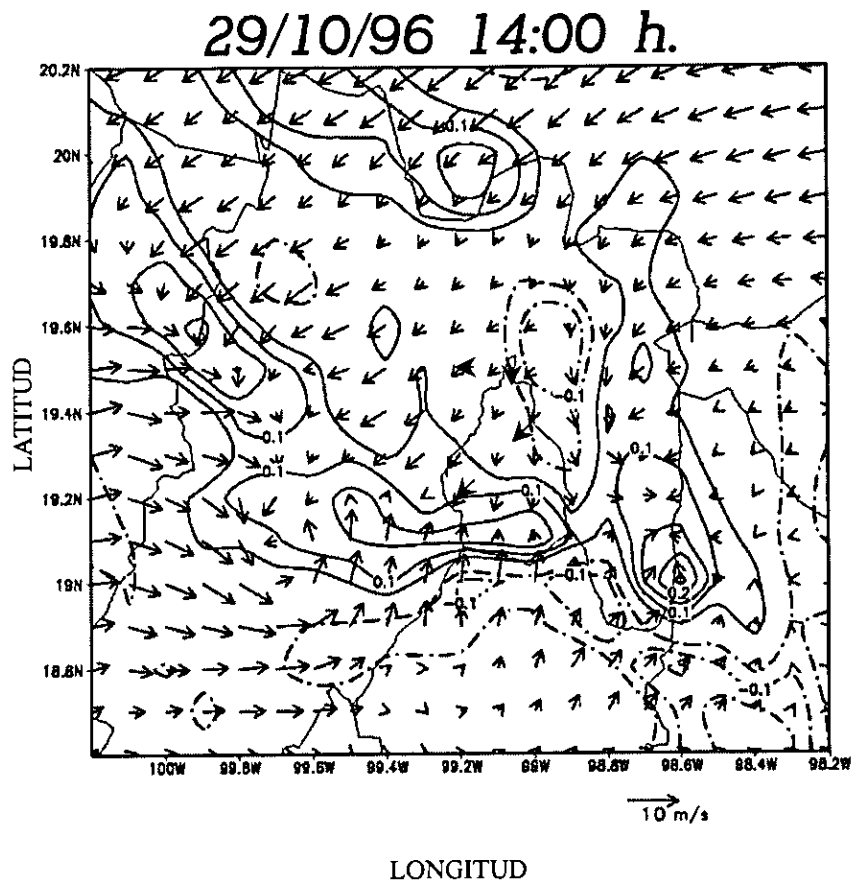


Figura 4.13.- Campo horizontal del viento, como en la figura 4.7 pero a las 14:00 h.

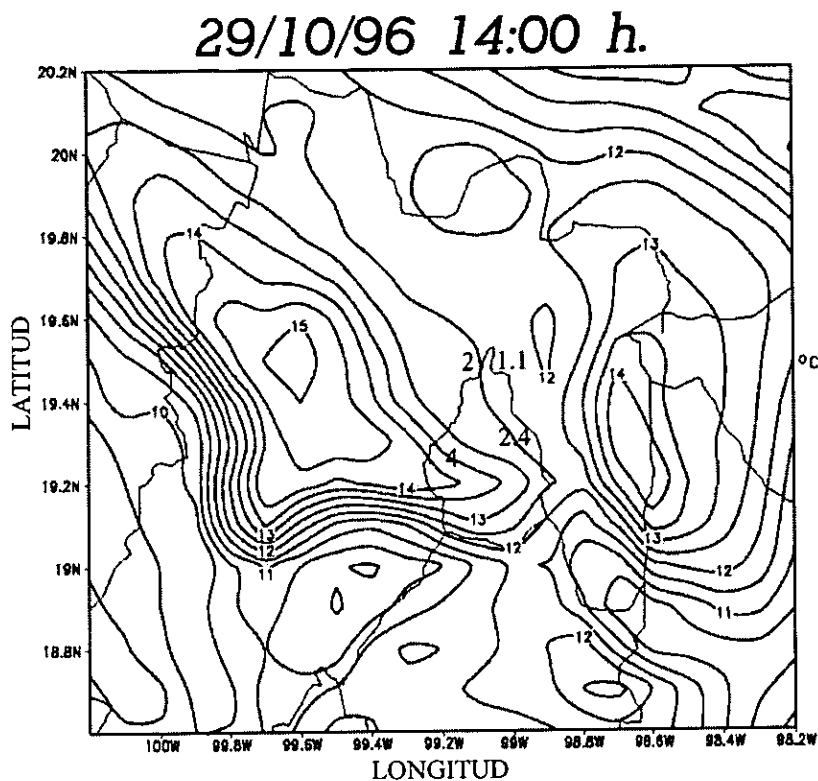


Figura 4.14.- Campo de temperatura, como en la figura 4.8 pero a las 14:00 h.

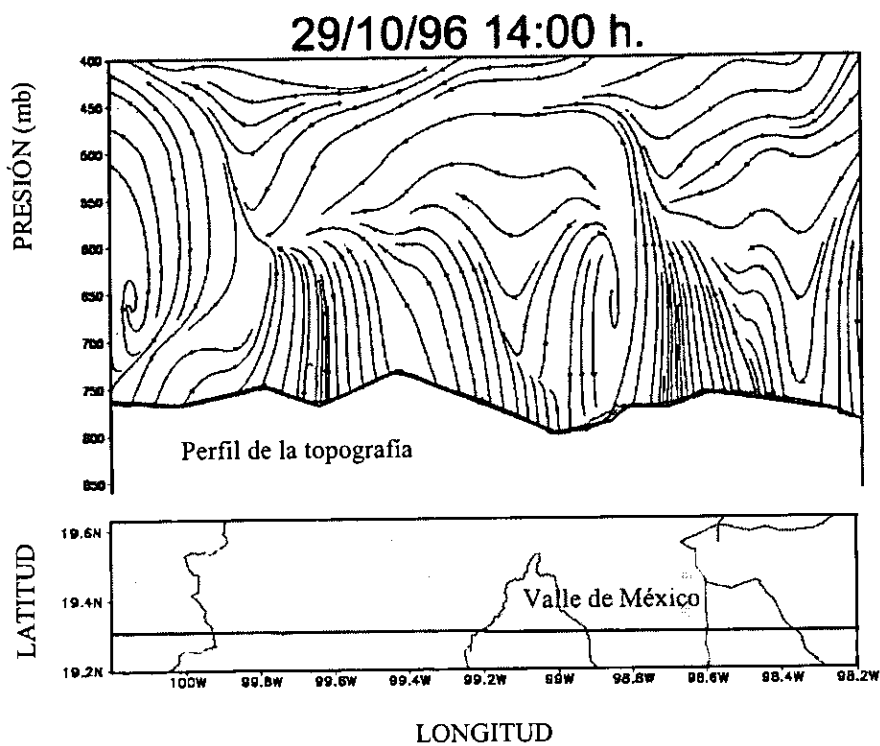


Figura 4.15.- Líneas de corriente, como en la figura 4.9 pero a las 14:00 h.

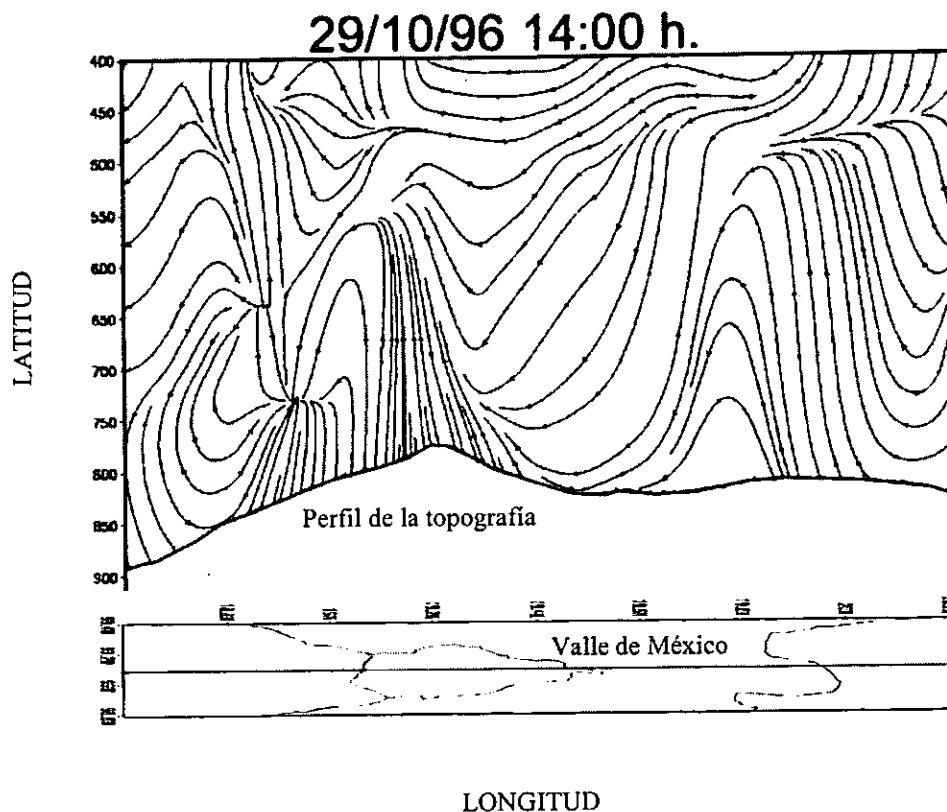


Figura 4.16.- Líneas de corriente, como en la figura 4.10 pero a las 14:00 h.

A las 18.00 h. se presenta una compleja turbulencia sobre el Valle de México (Fig. 4.17). Aun cuando la línea de convergencia alcanza su máxima latitud, ésta comienza a debilitarse, debido a que el viento del noreste se intensifica produciéndose un gran movimiento ascendente sobre esa región, el cual ayuda a dispersar las altas concentraciones de CO, gracias al movimiento ciclónico que se genera. Sobre el área donde existen movimientos ascendentes, la temperatura a los 750 mb. es alta, ya que el calor de la superficie es llevado a esa altura y viceversa en zonas de movimientos descendentes. A esta hora las montañas dejan de ser una fuente elevada de calor (Fig. 4.18) y a partir de entonces, la circulación en el Valle de México se normaliza, desplazando hacia el sur la línea de convergencia, que inhibía la dispersión de los contaminantes.

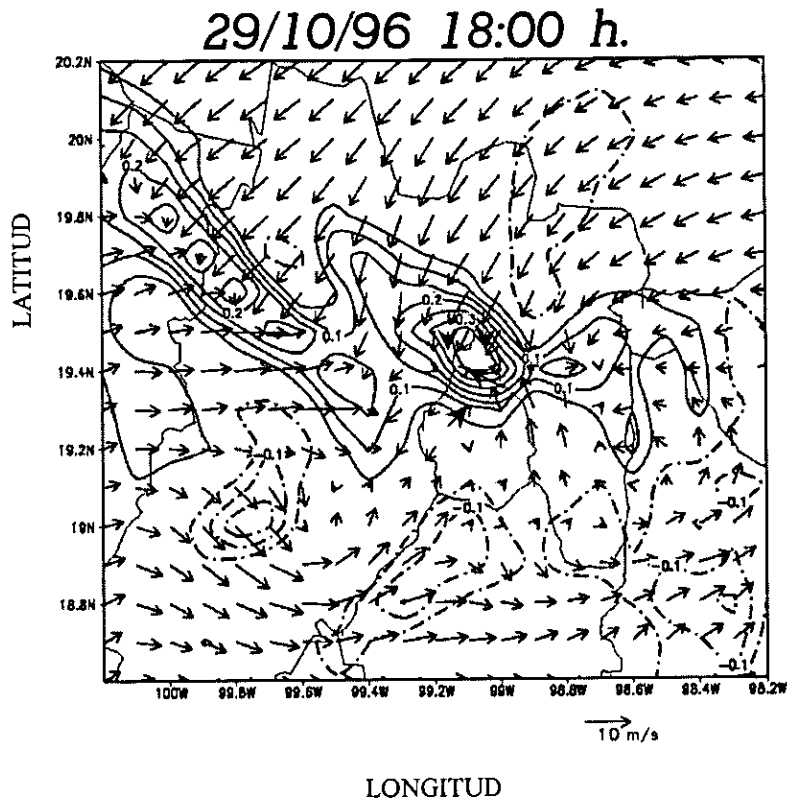


Figura 4.17.- Campo horizontal del viento, como en la figura 4.7 pero a las 18:00 h.

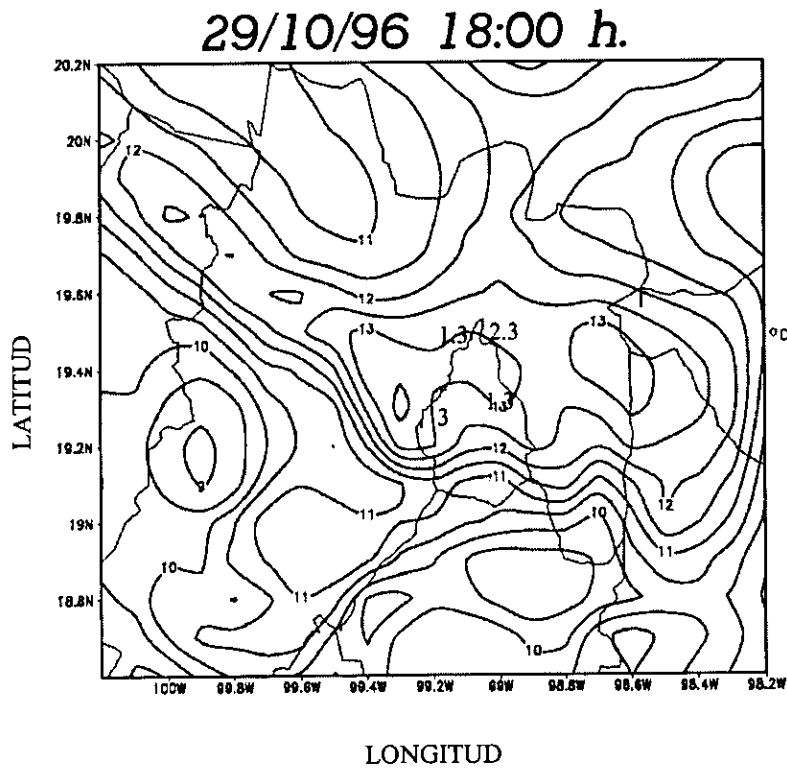


Figura 4.18.- Campo de temperatura, como en la figura 4.8 pero a las 18:00 h.

A la media noche, el viento del noroeste llega con la suficiente intensidad como para dispersar los contaminantes (Fig. 4.19). Al no estar presente la línea de convergencia dentro del Valle, pues se encuentra al sur de éste, los vientos logran sobrepasar las montañas del oeste y sur del Valle de México. Sin embargo, los vientos no atraviesan las montañas del este debido a su fuerte pendiente. A esta hora la contaminación es arrastrada por los vientos, que al llegar al suroeste sobre el Pedregal alcanza la mayor concentración de CO (Fig. 4.20). Las montañas ya no son una fuente elevada de calor, puesto que su temperatura es menor que la de sus alrededores y no cuentan con movimientos ascendentes significativos.

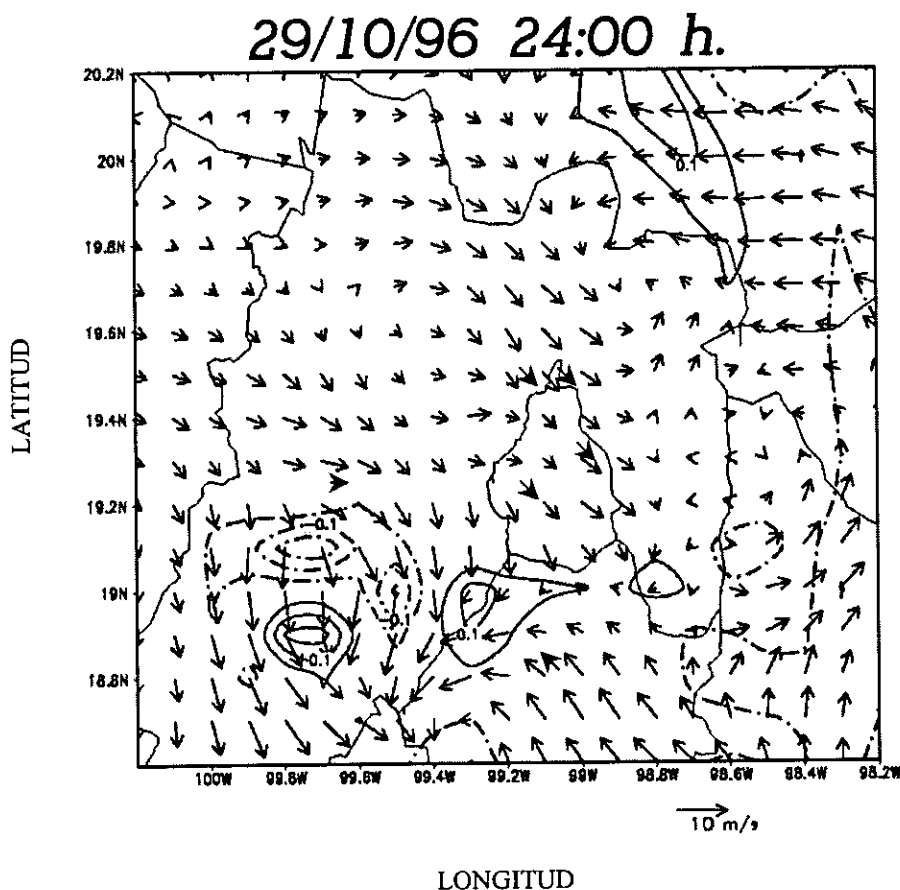


Figura 4.19.- Campo horizontal del viento, como en la figura 4.7 pero a las 24:00 h.

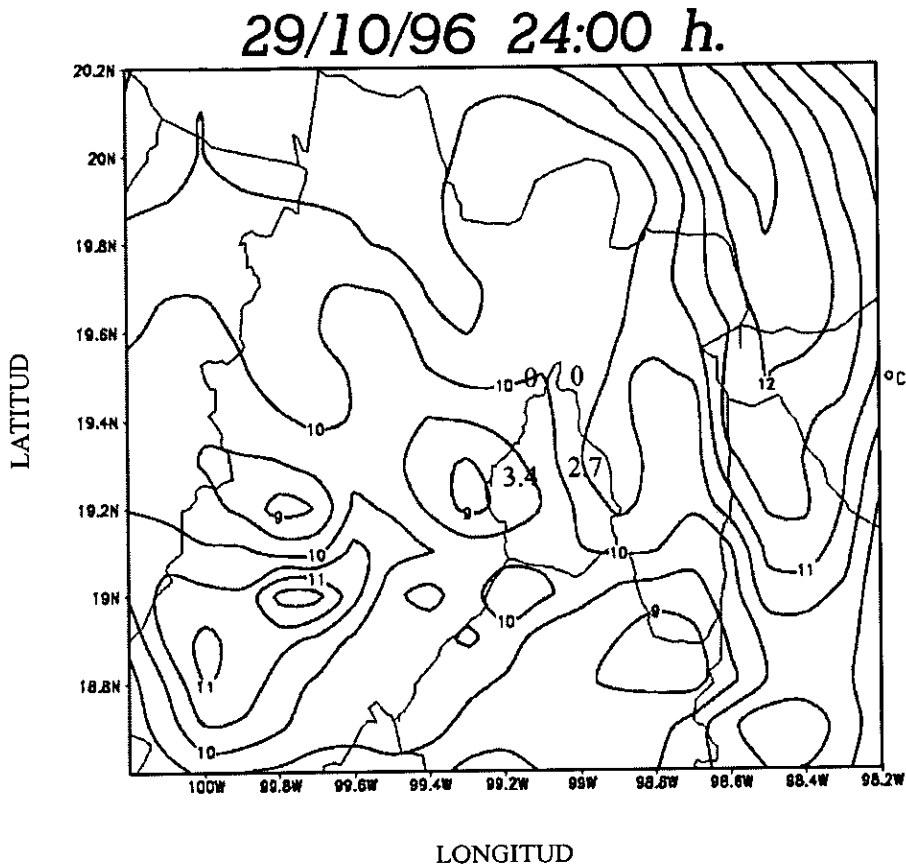


Figura 4.20.- Campo de temperatura, como en la figura 4.8 pero a las 24:00 h.

Cuando las montañas que rodean al Valle de México actúan como una fuente elevada de calor, y se genera una línea de convergencia a la hora de mayor temperatura, se generan movimientos descendentes sobre el Valle de México, que inhiben la dispersión de los contaminantes.

Debido a la gran cantidad de calor que existe en los Valles de México y Cuernavaca, generalmente se crea una línea de convergencia entre ellos, ya que los vientos del Valle de México van hacia el sur (Fig. 4.21) y los del Valle de Cuernavaca van hacia el norte (Fig. 4.22). En el evento de máxima contaminación la dinámica atmosférica muestra que el viento del Valle de México, en la madrugada y en la noche dominan sobre el viento del Valle de Cuernavaca en los 19.1 °N y viceversa a la hora de mayor temperatura, logrando así desplazar la línea de convergencia hacia el norte.

Una vez descrita la circulación atmosférica del Valle de México para el día de máxima contaminación, se analizará y comparará el día de mínima contaminación.

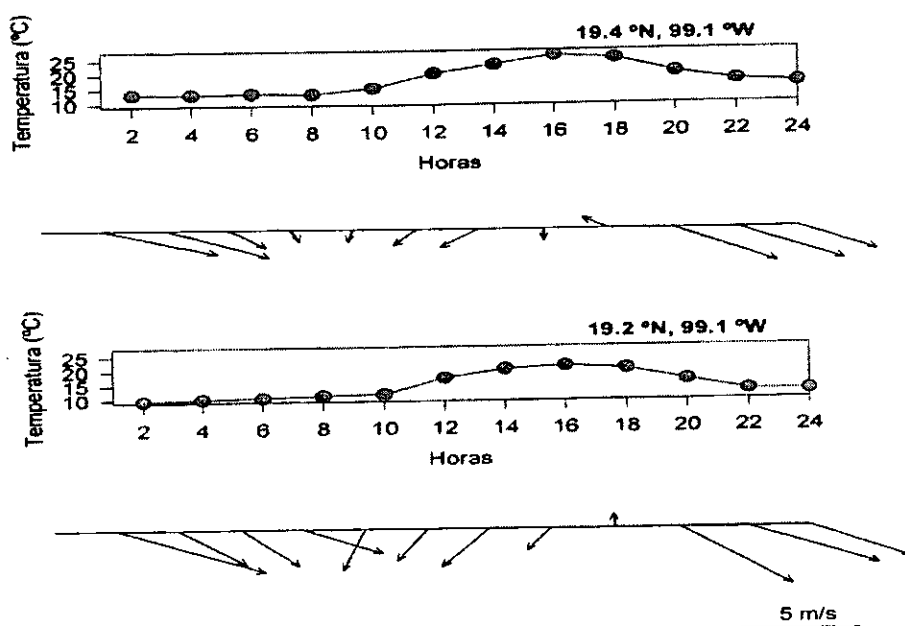


Figura 4.21.- Temperatura del aire y velocidad horizontal del viento en los 19.4 °N, 99.1 °W y 19.2 °N, 99.1 °W a nivel de superficie para el día 29 de octubre de 1996, obtenidos del modelo numérico MM5.

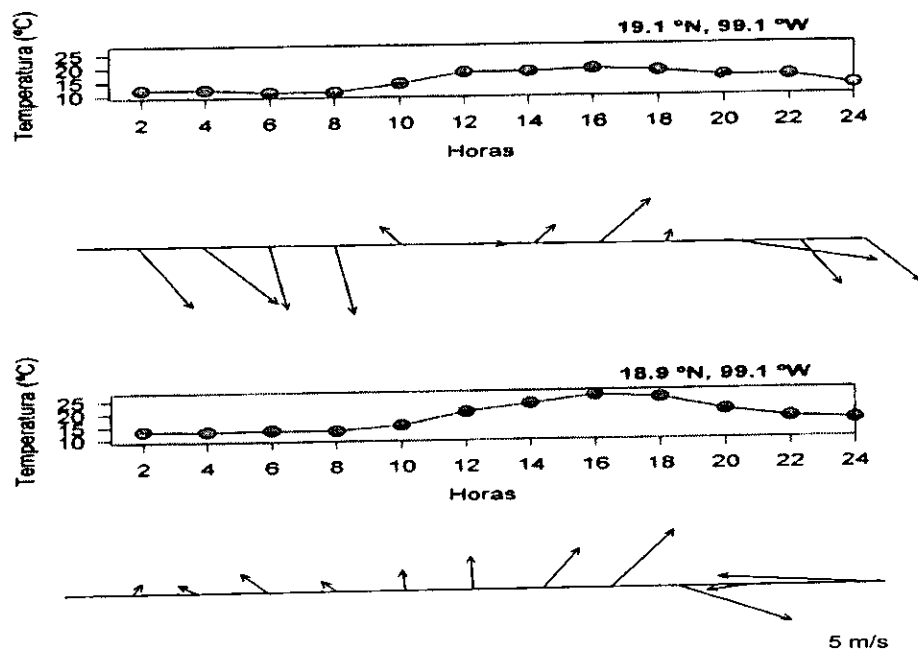


Figura 4.22.- Temperatura del aire y velocidad horizontal del viento en los 19.1 °N, 99.1 °W y 18.9 °N, 99.1 °W a nivel de superficie para el día 29 de octubre de 1996, obtenidos del modelo numérico MM5.

4.2.2- Circulación atmosférica de mesoescala para el día de mínima contaminación.

El día de mínima contaminación, 9 de agosto de 1996 comienza con pequeños movimientos descendentes en las montañas del este, vientos intensos sobre el Valle de México y al noreste del Valle se ve un movimiento ascendente muy intenso (Fig. 4.23), estos últimos dos favorecen la dispersión de los contaminantes. En la región donde se presenta el movimiento ascendente, a 750 mb. existe un núcleo de relativamente alta temperatura. Sobre el Distrito Federal y Área Conurbada también se presentan altas temperaturas (Fig. 4.24), debido a la gran cantidad de calor que emana el asfalto y concreto en zonas urbanas. La estación Hangares cuenta con la mayor concentración de CO, puesto que el viento al bajar de las montañas no permite que se renueve el aire en esta región. A esta hora (00:00 h) existen movimientos descendentes en las montañas (Fig. 4.25 y 4.26), ya que el calor en esta región es menor que el de la zona urbana.

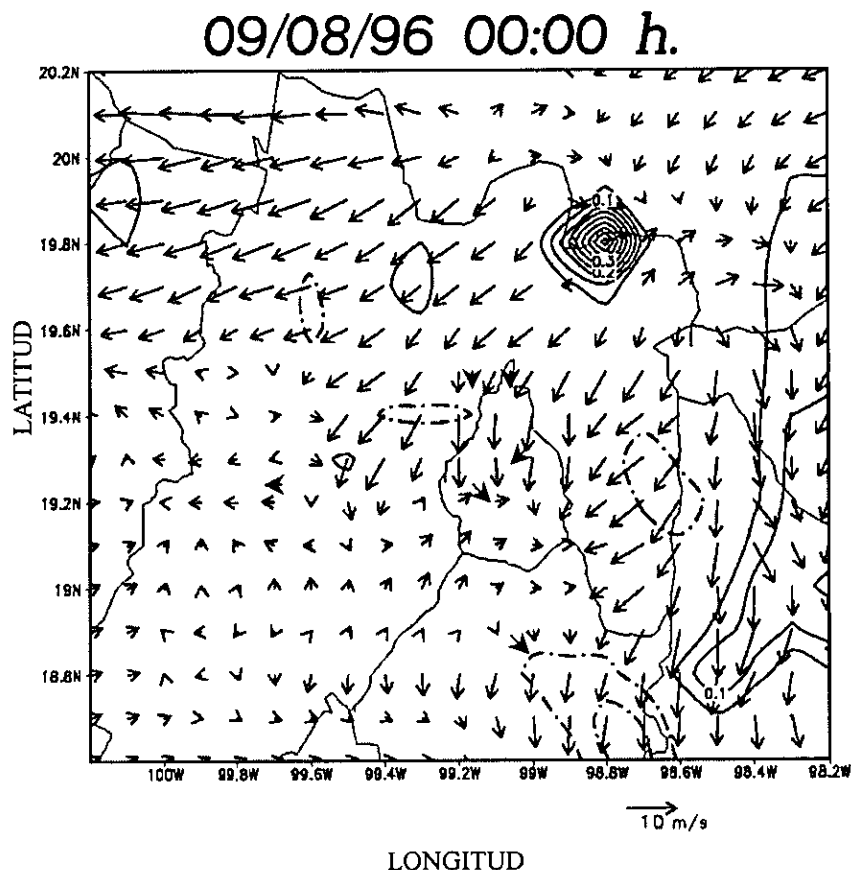


Figura 4.23.- Campo horizontal del viento superficial e isóneas de la velocidad vertical del viento (w), sobre el Valle de México, para el día 9 de agosto de 1996, a las 00:00 h.

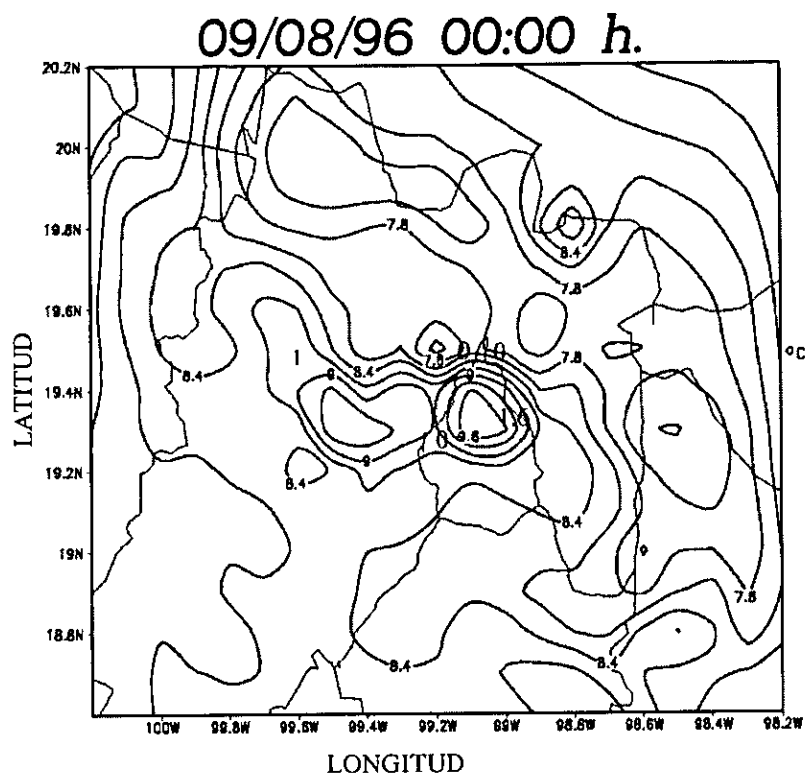


Figura 4.24.- Campo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) sobre las montañas (750 mb) y concentración de CO (ppm), sobre el Valle de México, para el día 9 de agosto de 1996, a las 00:00 h.

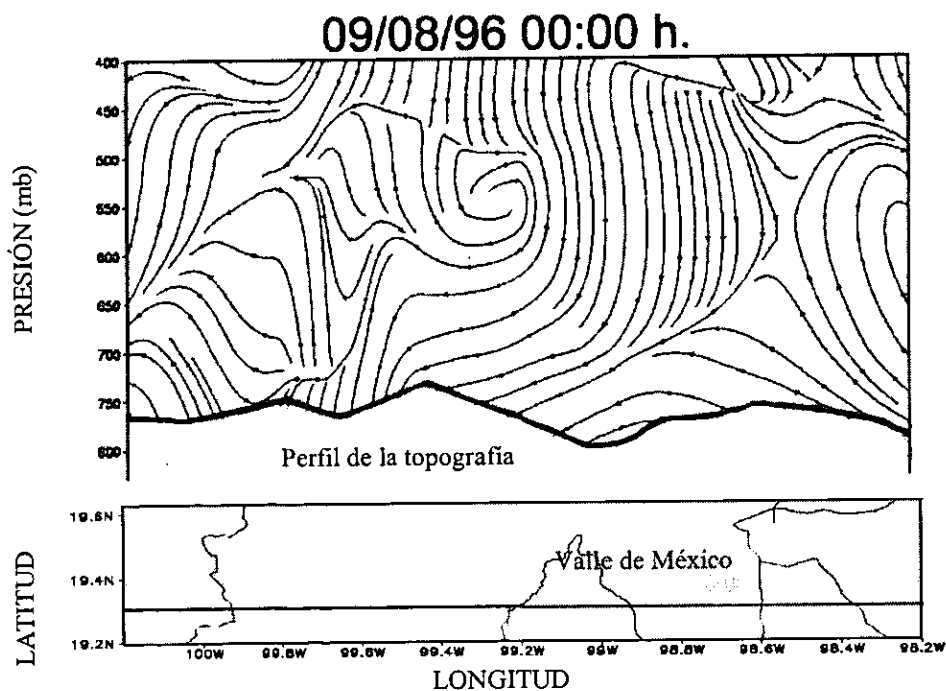


Figura 4.25.- Línea de corriente ($u:25w$)¹ sobre los 19.3°N , para el día 9 de agosto de 1996, a las 00:00 h.

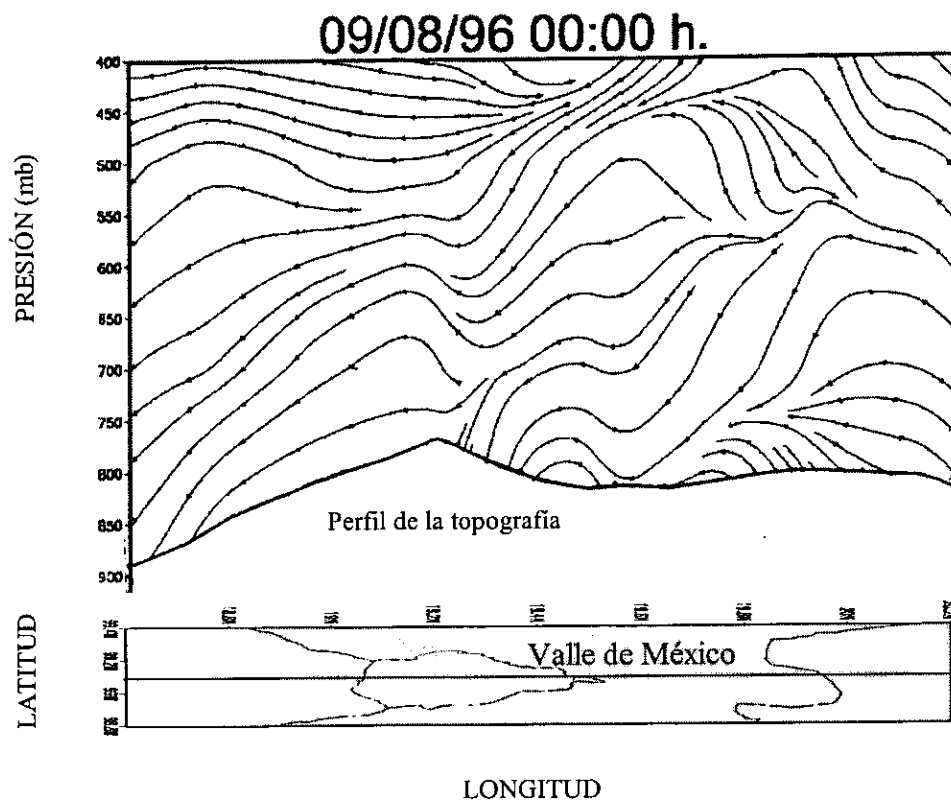


Figura 4.26.- Línea de corriente ($v:25w$)¹ sobre los 99.1 °W, para el día 9 de agosto de 1996, a las 00:00 h.

Al medio día (12:00 h), al noreste del Valle de México existe un movimiento ascendente, y campo horizontal del viento va hacia el suroeste, donde se estanca debido a la orografía (Fig. 4.27), provocando máxima concentración de CO en la estación Pedregal. En esta ocasión la temperatura sobre las montañas es menor a aquella de la zona urbana (Fig. 4.28), por lo tanto las montañas no actúan como una fuente elevada de calor, lo cual aunado a los movimientos verticales favorece la dispersión de contaminantes, a pesar de que a esta hora se presentan los máximos índices de contaminación.

¹ La escala de la velocidad vertical está multiplicada por 25 para poder apreciar las líneas de corriente.

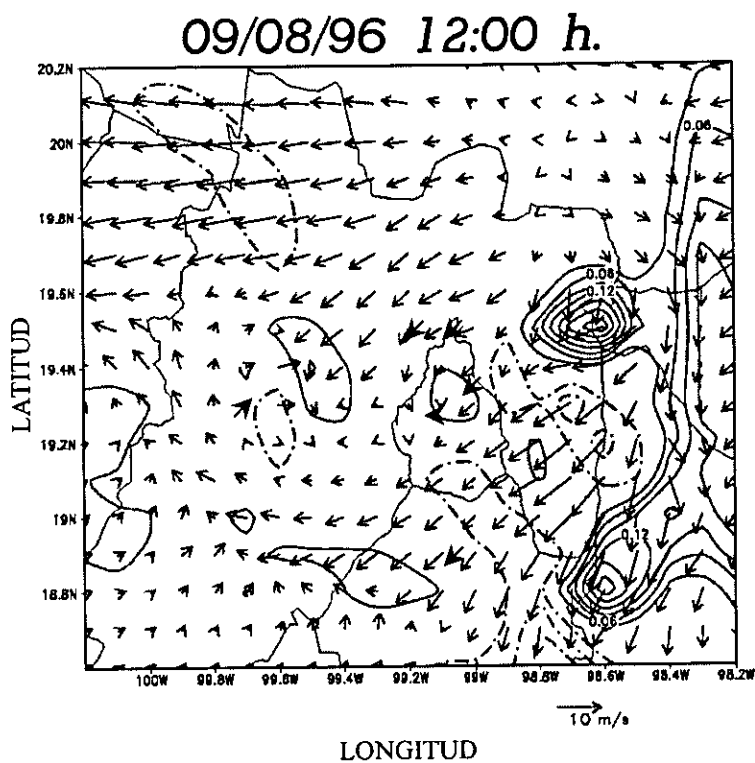


Figura 4.27.- Campo horizontal del viento, como en la figura 4.23 pero para las 12:00 h.

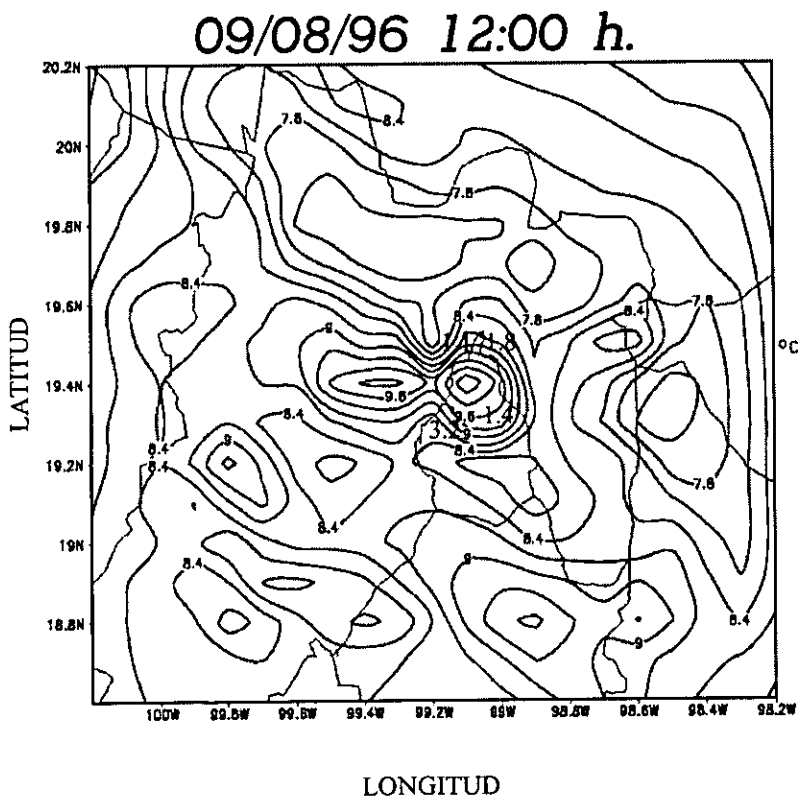


Figura 4.28.- Campo de temperatura, como en la figura 4.24 para las 12:00 h.

A las 14.00 horas, el viento que desciende de los volcanes se intensifica, limpiando la zona este del Valle de México (Fig. 4.29), transportando los contaminantes hacia la estación Pedregal que sigue contando con la mayor concentración de CO, debido a que el viento del valle se dirige hacia el suroeste. En este caso, como en el anterior (12:00 h) las montañas no son una fuente elevada de calor significativa, ya que a los 750 mb, la zona urbana del Valle emite más calor que gran parte de las montañas (Fig. 4.30). Sin embargo, las montañas al oeste del Valle (Fig. 4.31) y la zona urbana del Ajusco (Fig. 4.32), con mayor temperatura que gran parte del Valle, cuenta con fuertes movimientos ascendentes, los cuales actúan como una barrera de los vientos, aun cuando esta barrera es de menor intensidad que en la episodio de máxima contaminación.

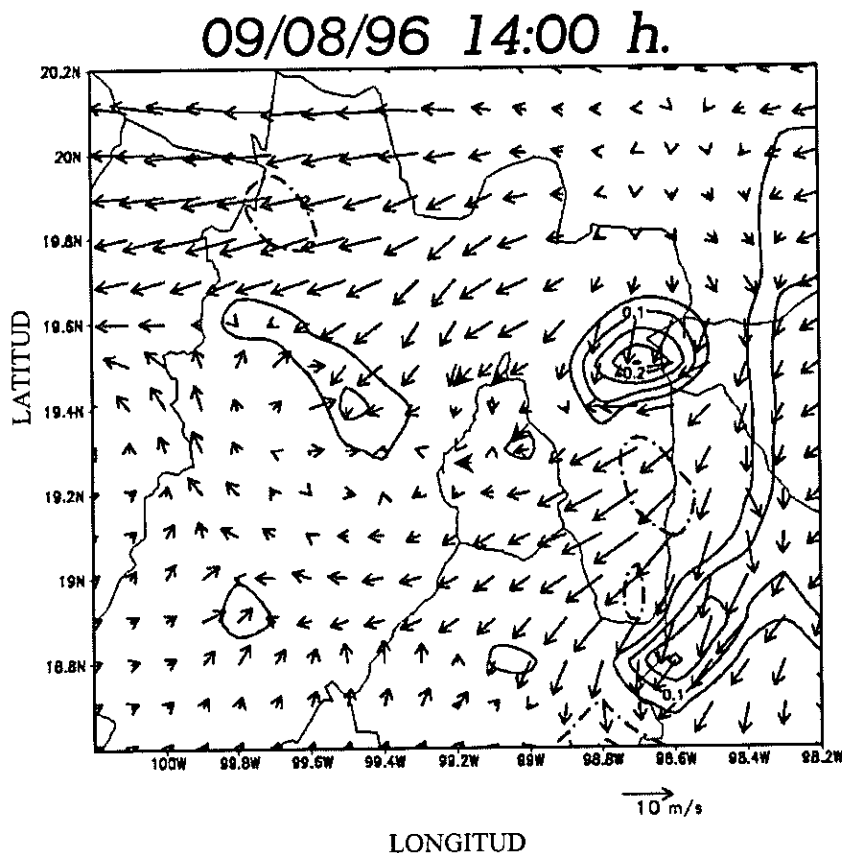


Figura 4.29.- Campo horizontal del viento, como en la figura 4.23 pero para las 14:00 h.

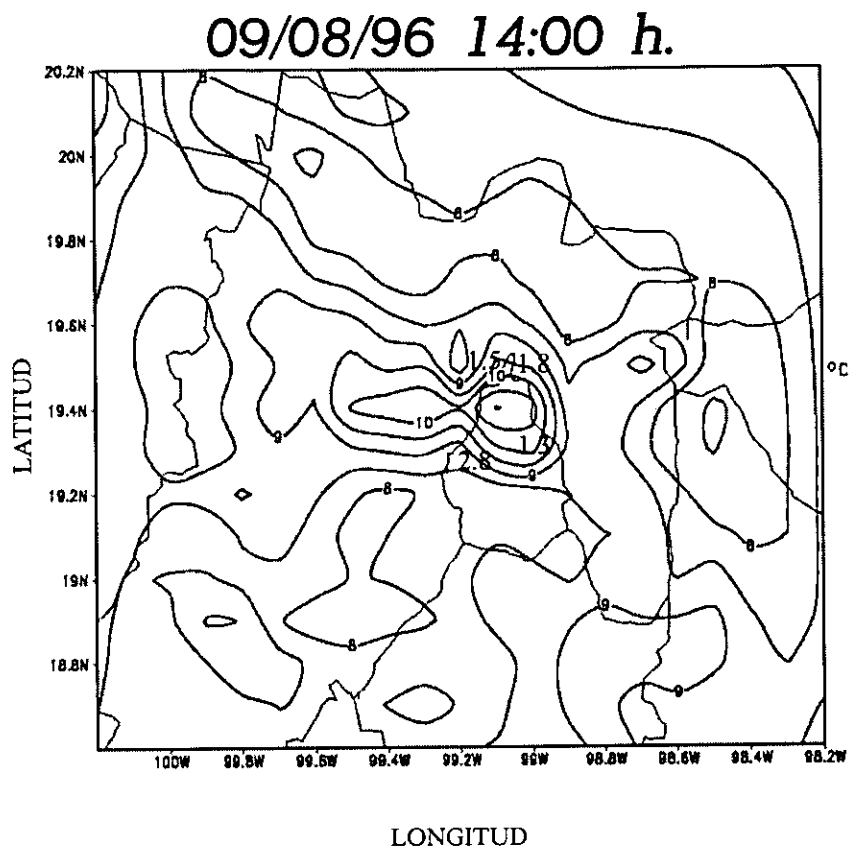


Figura 4.30.- Campo de temperatura, como en la figura.4.24 pero para las 14:00 h.

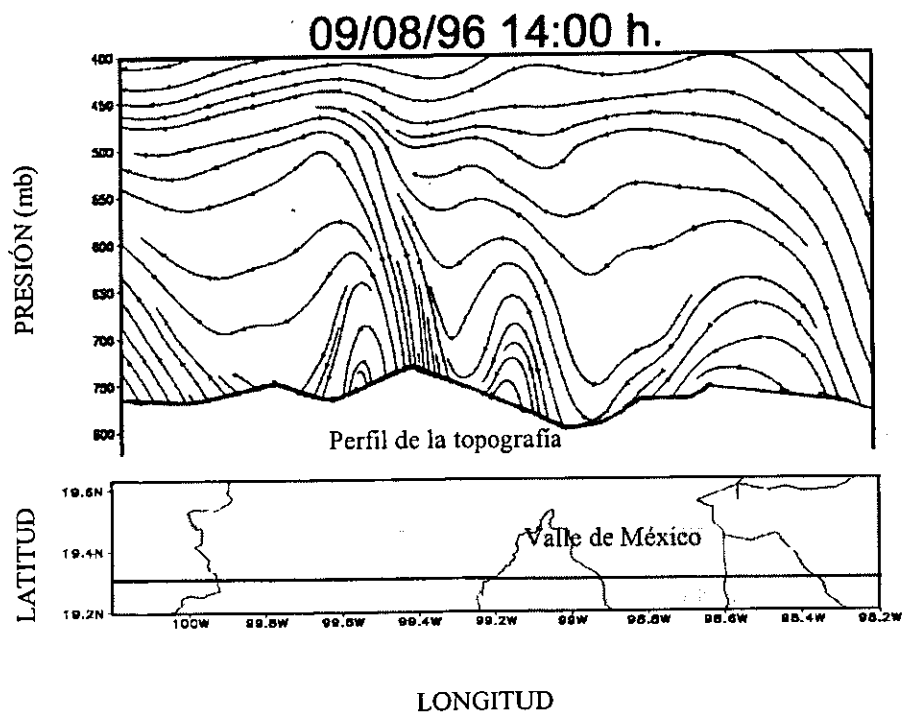


Figura 4.31.- Líneas de corriente, como en la figura 4.25 pero para las 14:00 h.

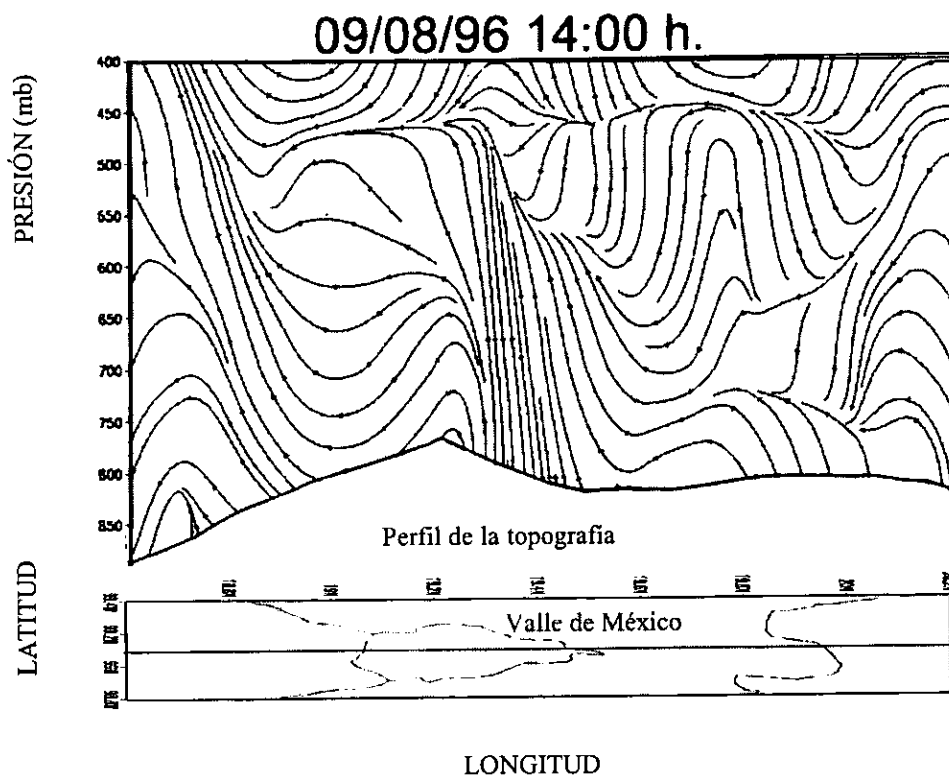


Figura 4.32.- Líneas de corriente, como en la figura 4.26 pero para las 14:00 h.

A la media noche, el movimiento ascendente se desplazó hacia el suroeste en el estado de México. El viento sigue soplando hacia el suroeste con gran intensidad (Fig. 4.33), por lo que la estación Pedregal sigue siendo la más contaminada (Fig. 4.34). La zona urbana del Valle de México emite una gran cantidad de calor, al igual que la zona de movimiento ascendente, que de acuerdo a la ecuación de estado, indicaría altas presiones. Al igual que en el episodio de máxima contaminación a esta hora, los índices de contaminación han bajado drásticamente.

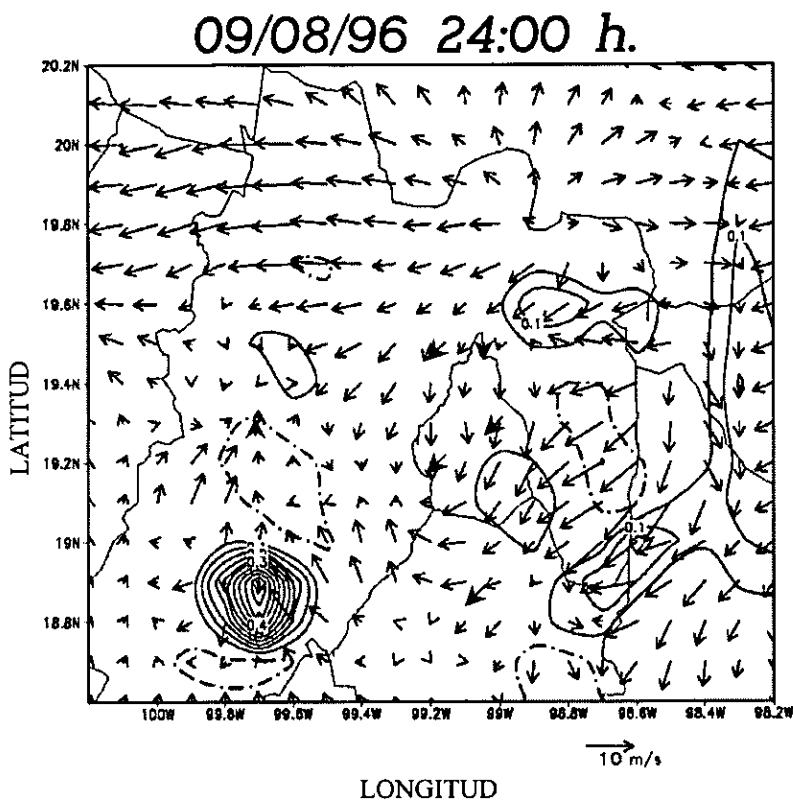


Figura 4.33.- Campo horizontal del viento, como en la figura 4.23 pero para las 24:00 h.

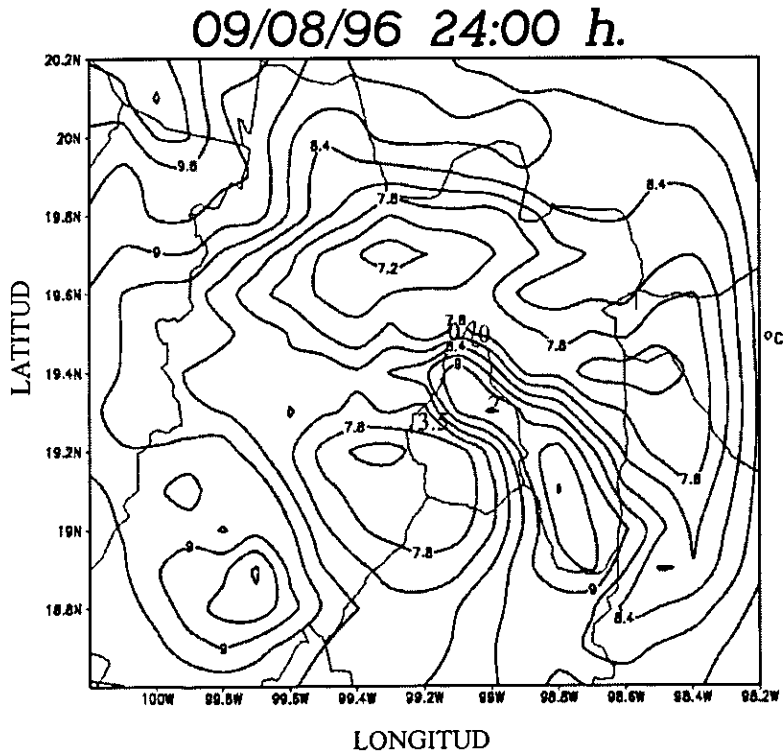


Figura 4.34.- Campo de temperatura, como en la figura 4.24 pero para las 24:00 h.

4.3.- Análisis de la estabilidad atmosférica

Los movimientos ascendentes son determinados por la estabilidad atmosférica, por lo que se analiza mediante las temperaturas obtenidas del modelo a diferentes niveles. Los perfiles de temperatura y su evolución determinan dicha estabilidad, mientras mayor sea la pendiente del perfil de temperatura, mayor será la inestabilidad y los contaminantes podrán ser dispersados mas fácilmente.

La estabilidad fue analizada considerando la evolución del perfil de temperatura en el centro del Distrito Federal; en el punto de la malla 19.3 °N, 99.1 °W, desde la superficie hasta los 700 mb.

El día de máxima contaminación (Fig. 4.35), el centro del Distrito Federal comienza con una mayor temperatura respecto al día de mínima contaminación (Fig. 4.36) y la máxima temperatura calculada se alcanzó a las 18:00 h. La estabilidad no varía mucho a lo largo de todo el día. El día de mínima contaminación en el centro de Distrito Federal a las 6:00 h se presenta una temperatura de 14.5 °C, y presentando un perfil con mayor pendiente (mientras mayor sea la pendiente, mayor será la inestabilidad) que en el día de máxima contaminación, sin embargo la pendiente en este día tiene mayor variación.

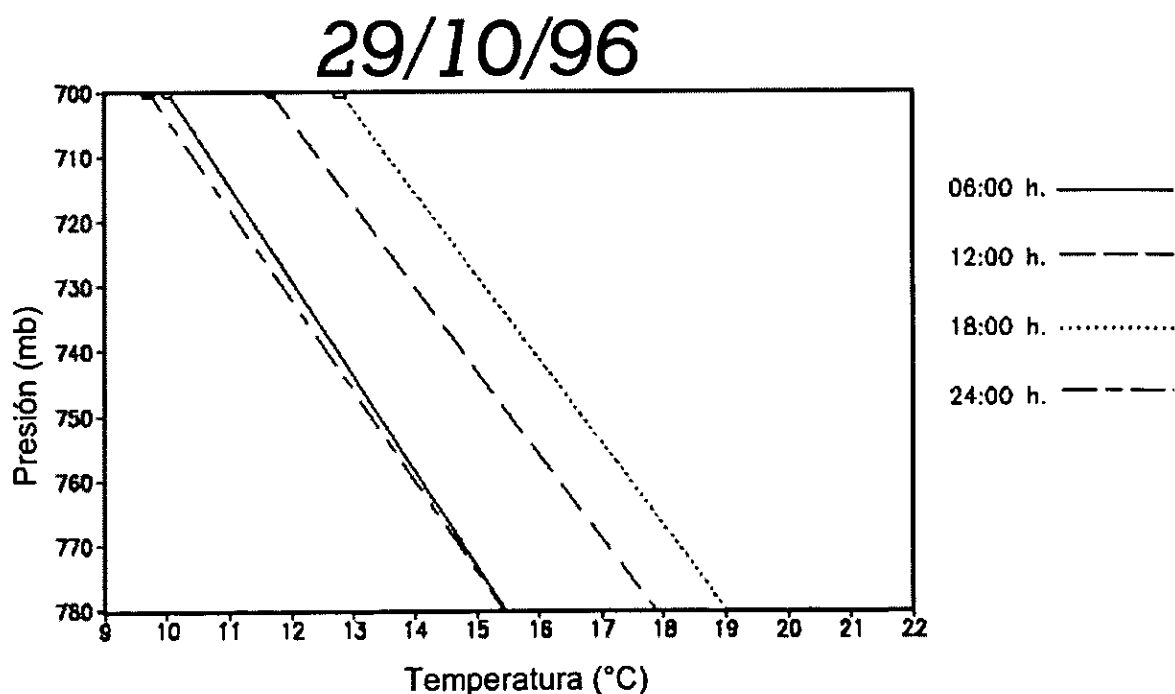


Figura 4.35.- Corte de temperatura en (19.3 °N, 99.1 °W), y su evolución durante el 29 de octubre de 1996.

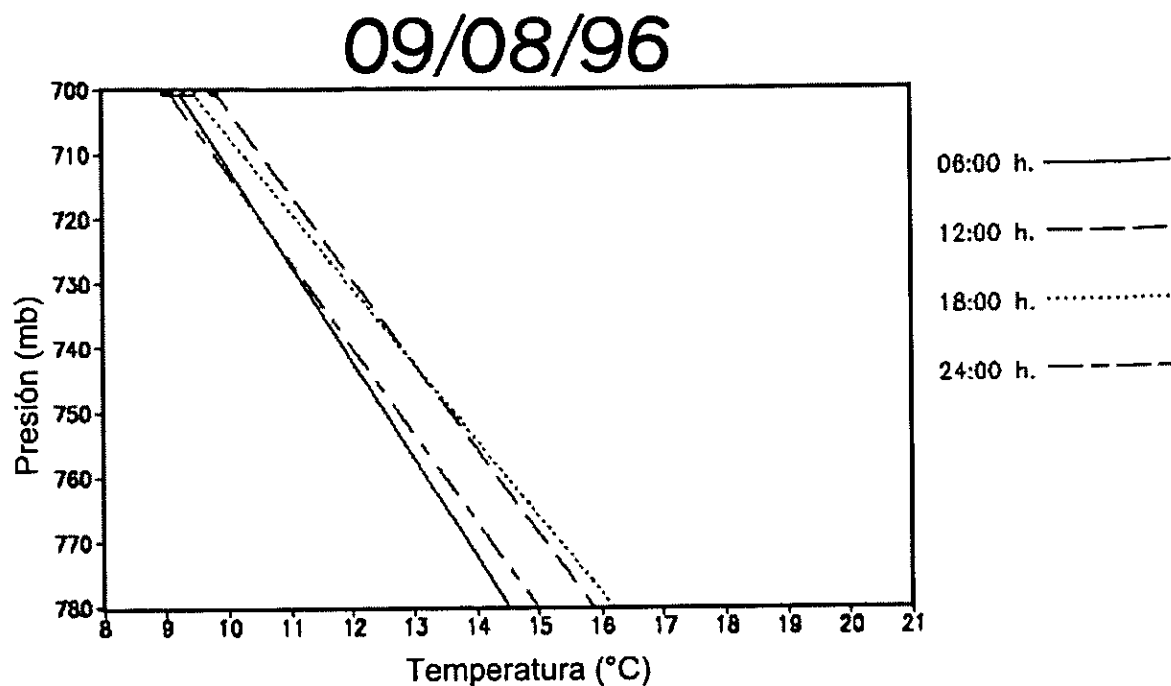


Figura 4.36.- Corte de temperatura en (19.3 °N, 99.1 °W), y su evolución durante el 9 de agosto de 1996.

El día de máxima contaminación al contar con una atmósfera más estable, inhibe más fácilmente la dispersión de los contaminantes, mientras que el 9 de agosto con menor estabilidad atmosférica permitió movimientos ascendentes favorables en la dispersión de los contaminantes no fotoquímicos.

4.4.- Validación del Modelo MM5

Una vez que se han descrito los resultados, es necesario comparar los campos de salida del modelo con datos observados para validarlo, de esta manera garantizamos que lo descrito en el presente trabajo es un diagnóstico de lo ocurrido en los días 9 de agosto y 29 de octubre de 1996. La validación de los resultados del modelo se realizó al obtener el coeficiente de correlación entre los valores de viento y temperatura simulados mediante el modelo y los observados en las estaciones de la RAMA: Hangares, Plateros, Tlanepantla y Xalostoc localizadas cerca de algún nodo de salida del modelo.

Las figuras de vientos (Fig. 4.37 y 4.38), cuentan con la escala de magnitud en la esquina superior izquierda, las estaciones antes mencionadas del lado izquierdo y se hace referencia a los datos calculados (obtenidos del modelo) y los observados (obtenidos de las estaciones de la RAMA) del lado derecho. En la parte inferior se localiza la escala de tiempo, cada serie de datos cuenta con una raya horizontal que representa el tiempo y el origen de la estación. Una raya vertical cuyo origen se encuentre sobre la recta horizontal y se dirija hacia arriba representa vientos provenientes del sur y viceversa.

En la esquina superior izquierda de cada una de las figuras de vientos (Fig. 4.39 y 4.40) y de temperatura (Fig. 4.41 y 4.42) se muestra la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación, donde:

V_{cal} es la magnitud del viento calculado (obtenido del modelo)

V_{obs} es la magnitud del viento observada (obtenida de las estaciones de la RAMA)

T_{cal} es la temperatura calculada (obtenida del modelo)

T_{obs} es la temperatura observada (obtenida de las estaciones de la RAMA)

r es el coeficiente de correlación ($0 \leq r \leq 1$)

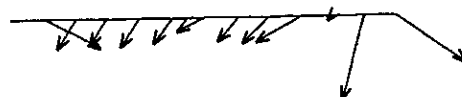
De esta manera se concluyó que los campos de salida del modelo son aceptables, pues los coeficientes de correlación para los vientos el día 29 de octubre son, en promedio, del 75.25 % y el de la temperatura es de 79.25%. Los coeficientes de correlación para el día 9 de agosto son de 73.67% para los vientos y 79% para la temperatura, en promedio.

En todas las pruebas que se realizaron para validar el modelo se tiene un intervalo de confianza mayor al 73.67%, por lo que el modelo (MM5) puede reproducir satisfactoriamente las condiciones meteorológicas de mesoescala sobre el Valle de México.

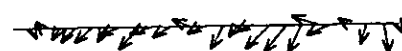
29/10/1996

5 m/s

Hangares

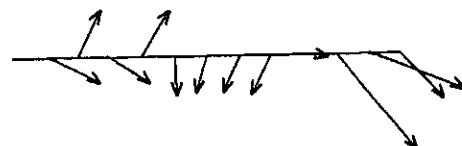


Calculado

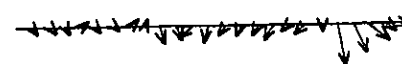


Observado

Plateros

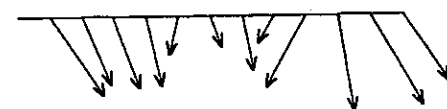


Calculado

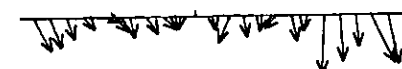


Observado

Tlanepantla

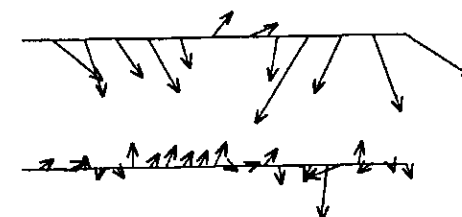


Calculado

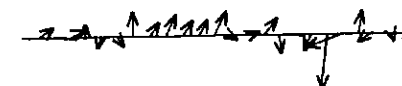


Observado

Xalostoc



Calculado



Observado

0 6 12 18 24

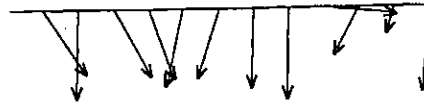
Tiempo (h)

Figura 4.37.- Comparación de vientos para el día 29 de octubre de 1996.

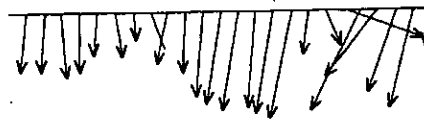
09/08/1996

5 m/s

Hangares

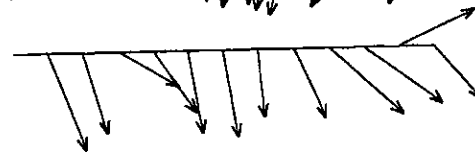


Calculado

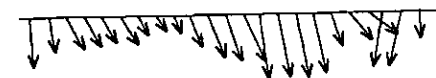


Observado

Plateros

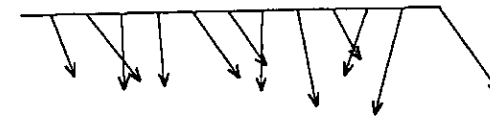


Calculado

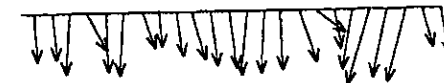


Observado

Tlanepantla



Calculado



Observado

0 6 12 18 24

Tiempo (h)

Figura 4.38.- Comparación de vientos para el día 9 de agosto de 1996.

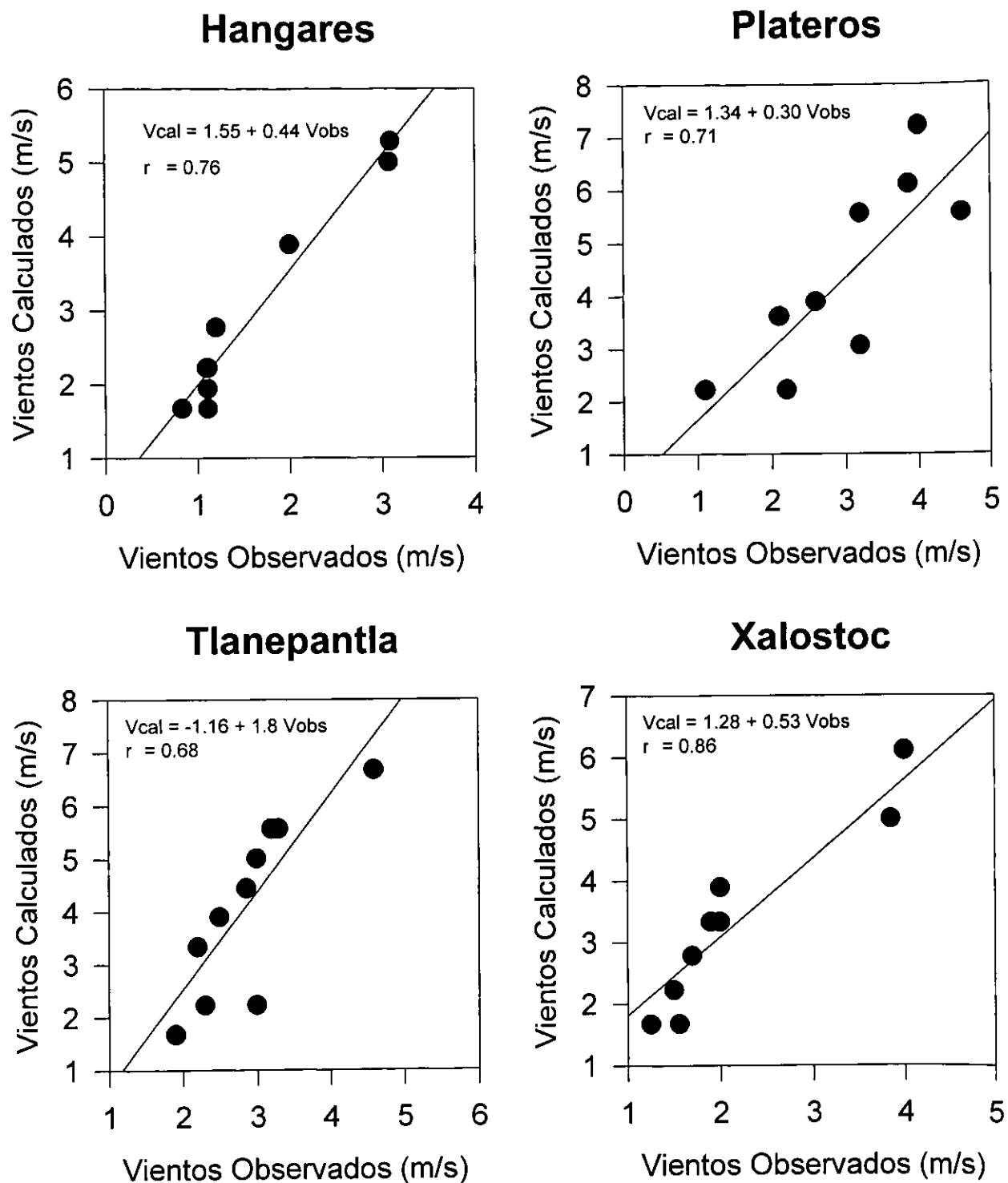
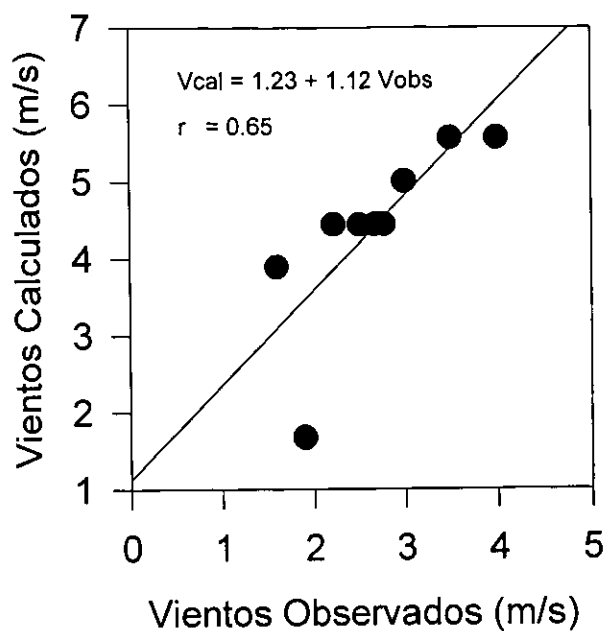
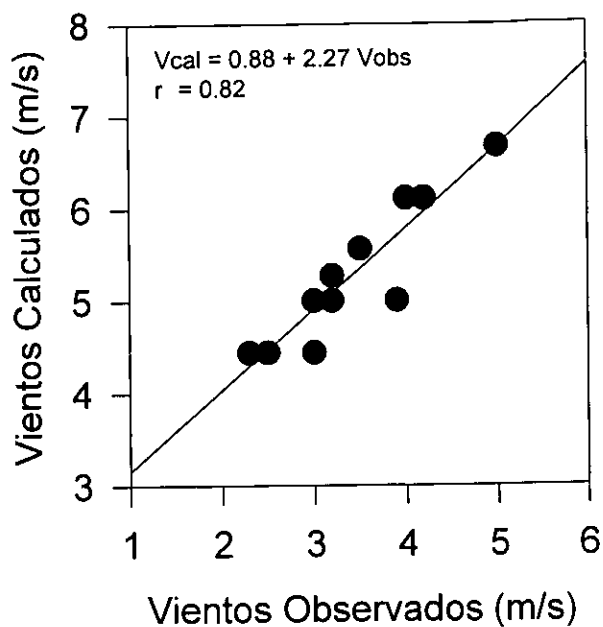


Figura 4.39.- Correlación entre la magnitud del viento observada y calculada, para el día 29 de octubre de 1996.

Hangares



Plateros



Tlanepantla

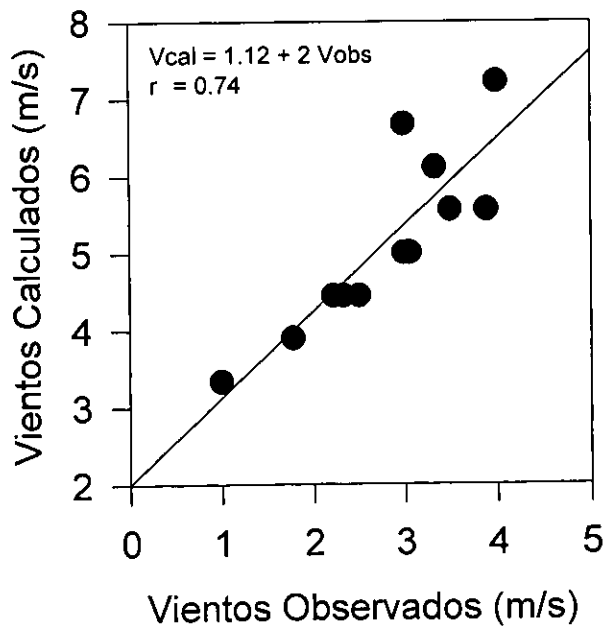


Figura 4.40.- Correlación entre la magnitud del viento observada y calculada, para el día 9 de agosto de 1996.

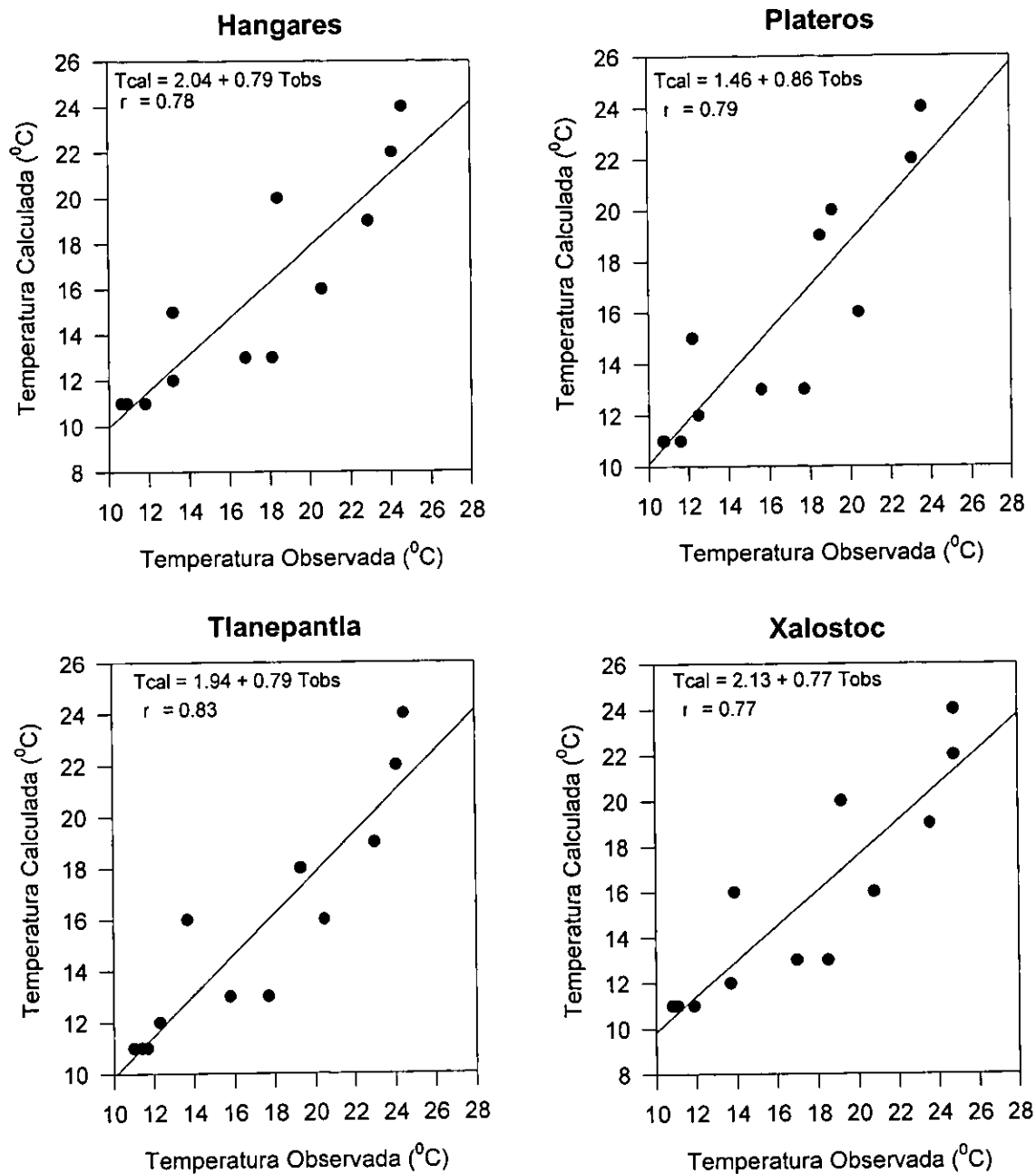


Figura 4.41.- Correlación entre la temperatura observada y la calculada, para el día 29 de octubre de 1996.

ESTA TESIS NO DEBE
 SALIR DE LA BIBLIOTECA

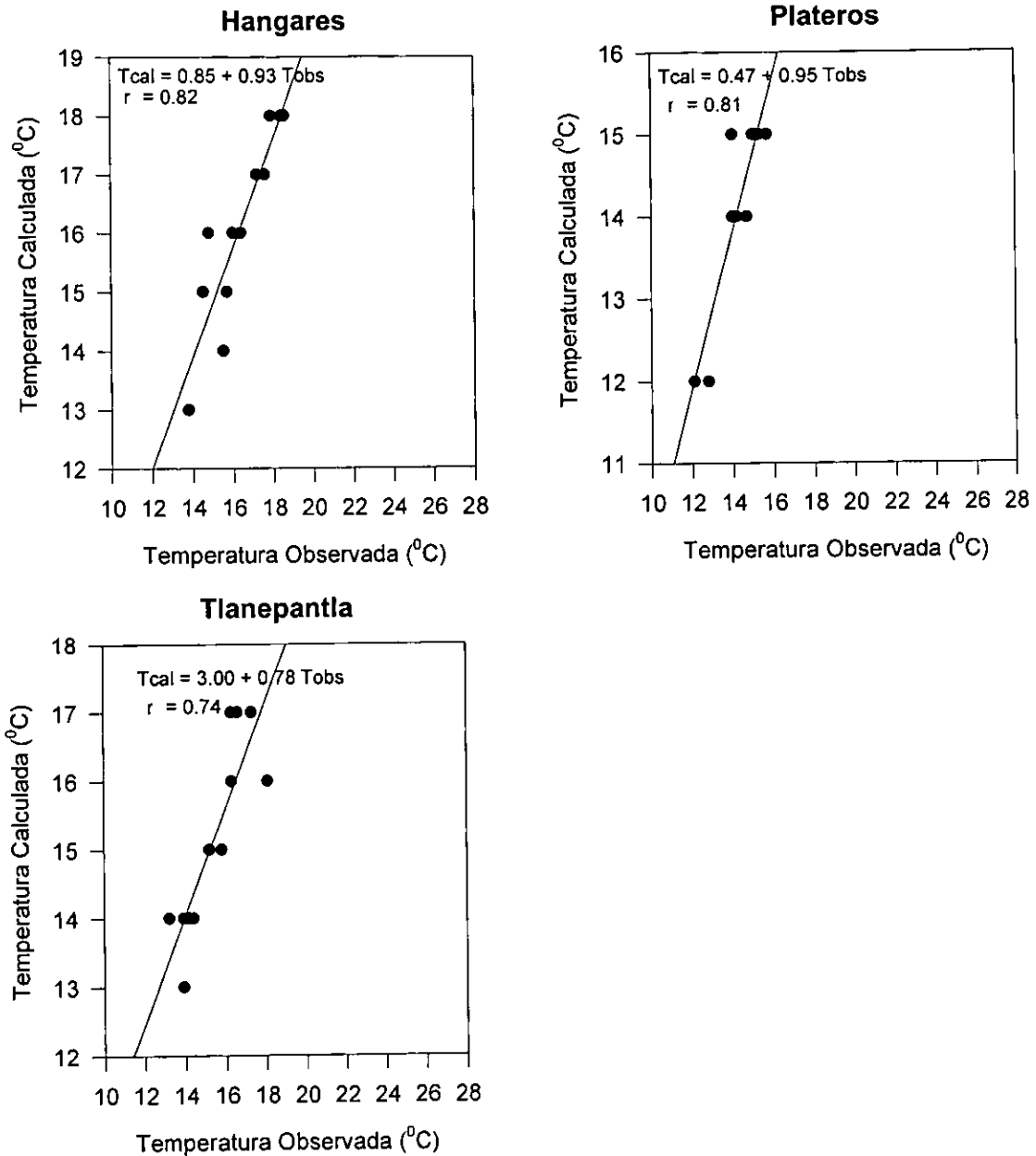


Figura 3.42.- Correlación entre la temperatura observada y la calculada, para el día 9 de agosto de 1996.

4.5.- Comparación de eventos extremos

Comparando ambos eventos, se observa en el día de máxima contaminación una alta temperatura sobre las montañas, lo que implica alta presión y densidad del aire sobre ellas, mientras que sobre el Valle de México la presión es menor. Como el aire se mueve de mayor a menor presión, baja de las montañas confinando el aire contaminado en el Valle de México. A pesar de que existieron movimientos ciclónicos durante la mayor parte del día, los movimientos ascendentes al ser tres órdenes de magnitud menores que los horizontales, no lograron dispersar el aire contaminado, y aunado a la línea de convergencia producida por la transferencia de momento del viento sinóptico del sureste, inhibió la dispersión de contaminantes sobre el Valle de México. Por el contrario, el 9 de agosto de 1996, el viento fue más intenso y no se presentó ninguna línea de convergencia sobre el Valle de México, favoreciendo la dispersión de los contaminantes.

En ambos casos la máxima concentración de monóxido de carbono se presentó al mediodía, cuando la intensidad del viento fue menor y se dirigía al suroeste donde se estancaba debido a la orografía, sin embargo, disminuyó rápidamente al cambiar de dirección.

El día de máxima contaminación a diferencia del de mínima, comienza con una atmósfera muy estable, y las montañas actúan como una fuente elevada de calor, lo que impidió que el aire de la superficie ascendiera y dispersara al monóxido de carbono.

CONCLUSIONES

El Modelo de Mesoescala Versión 5 (MM5), reproduce satisfactoriamente la circulación atmosférica a mesoescala sobre el Valle de México. Tales resultados se obtuvieron de comparar los vientos y temperaturas de superficie del modelo con los datos obtenidos de la RAMA.

La existencia de una línea de convergencia sobre el Valle de México inhibe la dispersión de contaminantes. Esto se debe a que los vientos y el flujo descienden, se debilitan cerca de esta región, impidiendo que los contaminantes puedan ser transportados hacia otras regiones.

Para el día de máxima contaminación, las montañas alrededor del Valle de México actúan como una fuente elevada de calor, inhibiendo la dispersión de los contaminantes. Esto se debe a que se generan vientos ascendentes sobre ellas, que impiden el continuo reciclado del aire del Valle de México.

El modelo fue capaz de ver la diferencia de la estabilidad atmosférica para los días de máxima y mínima contaminación, notando que para el día de mayor contaminación se contó con un gradiente térmico y una estabilidad atmosférica a lo largo del día, mayor que para el de mínima. Por lo que los movimientos verticales no fueron tan significativos como para el día de mínima contaminación, evitando la dispersión del aire contaminado.

En la dispersión de contaminantes la dirección juega un papel tan importante como la intensidad del viento. Pues cuando el viento se dirige hacia el sureste disminuye en gran medida la contaminación en el Distrito Federal, y viceversa cuando se dirige hacia el suroeste.

Los contaminantes atmosféricos en el Valle de México dependen más de cuestiones socioeconómicas que atmosféricas, en cuanto a su intensidad; pero son los factores meteorológicos los que favorecen su dispersión.

El día de mínima contaminación cuenta con una alta presión sobre el Valle de México, que favorece los movimientos convectivos y la dispersión de los contaminantes. Estas variaciones de presión entre un día y otro son capaces de ser reproducidas satisfactoriamente por el modelo.

Para entender la importancia global de la contaminación en el Valle de México se deben hacer además de los estudios climatológicos estudios sociales y bioquímicos de tal forma que nos den una idea más precisa sobre los orígenes de los contaminantes y su dispersión. También sería de gran ayuda acoplar este modelo (MM5) con algún modelo de dispersión, de forma tal que los pronósticos que se obtengan sean de mayor ayuda en la prevención de eventos extremos de contaminación.

En la actualidad se han tomado varias medidas para tratar de resolver el problema de la contaminación, como por ejemplo; el programa “Doble no circula”. Quizá la solución de fondo al problema de contaminación en el Valle de México debe incluir un transporte público eficiente que desaliente el uso de autos particulares. Adicionalmente, se puede pensar en diseñar un sistema de pronóstico meteorológico, sobre el Valle de México, de las condiciones que resultan en episodios de alta contaminación.

Una posible solución a este problema sería reforestar las montañas que rodean al Valle de México. Con ello la humedad se retendría por mas tiempo en la superficie y se evitaría que las montañas actuaran como una fuente elevada de calor. Esto evita que se genere un movimiento advectivo desde las montañas hacia el Valle, que inhibe el continuo reciclaje del aire contaminado sobre Valle de México.

REFERENCIAS

- Anthes, R.A., N. Seaman, J. Sobel y T. Warner, 1974. *The development of mesoscale models suitable for air pollution studies*. Select Group in Air Pollution Meteorology, Second Annual Progress Report. Vol. I. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C. 27711, 271 pp.
- Bachelor, G.K. 1976. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University, New York, USA. 615 pp.
- Blackadar, A.K., 1962. The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 67 (8), 3095-3102.
- Bossert, J.E., 1997. An investigation of flow regimes affecting the Mexico City region. *J. Appl. Meteor.*, 36: 119-140.
- Chen, P.C., 1996. *Climate and weather simulations and data visualization using a supercomputer, workstations, and microcomputers*. Proc Spie Int Soc Opt Eng, Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, Bellingham, Wa, (USA), 2656: 254-264.
- Chen, C., C.H. Bishop, G.S. Lai y W-K. Tao, 1997. Numerical simulation of an observed narrow cold-frontal rainband. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (6): 1027-1045.
- Cushman-Roisin, B. 1994. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall, New Jersey, USA. 320 pp.
- Doran, J.C., S. Abbott, J. Archuleta, X. Bian, J. Chow, R.L. Coulter, S.F.J. de Wekker, S. Edgerton, S. Elliott, A. Fernandez, J.D. Fast, J.M. Hubbe, C. King, D. Langley, J. Leach, J.T. Lee, T.J. Martin, D. Martinez, J.L. Martinez, G. Mercado, V. Mora, M. Mulhearn, J.L. Pena, R. Petty, W. Porch, C. Russell, R. Salas, J.D. Shannon, W.J. Shaw, G. Sosa, L. Tellier, B. Templeman, J.G. Watson, R. White, C.D. Whiteman, y D. Wolfe, 1998. The IMADA-AVER Boundary Layer Experiment in the Mexico City Area. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (11): 2497-2508.
- Dudhia, J., D. Gill, G. Yong-Run, D. Hansen, K. Manning, W. Wang e I. Moore, 1999. *PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 2*. NCEP tutorial note NCEP/NCAR. USA. 264 pp.
- EPA., 1997. *Smog -Who does it hurt. What you need to know about ozone and your health*. United States Environmental Prediction Agency.
- García-Reynoso J. A., 1999. *Informe de Trabajo Doctoral en Ciencias de la Tierra*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, C.U.-UNAM.
- Gordon, A.H., 1965. *Elementos de meteorología dinámica*. Unión tipográfica editorial Hispano Americana. México. 223 pp.

- Grell, G.A., J. Dudhia y D.R. Stauffer, 1995. *A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. National Center for Atmospheric Research. USA. 395 pp.
- Haltiner, G.J. y R.T. Williams, 1980. *Numerical prediction and dynamic meteorology*. Wiley, New York, USA. 477 pp.
- Hernández-Grajales, R.V., 1999. *Modelación preliminar del campo de viento alrededor de la central nucleoelectrica de Laguna Verde*. Tesis de Licenciatura. Fac. de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana. 67 pp.
- Holt, T. y M. Fiorino, 1995. *GRADS, The Grids Analysis and Display System*. Tutorial notes, Center for Ocean-Land-Atmospher Studies. Calverton, MD, USA. 148 pp.
- Holton, J.R., 1992. *An introduction to dynamic meteorology*. Academic press, San Diego, USA. 511 pp.
- Jáuregui, E., 1973. The urban climate of Mexico City, *Erdkunde*, 28 (4): 298-307.
- Jáuregui, E., 1988. Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin, *Atmósfera* 1: 131-140.
- Jáuregui, E., 1993. Mexico City's urban heat island revisited, *Erdkunde*, 47: 185-195.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collis, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, Roy Jenne y Dennis Joseph. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, 1996. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77 (3): 437-471.
- Kuo, H. L., 1971. A theory of parameterization of cumulus convection. *J. Meteor. Soc. Japón*, 49: 744-756.
- Landau, L. y E. Lifchitz, 1971. *Physique Theorique*. Editions Mir, Moscou. 752 pp.
- Magaña V. y J. L. Pérez, 1998. Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional de México. *GEO UNAM*, 5 (1): 33-39.
- Pan, Z., E. Takle, M. Segal y R. Turner, 1996. Influences of model parameterization schemes on the response of rainfall to soil moisture in the central United States. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (8): 1786-1802.
- Panchev, S., 1985. *Dynamic Meteorology*. D. Reidel Publishing Company, Holanda. 360 pp.
- Pedlosky, J. 1979. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York, USA. 624 pp.

- Pérez-García, I y E.C. Nickerson, 1997. The applicability of a mesoscale model in the Valley of Mexico during extreme air pollution episodes. En: *Numerical Simulations in the Environmental and Earth Sciences*. (Eds), García-García, F., G. Cisneros, A. Fernández-Eguiarte y R. Álvarez. Cambridge University Press, New York, USA. 134-142.
- Riehl, H y D. Herkhof, 1972. Some aspects of Denver air pollution meteorology. *J Appl. Meteor.*, 11: 1040-1047.
- Vázquez-Aguirre, J.L., 2000. *Caracterización objetiva de los nortes del Golfo de México y su variabilidad interanual*. Tesis de Licenciatura. Fac. de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, 62 pp.
- Warner, T.T. 1997. Environmental Applications of Mesoscale Atmospheric Models. En: *Numerical Simulations in the Environmental and Earth Sciences*. (Eds), García-García, F., G. Cisneros, A. Fernández-Eguiarte y R. Álvarez. Cambridge University Press, New York, USA. 105-115.
- Warner, T.T., Y-H. Kuo, J.D. Doyle, J. Dudhia, D.R. Stauffer y N.L. Seaman, 1992. Nonhydrostatic, mesobeta-scale real-data simulations with the Penn State University/National Center for Atmospheric Research mesoscale model. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49: 209-227.