

# CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA LOCAL EN EL VALLE DE MÉXICO DURANTE EL EXPERIMENTO CAM-MIT-2002: ANÁLISIS DE DIAGNÓSTICO

Alejandro ZITÁCUARO CONTRERAS y Ernesto CAETANO NETO  
*Grupo de Meteorología Tropical del Centro de Ciencias de la Atmósfera  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*

## RESUMEN

En febrero del 2002 se realizó el experimento CAM-MIT (Comisión Ambiental Metropolitana del Gobierno del Distrito Federal, México - Massachusetts Institute of Technology), para obtener mediciones de parámetros químico-atmosféricos y realizar estudios de calidad del aire sobre el Valle de México. El trabajo que aquí se presenta analiza algunos parámetros meteorológicos observados durante la campaña.

**Palabras clave:** Análisis observacional, circulación local, Valle de México.

## ABSTRACT

*In February of the 2002 the CAM-MIT (Metropolitan Environmental Commission of the Government of the Federal District, Mexico - Massachusetts Institute of Technology) experiment was conducted, to make measurements of chemical - atmospheric parameters and to also to study the air quality of the Valley of Mexico. Here is presented the analysis of the observed meteorological parameters collected during the campaign.*

**Key words:** *Observational analysis, local circulation, Valley of Mexico.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica sobre el Valle de México es uno de los problemas más comunes en cuanto a la calidad del aire y al ambiente de esta zona. Esta contaminación, al ser arrastrada por las corrientes de aire, puede generar áreas con condiciones desfavorables para la salud de la población (BOSSERT, 1997).

La dimensión de la isla de calor sobre la zona toma un papel relevante en cuanto a la modulación de los sistemas atmosféricos locales. Si se imagina a esta isla de calor como una gran burbuja de aire relativamente caliente ubicada sobre la ciudad de México, y que posee características distintas a la de sus alrededores en una atmósfera estable y en calma, dicha burbuja estaría obligada a ascender, ya que al incrementarse su temperatura, el aire se volvería más ligero y menos denso. Al mismo tiempo, su presión se reduciría formando un núcleo de baja presión; cualquier flujo entorno a esta burbuja se vería influenciado por la baja presión formada por la isla de calor, de modo que los vientos adoptarían la forma de un vórtice o circulación ciclónica (BENJAMÍN, 1983).

La isla de calor en la ciudad de México, originada por la urbanización, parece relacionarse con la formación de un vórtice ciclónico en el interior del Valle de México (JAUREGUI, 1995). En este

trabajo se analizan las características de las circulaciones atmosféricas locales sobre el Valle de México durante el periodo del experimento CAM-MIT.

## 2. CONDICIONES GEOGRÁFICAS DE LA ZONA Y SISTEMAS ATMOSFÉRICOS

La Cuenca de México, mejor conocida por su población como "El Valle de México", se encuentra situada de los 19° 03' a 19° 54' de latitud norte y de los 98° 38' a 99° 31' de longitud oeste, en la parte centro-sur del país; representa aproximadamente el 0,25% de la superficie total del país con 4.925 km<sup>2</sup> (INEGI, 2000).

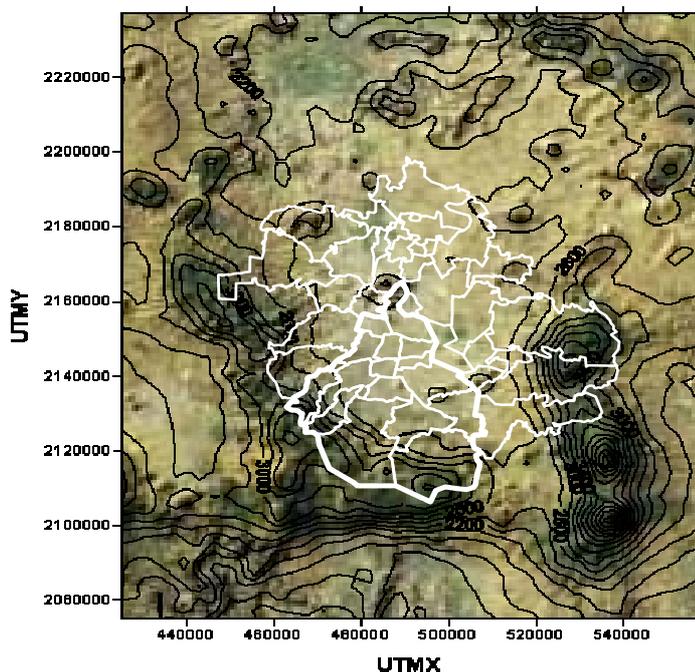


Fig. 1. Orografía del ámbito de estudio. Municipios y delegaciones que forman parte del Valle de México

El Valle de México en sus partes planas y bajas tiene una altitud aproximada de 2.240 m. Se encuentra en la parte sur de la Sierra La Muerta y sus límites geográficos son: la Sierra de Pachuca al norte, con una altitud media de 3.200 m; la Sierra Ajusco-Chichinautzin al sur, con una altitud media de 3.850 m; la Sierra Nevada, al este, cuyas dos principales formaciones son los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, con alturas de 5.286 y 5.747 m respectivamente; y la Sierra de Las Cruces y Tepotzotlán al oeste, con una altura media superior a los 4.000 m (RODRÍGUEZ, 1999). Este conjunto de sistemas orográficos, es el que determina la divisoria de la cuenca y le dan al Valle de México la forma de un plato enorme (Fig. 1), donde la orografía actúa como una barrera que evita la dispersión del aire contaminado emitido por la industria y los automóviles en la Ciudad de México (RODRÍGUEZ, 1999).

### 2.1. Sistemas a gran escala y a escala sinóptica

Los efectos de la topografía sobre los movimientos del aire actúan sobre un amplio rango de escalas (planetaria, sinóptica, regional, local, etc.), que en conjunto producen los sistemas de circulación atmosférica. Tales sistemas son el producto de las interacciones entre los sistemas

correspondientes a cada escala y los mecanismos generados por factores térmicos y dinámicos (BARRY, 1981).

A pesar de que los cambios en los flujos planetarios generalmente son de mayor importancia para el clima global, estos modulan las características de los sistemas a menor escala (sinóptica por ejemplo); a su vez, las modificaciones en los sistemas a escala sinóptica producen consecuencias inmediatas en las condiciones locales de una determinada región (BOLIN, 1950).

Los sistemas a escala sinóptica que presentan mayores efectos sobre las regiones con orografía relevante son los sistemas frontales ya que al cruzar las regiones montañosas modifican en gran parte la estructura de la atmósfera (BARRY, 1981). En el Valle de México, en la temporada seca (noviembre-abril), es común el paso de sistemas frontales (en este caso *frentes fríos*) y el asentamiento de masas de aire polar provenientes del noroeste de los Estados Unidos y Canadá. Estos a su vez son consecuencia de los llamados *Nortes*, típicos de esta temporada (VÁZQUEZ, 2000). Los *Nortes* se acompañan de lluvias esporádicas, aunque estas precipitaciones se deben tanto al paso de los *frentes fríos* sobre dicha región como a las interacciones que causa el frente con las condiciones meteorológicas tropicales de la zona.

## 2. 2. Circulaciones locales en el Valle de México

En general durante el invierno los vientos de la tarde se dirigen de la planicie a las montañas situadas en el poniente del Valle; además, se presenta un flujo de vientos del sur en la mitad oriental de la ciudad, mientras en el norte de la ciudad se observa una circulación ciclónica ligada a la presencia de aire tibio (o isla de calor) (JÁUREGUI, 1995).

Durante la noche el flujo del aire fresco o frío se desplaza ladera abajo desde las montañas circundantes; la convergencia de vientos, originada por la topografía del entorno, se ve reforzada por la presencia del aire tibio generado por la gran ciudad, que actúa como un tiro de chimenea que atrae el aire de los suburbios hacia el interior de la urbe.

La altitud de la ciudad de México, así como su estructura orográfica, no favorecen la dispersión de contaminantes. Por el contrario, propicia la formación de ozono en superficie, ya que la radiación en altitudes elevadas es más directa y modifica en mayor grado las partículas de oxígeno por efecto fotoquímico (PÉREZ *et al.*, 1997). La zona industrial al norte de la ciudad provoca, además, emisiones de contaminantes, los cuales son transportados hacia al suroeste donde quedan estancados (GARCÍA, 1999).

Un problema sobre dispersión y transporte de contaminantes relacionado con las circulaciones locales ocurre cuando los vientos convergentes nocturnos no favorecen la dispersión de contaminantes hacia el exterior de la ciudad. Y aunque, durante las horas nocturnas existen pocas fuentes de emisión, al amanecer se forma una inversión térmica habitual en la temporada de invierno, la cual produce situaciones críticas de contaminación atmosférica (DDF, 1995). JÁUREGUI (1998) argumenta que los vientos locales generados térmicamente en el Valle de México tienden a restringir la ventilación del aire contaminado cerca de la superficie, mientras que el relieve que rodea el valle contribuye a mantener un alto índice de contaminación.

No obstante, los movimientos convectivos favorecen la dispersión de contaminantes. Las condiciones más favorables ocurren cuando el suelo está húmedo y existe una somera capa límite, inicialmente seca, que al calentarse se inestabiliza favoreciendo las lluvias locales, si bien éstas son menores cuando no existe un forzamiento térmico suficiente para iniciar un movimiento convectivo, a pesar de que la atmósfera sea relativamente húmeda (PAN, 1996).

### 3. DATOS Y METODOLOGÍA

El experimento CAM-MIT se realizó del 11 al 21 de febrero del 2002. Contó con la instalación de seis estaciones meteorológicas automáticas acompañadas de otras en las que se midieron diversos parámetros químicos y de concentración de contaminantes. Durante el experimento también se realizaron lanzamientos de radiosondas dos veces al día, a las 06 y 18 horas (hora local del centro de México). A estos datos se sumaron los proporcionados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) del Servicio Meteorológico Nacional.

#### 3.1. Análisis objetivo: método de correcciones sucesivas

El método de Cressman, también llamado método de correcciones sucesivas, fue originalmente diseñado para áreas de datos relativamente densos y redundantes. El método considera la distribución de una variable meteorológica  $X_{g_{ij}}^{(v)}$  en la  $v$ -ésima iteración en el punto de malla  $(i, j)$ , y  $d$  es la distancia del punto de malla  $X_{g_{ij}}^{(v)}$  al punto de observación  $k$ . Alrededor de un punto de malla se dibuja un círculo mostrando el radio de influencia  $R$  y el área circunscrita es llamada región de influencia (KRISHNAMURTI *et al.*, 1996).

Dentro de una malla, la interpolación del campo obtenido de reanálisis con las observaciones es dada por:

$$X_{g_s}^{(v)} = \sum_{\substack{j=J+1 \\ i=I+1 \\ i=I-1 \\ j=J-1}}^{j=J+1} w_{ij} X_{g_{ij}}^{(v)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

donde  $I$  y  $J$  representan el número de puntos de malla en las direcciones zonal y meridiana, respectivamente. La función ponderada,  $w$ , es definida como

$$w_{ij} = \prod_{\substack{k=I+1 \\ k \neq I}}^{k=I+1} \frac{(x - x_k)}{(x_I - x_k)} \prod_{\substack{l=J+1 \\ l \neq J}}^{l=J+1} \frac{(y - y_l)}{(y_J - y_l)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

donde  $x$  y  $y$  son las localizaciones de los puntos de malla y observados, respectivamente.

Este planteamiento flexible, barato y satisfactorio en el manejo de datos, ha resultado ser una herramienta robusta para los requerimientos presentes de la predicción numérica, gracias a la detección y eliminación de errores que posee este sistema de análisis, a pesar de que una de las mayores dificultades de la aplicación práctica de la interpolación en cualquier análisis objetivo es el problema de la fiabilidad y mejora de los datos.

#### 4. DIAGNÓSTICO Y RESULTADOS

Durante febrero del 2002 el paso de siete sistemas frontales dio lugar a eventos de *Norte* en la planicie del centro de México; tres de ellos ocurrieron dentro de la campaña de mediciones del experimento CAM-MIT. Tomando en cuenta un caso particular de *Norte*, el análisis objetivo del viento local en la zona del Valle de México muestra un patrón diurno, siendo más débil por la mañana (06 horas) y más intenso por la tarde (18 horas; Fig. 2). El día 9 a las 18 horas (Fig. 2a) el viento muestra en la mayor parte del valle una componente sur, con un núcleo de convergencia sobre la zona del Cerro de la Estrella; doce horas después (Fig. 2b) los vientos se debilitan y dan lugar a corrientes que van de las montañas al fondo del valle originando una brisa de montaña.

Durante las horas de máxima intensidad de la situación de *Norte* (Fig. 2c), el viento no sopló de manera uniforme en todo el valle, siendo en estaciones como Chapingo y El Cerro de la Estrella se registran componentes de sur y sureste respectivamente. Sobre la zona de El Cerro de la Estrella se observa que los vientos convergen, al igual que ocurría 24 horas antes del evento, pero ahora con una mayor intensidad. A esta escala se puede ver que los vientos del norte sólo son evidentes en algunos puntos del valle; además, las montañas actúan como barrera desviando el viento hacia los pasos entre las montañas del suroeste del valle, donde la velocidad del viento presenta un ligero aumento de acuerdo con el principio de Bernoulli.

El día 11 a las 06 horas la intensidad del viento se debilita (Fig. 2d), aunque la componente norte es aún apreciable; los flujos de montaña adoptan un sentido contrario a la brisa de montaña. Se observa con claridad cómo el evento *Norte* ha modulado la circulación local alterando el efecto orográfico. Doce horas después (Fig. 2e) el viento vuelve a tener una componente sur en casi todo el valle.

Los campos del viento medio del mes de febrero a las 00 y 06 horas (Fig. 3a y 3b) indican que los flujos dominantes responden al efecto orográfico, a excepción de los eventos de Norte. A las 18 horas (Fig. 3d) se observa un área de convergencia sobre la zona de El Cerro de la Estrella, favorable para una mejor dispersión de contaminantes ya que el viento es obligado a ascender transportándolos hacia los niveles superiores del valle.

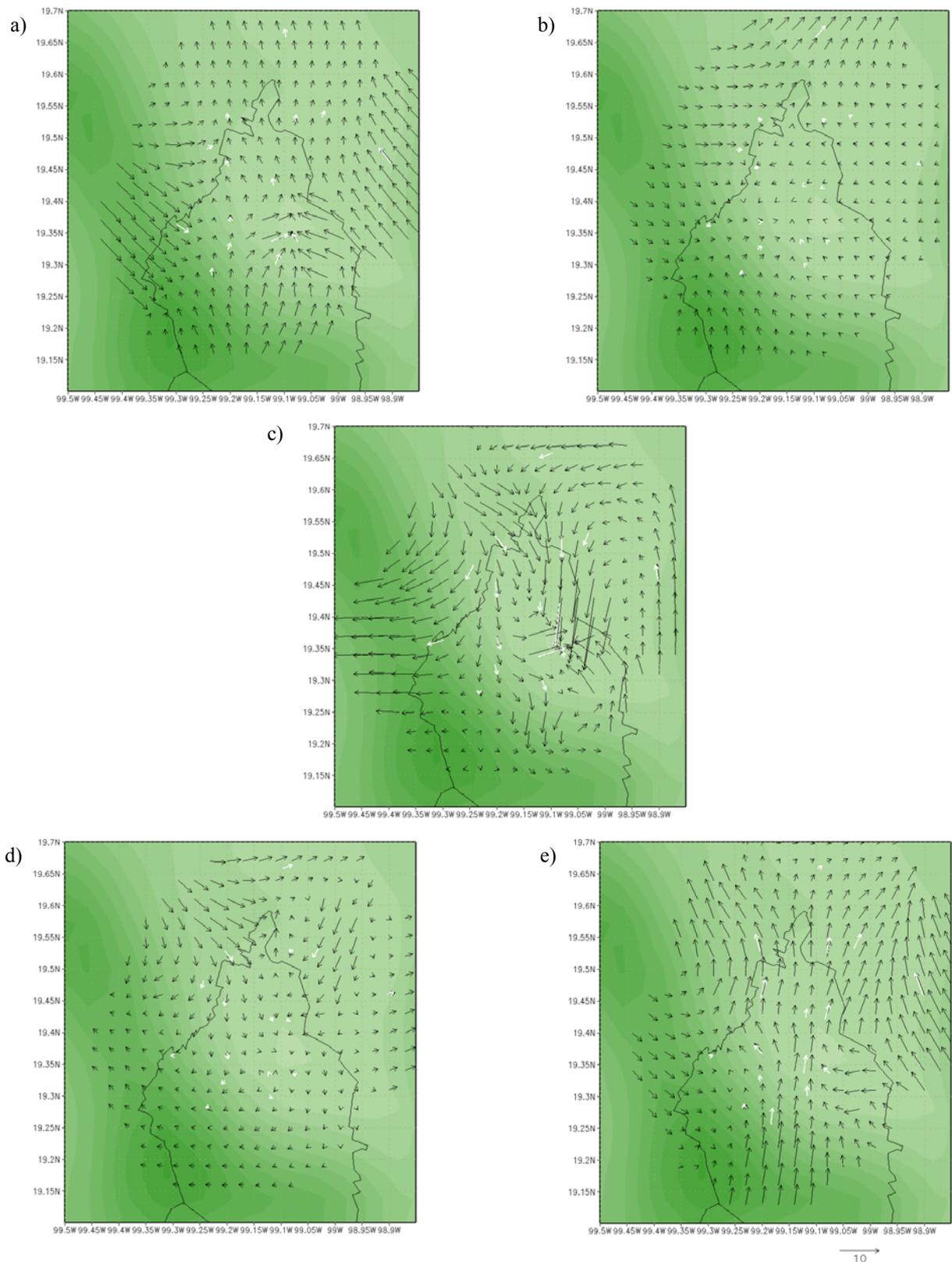


Fig. 2 Análisis objetivo del viento (m/s) durante un evento de *Norte*:  
 a) 9 de febrero a las 18 horas; b) 10 de febrero a las 06 horas; c) 10 de febrero a las 18 horas;  
 d) 11 de febrero a las 06 horas; e) 11 de febrero a las 18 horas

Los vientos sobre las montañas situadas al sur del valle muestran un patrón diario que obedece a circulaciones atmosféricas formadas por las brisas de valle y de montaña. Por ejemplo, los vientos en la estación Tres Marías muestran el predominio de una componente sur dentro entre las 10 y las 19 horas (Fig. 4), rotando casi 180 grados para adoptar una componente norte durante la noche y madrugada. Por otro lado la estación de Cuajimalpa, situada dentro del valle y en las faldas de las montañas al sureste de la cuenca, presenta el mismo patrón diario aunque con menos horas de vientos de valle (de 11 a 15 horas). Por su parte, Tepepan, al sur del valle, presenta una mayor variabilidad, no reflejando el régimen de brisas de valle y de montaña.

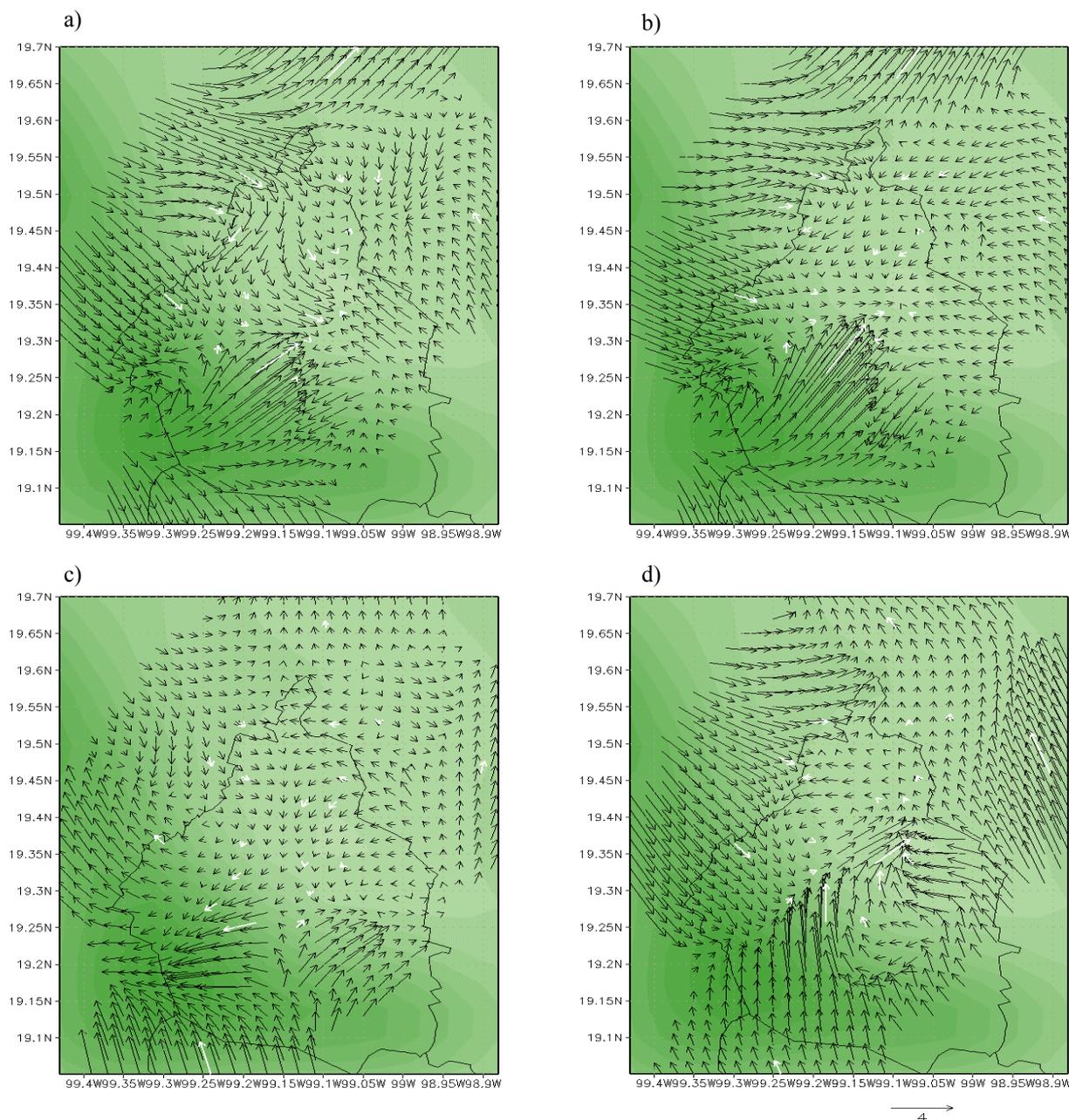


Fig. 3. Variación diaria de la velocidad y dirección del viento en superficie (m/s):  
a) 00 horas; b) 06 horas; c) 12 horas; d) 18 horas

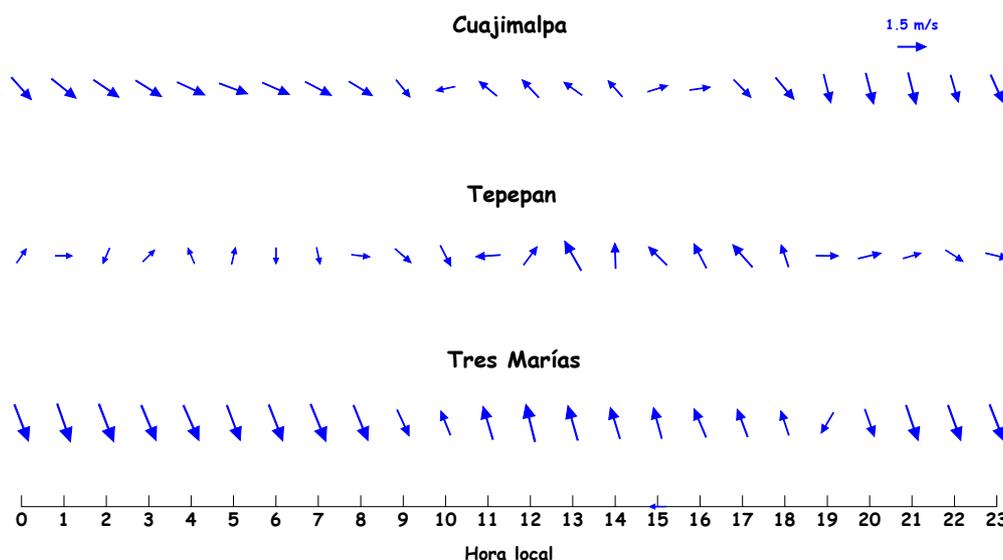


Fig. 4. Promedio horario del viento en superficie para Tres Marías, Cuajimalpa y Tepepan. Febrero de 2002

## 5. CONCLUSIONES

Las circulaciones locales en la región del Valle de México durante febrero del 2002 estuvieron moduladas en su mayor parte por la orografía y las interacciones de ésta con sistemas sinópticos (eventos de *Norte*). Los eventos de *Norte* modifican las características de las condiciones atmosféricas locales y producen un efecto de ventilación que es propicio para la dispersión de contaminantes. A pesar de ello, los campos de viento medio durante febrero del 2002 muestran que la circulación del viento responde fundamentalmente a efectos orográficos (brisas de valle y de montaña).

## 6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Adalberto Tejeda Martínez por las valiosas aportaciones a este trabajo.

## 7. REFERENCIAS

- BARRY, G.R. (1981). *Mountain weather and climate*. Methuen, USA, 313 pp.
- BENJAMÍN, S.G. (1983). *Some effects of surface heating and topography on the regional severe storm environment*. Ph.D. thesis, Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, 265 pp.
- BOLIN, B. (1950). "On the influence of the earth's orography on the character of the westerlies". *Tellus*, 2, pp.184-95
- BOSSERT, J.E. (1997). "An investigation of flow regimes affecting the Mexico City region". *J. Appl. Meteor.*, 36, pp.119- 140.
- DDF DIRECCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE (1995). *Programa para mejorar la calidad del aire*.

- GARCÍA, J.A. (1999). *Evaluación de escenarios utilizando el modelo regional de calidad del aire Multiscale Climate Chemistry Model*. Tesis de Doctorado en Ciencias (Fisicoquímica de la atmósfera), Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM, 111 pp.
- INEGI (2000). Censo Estadístico de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. On-Line: <http://inegi.gob.mx>
- JÁUREGUI, E. (1995). "Algunas alteraciones de largo período del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. Revisión y perspectivas". *Investigaciones Geográficas*, Boletín 31, UNAM, pp.9-44.
- JÁUREGUI, E. (1998). *Climate variability and trend in the Mexico Basin during the XX Century*. Geographical Union Commission on Climatology, Evora, Portugal, pp.65-66.
- KRISHNAMURTI, T.N. and BOUNOUA, L. (1996). "An introduction to numerical weather prediction techniques". *CRS Press*, pp.93-119.
- PAN, Z. (1996). Influence of model parameterization schemes on the response of rainfall to soil moisture in the central United States. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (8), pp.1786- 1802.
- PÉREZ, G.I. y NICKERSON, E.C. (1997). The applicability of a mesoscale model in the Valley of Mexico during extreme air pollution episodes. En: GARCÍA-GARCÍA, F.; CISNEROS, G.; FERNÁNDEZ-EGUIARTE, A and ÁLVAREZ, R. (Eds). *Numerical Simulations in the Environmental and Earth Sciences.*, Cambridge University Press, New York, USA, pp.134- 142.
- RODRIGUEZ, V.D. (1999). *Prevención de desastres en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Tesis de Doctorado en Ciencias Sociales, División de ciencias sociales y humanidades de la UAM, 360 pp.
- VÁZQUEZ, A.J.L. (2000). *Caracterización objetiva de los nortes del Golfo de México y su variabilidad interanual*. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Fac. Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, 62 pp.

