



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

01060  
/

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

**ESTUDIO DE LAS RELACIONES ENTRE LAS  
CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y LA DISTRIBUCIÓN  
VERTICAL DEL OZONO EN LA TROPOSFERA DE LA  
CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN GEOGRAFÍA

QUE PRESENTA

**NORBERTO ALATORRE MONROY**

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

DIRECTOR DE TESIS: DR. MAURO G. VALDÉS BARRÓN



DIVISION DE  
ESTUDIOS DE POSGRADO

CIUDAD DE MÉXICO

SEPTIEMBRE DE 2002

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Esta tesis se realizó, gracias a la beca de maestría No. **117115** del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

La tesis forma parte de los resultados del proyecto financiado por CONACYT, titulado “**Distribución vertical del ozono en la troposfera de la Ciudad de México**”, el cual se realizó en el Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica de la UNAM, del 08 al 18 de abril de 1997.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

*Gracias al amor que nació de mis padres, tengo la dicha de conocer y compartir la vida con mis hermanos J.Javier, J. Antonio y Jacobo, con los cuales he de seguir compartiendo los mejores días de mi existencia.*

Gracias a mi esposa: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

***“ Todo conocimiento comienza por los sentimientos “.***  
*Leonardo da Vinci (1452 - 1519).*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

De la manera más atenta doy reconocimiento especial a las siguientes personas:

**Dr. Mauro G. Valdés Barrón**, asesor del presente trabajo y a quien debo en todo momento mi lealtad y amistad; gracias por ésta oportunidad.

**Dr. Amando Leyva Contreras**, sus oportunos comentarios han enriquecido éste trabajo.

**Dra. Laura Elena Maderey Rascón y Dra. María Engracia Hernández Cerda**, excelentes maestras que están dispuestas a brindar una correcta orientación, gracias.

**Dr. Juan Carlos Gómez Rojas**, excelente maestro dispuesto a brindar una correcta orientación.

**Ing. Jesús Martínez Guerrero**, buen amigo y consejero.

**A todo el personal del ORS del Instituto de Geofísica, UNAM.**

# **Estudio de las relaciones entre las condiciones meteorológicas y la distribución vertical del ozono en la troposfera de la Ciudad de México.**

## **Índice**

### **Introducción.**

<b>Capítulo 1 El ozono y el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).</b>	<b>1</b>
1.1. El ozono, su función y localización en la atmósfera.	1
1.2. El ozono en la estratosfera, la troposfera y como un contaminante atmosférico urbano	5
1.3. El caso de la ZMCM y sus antecedentes históricos. Actualidad e importancia del tema	10
<b>Capítulo 2 Monitoreo del ozono en la troposfera. Metodología e instrumentación empleada.</b>	<b>15</b>
2.1. Técnicas de medición del ozono troposférico en la ZMCM.	15
2.1.1. Equipo de tierra.	19
2.1.2. Equipo de aire.	25
2.2. Procedimiento para el lanzamiento de los ozonosondeos.	25
2.3. Ubicación de los lanzamientos de las ozonosondas.	29
2.4. Programación de los ozonosondeos.	29
2.5. Condiciones meteorológicas a mesoescala.	30
<b>Capítulo 3 Resultados.</b>	<b>35</b>
3.1. Distribución vertical de la temperatura ambiente.	35
3.2. Distribución vertical de la humedad relativa.	42
3.3. Distribución vertical de la velocidad del viento.	49
3.4. Distribución vertical de la dirección del viento.	55
3.5. Distribución vertical del ozono.	60
<b>Capítulo 4 Análisis de los resultados.</b>	<b>69</b>
<b>Conclusiones.</b>	<b>84</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>86</b>

## Introducción.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), fisiográficamente se localiza en la parte suroeste de la Cuenca de México, siendo esta última hidrológica y atmosféricamente una cuenca cerrada; se encuentra a una altitud promedio de 2,240 msnm, y posee las siguientes coordenadas extremas: 19° 05' a 19° 35' de latitud norte y 99° 00' a 99° 27' de longitud oeste.

Asociado con lo anterior, el constante proceso de crecimiento de la población humana, así como las necesidades de infraestructura y servicios urbanos que demandan hacia el interior de la ZMCM, han propiciado que en el último lustro del siglo XX las condiciones atmosféricas locales y sinópticas sean decisivas para la presencia y permanencia, espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos, dejando como resultado un enrarecimiento del aire de la ciudad.

Con la finalidad de precisar de manera cuantitativa y cualitativa la presencia de los contaminantes atmosféricos metropolitanos, se realizaron en la década de los sesentas los primeros muestreos de la calidad del aire dentro de la ZMCM; estos estudios fueron encaminados por el Dr. Humberto Bravo Álvarez investigador de la UNAM. Como resultado de dichas pruebas se reportó por primera vez la presencia de metales pesados, así como los primeros indicios del ozono troposférico, en la capa de aire superficial.

Es de llamar la atención que para el caso del ozono como contaminante metropolitano, después de los registros obtenidos en los sesentas sobre sus concentraciones, se presentó una serie de estudios y reportes en los cuales se anunciaban incrementos de los índices de este contaminante; sin embargo, dichas investigaciones no fueron tomadas con la importancia que se debiera, lo que propició una falta de normatividad en los reglamentos

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ambientales del Departamento hoy Gobierno, del Distrito Federal. Esto provocó, a finales de 1986, que las concentraciones de ozono troposférico de la ZMCM se incrementaran drásticamente; tales aumentos estuvieron correlacionados directamente con el cambio de gasolinas que realizó PEMEX en el mismo año (Bravo y Torres, 1997).

Es hasta el año de 1988 cuando se observan los índices más altos de ozono, así como también su mayor permanencia y periodicidad dentro de la ZMCM; dichos índices rebasaron y violaron por 1000 horas la norma de calidad internacional para este contaminante; cabe señalar, que las condiciones atmosféricas de la ZMCM permanecieron con características similares hasta el invierno de 1996-1997.

Tomando en cuenta la situación anterior, surgió el interés por conocer la distribución vertical del ozono en la ZMCM, objetivo principal de esta investigación que se desarrolla en el Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica de la UNAM, y la influencia que ejercen los elementos y factores climáticos en la distribución espacial y temporal de este contaminante.

Para el objetivo mencionado, se plantea la hipótesis de que la concentración de ozono a diferentes altitudes, está determinada por la intensidad de la actividad de la capa de mezcla, la cual a su vez depende en orden de importancia de la temperatura, la humedad, el viento y la radiación solar.

En el **Capítulo I** se trata la importancia del funcionamiento y distribución del ozono a través de las diferentes capas atmosféricas, así como de los mecanismos de formación y comportamiento a nivel troposférico, donde se manifiesta como un contaminante se toma para ello, como caso de estudio la ZMCM y se dan sus antecedentes históricos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el **Capítulo II** se presentan tres diferentes técnicas para medir las concentraciones de ozono dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, así como sus rangos de precisión para el cálculo de la concentración del gas en cuestión.

También en este apartado se explican las ventajas del empleo de los ozonosondeos para el estudio del ozono urbano, el procedimiento para realizarlo por medio del equipo requerido, la selección de los sitios de lanzamiento, la programación de los ozonosondeos y el análisis de las condiciones meteorológicas a mesoescala.

El **Capítulo III** muestra una serie de perfiles verticales que corresponden a cada uno de los parámetros meteorológicos registrados por las radiosondas; de igual forma se presentan perfiles de ozono, producto de los datos obtenidos por las ozonosondas. Dichas graficas parten de una altitud desde el nivel del mar hasta los 35,000 msnm; así mismo, se hace una interpretación de cada uno de los grupos de gráficos.

En el **Capítulo IV** se desarrollan nuevos gráficos, pero en esta ocasión a una altitud de 2,000 a 6,000 msnm, los cuales permiten el análisis e interpretación más conveniente de los parámetros meteorológicos que influyen o participan en la presencia de las anomalías del ozono a nivel troposférico.

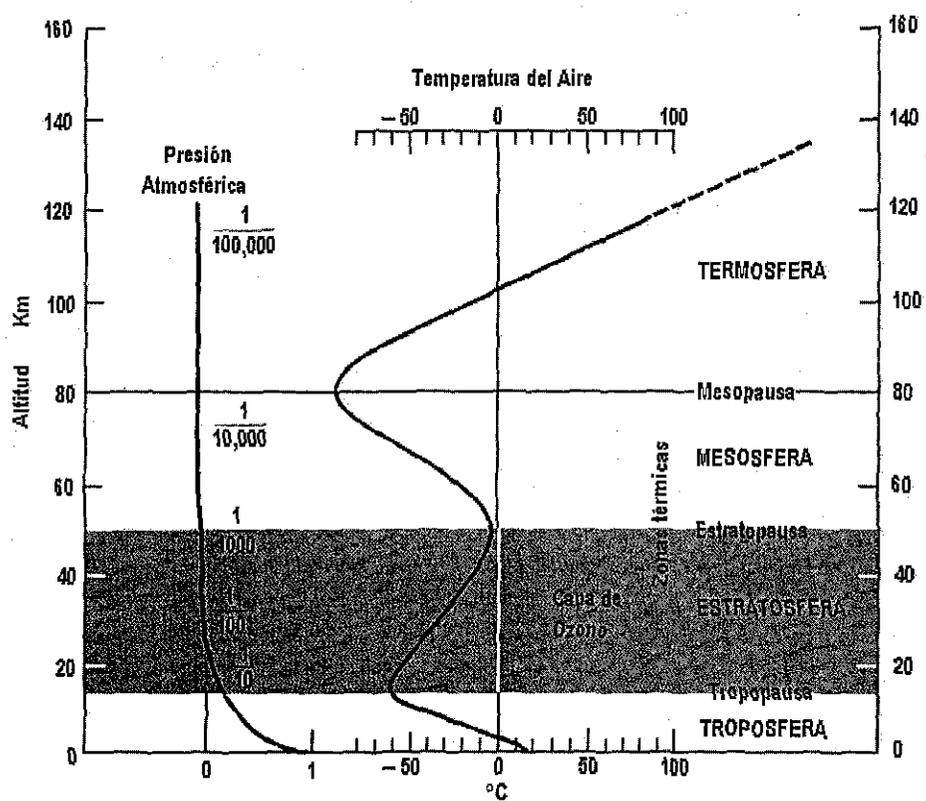
Por último, se presenta, un **anexo** con las conclusiones y recomendaciones; además se expone la bibliografía empleada en este estudio.

# CAPITULO I

## EL OZONO Y EL CASO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (ZMCM).

### 1.1. El ozono, su función y localización en la atmósfera

El ozono (O<sub>3</sub>) es un gas con un tono azulado cuyas moléculas se componen de tres átomos de oxígeno, y son relativamente inestables en la atmósfera terrestre. Quizá la característica más importante del ozono dentro de la atmósfera es el de formar una capa en la estratosfera con capacidad de poder filtrar la porción más energética de la radiación solar ultravioleta antes de que pueda alcanzar directamente la superficie terrestre, ver figura 1.



Fuente: Strahler, A. N. (1979)

Modificado por: Norberto Alatorre M.

Figura 1. Esquema idealizado de la estratificación atmosférica de la Tierra.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

C. F. Schönbein, en 1839 descubrió el ozono durante sus observaciones de descargas eléctricas; pero no fue sino hasta después de 1850 cuando se determinó que se trataba de un constituyente atmosférico natural. El nombre de **Ozono** proviene de la palabra griega que significa "olor", una referencia al olor nítidamente agrio que éste presenta cuando se encuentra en grandes concentraciones.

A partir de 1860 comenzó a medirse con regularidad el ozono en superficie. En 1880, se realizaron diversos experimentos, los cuales demostraron que el ozono absorbía la radiación solar, en especial la radiación solar ultravioleta. En 1913 se demostró concluyentemente que la mayor parte del ozono atmosférico se ubica en la estratosfera, mostrando también que su concentración máxima se presenta entre los 19 y 23 Km de altura (EPA; NASA; INE 1998), (figura 1).

Para Whitten, R.C. y Prasad, S.S. (1985), *"El ozono protege a la biósfera, de la radiación solar ultravioleta y es probablemente el miembro más joven de la familia de gases que componen a la actual atmósfera terrestre"*.

Como se había mencionado anteriormente, el  $O_3$  se localiza en la estratosfera; sin embargo, su ubicación no es exclusiva de esta región atmosférica, debido a que también se presenta en la troposfera de una manera natural y circunstancial; esta última situación se debe a las diversas actividades humanas que generan elementos fotoquímicos que alteran el balance atmosférico, lo que provoca que la presencia del ozono en esta capa se incremente y comporte de manera anormal.

Debido a las características físicas, químicas y térmicas que rigen en la estratosfera y en la troposfera, en cada una de estas capas atmosféricas se concentra, respectivamente el 90 % y el 10 % del ozono atmosférico. Es importante señalar que la cantidad de ozono en la

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

atmósfera se determina por el balance entre los procesos de creación y destrucción de dicho gas. Estos procesos serán tratados en los siguientes incisos.

### 1.2. El ozono en la estratosfera, en la troposfera y como un contaminante atmosférico urbano.

La formación del  $O_3$  en la atmósfera inicia con la participación de la radiación solar ultravioleta (UV), la cual se localiza en la región espectral que va desde 220 nanómetros (nm) hasta 400 nm. La radiación solar ultravioleta al incidir continuamente en las moléculas de oxígeno ( $O_2$ ) termina disociándolas, convirtiéndolas en átomos de oxígeno (O) altamente reactivos. Una vez liberado el átomo de oxígeno puede combinarse con una molécula de  $O_2$  intacta, para formar al ozono (NASA, 1998), ver figura 2.

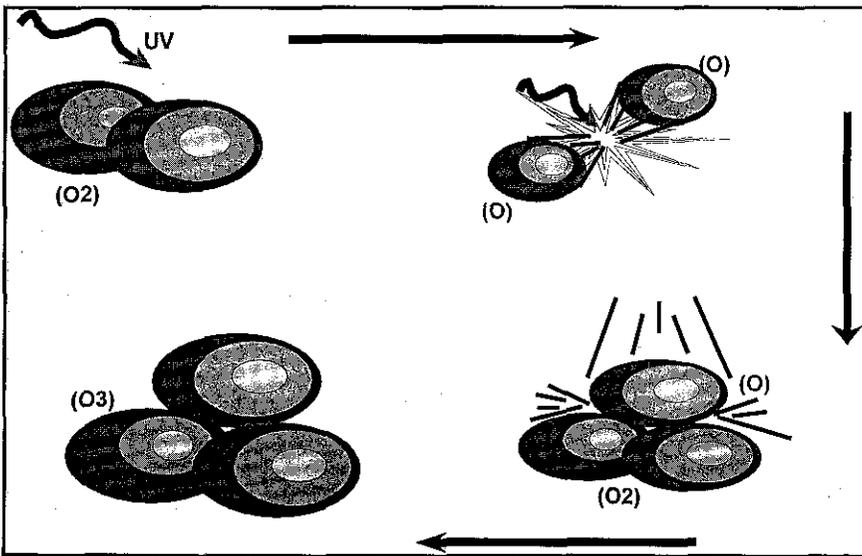


Figura 2. Modelo atómico idealizado de la formación del ozono en la naturaleza.

Es importante señalar que este proceso de formación del ozono es sólo esquemático, debido a que no puede generalizarse dicho proceso para la estratosfera y la troposfera, ya que es diferente en cada una de las capas mencionadas.

La formación del ozono comienza aproximadamente desde la estratopausa y se continua casi hasta la tropopausa; la mayor producción se observa alrededor de los 24,000 metros sobre el nivel del mar (msnm), la energía absorbida por una parte considerable de la radiación solar UV. (tal absorción produce un efecto secundario, el cual consiste en un incremento a la temperatura del aire de dicha zona); sin embargo al realizar esta acción también ocasiona su propia destrucción. Dicho procedimiento se conoce con el nombre de "Las Reacciones de Chapman" (NASA 1998), ver figura 3.

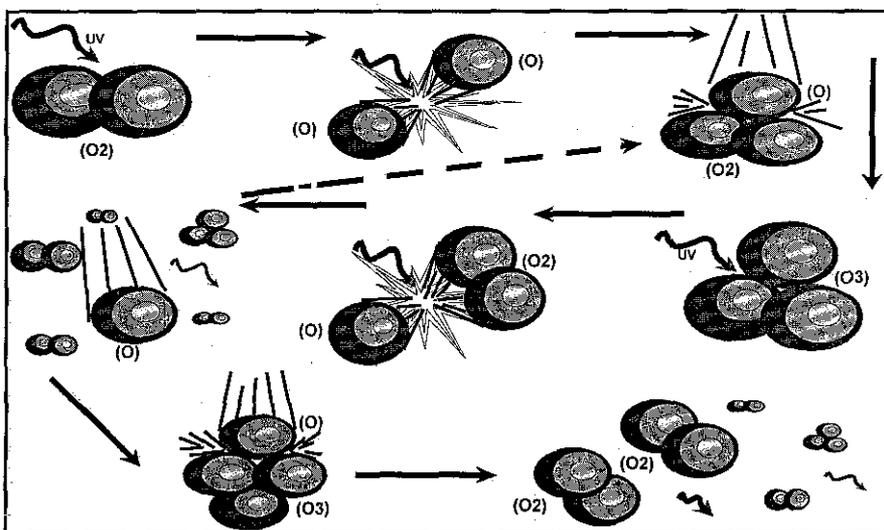


Figura 3. Modelo atómico idealizado de Las Reacciones de Chapman.

Como se observa en la figura 3, Las Reacciones de Chapman, inician cuando una molécula de oxígeno es disociada por la incidencia de un fotón de UV; convirtiendo a esta molécula en dos átomos de O altamente reactivos. Una vez liberado el átomo de oxígeno

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

puede combinarse con una molécula de  $O_2$ , para poder formar al ozono. Asimismo el  $O_3$  absorbe un fotón de UV (con una longitud de onda entre los 280 a 320 nm), la molécula tiende a dividirse en una molécula ordinaria de  $O_2$  y un átomo libre de  $O$ . Este átomo libre puede unirse nuevamente a otra molécula de  $O_2$  para formar  $O_3$  ó podría quitarle un átomo de  $O$  al ozono para hacer dos moléculas de oxígeno ordinario y de esta forma iniciar nuevamente las reacciones de Chapman. Este proceso no es capaz de producir concentraciones significativas de ozono en la troposfera (Bravo 1987), debido a que la radiación UV llegada a esa altitudes sumamente atenuada.

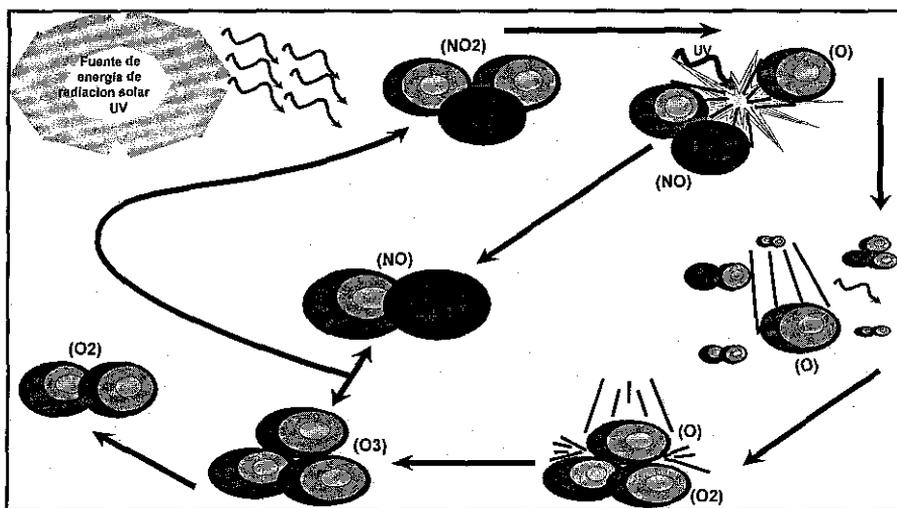
Pese a todo lo anterior, existen otros agentes naturales que afectan la creación, concentración y destrucción del  $O_3$  en la estratosfera como son: las descargas eléctricas, el vapor de agua de los océanos, y las erupciones volcánicas, contribuyendo estos últimos dos a agregar en la atmósfera elementos como el nitrógeno, el hidrógeno y el cloro.

La formación del ozono en la troposfera es de carácter circunstancial, debido a que depende de la intervención de varias reacciones fotoquímicas, las cuales son producto de la combinación de las moléculas de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y las moléculas de compuestos orgánicos volátiles (COVs); estos últimos se originan por la mezcla de las moléculas de  $O_2$  y la combustión de los hidrocarburos consumidos por los automóviles, así como de la intensidad de la radiación solar recibida. Sin embargo las reacciones fotoquímicas más típicas para la generación y destrucción de  $O_3$ , son con el bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ).

Humberto Bravo A. et al. (1991), mencionan que *“La formación del ozono troposférico depende en gran parte de la radiación solar; cuanto más cerca se está del Ecuador mayor es el potencial energético que se recibe. Uno de los precursores es el  $NO_2$ , el cual es un absorbedor muy eficiente de la energía solar UV que llega a la superficie de*

la Tierra. Esta interacción genera lo que se conoce como *reacción fotolítica*; la molécula  $\text{NO}_2$  se rompe en dos:  $\text{NO}$  y  $\text{O}$ , con la cual se inicia el mecanismo de formación del ozono”, ver figura 4.

El  $\text{O}_3$  es uno de los contaminantes atmosféricos urbanos de mayor importancia en la ZMCM, debido a sus altos niveles de concentración diarios y a la presencia de múltiples contaminantes precursores del mismo; es decir que no proviene de una fuente directa, sino que su presencia depende de varios factores.



**Figura 4. Modelo idealizado del Ciclo Fotolítico del Ozono troposférico.**

Para precisar de una manera correcta la procedencia del ozono, es necesario explicar que la contaminación atmosférica urbana presenta dos tipos de agentes contaminantes: los **primarios** y los **secundarios**.

Los contaminantes primarios son emitidos en forma directa a la atmósfera, producto de la combustión de energéticos fósiles, evaporación de solventes químicos y emisiones liberadas de polvos principalmente. Se consideran dentro de este grupo al bióxido de azufre

(SO<sub>2</sub>); bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>); COVs; hidrocarburos y monóxido de carbono (CO), (Bravo y Torres J., R. 1997).

Los contaminantes secundarios son formados en la atmósfera a través de una complicada serie de reacciones activadas por la radiación solar (reacciones fotoquímicas), donde los precursores de dichos contaminantes son los NO<sub>x</sub> y los hidrocarburos. Dentro de los principales contaminantes secundarios se encuentra el ozono y los aerosoles fotoquímicos los cuales se constituyen de partículas de sulfatos y nitratos, (Ibis 1997).

De acuerdo con lo anterior, hay que mencionar que para que los mecanismos de formación y distribución del ozono urbano dependen también de la combinación de varios elementos locales, como son los físicos (topografía, meteorología, clima y localización geográfica); los fotoquímicos de los contaminantes precursores (NO<sub>x</sub> e hidrocarburos) y la radiación solar la cual actúa como fuente energética para toda reacción atmosférica.

### **1.3. El caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y sus antecedentes históricos. Actualidad e importancia del tema.**

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), ha experimentado en los últimos cuatro decenios del siglo XX un empobrecimiento de la calidad del aire, debido principalmente a la emisión de variados contaminantes, producto de las diferentes actividades antrópicas que se desarrollan dentro de la ciudad.

Asimismo la situación geográfica de la Cuenca de México, en donde se establece la ZMCM, (latitud, altitud, clima y sobre todo la condicionante de ser hidrológica y atmosféricamente una cuenca cerrada), las condiciones atmosféricas locales (vientos anabáticos y catabáticos, temperatura ambiente, radiación solar y humedad relativa), y

sinópticas (frentes fríos, ciclones y anticiclones), condicionan drásticamente la presencia y permanencia, espacial y temporal, de los contaminantes atmosféricos (Valdés, 1997).

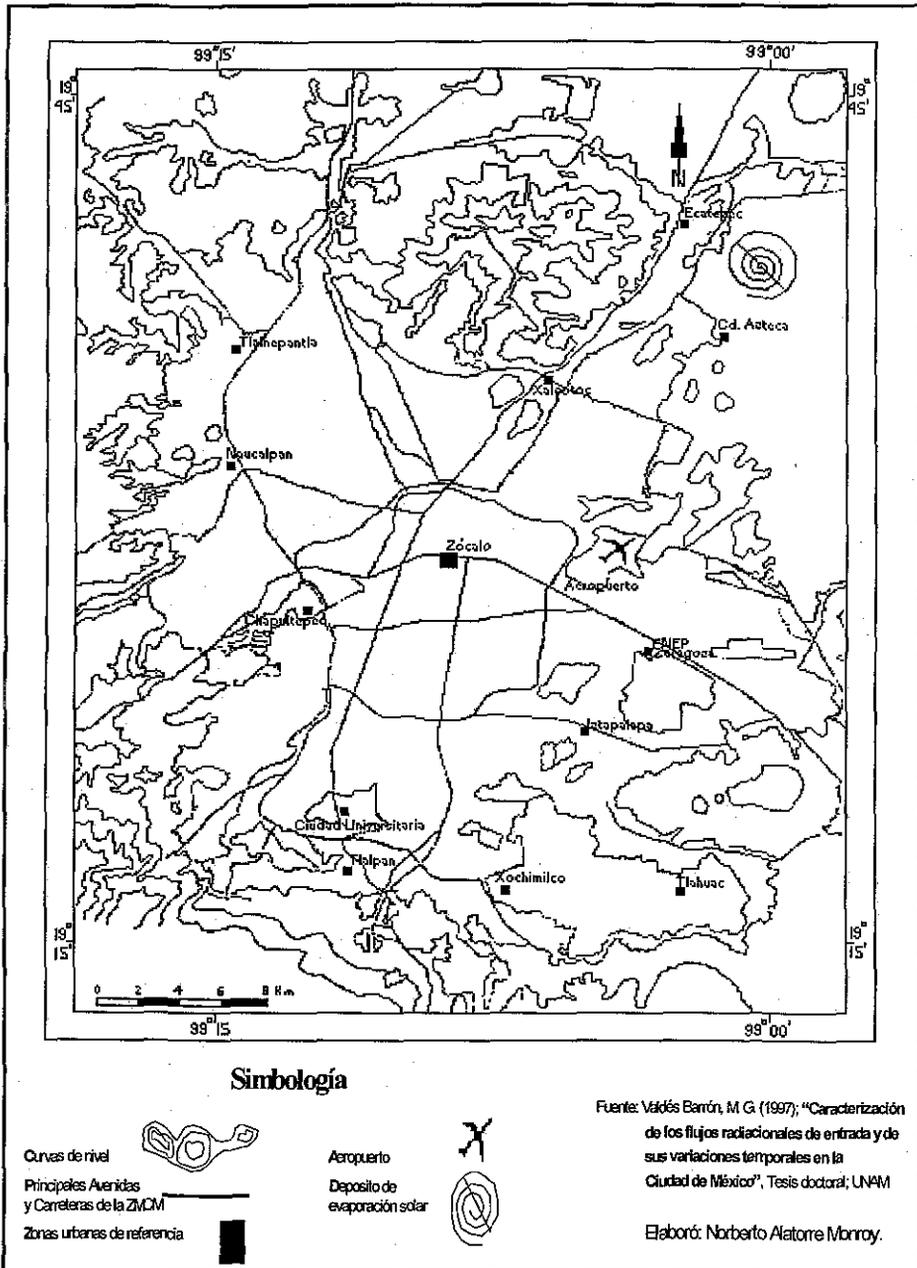
Para entender mejor la situación del empobrecimiento del aire de la ZMCM, es necesario mencionar algunas características físicas de su ubicación: a) se localiza en la parte suroeste de la cuenca endorreica del Valle de México; b) tiene una altitud promedio de 2,240 msnm; c) sus coordenadas extremas son 19° 15' y 19° 45' de latitud norte, 99° 00' y 99° 15' de longitud oeste, ver **figura 5**.

Hoy en día la contaminación atmosférica de la ZMCM, está representada principalmente por los altos y frecuentes niveles de ozono, convirtiéndose en uno de los problemas más importantes en cuestión ambiental por sus efectos en la salud de más de 20 millones de habitantes y por los gastos que representa en la economía capitalina "para su prevención" (Bravo y Torres, 1997).

El problema del ozono en la ZMCM no es reciente, debido a que ya existían estudios previos que mencionaban su presencia y su posible incremento en la atmósfera de la Ciudad de México. Tales estudios han sido desarrollados en institutos universitarios, dependencias gubernamentales y organismos internacionales; siendo entre los más destacados:

El Dr. Humberto Bravo A. investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM; la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Departamento del Distrito Federal (DDF) hoy Gobierno del Distrito Federal (GDF); la organización internacional Greenpeace; el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP); el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ); Los Alamos National Laboratory; the National Oceanic and Atmospheric

Figura 5. Localización de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Administration (NOAA), y el Observatorio de Radiación Solar (ORS) del Instituto de Geofísica de la UNAM. A continuación se presenta una breve reseña cronológica de dichos estudios.

En el año de 1958, se realiza el primer muestreo del aire dentro de la ZMCM, el cual tenía como objetivo principal, diferenciar el tipo de material orgánico que se encontraba en suspensión. También dentro de este análisis se detectó por primera vez la presencia de partículas sólidas que se encontraban suspendidas en la atmósfera citadina, las cuales resultaron ser de metales pesados como plomo, fierro, berilio, manganeso, estaño y aluminio (Bravo 1985).

Para el año de 1961, Bravo, H., y otros investigadores reportaron los primeros indicios del ozono en la ZMCM, para ser más precisos, en Ciudad Universitaria (CU), con un valor de 0.04 partes por millón (ppm), *“tal unidad de medida se utiliza para determinar las concentraciones muy pequeñas de gases en un volumen de aire, que es dividido en un millón de partes iguales. Cada millonésima parte de volumen, correspondiente a la substancia de nuestro interés, se considera una parte por millón de la substancia”*, (DDF 1997).

En 1974 el grupo del Departamento de Contaminación Ambiental del Instituto de Geofísica, UNAM, menciona que el  $O_3$  podría ser a corto plazo uno de los contaminantes que representara mayores problemas; debido a que el índice resultante para las condiciones geográficas y tecnosociales de México utilizado por este grupo, clasificaba a este contaminante como uno de los de mayor incidencia en la salud humana, (Bravo y Torres, 1997).

A pesar de esto, es hasta el año de 1978 que se realiza un estudio del ciclo del ozono y sus generadores por parte del gobierno capitalino durante el período de agosto a

diciembre, escogiendo dos lugares de monitoreo dentro de la ZMCM; el primero localizado al oriente de la ciudad, propiamente dentro de las instalaciones del Aeropuerto Internacional Benito Juárez, y el segundo en el Centro Histórico. La selección de dichos puntos obedeció a la ubicación geográfica con respecto a la circulación dominante de los vientos dentro de la ciudad, también por la mayor concentración de vías de comunicación que están relacionadas con las fuentes de trabajo de los capitalinos (op cit. 1987).

Los resultados obtenidos en dicho estudio, indicaban que las mayores concentraciones de NOx e hidrocarburos se daban durante las primeras y últimas horas del día; sin embargo, las reacciones fotoquímicas que sufrían los contaminantes al avanzar el día, daban paso a la aparición e incremento del ozono, el cual alcanzaba su máximo en los puntos seleccionados cerca de las 12:00 Hrs. (Bravo 1987).

El DDF, realizó estudios en el invierno de 1983 - 1984 para determinar el incremento del ozono, los cuales demostraron, que la calidad de aire había rebasado las normas oficiales tanto internacionales como las metropolitanas, con registros de 0.11 ppm (Ibis. 1987).

En el verano de 1985 Bravo y Torres, investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, exponen en: *"The 78<sup>th</sup> Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Detroit, Mich., June 16-21"*, los resultados de su investigación que lleva por nombre: *"Ozone monitoring and night concentrations events at the campus of the University of Mexico"*; en el cual reportan la presencia de eventos nocturnos (19 a 22 Hrs.) de altas concentraciones de ozono en la estación universitaria que se ubica en las instalaciones del CCA.

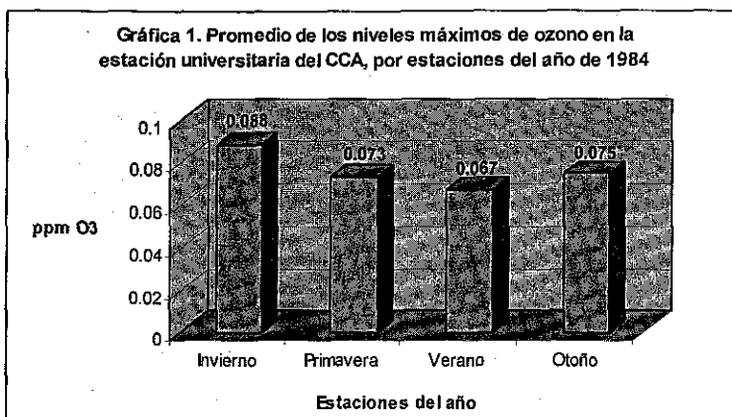
En dicha investigación se utilizó un Analizador de Ozono Beckman, modelo 950, el cual emplea la técnica de quimioluminiscencia, y el cual se calibra con etileno; este equipo

fue montado a una altura de ocho metros, también se empleó un Radiómetro para ultravioleta que cubre una banda de 295 – 385 nm y una torre meteorológica de 20 metros. Todo este equipo se ubicó sobre el techo del edificio del CCA, con el instrumental mencionado. Se reportaron semejanzas y asociaciones entre los máximos de concentración de  $O_3$  y los factores meteorológicos que a continuación se mencionan:

- a) Fuertes inversiones térmicas por la mañana (6:00 Hrs. tiempo local).
- b) Ausencia de inversiones térmicas en la tarde (18:00 Hrs. tiempo local).
- c) Las máximas concentraciones diarias de ozono, se mantienen en la atmósfera por un mínimo de dos horas.
- d) Baja velocidad de los vientos (0.05m/s).
- e) Prevalencia de vientos del sector norte de la ciudad (área industrial).
- f) Vientos con dirección contraria durante la noche (procedentes de las montañas del sur de la ciudad).
- g) Presencia de los vientos catabáticos con velocidad variable.

Asimismo Bravo y Torres, (1985, 1988), demuestran la tendencia de un incremento de los niveles de concentración del  $O_3$ , en las estaciones de otoño e invierno y de un decremento durante el verano (**ver gráfica 1**). Lo anterior ha podido determinar que los índices de concentración de ozono no necesariamente se deben presentar durante el día, ni dentro de la ZMCM, sino también se han localizado estos fenómenos fuera de las áreas urbanas y en horarios nocturnos (Bravo, 1987; Bravo y Torres, 1985, 1988).

Sin embargo, es hasta finales del año de 1986 que las concentraciones de ozono troposférico de la ciudad se incrementan drásticamente; este fenómeno se puede correlacionar directamente con el cambio de las gasolinas que realizó PEMEX en el mismo año (Bravo; et al. 1991).



Fuente: Bravo y Torres (1985).

Pero es hasta el año de 1989 cuando se registran los mayores niveles y persistencia del O<sub>3</sub> dentro de la ZMCM, parámetros que rebasaron y violaron por más de 1000 horas la norma de calidad internacional para este contaminante (Ibis. 1991).

Para los meses de septiembre de 1990 y febrero de 1991, se llevó a cabo en la Ciudad de México el experimento denominado *"ANALYSIS OF TETHERED BALLON-BORNE MEASUREMENT IN MEXICO CITY SEPTEMBER 1990 AND FEBRUARY 1991"*, por parte de los investigadores: William M. Porch; William E. Clements, de "Los Alamos National Laboratory" y J.A. Herwehe de la "National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)"; dicho experimento consistió en definir un perfil atmosférico de la ZMCM para determinar las características más importantes del O<sub>3</sub> como contaminante y su evolución. Elevando un equipo de medición de ozono, conocido como ozonosonda (descrito más adelante), por medio de un globo aerostático fijado al suelo por cables. *"Sin embargo, para realizar estos experimentos se deben reunir por lo menos las siguientes características: a) una atmósfera estable, b) que no existan corrientes de viento*

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

*troposférico que afecten el lanzamiento tanto de día como de noche y c) los días deben ser con una considerable intensidad de radiación solar” (Porch, William M., et al. 1992), condiciones que no se cumplieron, por lo que sus resultados no son confiables.*

En el verano de 1998, se publica el *Informe anual de la calidad del aire en el Valle de México* de la Secretaría del Medio Ambiente del GDF (SMAGDF), en el cual mencionan que los índices de contaminación por parte del ozono, han descendido de manera constante a partir de 1992 hasta 1997, un 23 % (SMAGDF 1998).

Para Bravo y Torres J., R. (1997), tan sólo dichas autoridades han logrado que: *“disminuyan los niveles pico de O<sub>3</sub> por arriba de 0.30 ppm en su frecuencia de ocurrencia, manteniéndose un promedio anual mayor a las 1000 violaciones (horas) a la Norma de Calidad para el ozono desde 1989”.*

Es importante señalar que en la reseña cronológica realizada sobre los estudios del ozono en la ZMCM existen muy pocas referencias de la distribución vertical de este gas en la troposfera capitalina, aunado a que son de carácter parcial y de resultados dudosos, ya que se caracterizan por ser realizadas a poca altura o la medición de las concentraciones de O<sub>3</sub> no son completamente en la vertical.

Ante tal situación surge el interés de saber de manera precisa la distribución vertical del ozono en la ZMCM, siendo ésto el objetivo principal de la presente investigación, para poder determinar la influencia directa o indirecta de los elementos y factores meteorológicos y climáticos en la distribución espacial y temporal del contaminante.

## CAPITULO II

### MONITOREO DEL OZONO EN LA TROPOSFERA. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA.

#### 2.1. Técnicas de medición del ozono troposférico en la ZMCM

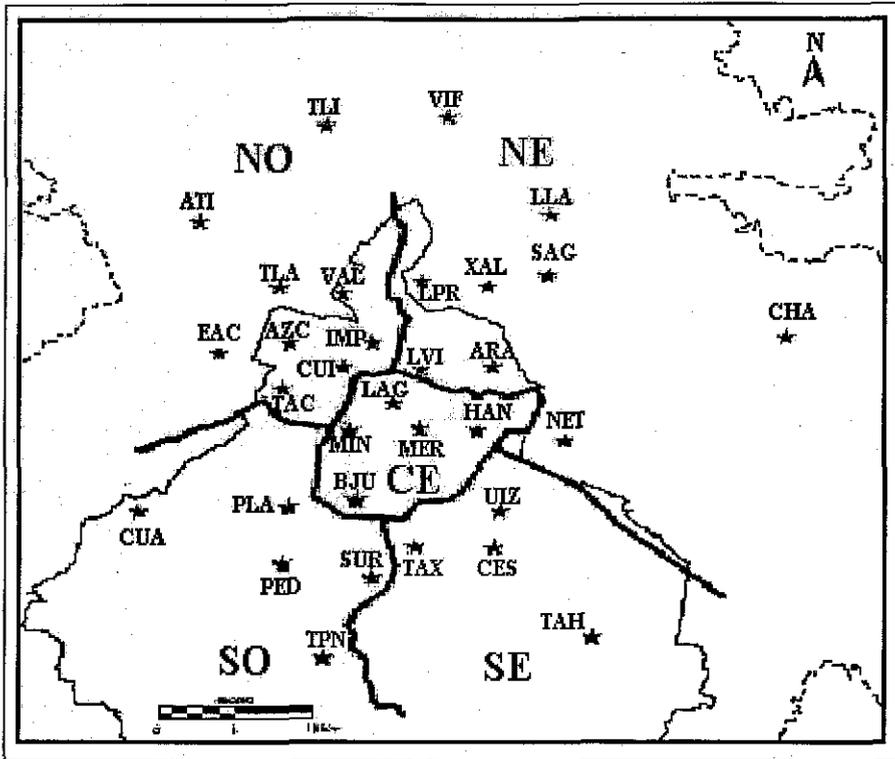
Dentro de la ZMCM, se realizan mediciones de ozono troposférico por parte de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (R.A.M.A.) del Gobierno del Distrito Federal (GDF), y la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM; por medio de técnicas de fotometría en el rango del ultravioleta y por quimicoluminiscencia. Ambos procedimientos se llevan a cabo en diferentes estaciones que se distribuyen de forma irregular por la ZMCM, las cuales a su vez poseen altitudes distintas con respecto al nivel medio de la Ciudad de México, que es de 2,240 msnm, ver **figura 6**.

El proceso de la quimicoluminiscencia es el siguiente: *“El aire del ambiente es introducido simultáneamente con etileno a una cámara de mezclado donde el ozono presente en el aire reacciona con el etileno en una reacción de quimicoluminiscencia con la formación de un complejo excitado que emite luz, que se detecta por medio de un tubo fotomultiplicador. La emisión detectada como una corriente eléctrica es amplificada y leída directamente en un dispositivo de carátula o graficador. El etileno deberá ser grado puro (Q.P.) como mínimo”*.

También explica que la fotometría en el rango del ultravioleta se basa en lo siguiente: *“Se generan atmósferas de prueba, empleando un dispositivo con lámpara de luz ultravioleta en el cual se controla el flujo de aire y la temperatura, midiendo la concentración de  $O_3$  en la atmósfera generada utilizando el método espectrofotométrico de KI, con las correcciones de temperatura y presión correspondientes”*; Bravo A., H. (1987).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 6. Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMCM.



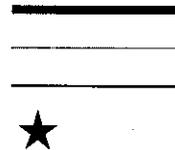
SIMBOLOGÍA

Límite de la Zonificación.

Límite de la Zona Metropolitana.

Límite del Distrito Federal.

Estación de Monitoreo



Estación	Clave	Estación	Clave	Estación	Clave	Estación	Clave
Vallejo	VAL	La Villa	LVI	Insurgentes	MIN	Tultitlán	TLI
Tacuba	TAC	San Agustín	SAG	Santa Ursula	SUR	Lagunilla	LAG
ENEP Acatlan	EAC	Xalostoc	XAL	Pedregal	PED	UAM Iztapalapa	UIZ
Azcapotzalco	AZC	Aragón	ARA	Plateros	PLA	Atizapán	ATI
Tlalnepantla	TLA	Netzahualcóyotl	NET	Cuajimalpa	CUA	Merced	MER
L.M.P.	IMP	V. de las Flores	VIF	Tlalpan	TPN	Taxqueña	TAX
Cuicláhuac	CUI	Chapingo	CHA	C. de la Estrella	CES	Laureles	LLA
Hangares	HAN	Tlahuac	TAH	La Presa	LPR	Benito Juárez	BJU

Fuente: SMAGDF (1998)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Sin embargo estas mediciones son solamente concentraciones superficiales del ozono de la ZMCM, ignorando en su totalidad las concentraciones verticales, las cuales como anteriormente se había señalado pueden agregarse de manera directa a las concentraciones de días subsecuentes cuando las corrientes convectivas literalmente bajen el ozono de las partes altas de la Troposfera a la superficie. Para subsanar esta deficiencia, existe la técnica de ozonosondeo que permite conocer de manera directa las concentraciones tanto de  $O_3$  troposférico como estratosférico, la cual será tratada en puntos subsecuentes.

El ozonosondeo es la técnica de medición de  $O_3$  atmosférico por medio de la preparación, lanzamiento y recepción de información del equipo conocido como ozonosonda Concentradora Electromecánica Celular (siglas en inglés ECC), la cual es transportada a una altitud aproximada de 30,000 a 40,000 msnm, por un globo de caucho natural, llenó de hidrógeno o helio.

Asimismo la ozonosonda ECC se lanza regularmente desde un sitio libre de obstáculos (antenas, árboles y/o edificios), ver figura 7.

Esta técnica comenzó a utilizarse en la Antártida en 1962, por el investigador Komhyr, W. D. y su equipo de trabajo de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Air Resources Laboratory the University of Colorado (Bojkov & Fabian, 1988); asimismo diversos grupos de investigadores ubicados en diferentes bases científicas de las regiones árticas y antárticas de los países desarrollados, comenzaron a utilizar con más frecuencia entre los años setentas y ochentas dicha técnica.

De manera paralela a los ozonosondeos polares se empezaron a realizar algunos ozonosondeos en áreas rurales y urbanas de Estados Unidos de América (E.U.A.) y de Europa, con el propósito de detectar concentraciones de ozono troposférico, las cuales

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

afectan de manera directa a las zonas maiceras, forestales y de población urbana, de dichas regiones (Nato Advanced Workshop On Regional and Global Ozone Interaction and its Environmental Consequences, 1998).



**Figura 7. Preparativos para realizar un ozonosondeo en Ciudad Universitaria.**

La ozonosonda ECC es un equipo destinado para ejecutar mediciones de ozono troposférico y de la baja estratosfera (hasta los 40,000 msnm aproximadamente); que se compone de manera general de un sensor de ozono conectado a una interfase y a una radiosonda RS80 estándar.

El sensor de ozono, es un concentrador electroquímico celular, que está constituido de dos electrodos de platino que se albergan en dos pequeñas cámaras de teflón especial llamados ánodo y cátodo, que se encuentran unidas electrónicamente por un puente de iones (VAISALA, 1988).

La interfase es una tarjeta electrónica que se encuentra conectada al sensor de  $O_3$  por medio de un par de cables, cada uno cuenta con un extremo revestido de oro; dicha tarjeta se encarga de convertir las reacciones electroquímicas del sensor de ozono en pulsos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

A su vez se encuentra la interfase conectada a la radiosonda RS80; esta última habilita las medidas de humedad, presión, temperatura y altura geopotencial simultáneamente con el muestreo de ozono, lo cual proporciona con exactitud datos atmosféricos que permitan realizar un perfil vertical de la distribución real del  $O_3$  en ese momento. (VAISALA, 1988 y 1997).

Sin embargo, para poder procesar e interpretar la información generada por la ozonosonda ECC durante todo el ozonosondeo, es necesario contar con el equipo de tierra que pueda calibrar y comprobar el buen funcionamiento de la ozonosonda ECC antes de ser utilizada y lanzada.

### 2.1.1. Equipo de tierra

Es necesario aclarar que la calibración y verificación de la ozonosonda ECC, se basa principalmente en torno al sensor de ozono, que anteriormente fue descrito.

El equipo de tierra utilizado durante la campaña de ozonosondeo en Ciudad Universitaria en abril de 1997, se integra de: soluciones químicas, material de laboratorio, varios recipientes, sensores electrónicos y una PC portátil con programa procesador de ozonosondeo en ambiente Windows.

1.- Las soluciones químicas: se emplean en el proceso de calibración y verificación del sensor de ozono, deben ser precisas las cantidades de los reactivos que serán diluidos en agua destilada al doble ó triple (tanto para el cátodo como para el ánodo), como a continuación se señala:

a) Para la solución del cátodo, es necesario obtener un litro de solución a partir de la mezcla de  $\frac{1}{2}$  litro de agua destilada con las siguiente sustancias:

25 g.	Bromuro de potasio	(KBr).
10 g.	Yoduro de potasio	(KI).
3.73 g.	Bifosfato de sodio heptahidratado	( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ).
0.627 g.	Fosfato de sodio monohidratado	( $\text{NaHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

Posteriormente de ser disueltas las sustancias anteriores, se añade agua destilada para completar el litro de la solución del cátodo, la disposición de elaborar un litro de solución es recomendación de la NOAA (Komhyr, W.D., 1986).

b) Para el caso de la solución del ánodo, se utilizan 50 ml de la mezcla del cátodo preparada como se describió anteriormente, pero con la diferencia que a la presente solución se le incorporan 125 g. de cristales de Yoduro de potasio (KI), los cuales tienen que ser disueltos en la cantidad de líquido ya especificado (op cit., 1988).

2.- Material de laboratorio y recipientes: son necesarias botellas y recipientes de plástico ó cristal para preparar y almacenar las soluciones que serán ocupadas por el sensor de ozono, así como instrumental de laboratorio para realizar la calibración de la ozonosonda ECC; siendo necesario el siguiente equipo para realizar dichas actividades:

- a) Dos vasos de precipitados, con volumen de 50 y 250 ml.
- b) Un recipiente cilíndrico de 100 ml.
- c) Dos matraces con tapón, con volumen de 100 y 1000 ml.
- d) Dos embudos de polipropileno, con un diámetro aproximado de 100 mm.
- e) Dos botellas de color oscuro, con volumen de 100 y 1000 ml.
- f) Un embudo de polopropileno, con diámetro de boca 65 mm y diámetro de tubo 10 mm para emplearlo con polvos.
- g) Tres espátulas de acero ó plástico.
- h) Dos recipientes de polopropileno, para pesar polvos.

- i) Dos jeringas desechables de plástico con aguja de 3 ó 5 ml.

**3.- Sensores electrónicos, PC portátil con programa procesador de ozonosondeo en ambiente Windows:** los sensores electrónicos y el programa procesador para la PC utilizados para la preparación y recepción de los ozonosondeos de C.U., son en su mayoría de manufactura de la compañía VAISALA; por lo cual se limitará el siguiente texto a realizar una descripción e ilustración general del funcionamiento del equipo:

a) Contador del flujo de aire; se utiliza para saber si la razón de flujo de aire de la ozonosonda ECC es la correcta, esto se determina por medio del bombeo de aire de la sonda en una solución jabonosa, lo que genera una burbuja que será impulsada y cronometrada a través de 100 ml, ver figura 8.

b) Unidad ozonizadora (test) de la "Science Pump Corporation", modelo TSC-1; sirve para comprobar el buen funcionamiento y calibración de los parámetros de medición de la ozonosonda ECC, ver figura 9.

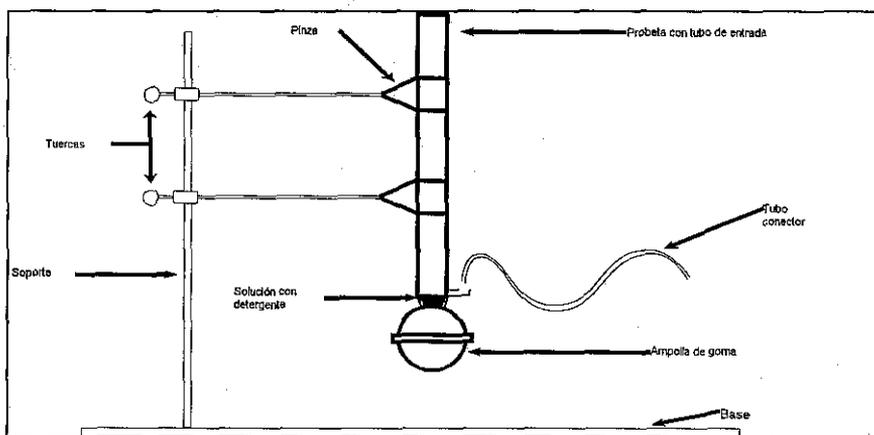
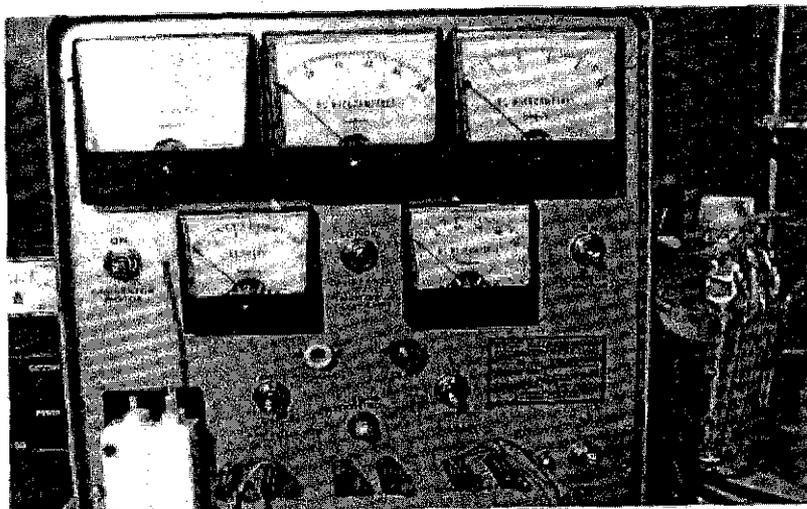


Figura 8. Dibujo del contador del flujo de aire de la ozonosonda ECC.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



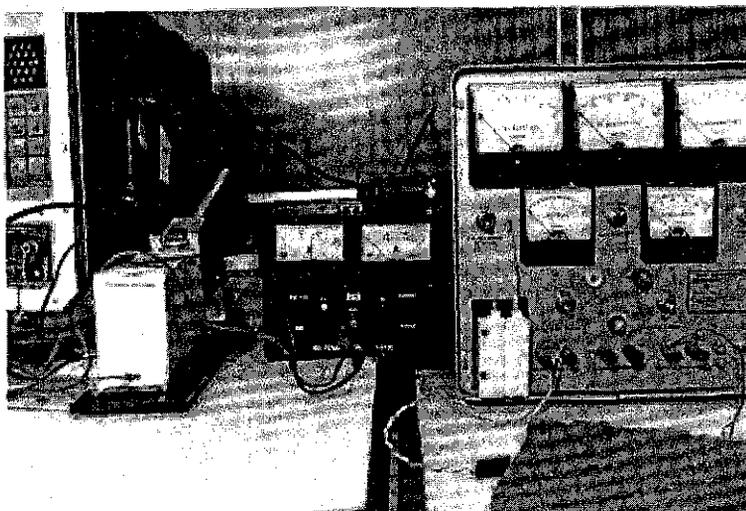
**Figura 9. Unidad ozonizadora (test) de la "Science Pump Corporation", modelo TSC-1.**

c) Fuente de energía TES - 6100; se utiliza como sustituto de la batería que emplea la radiosonda RS80, durante el proceso de calibración; la cual necesita suministrar energía con una razón de 18 a 20V DC, 300 mA, **ver figura 10.**

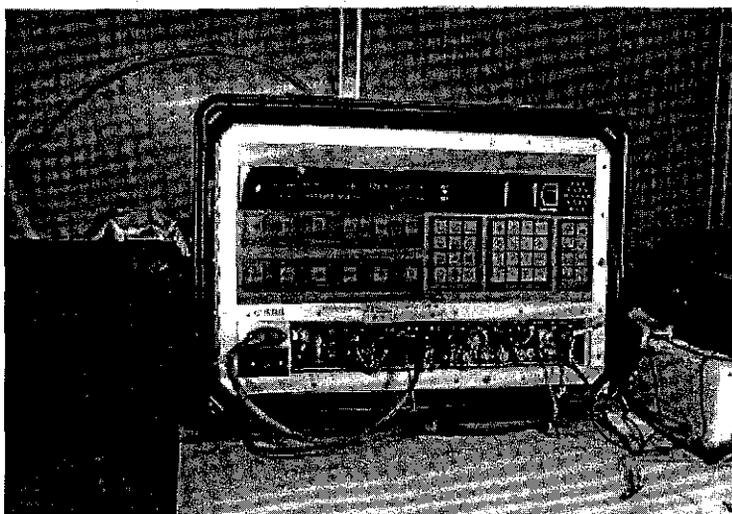
d) Cápsula acondicionadora de radiosonda RS80 con termómetro y soporte; se emplea simultáneamente con la Fuente de energía TES - 6100, para calibrar los sensores que lleva en su interior (presión, temperatura y humedad relativa), **ver extremo izquierdo de la figura 10.**

e) Unidad receptora de ozonosondeo DigiCORA de VAISALA; se encarga de sintonizar y recibir por medio de dos antenas (VLF y UHF) y un amplificador (1 MHZ) del equipo VAISALA MARWIN, la información de la ozonosonda ECC durante su comprobación y lanzamiento convirtiendo la señal en una frecuencia auditiva, así como visual la cual se observa en la pantalla de cuarzo que tiene integrada el equipo, lo cual permite tener monitoreada la unidad lanzada, **ver figura 11.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



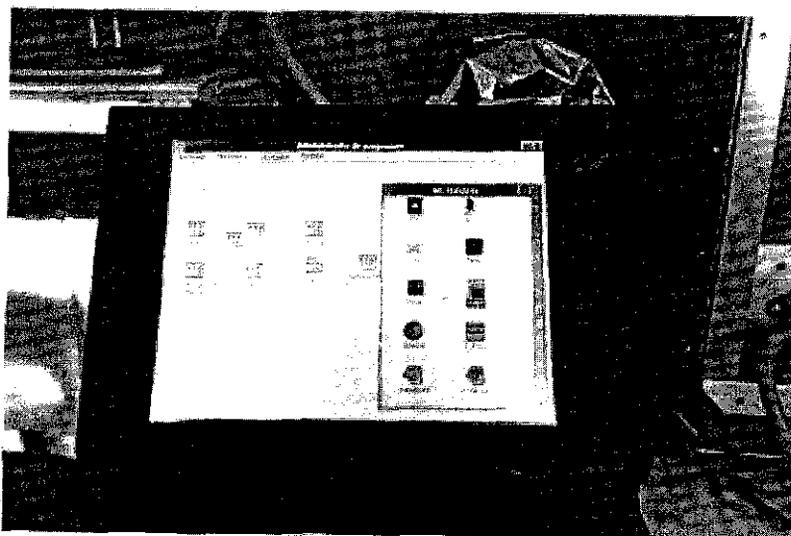
**Figura 10. Fuente de energía TES conectada a la radiosonda RS80 en el momento de su calibración.**



**Figura 11. Unidad receptora de ozonsondeo DigiCORA, conectada a la radiosonda RS80 y PC.**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

f). PC portátil con programa procesador de ozonosondeo en ambiente Windows; el equipo de cómputo debe ser portátil y ligero (Laptop), para que en el caso de existir la posibilidad de realizar lanzamientos en otras localidades no sea difícil el traslado del instrumental; así también debe cubrir la Laptop las siguientes características mínimas: 640 KB de RAM; Disco Duro de 20 MB; Unidad de disco de 3 ½"; Windows 3.11; Canal de comunicación serial y paralelo y Monitor EGA. Todo lo anterior es indispensable para poder operar dentro de programa procesador de ozonosondeo conocido como METGRAPH, el cual fue diseñado por la empresa VAISALA, ver figura 12.



**Figura 12. Laptop con programa procesador de ozonosondeo en ambiente Windows.**

Dicho programa tiene la capacidad de graficar simultáneamente la información de altitud, presión, humedad relativa, temperatura y ozono, emitida por la ozonsonda ECC durante todo el tiempo que se lleve el lanzamiento.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.1.2. Equipo de aire

El funcionamiento óptimo del equipo de aire depende de su revisión previa, por parte del equipo de trabajo (por lo menos 2 horas antes del lanzamiento), está constituido de los siguientes elementos:

- a) Globo de caucho natural de 1200 g.
- b) Tanques de gas de helio, para inflar el globo.
- c) Paracaídas de fibras sintéticas de 1.5 m. de diámetro.
- d) Carrete y anillo de retardo con 25 m. de cordel de fibra sintética.
- e) Antena Omega (va incluida con el carrete y anillo de retardo).
- f) Caja de Styrofoam comprimido (viene incluida con la ozonosonda ECC).

**Nota:** todos los elementos del equipo de aire, serán ilustrados en el siguiente inciso.

## 2.2. Procedimiento para el lanzamiento de los ozonosondeos

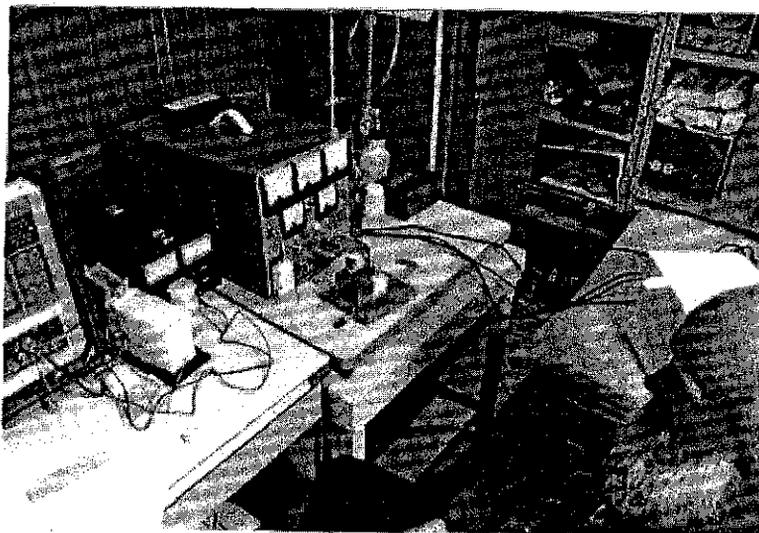
El lanzamiento de una ozonosonda ECC se divide por lo general en cuatro etapas:

**1a. etapa:** El tiempo ideal para organizar esta etapa es de 48 hrs. a una semana antes de iniciar los primeros ozonosondeos; consiste en la limpieza y comprobación del equipo de tierra, así como el preparado de las soluciones que serán cargadas en los recipientes de los sensores de la Unidad ozonizadora (test) modelo TSC-1 y de la ozonosonda ECC con el propósito de que el día del lanzamiento, la respuesta de las células de concentración electroquímicas de cada sensor sea más rápida al ozono (se recomienda preparar más de dos ozonosondas).

**2a etapa:** Se realiza el día del ozonosondeo, una comprobación final del funcionamiento del equipo sensor de la ozonosonda ECC, así como de la radiosonda RS80,

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

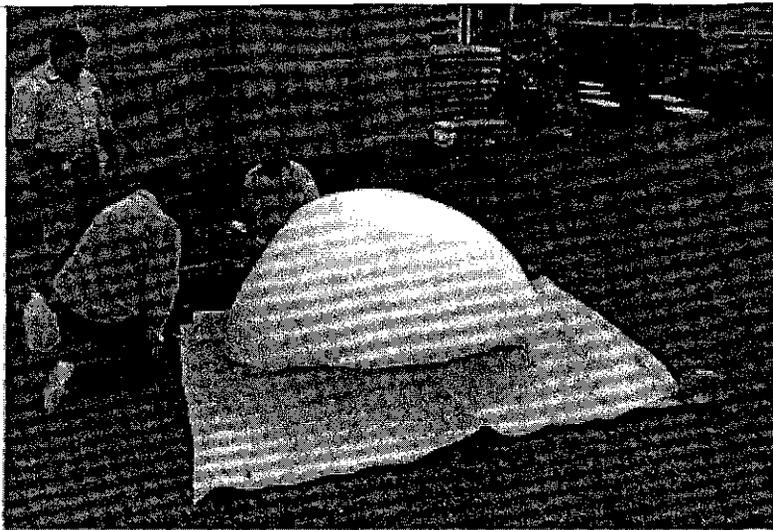
con un margen de tiempo de tres a cuatro horas antes del lanzamiento (este lapso de tiempo permite reemplazar el equipo por otro en caso de falla), ver figura 13.



**Figura 13. Comprobación final de la ozonosonda ECC y radiosonda RS80, antes del ozonosondeo.**

**3a. etapa:** Es el penúltimo paso antes de lanzar la ozonosonda, el cual puede ser desarrollado en un tiempo de quince minutos a dos horas. En primera instancia se conecta la unidad receptora de ozonosondeo DigiCORA al equipo sensor (radiosonda interconectada a la interfase de la ozonosonda) y a la Laptop; posteriormente se inicia el programa procesador de ozonosondeo METGRAPH, en el cual se introducen los datos de identificación de la ozonosonda ECC (Fecha de manufactura y de lanzamiento; número de la serie de fabricación y nombre de la estación de lanzamiento), al igual que los parámetros meteorológicos de presión, humedad y temperatura que se registran en superficie (ver figuras 12 y 13). De manera simultánea se debe preparar y verificar el funcionamiento del equipo de aire, iniciando con el inflado del globo de caucho con helio, ver figura 14.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



**Figura 14. Globo de caucho natural inflado con helio.**

Al concluir el inflado del globo también debe de estar lista y empacada en su caja de Styrofoam comprimido la ozonosonda ECC, la cual a su vez tiene que estar conectada a una batería húmeda de 12 V DC (es transportada en la misma caja de la ozonosonda) y a la radiosonda RS80, que se encuentra unida también a la caja por cintas adhesivas; por último todo el equipo debe estar sujeto a los cordones del paracaídas, ver el ángulo superior derecho de la **figura 15**.

Por último se procede a lanzar el equipo sensor a la atmósfera, desde una zona que se encuentre despejada y libre de obstáculos que pudieran interferir en el vuelo del globo (el globo asciende a una razón de 5 a 7 m/s.). **figura 16**.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Figura 15. Equipo de ozonosondeo antes de ser lanzado.

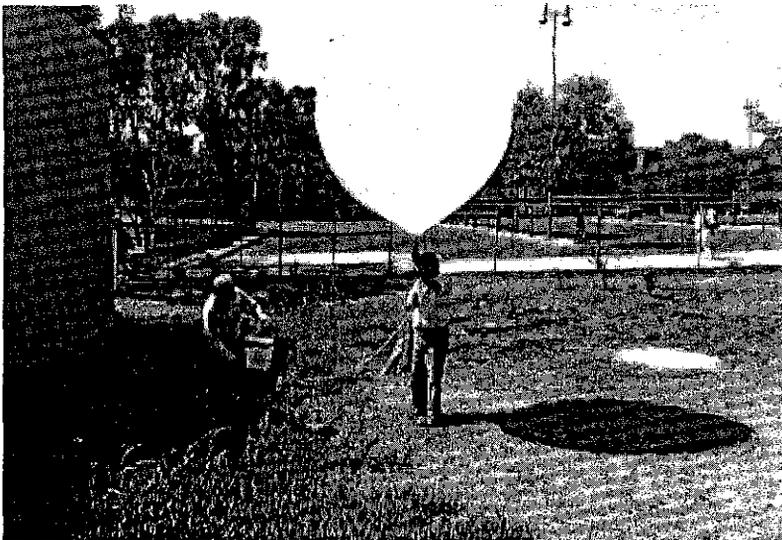


Figura 16. Lanzamiento del equipo de ozonosondeo en C.U.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**4a. etapa:** Esta es la última etapa del lanzamiento, en la cual después de haber iniciado el vuelo la ozonosonda ECC, únicamente el equipo en tierra se restringe a recibir, procesar y almacenar en la computadora, la información meteorológica enviada por la ozonosonda (*la duración de la etapa estará condicionada por el tiempo en que dure el ascenso del globo*).

### **2.3. Ubicación de los lanzamientos de las ozonosondas.**

La campaña de ozonosondeos en la ZMCM se integró de 17 lanzamientos, de los cuales 16 fueron realizados en las instalaciones del ORS en Ciudad Universitaria ( $19^{\circ} 20'$  de latitud norte y  $99^{\circ} 10' 54''$  de longitud oeste, a una altitud de 2264 msnm), y el último ozonosondeo se llevo a cabo en el poblado de Orizabita, Hgo. ( $20^{\circ} 35'$  de latitud norte y  $99^{\circ} 12' 30''$  de longitud oeste, a una altitud de 1745 msnm), lugar donde el ORS mantiene una estación solarimétrica rural.

### **2.4. Programación de los ozonosondeos.**

El programa original de los ozonosondeos, contemplaba el realizar dos lanzamientos diarios, uno a las 08:00 Hrs., cuando la altura de la capa de mezcla se encontrara lo más bajo posible, y otro a las 15:00 Hrs.; hora en la cual dicha capa alcanza su máxima expansión. Sin embargo, durante todo el estudio se tuvieron que realizar varios ajustes en el horario de los lanzamientos, debido principalmente a la existencia de días en donde las concentraciones de ozono en superficie no se consideraron significativas, ver tabla No. 1.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<i>Fecha</i>	<i>Hora local del lanzamiento (Horario de Verano)</i>	<i>Altura máxima (msnm)</i>
08 de abril de 1997	22:38	17,996
09 de abril de 1997	18:46	29,868
10 de abril de 1997	10:51	34,263
10 de abril de 1997	17:45	07,918
11 de abril de 1997	19:41	24,977
12 de abril de 1997	11:19	21,574
12 de abril de 1997	17:46	28,957
13 de abril de 1997	11:35	32,047
14 de abril de 1997	11:40	29,663
14 de abril de 1997	17:48	34,772
15 de abril de 1997	10:48	33,347
15 de abril de 1997	17:20	30,076
16 de abril de 1997	14:19	33,152
17 de abril de 1997	02:16	24,910
17 de abril de 1997	11:00	31,307
17 de abril de 1997	13:55	34,060
18 de abril de 1997	14:36	29,846

**Tabla No. 1. Fecha, hora de inicio y altura máxima de cada lanzamiento.**

## 2.5. Condiciones meteorológicas a mesoescala.

Las condiciones meteorológicas que predominaron sobre México, durante los días de campaña de ozonosondeos en Ciudad Universitaria, serán descritas y divididas en tres periodos de tiempo los cuales son del 8 al 10; del 11 al 14 y del 15 al 18 de abril de 1997. Dichas interpretaciones de las fechas antes citada, se realizaron gracias a la consulta de los boletines meteorológicas diurnos y vespertinos del Centro Meteorológico de la Comisión Federal de Electricidad (CMCFE).

Los principales sistemas meteorológicos que afectaron a la República Mexicana, del 8 al 10 de abril de 1997, fueron: la entrada de masas de aire marítimo tropical provenientes del Océano Pacífico que afectaría en su mayor parte al país, a su vez dichas masas de aire

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

tropical se asociaron con una corriente de chorro que se localizaba desde la zona central del Pacífico (costas de Colima y Jalisco) con un desplazamiento hacia el norte del Golfo de México, ocasionando nublados con lluvias aisladas de carácter moderado a fuerte sobre los estados que conforman las zonas Occidente; Norte; Centro; Golfo y Sureste, **ver figura 17.**

Las condiciones meteorológicas que se presentaron en las mismas fechas dentro de Ciudad de México fueron: bajas temperaturas en la mayor parte del día oscilaron entre los 10° y 15°C, por la tarde la temperatura registraba incrementos los cuales llegaron a los 25°C; al término del atardecer, se presentaban lluvias y tormentas eléctricas aisladas en las zonas de montaña.

Para los días 11, 12, 13 y 14 de abril de 1997, las condiciones meteorológicas variaron de manera notable; debido al descenso de la corriente de chorro, la cual cruzaba sobre los estados de las zonas Occidente, Centro y Golfo, asociándose con la presencia de una masa de aire frío que se desplazaba hacia el sur desde la zona Centro Norte del país y noreste del Golfo de México, simultáneamente estos eventos se combinaron con dos frentes fríos provenientes de E.U.A., que en poco tiempo se convirtieron en estacionarios provocando bajas temperaturas en gran parte del territorio nacional, lluvias aisladas en la parte centro del Golfo y Pacífico Sur, y heladas en las áreas montañosas de las zonas Norte y Occidente de México, **ver figura 18.**

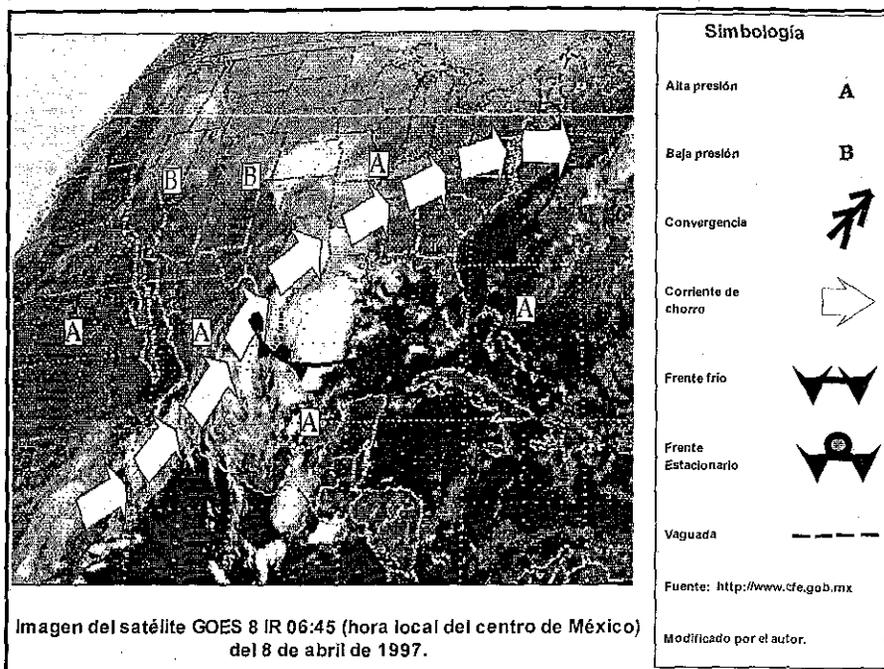


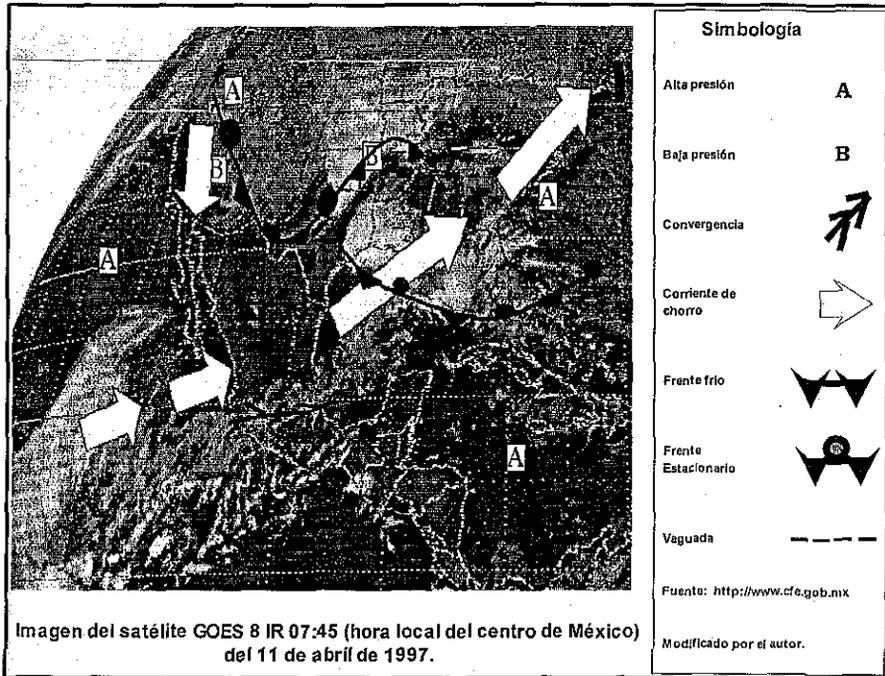
Figura 17. Imagen de satélite representativa para los días 8, 9 y 10 de abril de 1997.

Dentro de este lapso de tiempo las condiciones atmosféricas de la ZMCM, se conservaron las bajas temperaturas matutinas ( $8^{\circ}\text{C}$  a  $12^{\circ}\text{C}$ ); se presentaron ligeras ráfagas de viento procedentes del noreste; por las tardes las temperaturas no rebasaron los  $24^{\circ}\text{C}$ , así mismo se registraron cielos de medionublado a nublado.

Sin embargo, para el último periodo de tiempo considerado para señalar las principales condiciones meteorológicas en México (del 15 al 18 de abril de 1997), se observó que el frente estacionario que se localizaba en días anteriores al norte de Chihuahua se disipó, en tanto que el frente estacionario ubicado sobre el Golfo de México tuvo un desplazamiento hacia el norte de la península de Yucatán; asimismo la masa de aire frío que le acompañaba al frente estacionario del Golfo se ubicaba al oriente del país, lo cual favoreció la presencia nuevamente del descenso de temperatura y lluvias aisladas en

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

las zonas Norte y Golfo, así como también se presentaron vientos del norte y noreste con una velocidad máxima de 60 km/h. En la mayor parte del litoral del Golfo de México.



**Figura 18. Imagen de satélite representativa para los días 11, 12, 13 y 14 de abril de 1997.**

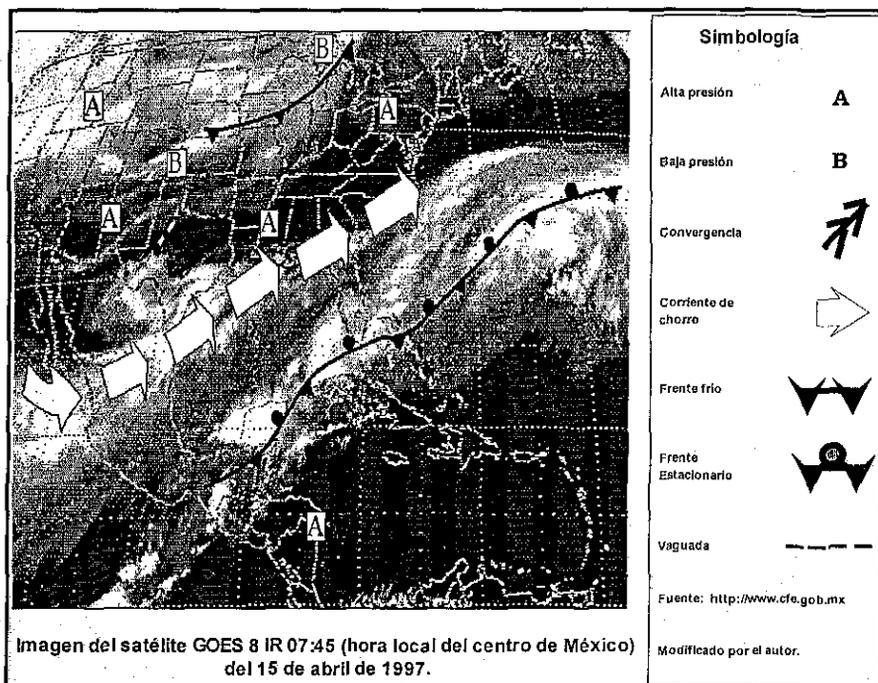
Por lo que respecta a la corriente de chorro, esta realizó nuevamente un corrimiento pero en esta ocasión hacia el norte cruzando sobre el extremo sur de la península de Baja California y sobre los estados que conforman las zonas Norte y Noreste del país; dicho sistema provocó la afluencia de aire húmedo a las regiones mencionadas, ocasionando cielos nublados, tormentas eléctricas y lluvias aisladas, ver figura 19.

En lo concerniente a las condiciones meteorológicas que dominaron en la ZMCM durante las fechas del 15 al 18 de abril de 1997, se observó que el estado del tiempo se caracterizó por mantenerse de manera similar a los días anteriores; únicamente con la

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

variación de la ausencia de vientos y la presencia aislada de lluvias moderadas en las zonas de montaña.

De una manera general todos los lanzamientos de ozonosondas en la ZMCM se realizaron bajo condiciones meteorológicas heterogéneas, las cuales presentaron diversos resultados que serán observados y argumentados en los subsecuentes capítulos.



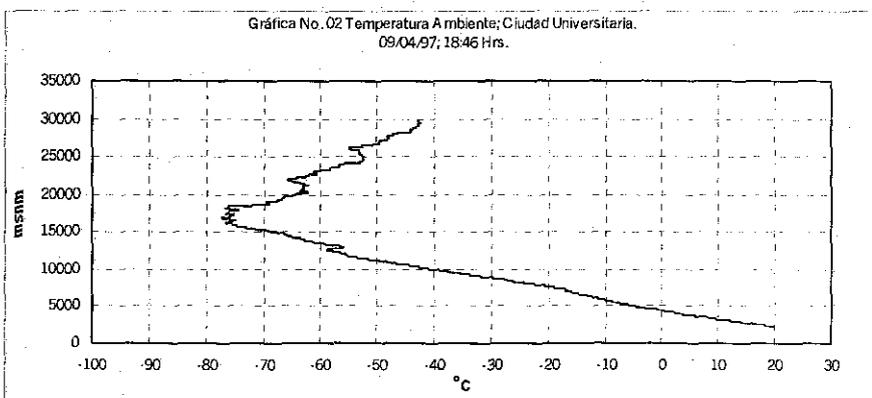
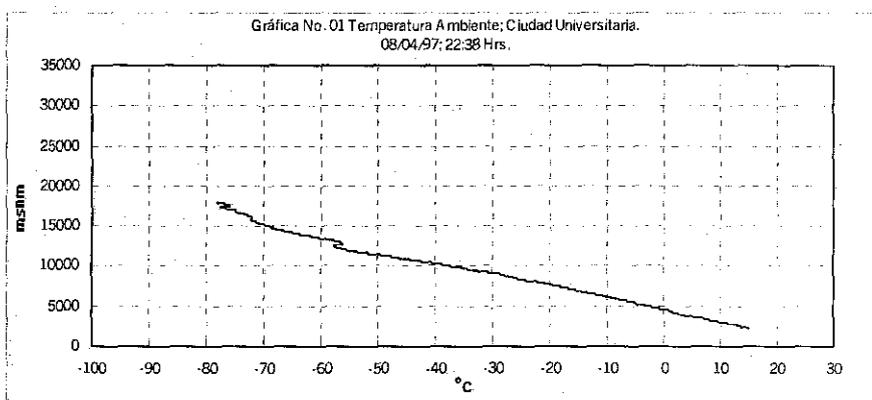
**Figura 19.** Imagen de satélite representativa para los días 15, 16, 17 y 18 de abril de 1997.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

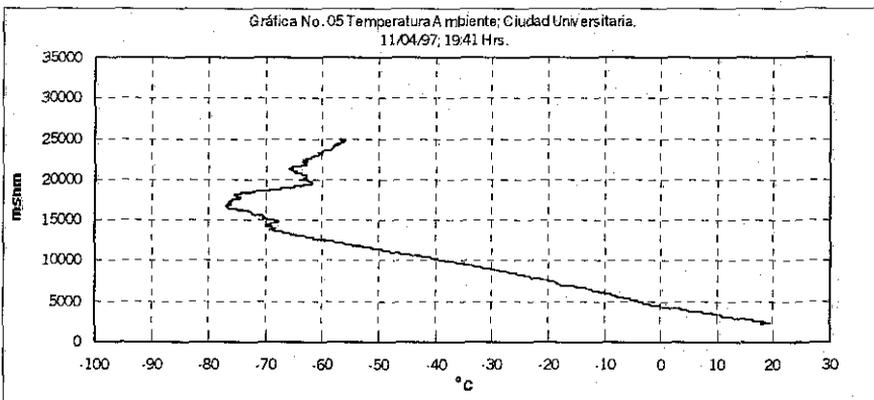
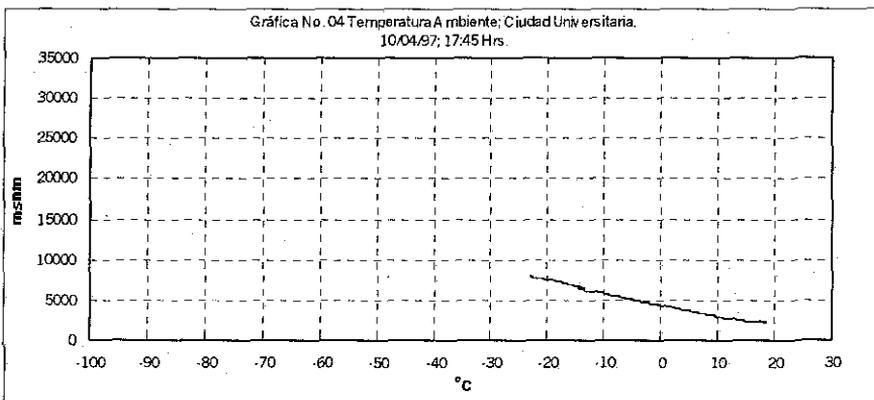
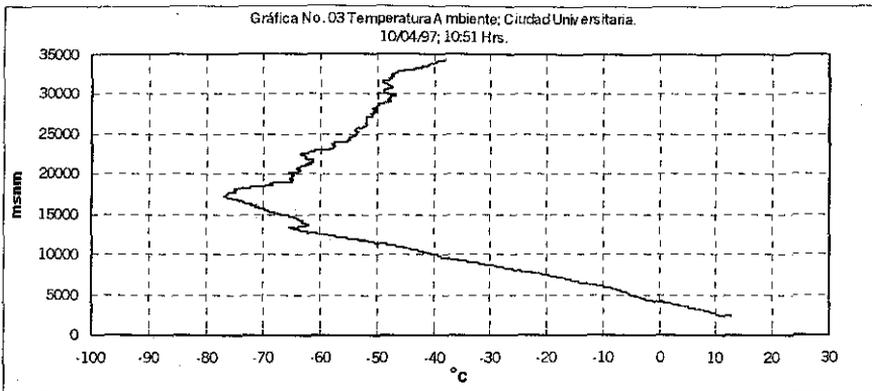
### CAPITULO III RESULTADOS.

Con los datos obtenidos de los radiosondeos, se construyeron los gráficos para una mejor y más rápida interpretación; a continuación mostramos los resultados de la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, así como los perfiles de la presión parcial de ozono.

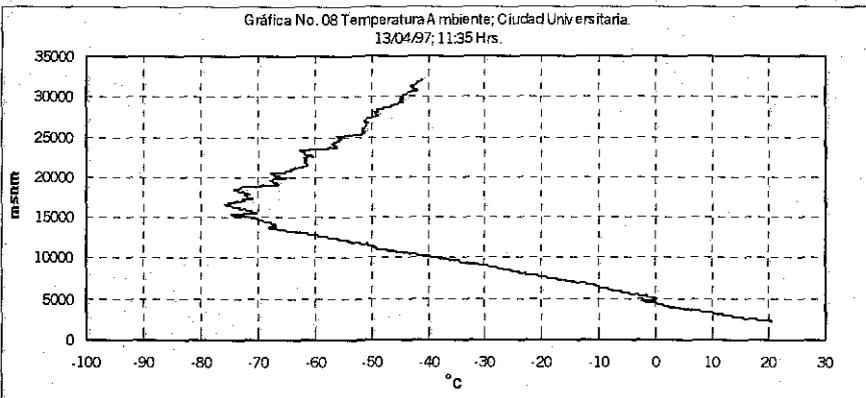
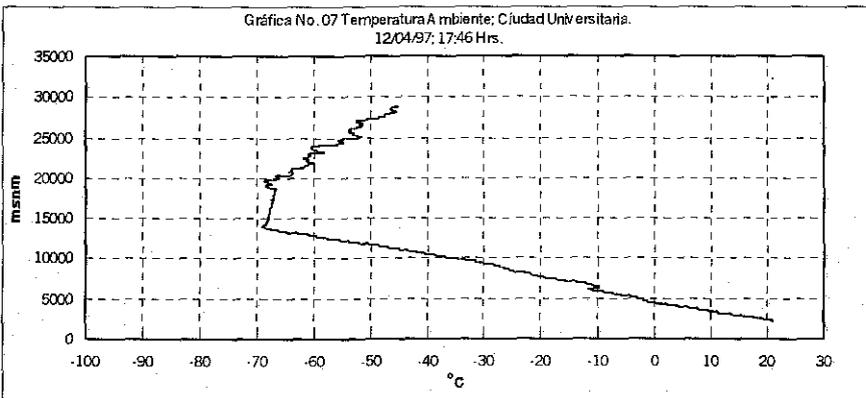
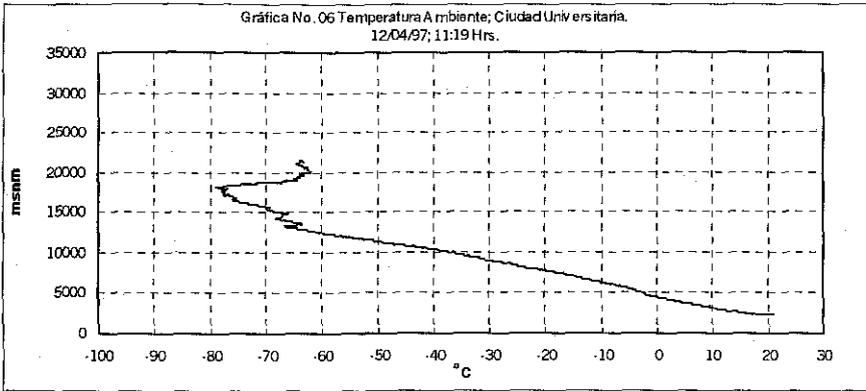
**3.1. Temperatura ambiente.** La distribución de la temperatura ambiente durante la campaña de ozonosondeos fue la esperada, ya que los gráficos muestran un gradiente de descenso normal conforme ascendía el equipo por la troposfera; posteriormente se incrementa de forma gradual la temperatura.



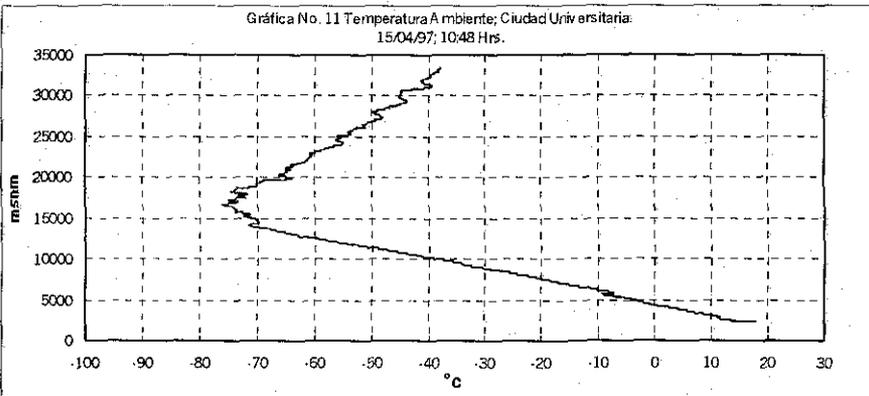
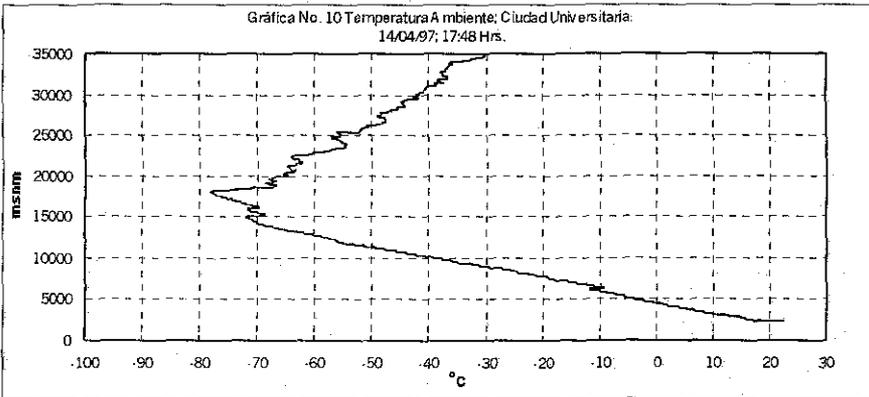
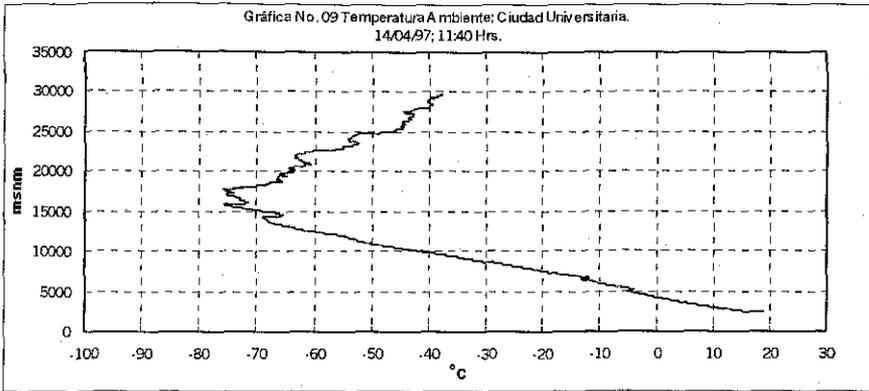
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



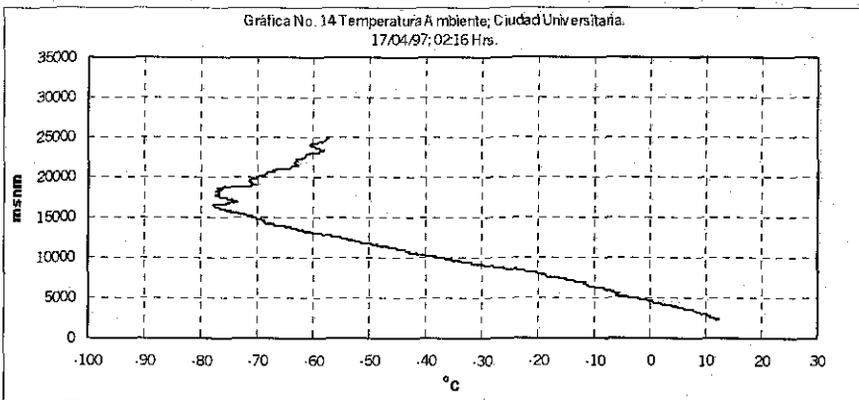
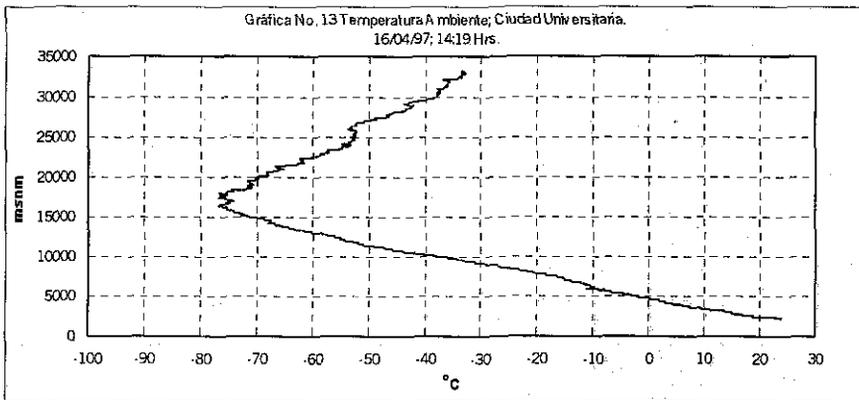
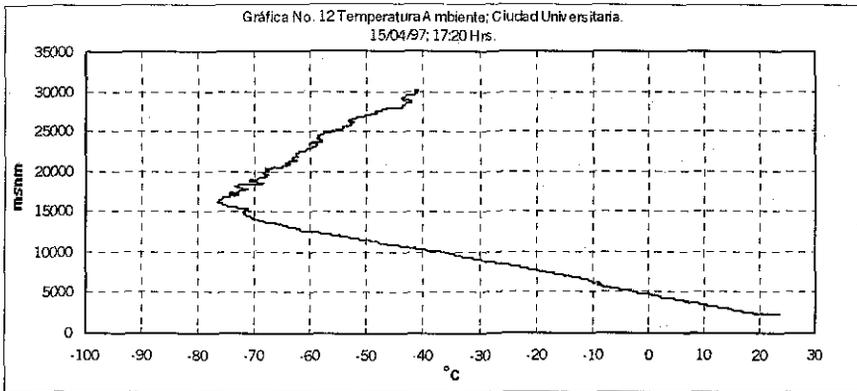
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



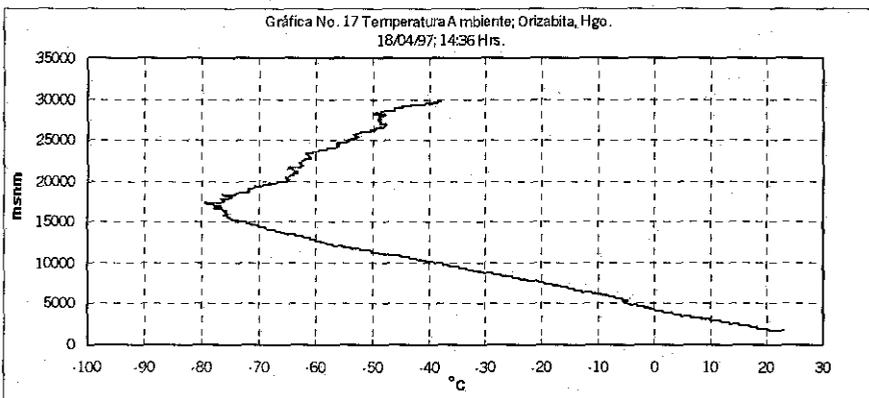
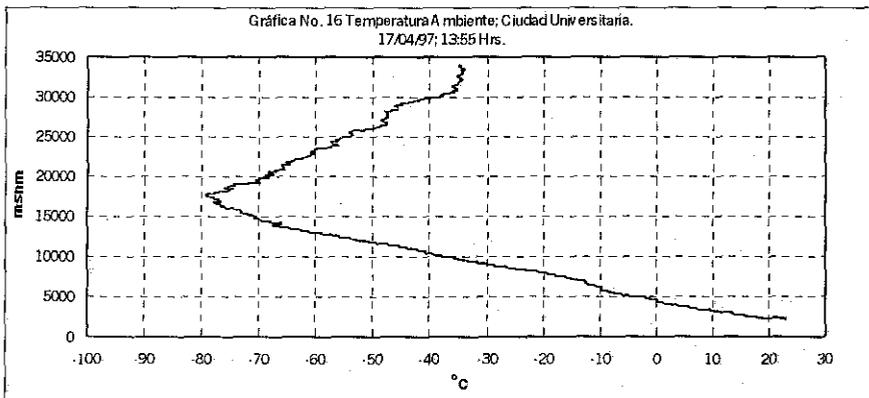
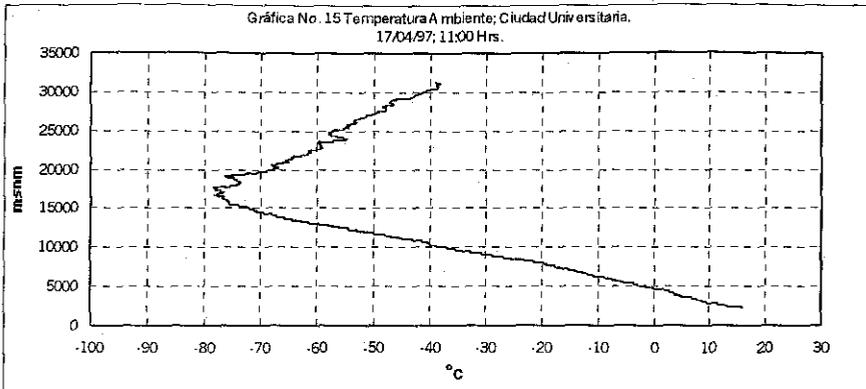
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



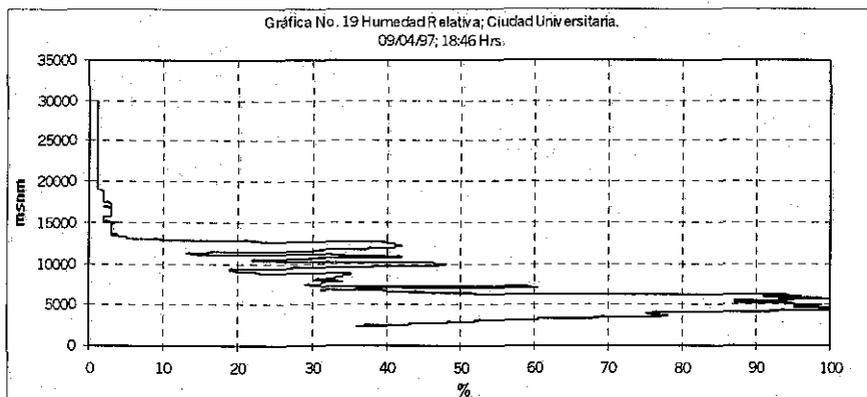
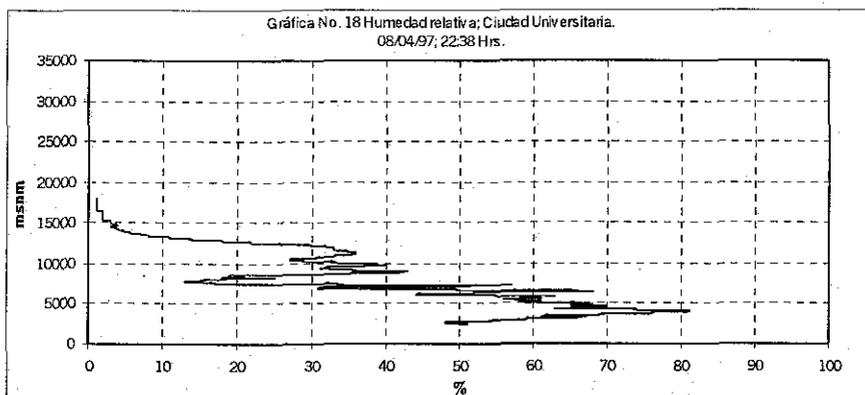
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La secuencia de gráficos de la Temperatura ambiente, muestra de manera general la existencia de dos zonas atmosféricas donde se presentan inversiones térmicas, las cuales pueden ser delimitadas altitudinalmente de la siguiente manera: la primera zona queda comprendida de los 5000 a 15000 msnm, en tanto que la segunda inicia aproximadamente de los 16000 a 20000 msnm.

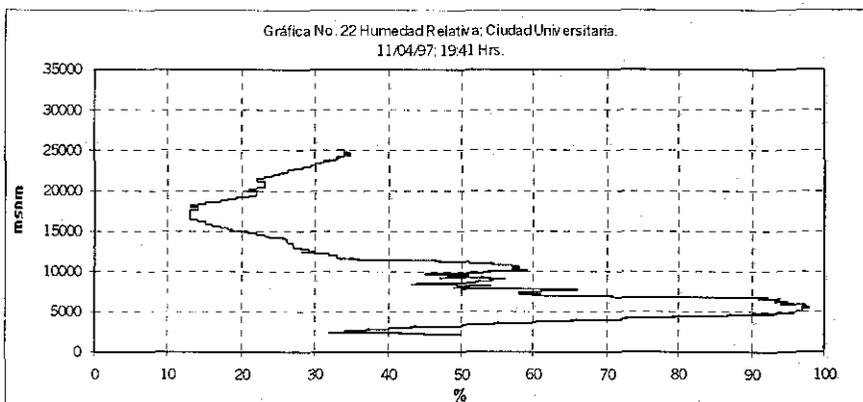
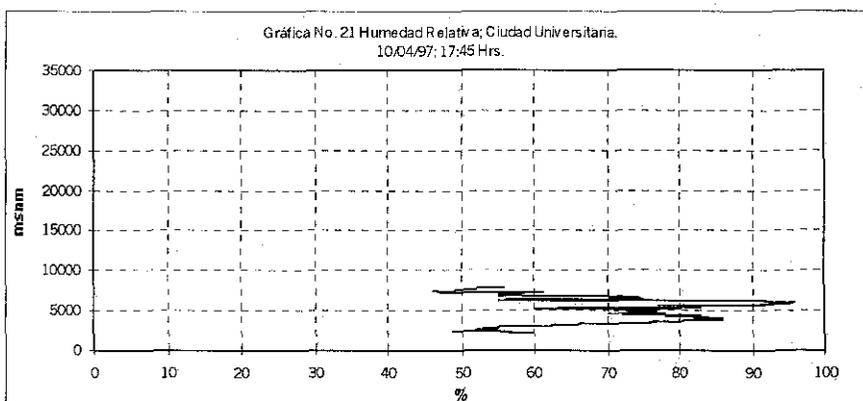
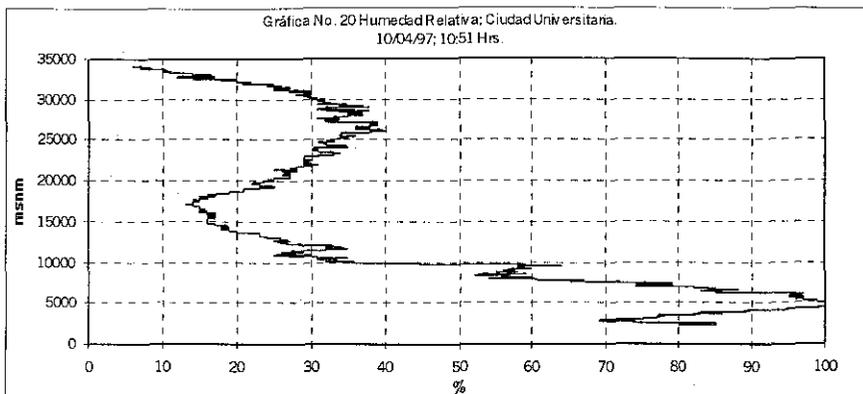
Para el caso de la primera demarcación, es importante señalar que las inversiones térmicas que se presentan en ella, se caracterizan por ser de pequeñas variaciones térmicas y de poca altitud.

Con respecto a la segunda región, aunque es una zona de inversión térmica se observa una serie de pequeños cambios térmicos que se puede decir que son normales, debido a las características físicas y químicas que rigen en la estratosfera, lo cual proporciona estabilidad en las masas de aire, así como significativos cambios de temperatura de las mismas.

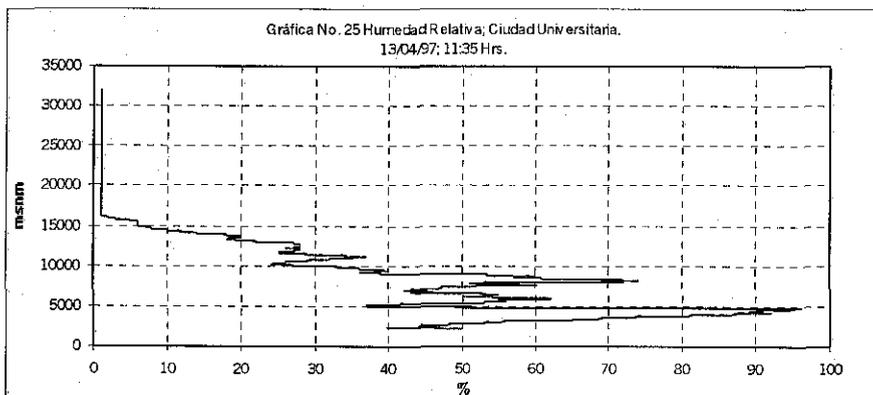
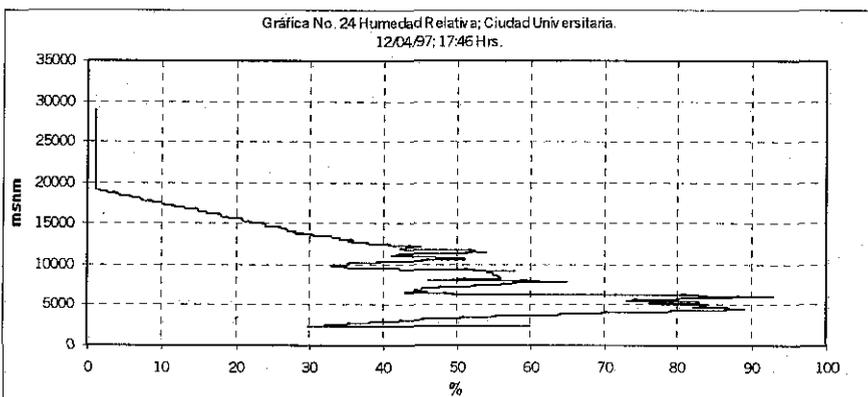
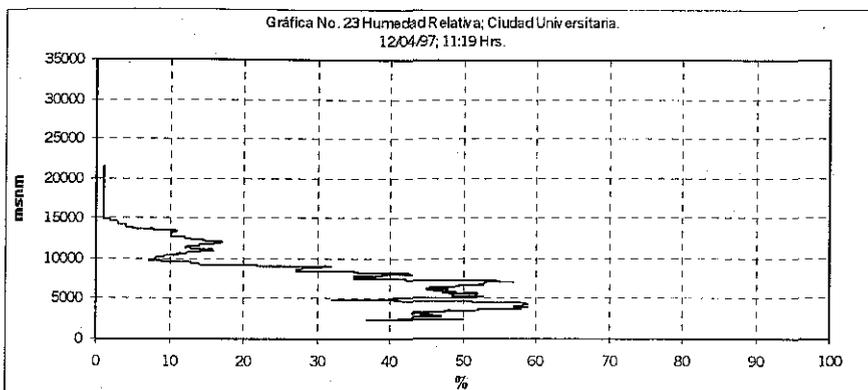
**3.2. Humedad Relativa.** La distribución de la humedad relativa durante la campaña fue de carácter excepcional, ya que los perfiles elaborados con la información, mostraron un descenso porcentual aparentemente normal conforme se elevaba el equipo por la atmósfera; sin embargo, posteriormente se observan incrementos como se muestra en las siguientes gráficas.



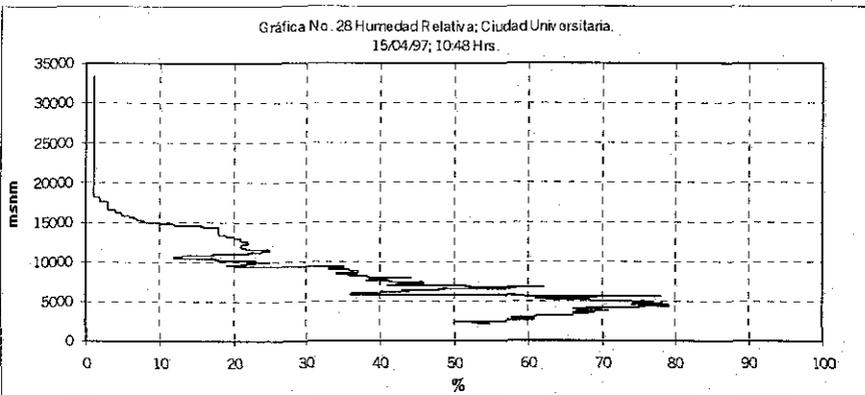
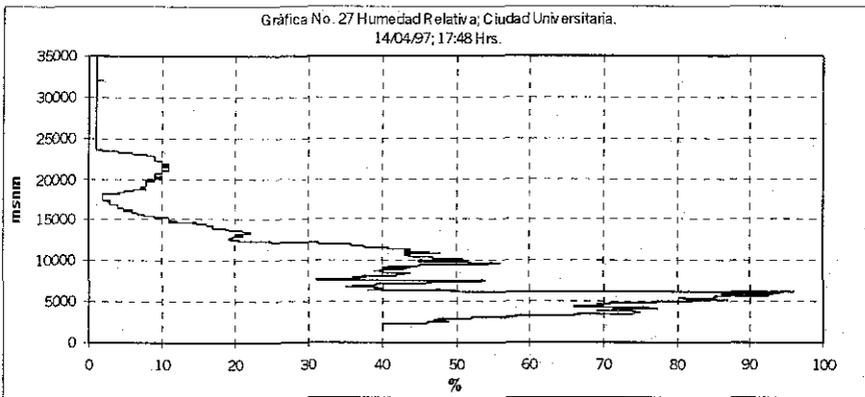
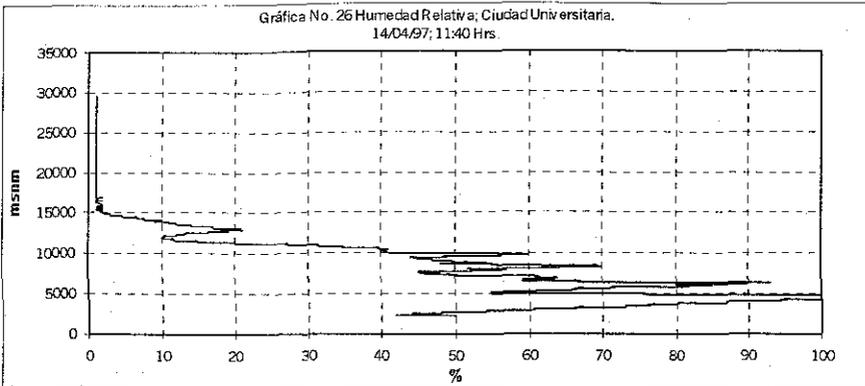
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



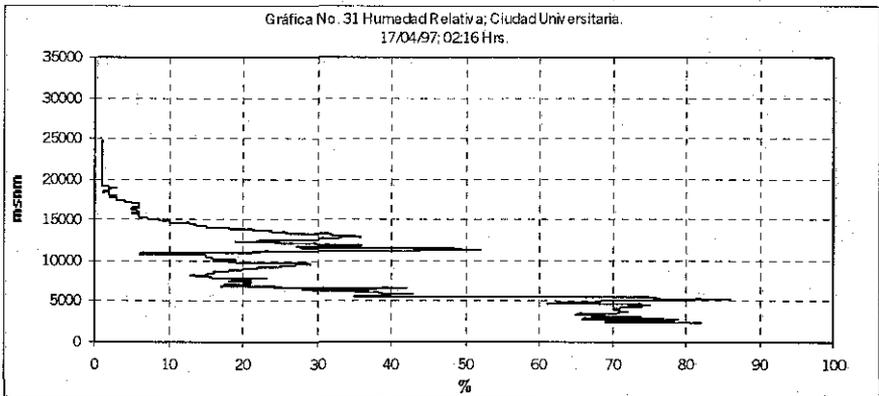
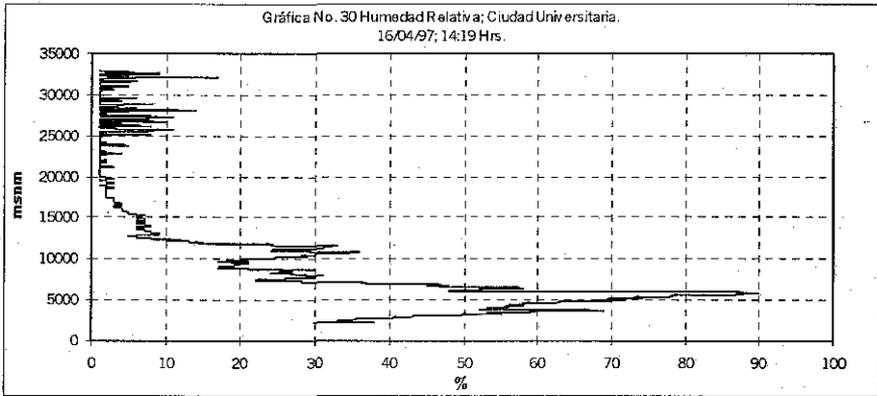
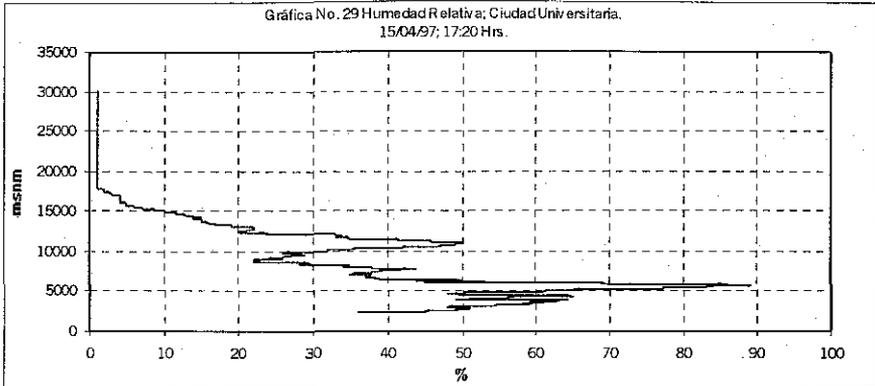
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



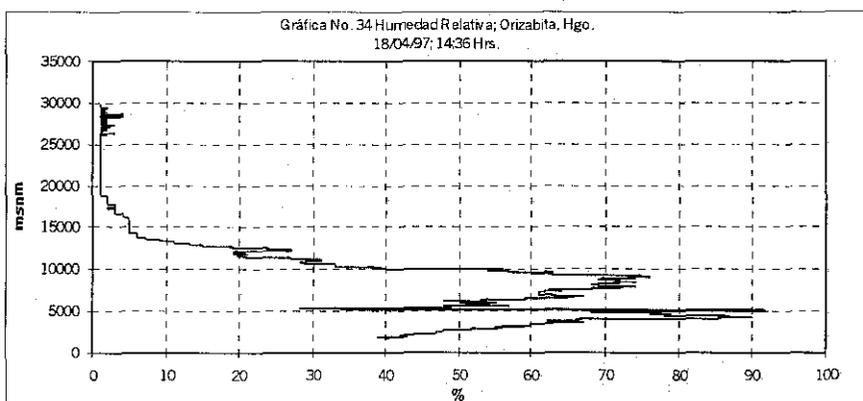
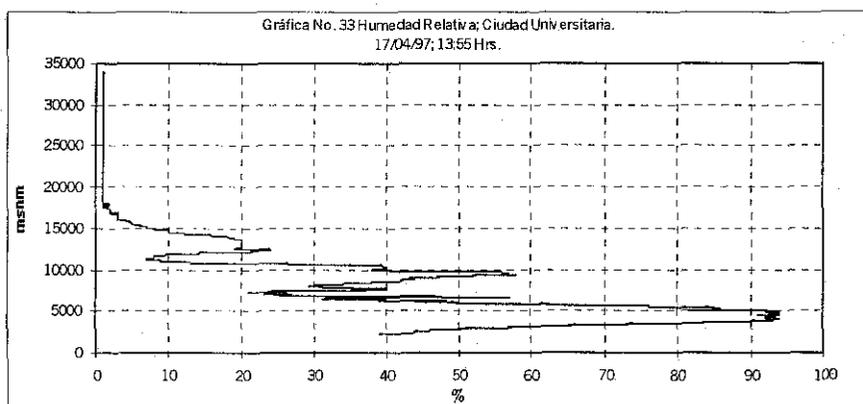
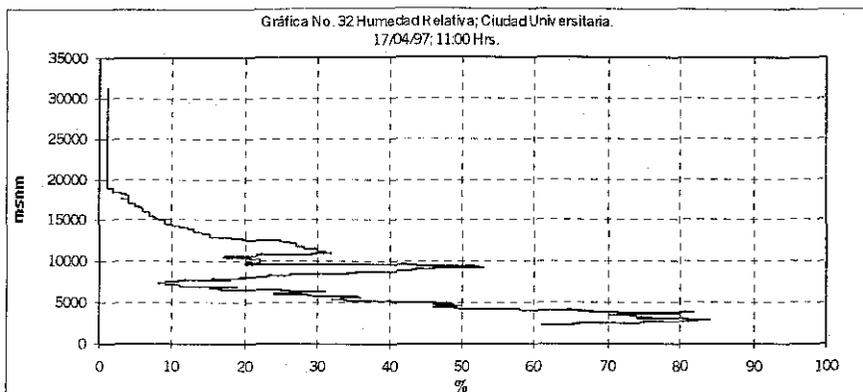
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



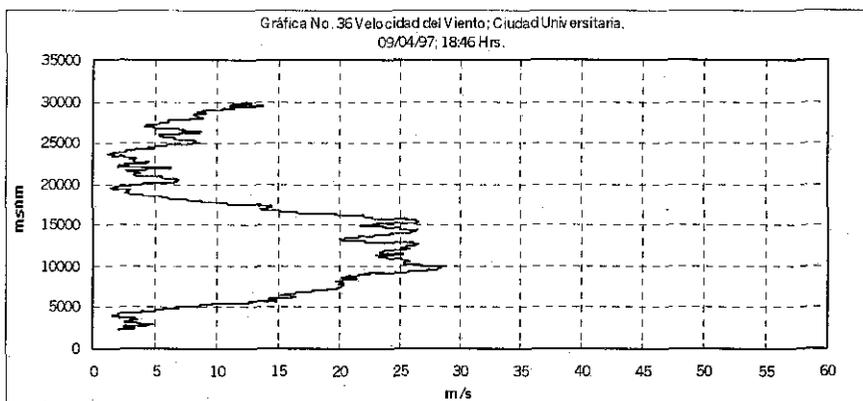
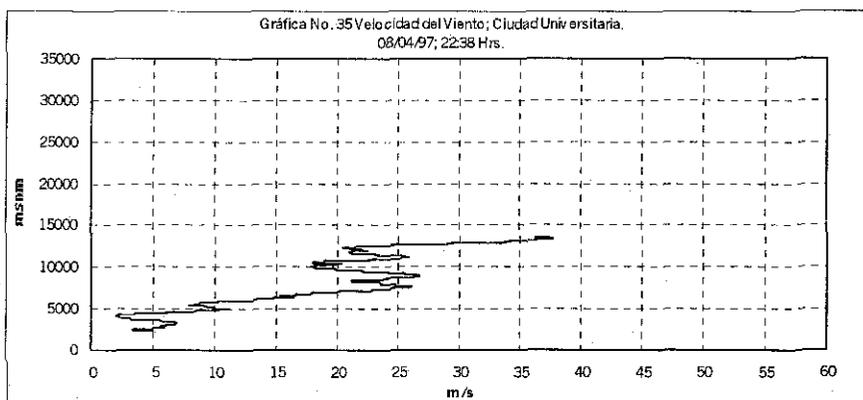
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

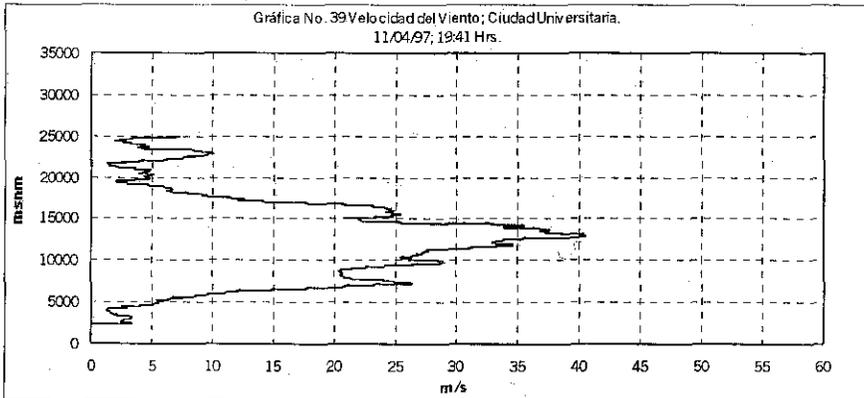
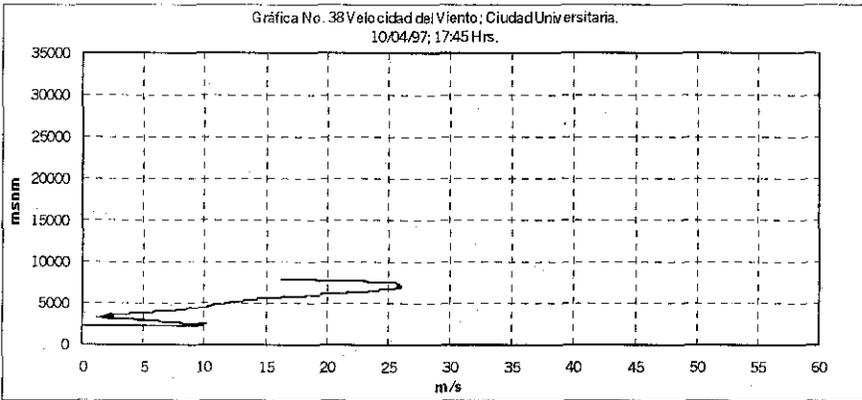
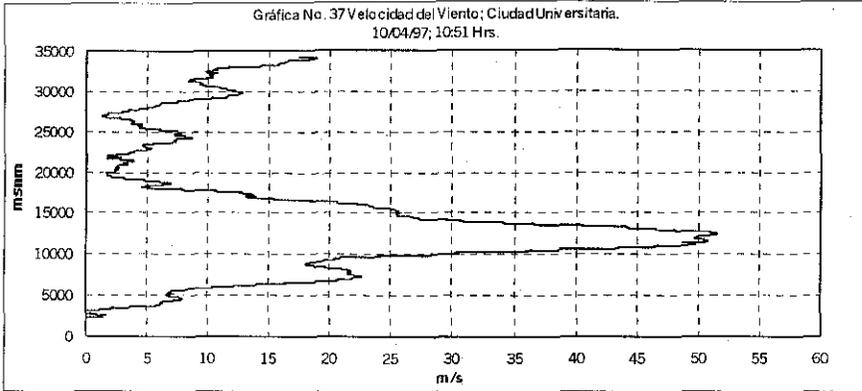
La anterior secuencia de gráficos de humedad relativa, muestra de manera general que en los primeros metros sobre el lugar de lanzamiento se presentaron en un 65 % de las ocasiones valores  $\geq 50$  % de la H.R., lo cual se debió a que durante toda la campaña de ozonosondeos dentro de la ZMCM se registraban lluvias al término del atardecer, dejando considerables niveles de humedad que serían evidenciados en los lanzamientos de los días sucesivos.

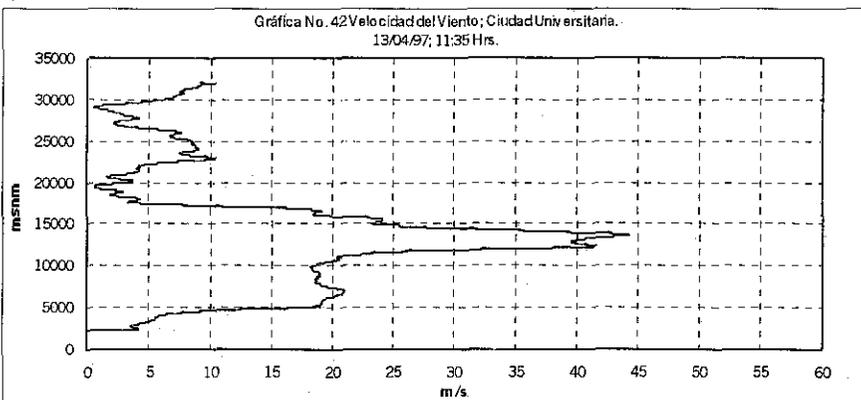
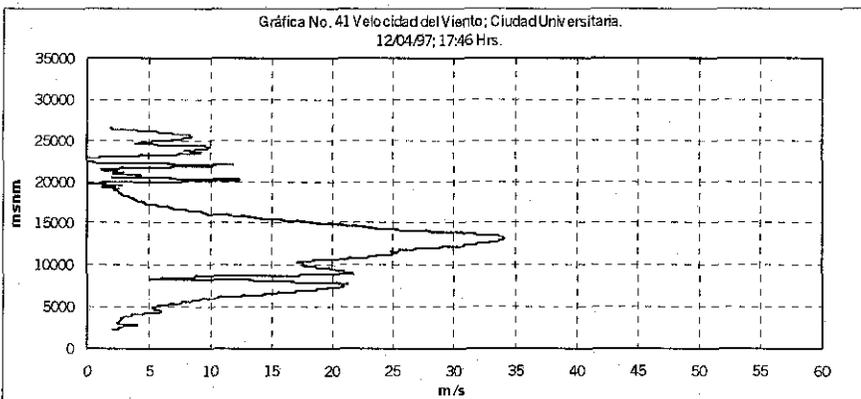
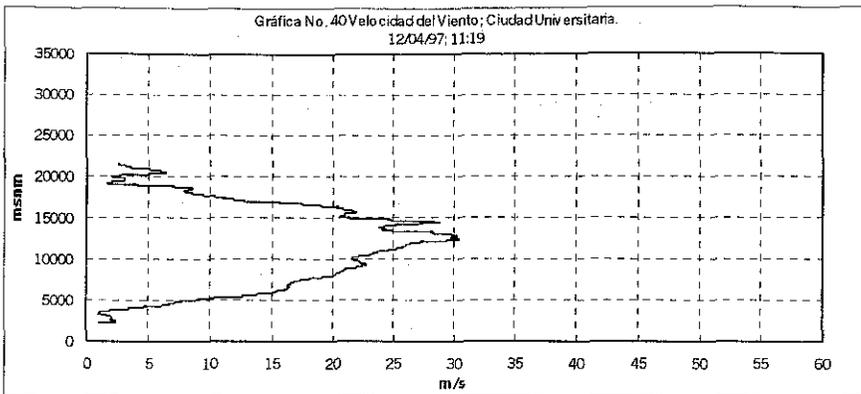
Es importante señalar, que el comportamiento de los perfiles de humedad obtenidos en esta campaña de lanzamientos son de apariencia similar entre sí, debido a que exhiben semejanzas en su distribución; ya que al principio de cada uno se registran disminuciones porcentuales, hasta los 2,600 msnm. Después del nivel citado los índices comienzan a incrementarse llegando en la mayor parte de los casos a señalar valores entre los 80 y 90 %, los cuales se observan entre los 4,500 a 6,000 msnm. No obstante, a lo anterior existen tres gráficos (No. 19, 20 y 26) que muestran máximos del 100 % a una altitud promedio de los 5,000 msnm.

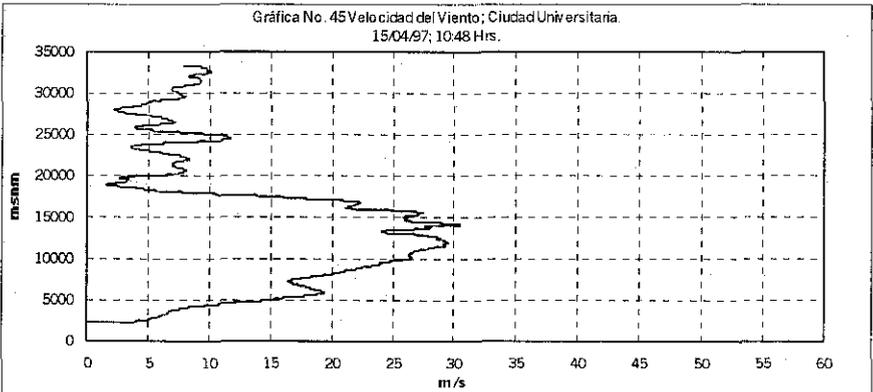
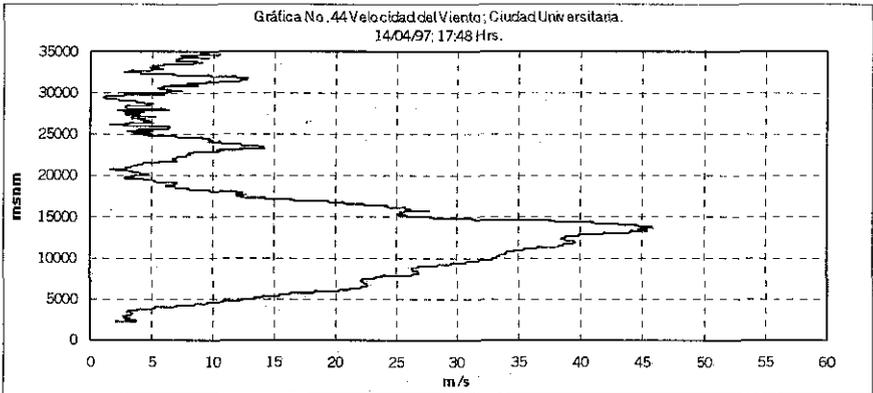
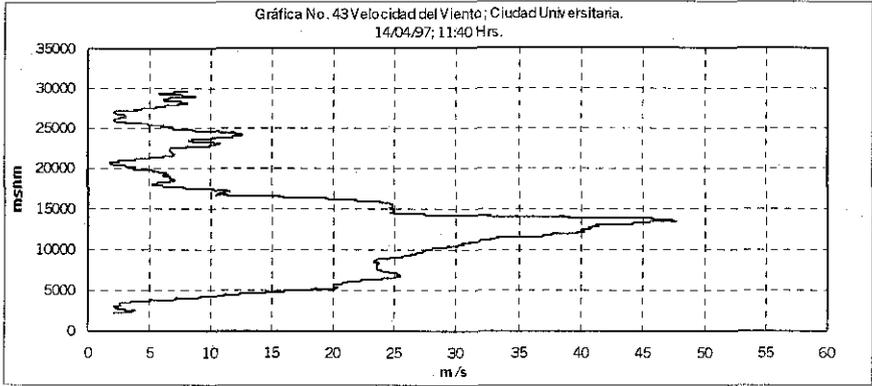
Pasado de los 7,000 msnm, comienza un evidente descenso de la humedad relativa, con ocasionales repuntes que no rebasan por lo general el 65 %, llegando así hasta su mínima expresión que es del uno por ciento, el cual aparece entre los 16,000 a 20,000 msnm.

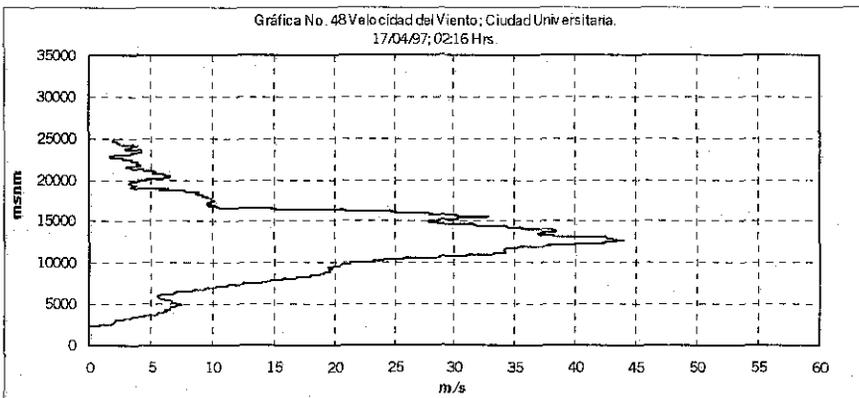
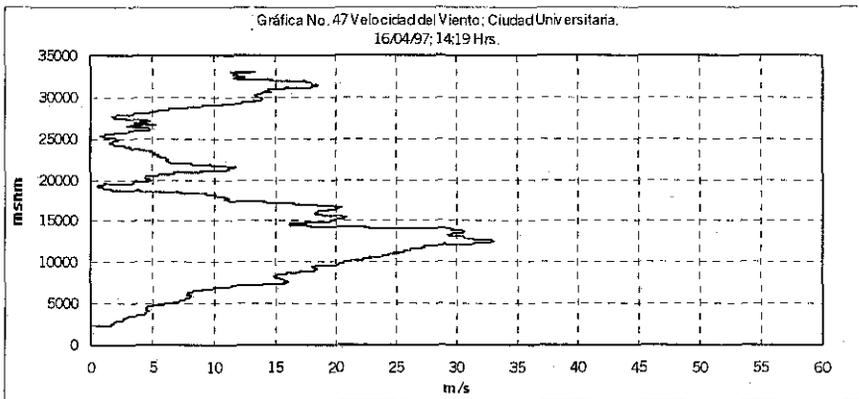
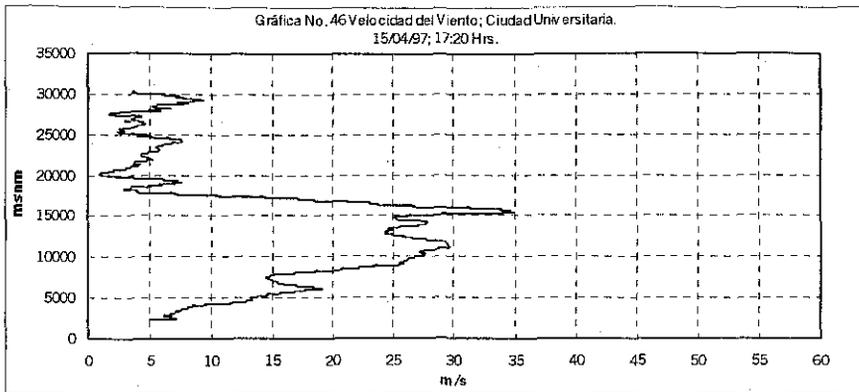
**3.3. Velocidad del viento.** El parámetro tuvo un comportamiento esperado para la época del año. La cual presenta todavía, en las primeras horas de iluminación solar, una estabilidad o un movimiento casi inapreciable de las masas de aire que integran a la Capa de Mezcla de la ZMCM. Así mismo, se detectó de forma clara la presencia de la Corriente de Chorro, debido a la aparición de bruscas aceleraciones de la velocidad del viento en las masas de aire, entre los tres a trece mil metros sobre el nivel del mar.

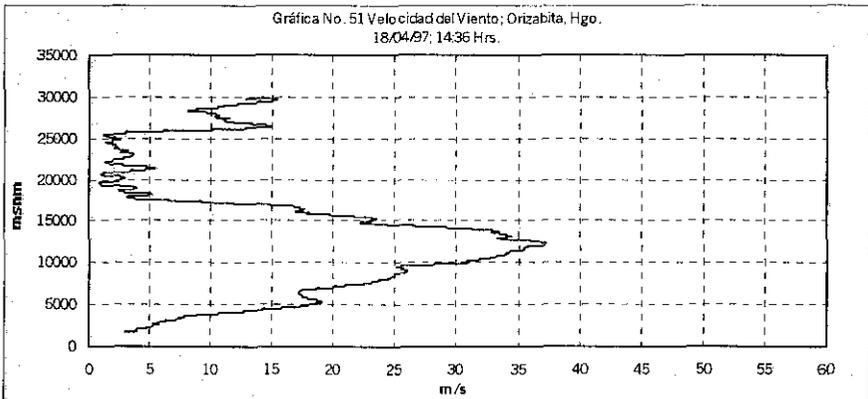
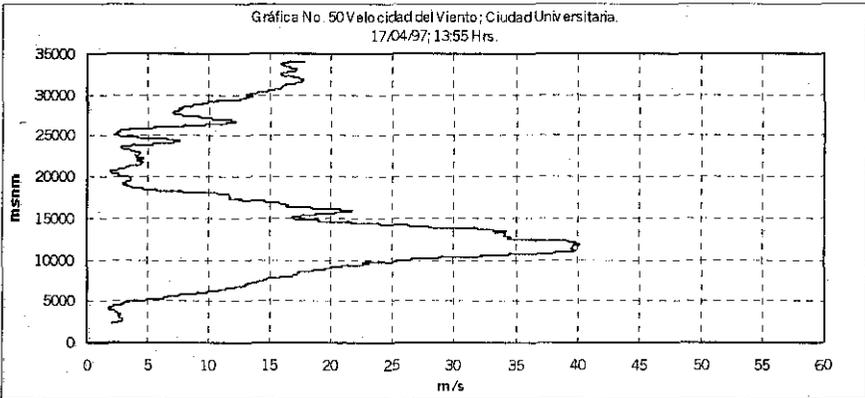
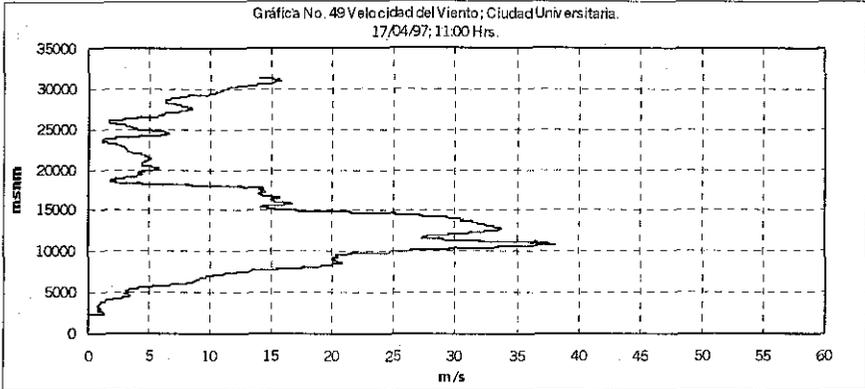










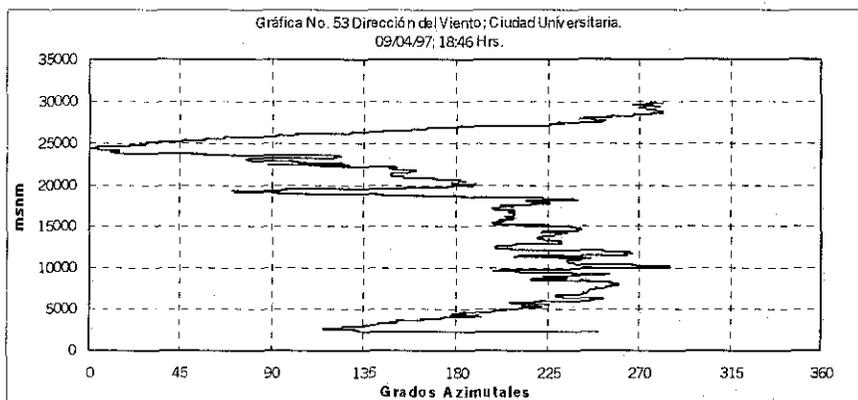
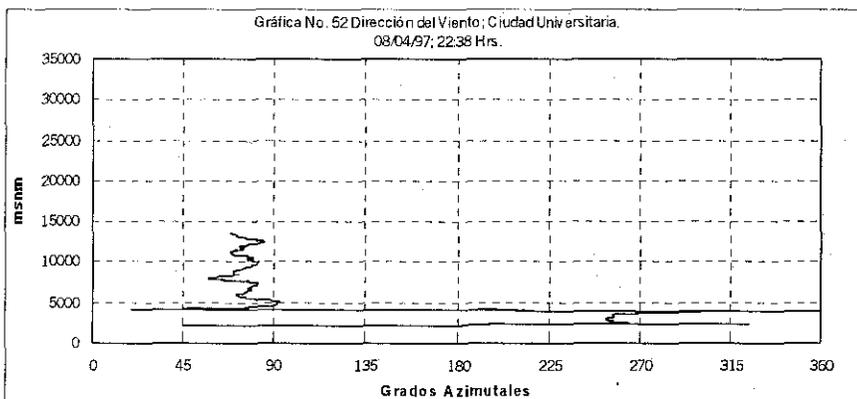


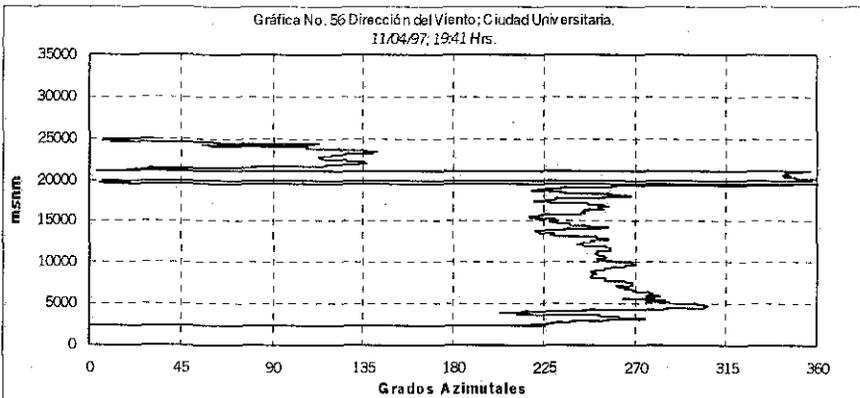
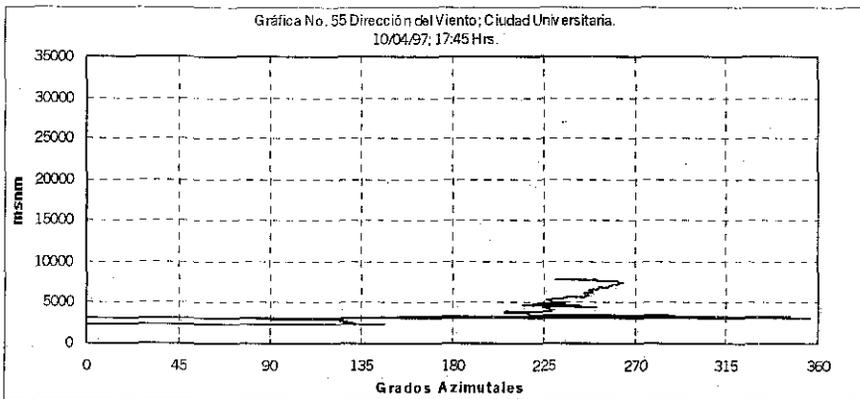
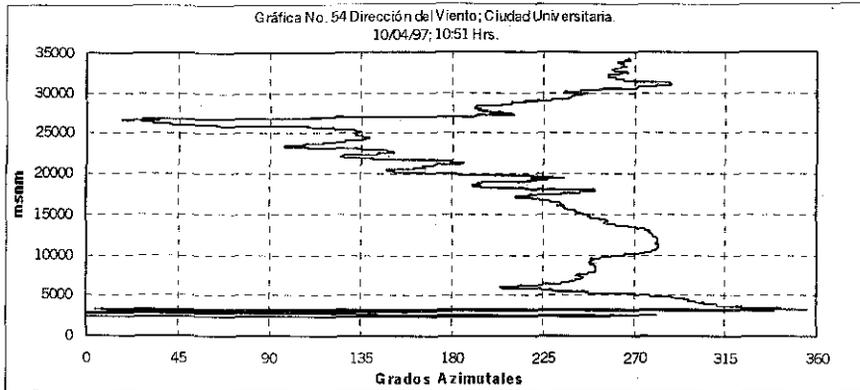
De forma general en los primeros 5,000 msnm, de toda la serie de gráficos de velocidad del viento, muestra un movimiento de las masas de aire que no supera los 10 m/s; dicha situación queda englobada en la Capa de Mezcla, en la cual se favorece que los contaminantes generados durante las primeras horas de la mañana en la ZMCM, no alcancen a dispersarse de manera satisfactoria en gran parte del día, lo que trae como resultado de forma directa la presencia de contingencias ambientales.

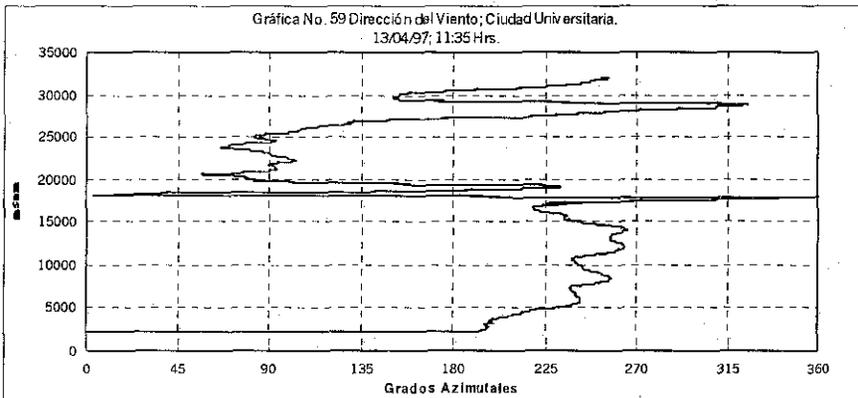
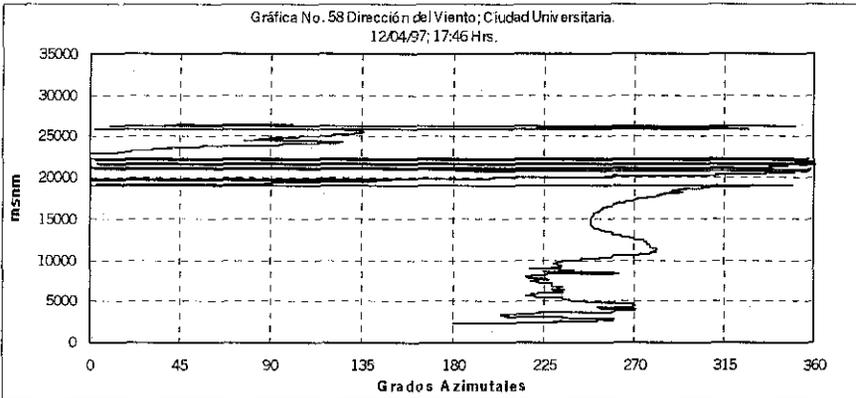
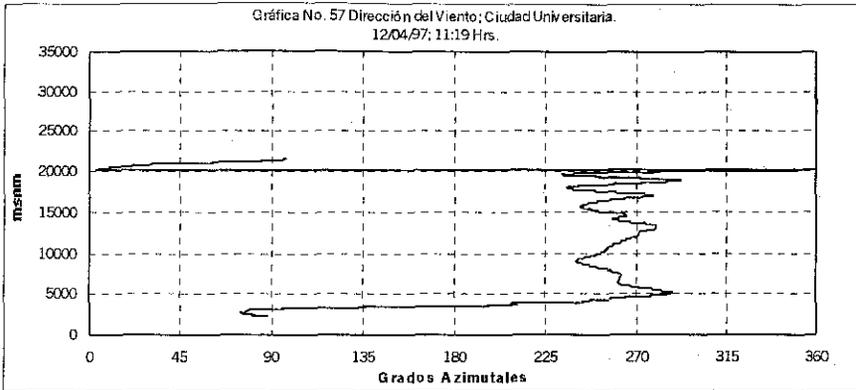
Con respecto a la presencia de la Corriente de Chorro sobre la ZMCM, queda de manifiesto sus máximos valores y efectos en la atmósfera urbana entre los 10,000 a 15,000 msnm, los cuales oscilan entre los 35 a 40 m/s. Sin embargo, los días en donde la Corriente de Chorro rebasa los 40 m/s, se observan en las gráficas No. 37, 42, 43, 44 y 48.

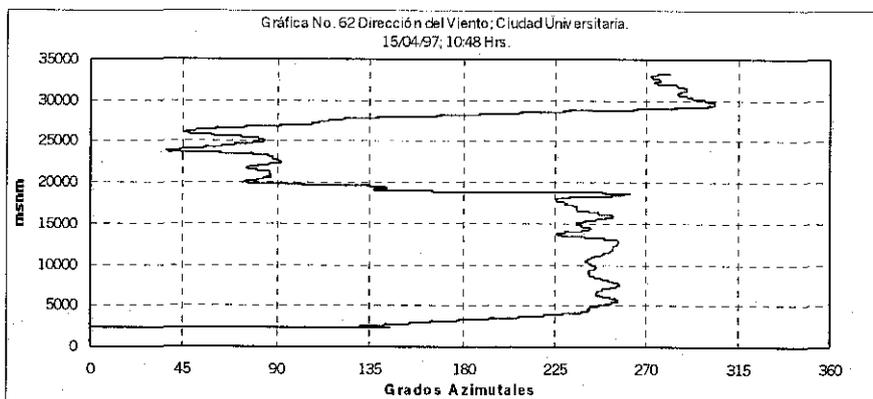
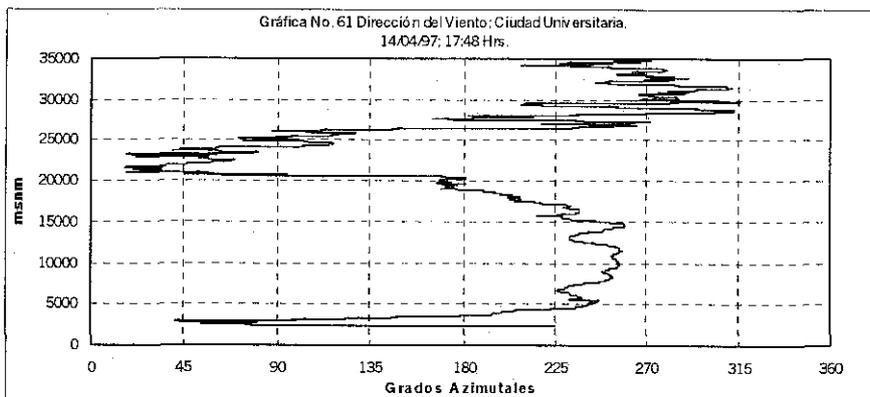
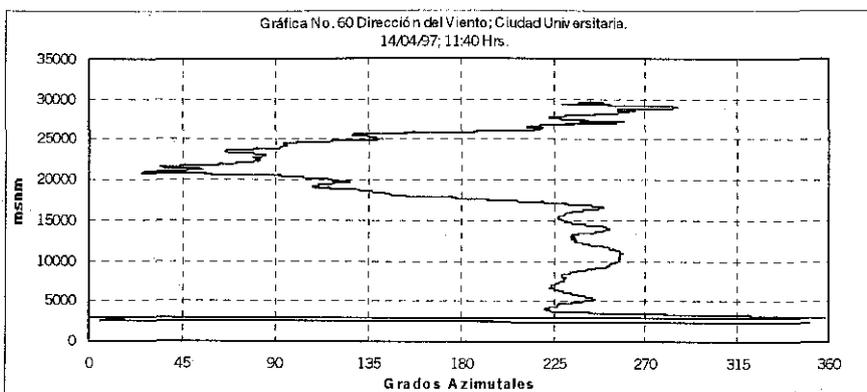
**3.4. Dirección del viento.** Con respecto a la dirección del viento se puede dividir su procedencia en cuatro niveles los cuales son: a) 2,240 a 3,000 donde las componentes dominantes fueron del norte y del suroeste; b) 3,000 a 19,000 aproximadamente, en la que la dirección de los vientos fue del suroeste y oeste; c) 20,000 a 25,000 en los vientos se presenta una dominante cambia de manera drástica ya que su procedencia es del Norte a Este y d) 25,000 a 30,000 los vientos procedían del oeste a noroeste.

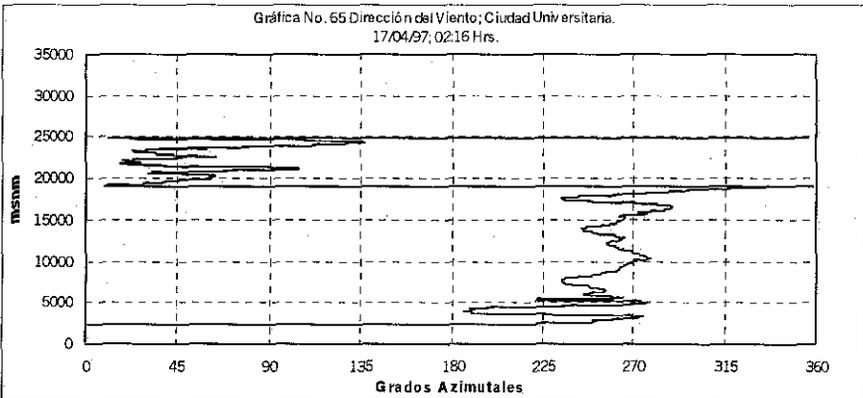
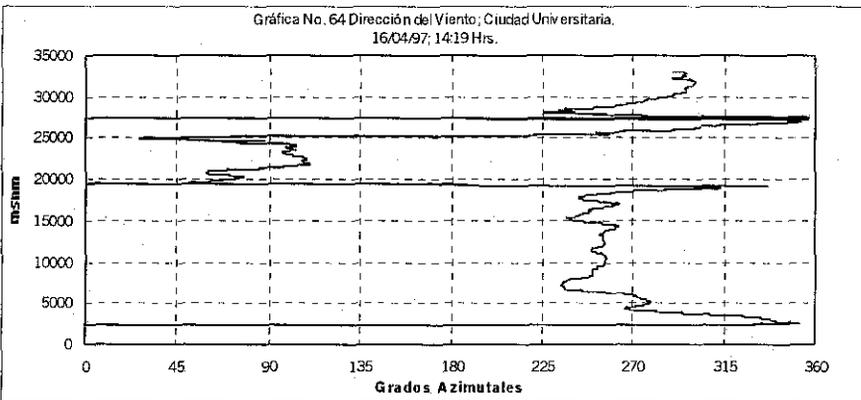
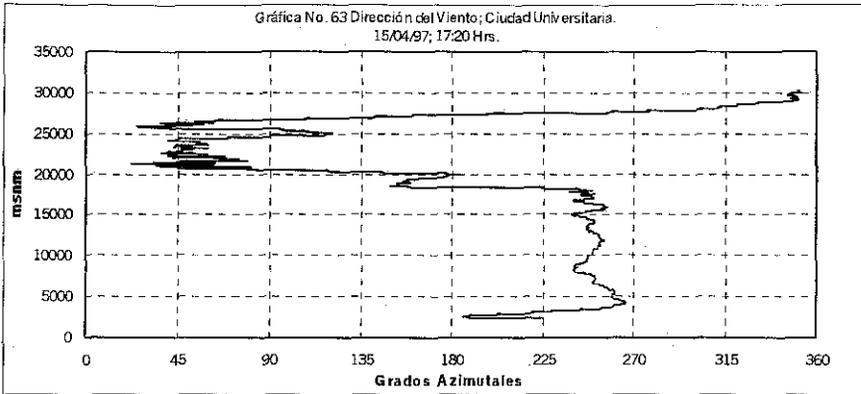
Cabe señalar, que tal heterogeneidad, dificulta jerarquizar la procedencia correcta de cada nivel; lo cual para fines del estudio no es tan relevante.

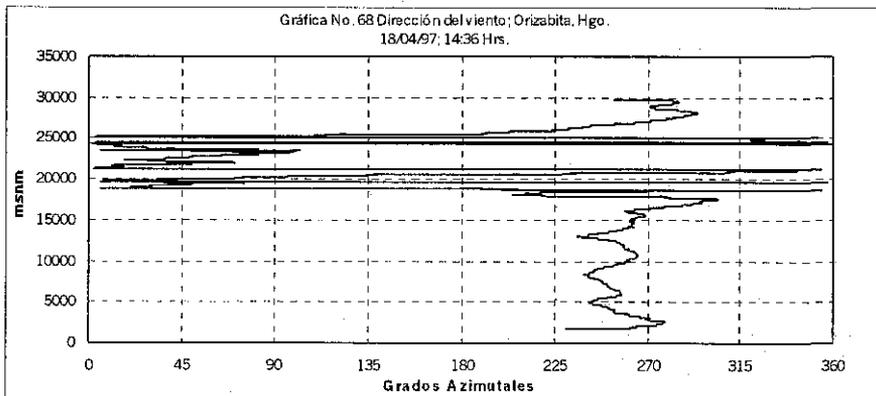
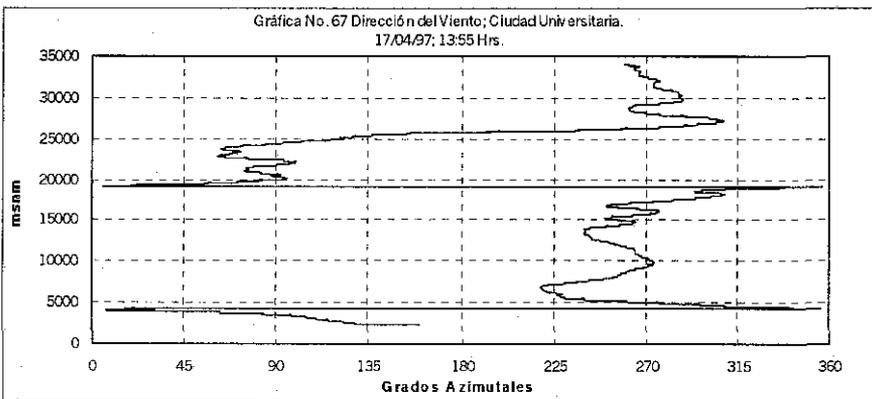
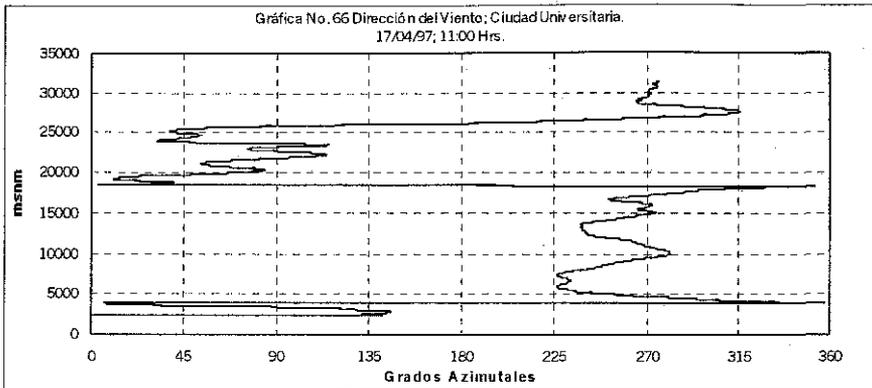




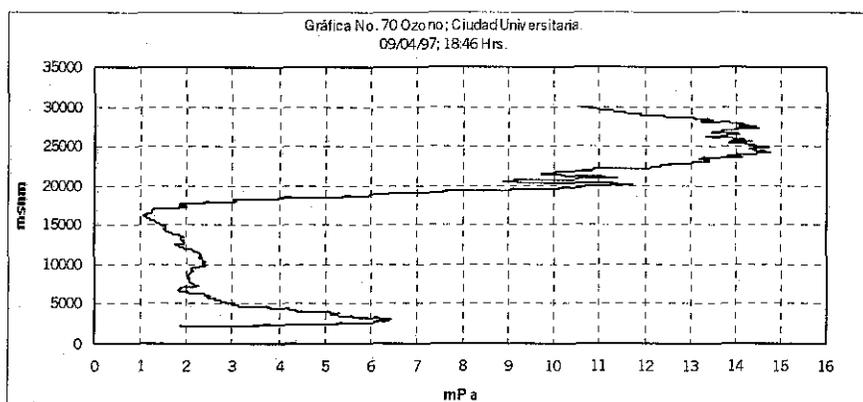
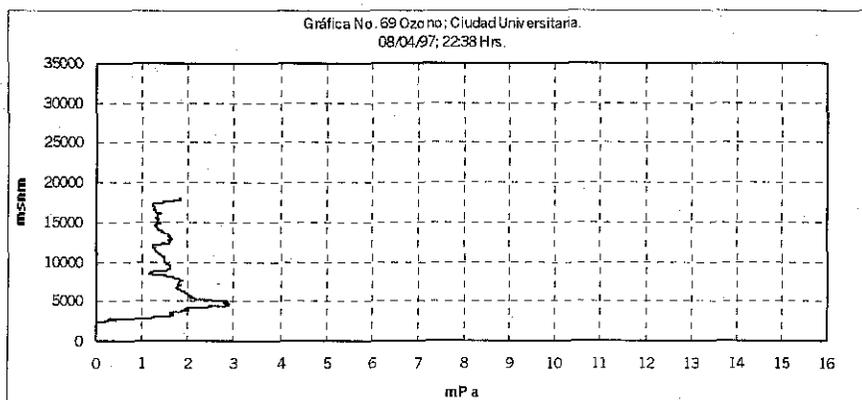


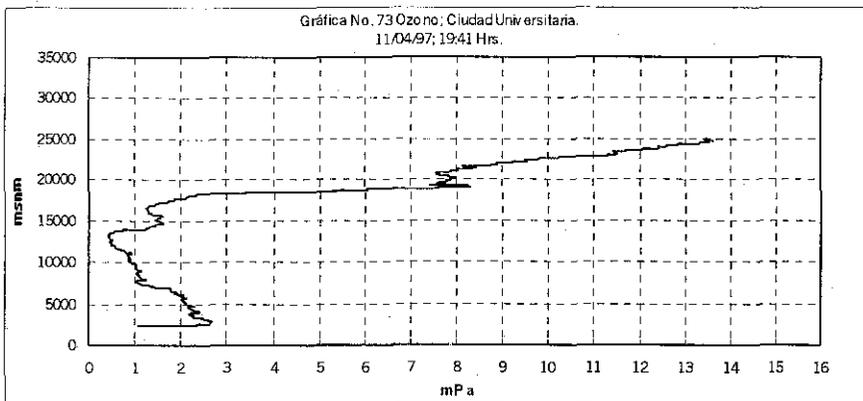
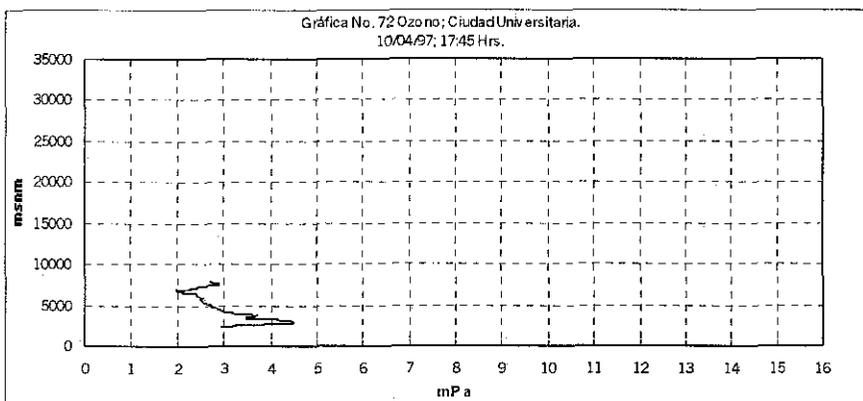
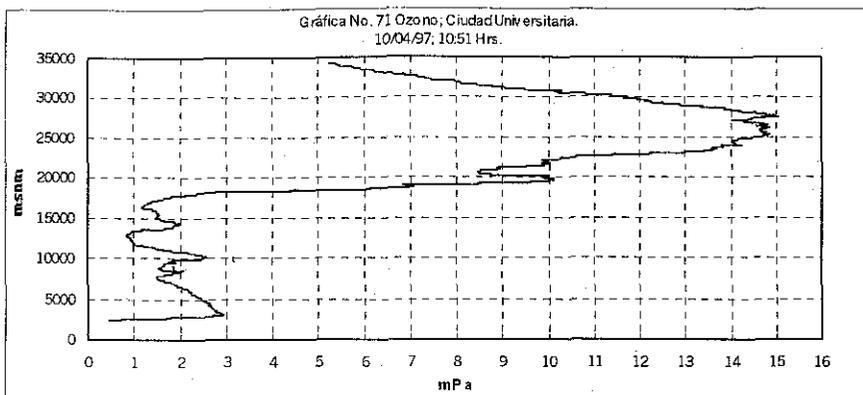


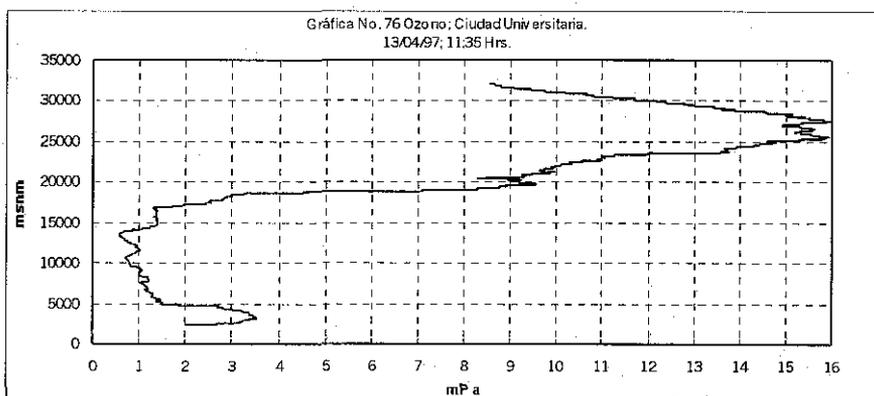
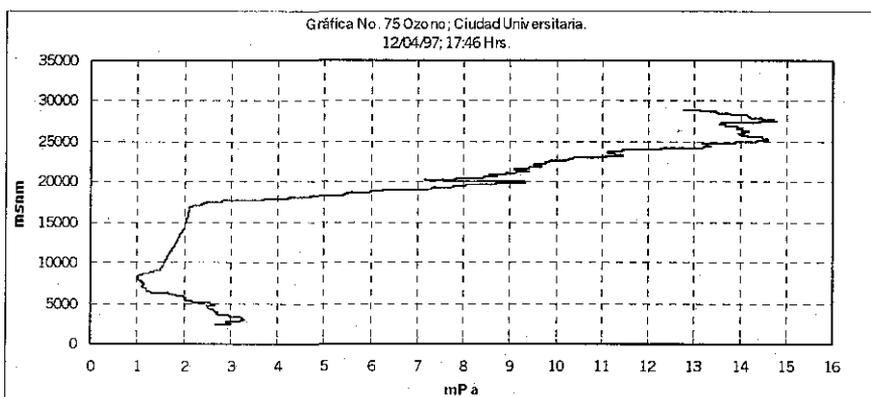
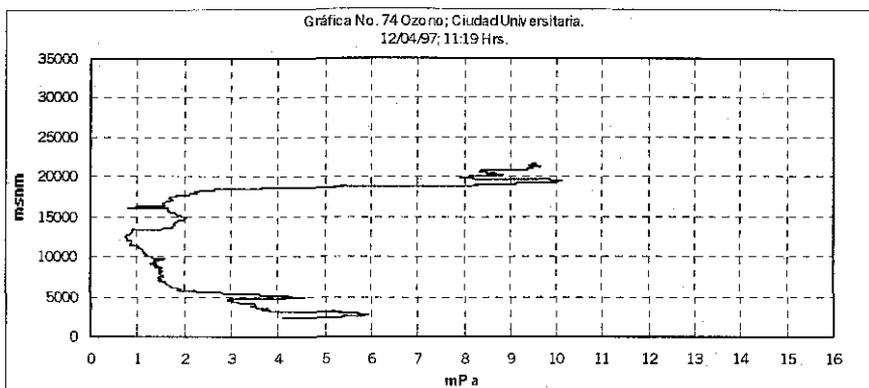


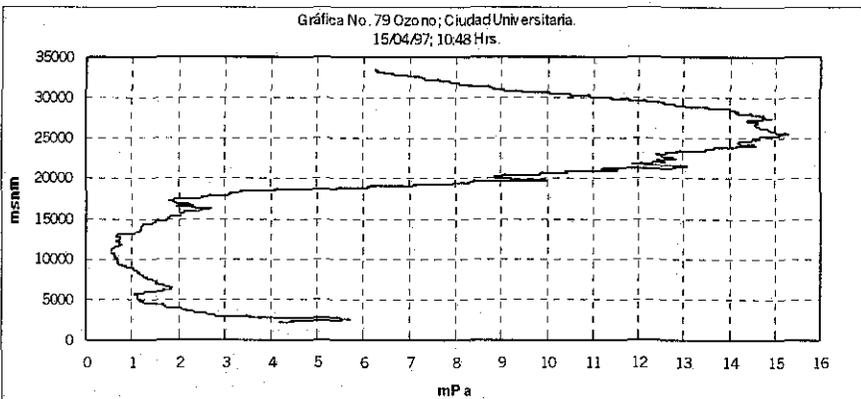
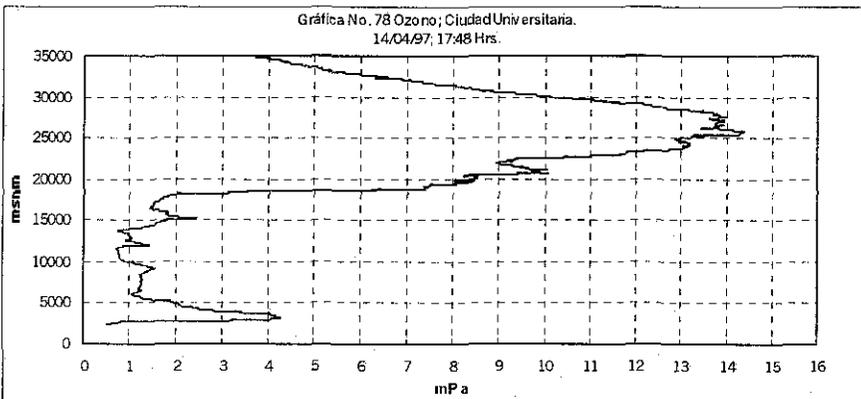
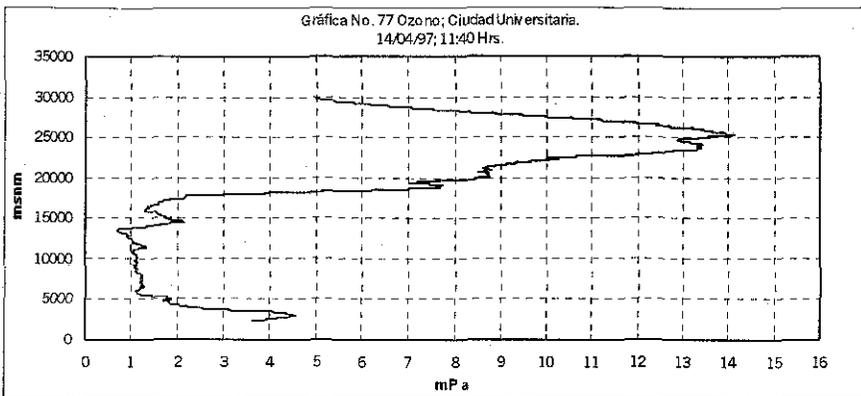


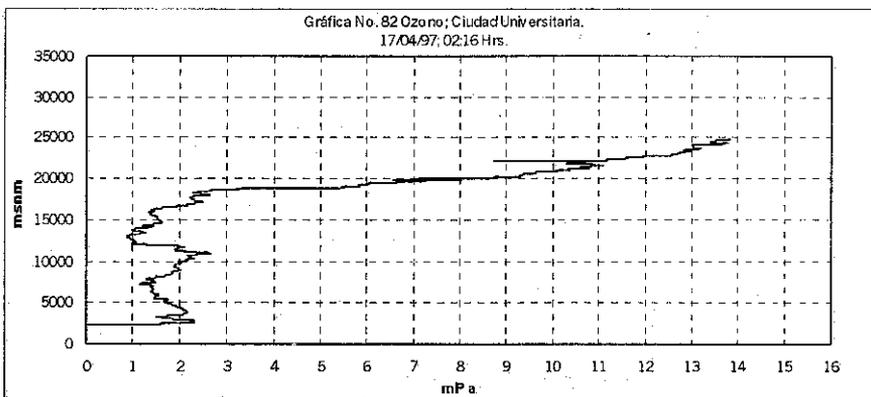
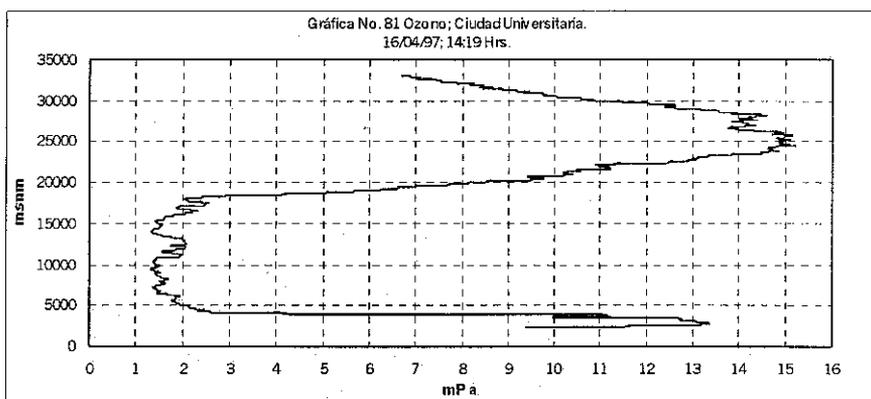
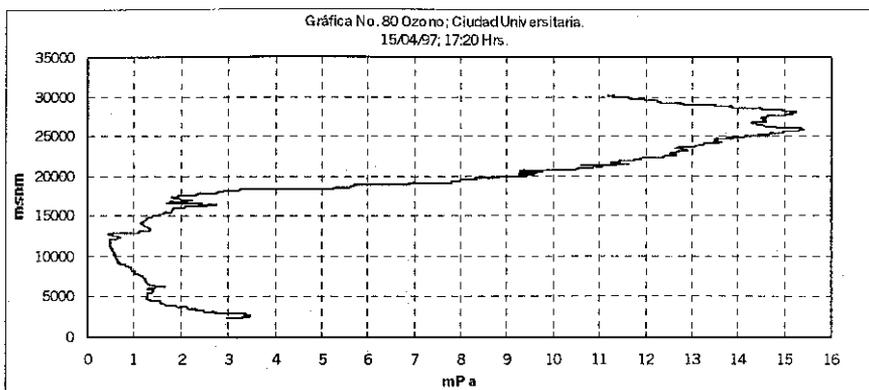
**3.5. Ozono.** En los perfiles de ozono, existe una marcada diferencia entre los valores obtenidos para la Ciudad Universitaria y la estación rural de Orizabita, Hgo.; también existe una diferencia en la concentración de ozono troposférico en Ciudad Universitaria, de acuerdo a los niveles de contaminación en superficie.

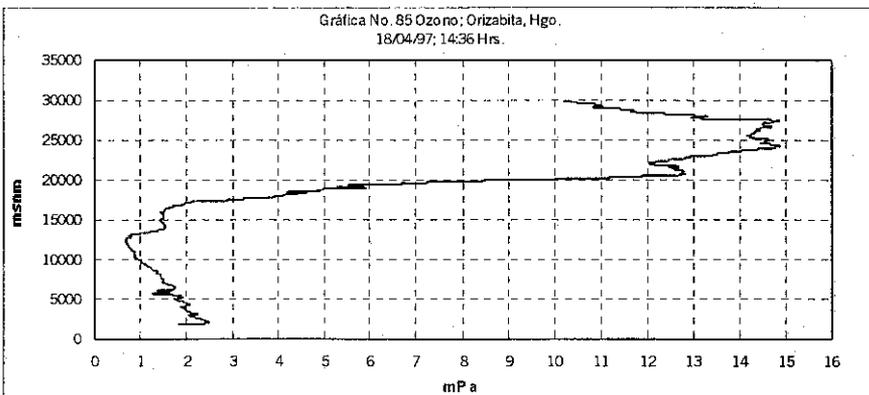
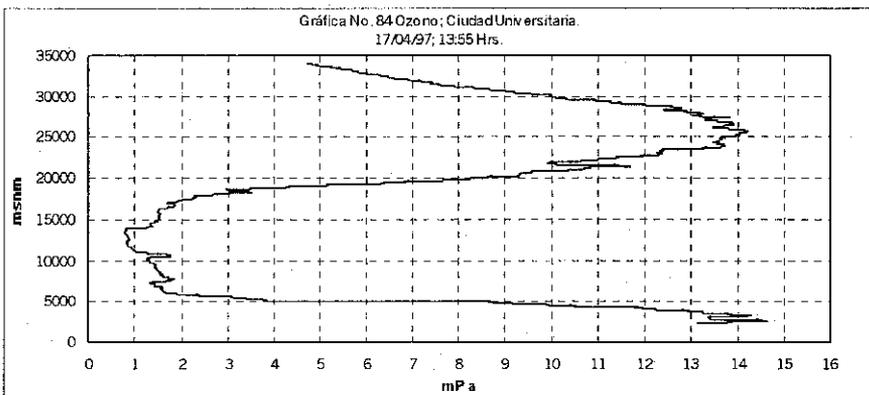
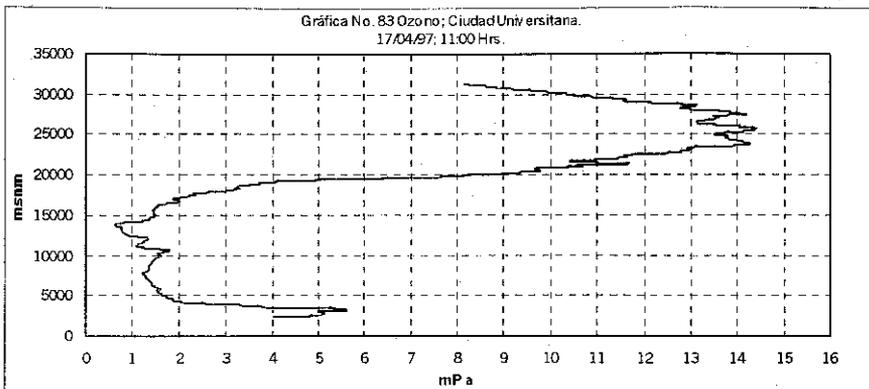












De los diecisiete perfiles elaborados, claramente se aprecian dos zonas de máxima concentración del ozono; dichas regiones se encuentran dentro de las siguientes altitudes: la primera se localiza dentro de la troposfera en donde la agrupación de este gas por lo general no rebasa los 5,000 msnm; con respecto a la segunda área las concentraciones comienzan a una altitud promedio de los 17,000 msnm, disminuyendo a partir de los 28,000 msnm aproximadamente.

Sin embargo, es el  $O_3$  troposférico quien llama la atención, debido a que presenta un comportamiento anómalo en sus concentraciones, durante toda la campaña de lanzamientos. Basta señalar que el 47 % de los días estudiados se encontraban en niveles menores a los 4 mPa; en tanto que el 53 % de los días restantes, presentaron registros mayores a los 4 mPa.

En este último grupo de días, sobresalen dos eventos los cuales muestran concentraciones de  $O_3$  troposféricos superiores a los 10 mPa, lo que rápidamente los sitúa como casos extraordinarios; debido a su similitud e incluso superioridad de los índices que eran exclusivamente de la Estratosfera (ver gráficas No. 81 y 84). Estos dos eventos claramente pueden estar relacionados de forma directa con los altos niveles de contaminación atmosférica y las condiciones meteorológicas que se presentan durante la época de invierno en la ZMCM.

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

#### 4.1. Análisis de la Humedad Relativa, la Temperatura y el Ozono

Como ya se mencionó anteriormente, el programa de observaciones contemplaba en un principio llevar a cabo dos lanzamientos al día, pero durante el desarrollo del experimento se realizaron varios cambios en la programación de éstos, debido básicamente a la existencia de días en donde las concentraciones de ozono en la superficie fueron bajas en contraste con las observadas los días 16 y 17 de abril, cuando las concentraciones alcanzaron niveles considerados como no satisfactorios para la salud de la población. Por esta razón los horarios de los lanzamientos se ajustaron en función de las condiciones de calidad ambiental existentes.

El día 18 de abril, se realizó un último lanzamiento en el poblado de Orizabita, Hgo. ( $20^{\circ} 35' N$ ,  $99^{\circ} 12' 30'' W$  a 1745 msnm). Lugar donde el ORS, mantiene una estación solarimétrica de referencia, ya que la contaminación atmosférica de origen antropogénico es baja, por lo que podemos considerar los resultados del lanzamiento realizado como valores de referencia para este trabajo en una atmósfera limpia.

De acuerdo a lo observado en el capítulo anterior, se observó la existencia de una anomalía en los perfiles de ozono de Ciudad Universitaria, la cual consistió en un incremento del  $O_3$  en la Troposfera baja, lo que no se presentó en el perfil de la estación Orizabita (**ver figura 20**). Así mismo, para comprobar que el comportamiento en la estación urbana es anómalo se muestra en las (**figuras 20 y 21**), una distribución vertical típica de ozono obtenida en la isla de Hawaii a  $19^{\circ} 30'$  de latitud norte y  $155^{\circ} 30'$  de longitud oeste.

Es importante recordar los mecanismos naturales de la formación del ozono dentro de una atmósfera libre de contaminantes, mecanismos que distribuyen el gas de la siguiente manera: en la estratosfera se encuentra el 90% de ozono y en la troposfera el 10%.

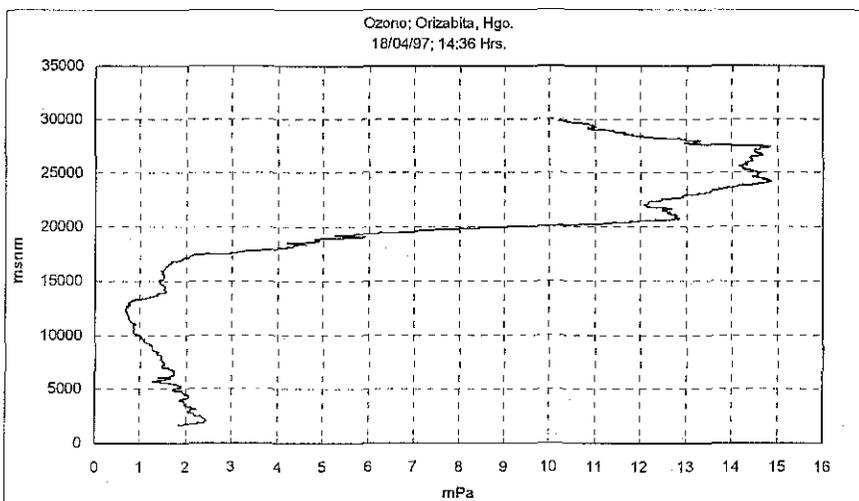
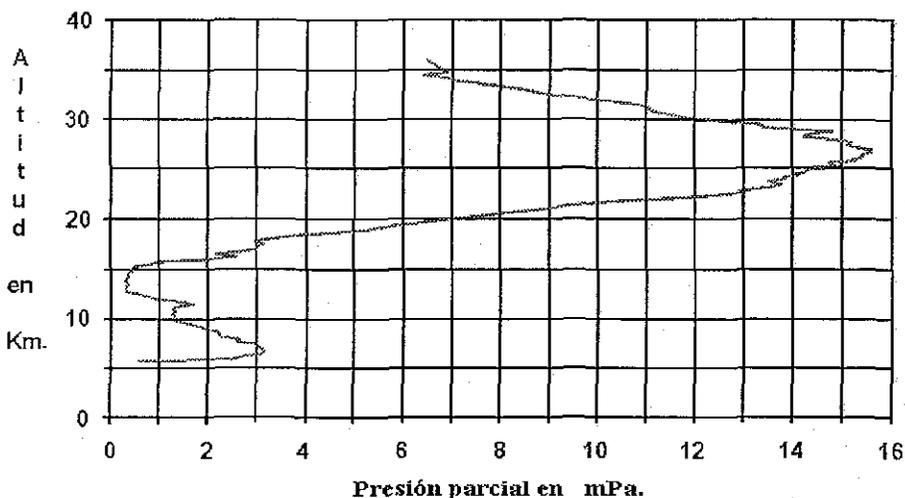


Figura 20. Perfil típico de la distribución vertical del ozono en una atmósfera libre de contaminantes.



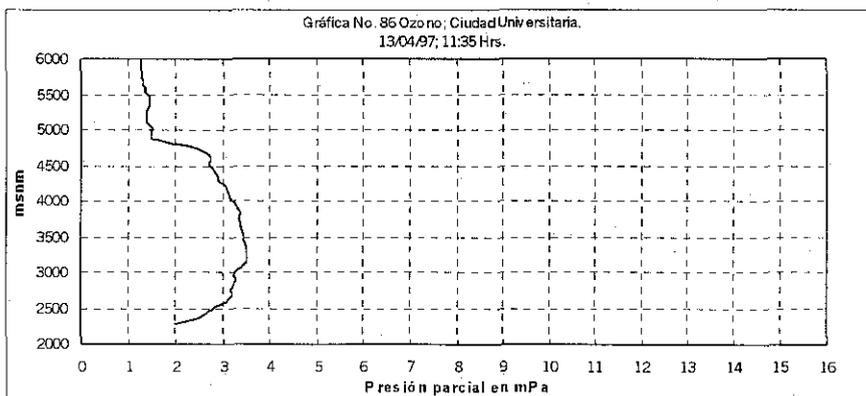
Fuente: <http://mloserv.mlo.hawaii.gov/mloinfo/programs/gases/o3profil.htm>

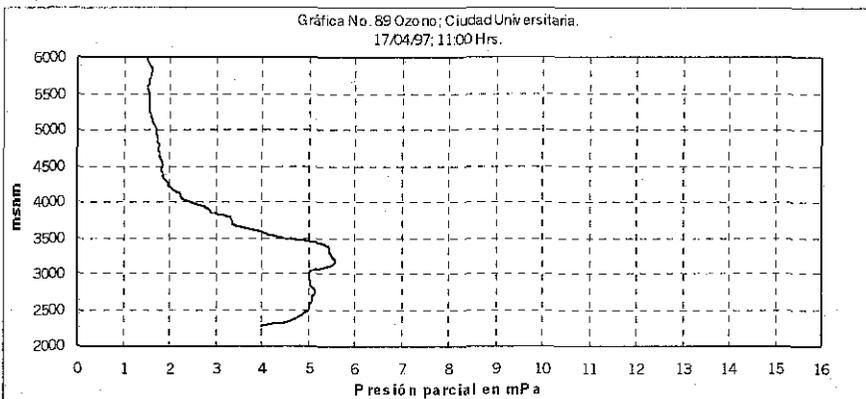
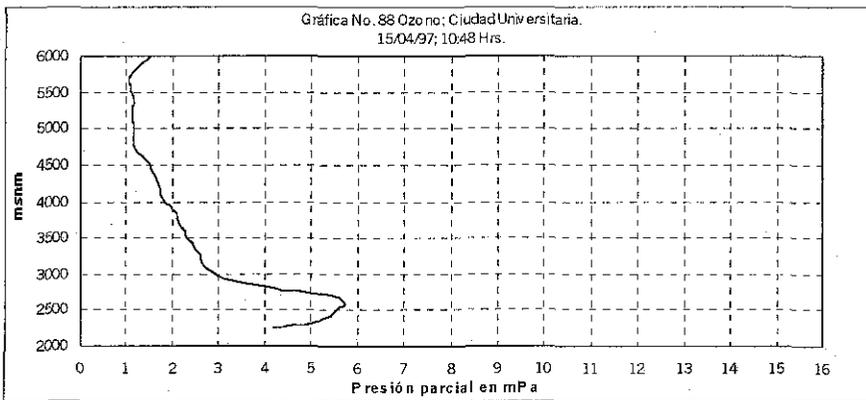
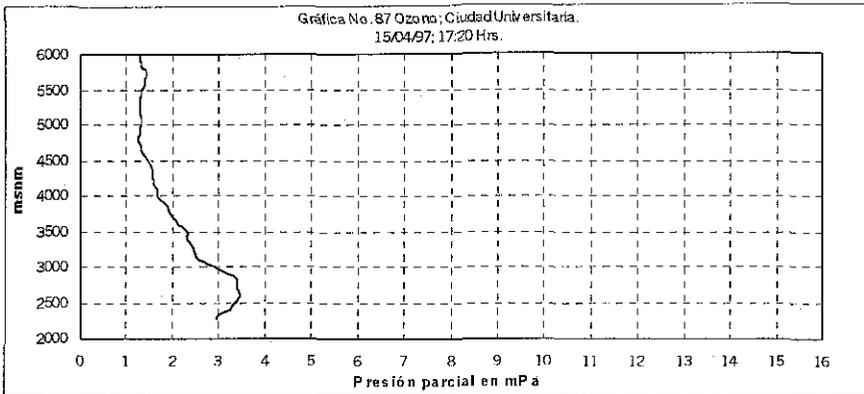
Figura 21. Perfil típico de la distribución vertical del ozono, sobre la isla de Hawái del 13 de agosto de 1997. Clave del ozonosondeo HI293ASL.

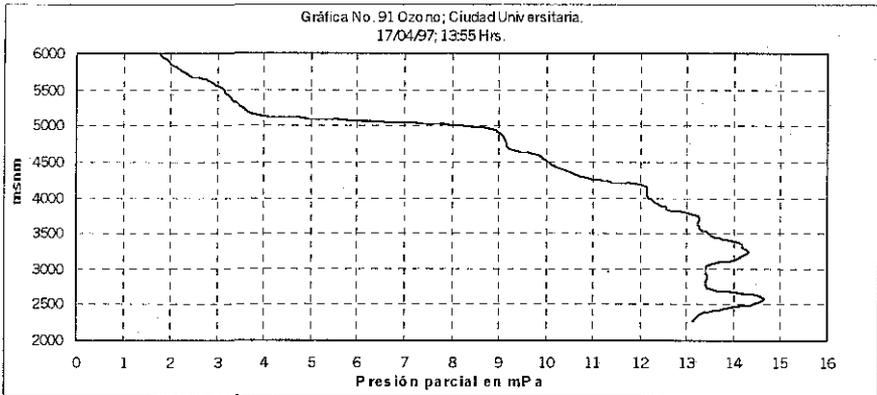
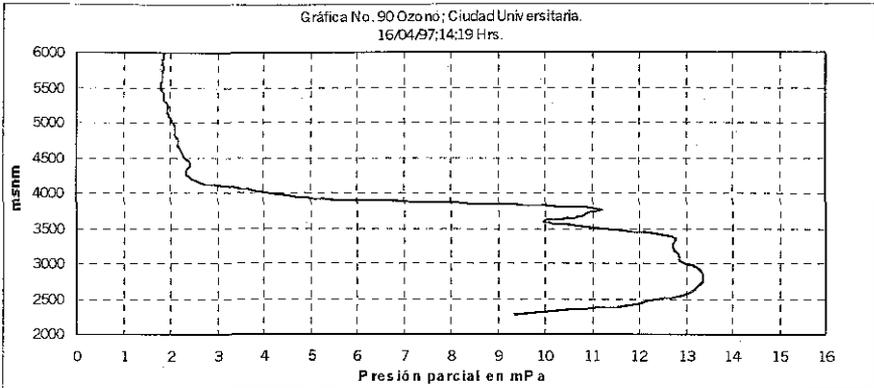
Tanto en el perfil de Hawaii como en el de la estación de Orizabita, Hgo., se puede observar cómo las concentraciones de ozono se comportan más o menos en forma semejante hasta una altura promedio de 30 kilómetros, mientras que en Ciudad Universitaria, se presenta esta anomalía, desde la superficie hasta aproximadamente los 6,000 msnm, donde el comportamiento ya es semejante al de la estación Orizabita, no importando que entre ellos exista una diferencia de 9 días.

Debido a esto, solamente se enfocará al análisis de los primeros 6000 msnm, dentro de los cuales se presentan las anomalías de ozono antes descritas, por lo que para una mejor y más rápida interpretación, se reconstruyeron las graficas de humedad relativa, temperatura y ozono durante los primeros 6000 metros.

Por otra parte el análisis de los gráficos se podría realizar uno por uno, pero no es necesario si se agrupan de acuerdo a la concentración máxima de ozono alcanzado en cada lanzamiento. Solamente se circunscribirá a presentar dos lanzamientos con valores de presión parcial máxima de ozono en los primeros 6000 msnm de 0 a 4 mPa, dos con concentraciones  $>4$  y  $\leq 8$  mPa y dos días con valores  $>8$  mPa de ozono (grafica No. 86 a la 91).



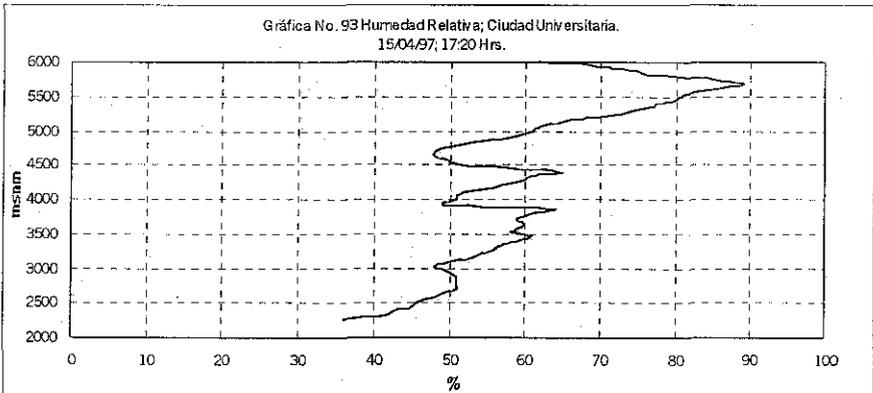
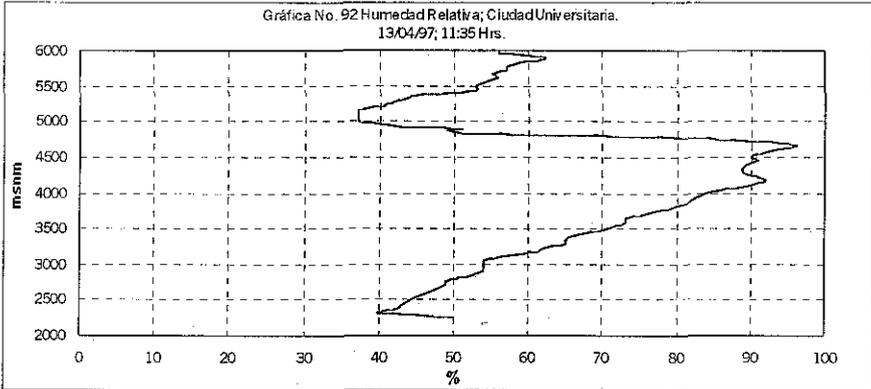


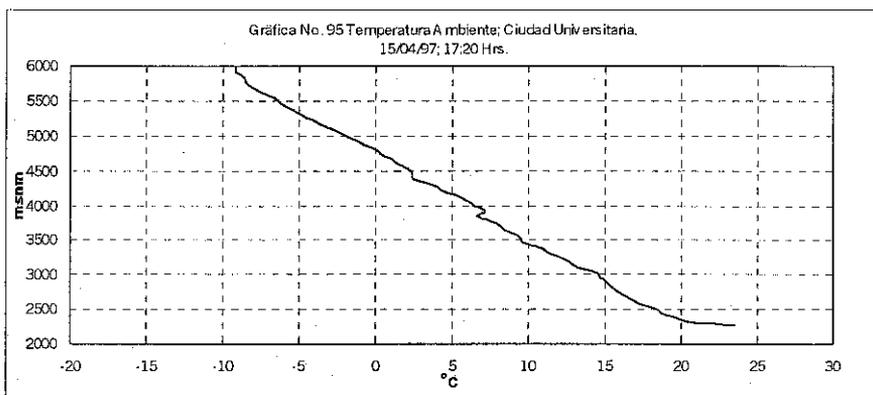
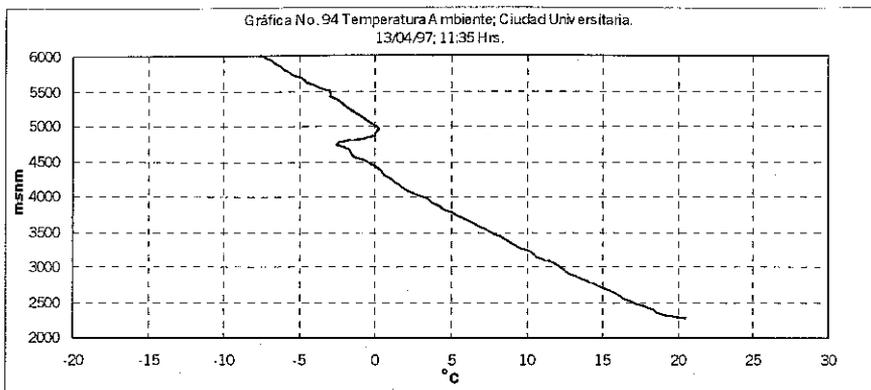


Los dos primeros días son el 13 y 15 de abril, este último de las 17:20 Hrs.; como se puede observar en los gráficos 86 y 87 a partir de la superficie las concentraciones de ozono son mayores conforme aumenta la altitud, hasta cerca de los 5000 msnm para el 13 de abril, mientras para el 15 del mismo mes, la altura de esta concentración es a los 3000 msnm.

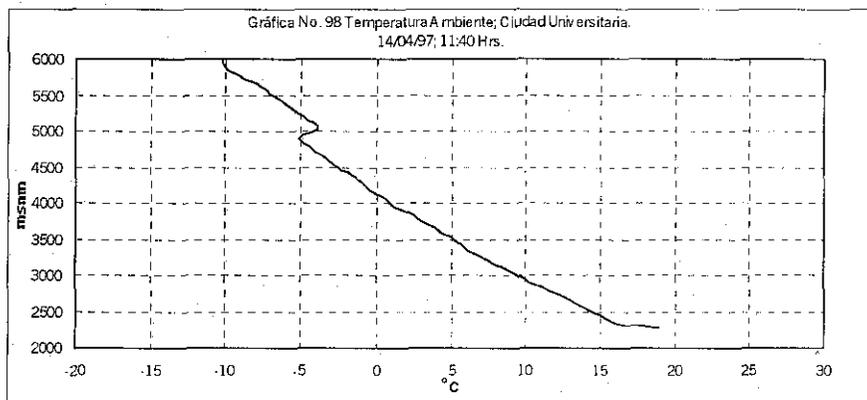
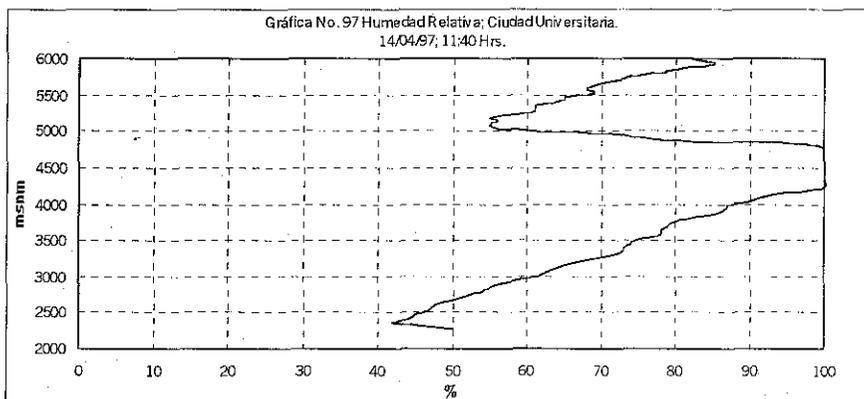
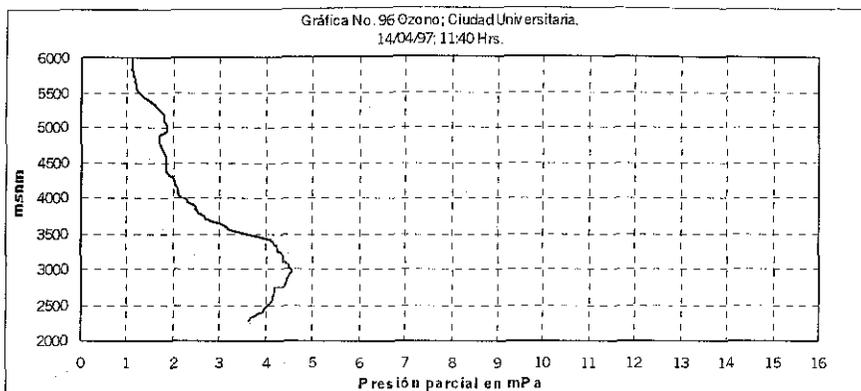
Si se comparan con los perfiles de humedad relativa, se puede apreciar que tanto el día 13 como el 15 (gráficos 92 y 93 respectivamente), existe una buena correlación en el comportamiento de éstos con el ozono, pero si además los comparamos con los perfiles de

temperatura (94 y 95), se observar que tanto el ozono como la humedad relativa responden a los cambios que presenta el perfil de temperatura ambiente.





Para el día 14 (11:40 Hrs.), la relación del ozono, la humedad relativa y el perfil de la temperatura ambiente ya no es tan clara como los dos días anteriores (gráficas 96, 97 y 98 respectivamente), por lo que se buscó una nueva forma de representar los perfiles de temperatura, que destacara las pequeñas variaciones que no son posibles de observar en los perfiles térmicos actuales.



Benckley y Shulman (1979), proponen estimar la profundidad de la capa de mezclado a través de la temperatura potencial a partir de la temperatura ambiente obtenida por los radiosondeos. Estos cálculos se realizaron de acuerdo al manual EPA-450/4-80-027 de marzo de 1981, elaborado por la Environmental Protección Agency (EPA) de los Estados Unidos (EPA, 1981).

#### 4.2 Procedimiento de calculo de la Temperatura Potencial.

Se consideran procesos **adiabáticos** a aquellos cambios físicos que ocurren en un sistema cerrado, donde no hay ni entrada ni salida de calor. En la atmósfera, las variaciones **adiabáticas** de la presión pueden conducir a significativos cambios en la temperatura y la estabilidad del aire. Los procesos de este tipo son muy frecuentes en la atmósfera y juegan un importante papel en los fenómenos meteorológicos, sobre todo si transcurren muy rápido (en horas).

En dependencia de si se tiene en cuenta la humedad del aire, los procesos pueden ser adiabáticos secos o húmedos.

Para el aire seco, la ecuación de calor puede expresarse como:

$$dQ = C_v \cdot dT + P \cdot dv$$

y la ecuación de estado sería:

$$1/v = P/(R \cdot T)$$

donde:

$dQ$  = cantidad de calor

$C_v$  = calor específico del aire a volumen constante [718 joule/ (Kg. °K)]

$R$  = constante de los gases para el aire seco [287,05 joule/(Kg. °K)]

$P \cdot dv$  = trabajo de dilatación

$v =$  volumen específico

$P =$  presión atmosférica

$T =$  temperatura del aire

Se ha establecido que:

$$C_v + R = C_p$$

donde  $C_p$  es el calor específico a presión constante:

$$[C_p = 1005 \text{ joule}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K})]$$

De la derivación de la ecuación de estado se obtiene que:

$$P \cdot dv + v dP = R dT$$

Si  $dQ = 0$ , entonces despejando ambas ecuaciones se obtiene que:

$$C_p \cdot dT = R \cdot T \cdot (dp/p)$$

Denominemos la presión y la temperatura iniciales como:

$P_0$  y  $T_0$ .

Integrando la expresión anterior, se llega a lo siguiente:

$$T = T_0 \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{R}{C_p}}$$

Donde  $R/C_p = 0,2857$

La **temperatura potencial** es la temperatura que tomaría una parcela de aire si mediante un proceso adiabático seco dicha parcela se lleva de la presión ambiente a la presión de 1000 hPa. Se entiende como: mover la parcela hacia el nivel donde la presión es

de 1000 hPa. Sustituyendo en la expresión anterior, se obtiene la de la temperatura potencial:

$$\Theta = T_0 \left( \frac{1000}{P_0} \right)^{0,2857}$$

Es evidente que en todos los procesos adiabáticos la temperatura potencial de la parcela permanece constante. Por eso la temperatura caracteriza el estado de la parcela y es su propiedad conservativa mientras el proceso sea adiabático. En particular, en los procesos turbulentos, las porciones de aire transportan consigo su temperatura potencial.

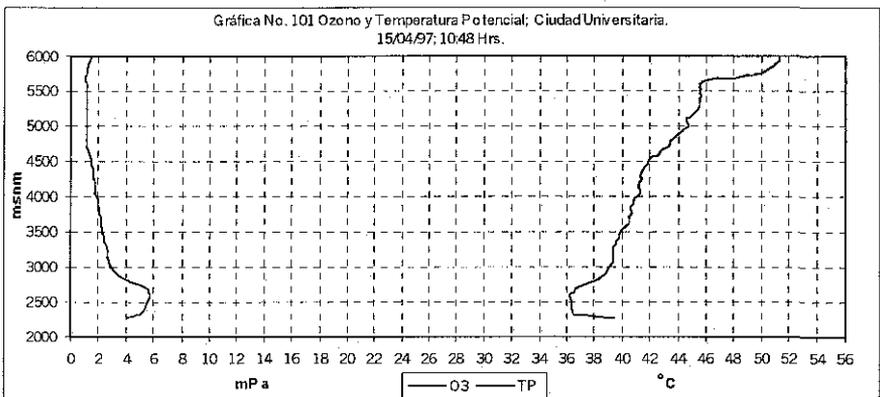
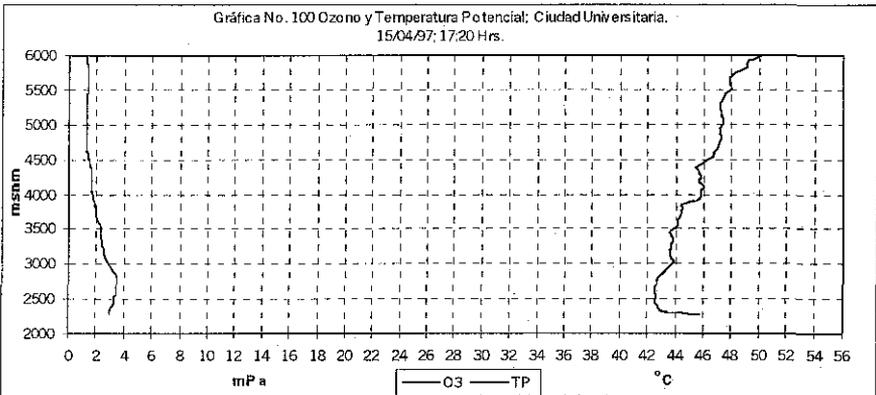
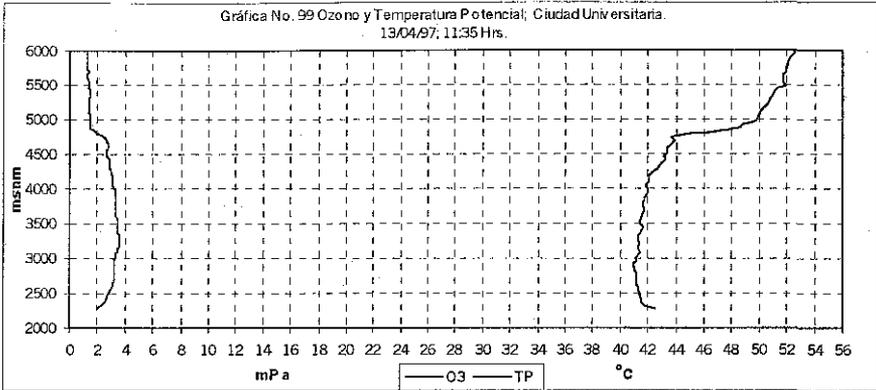
Al mezclarse dos masas de aire en un nivel dado, sus temperaturas potenciales se homogeneizan. En una masa completamente mezclada, la temperatura potencial es constante en todos los niveles y la temperatura absoluta (T) disminuye 0.98°/100m, es decir, responde al gradiente adiabático seco.

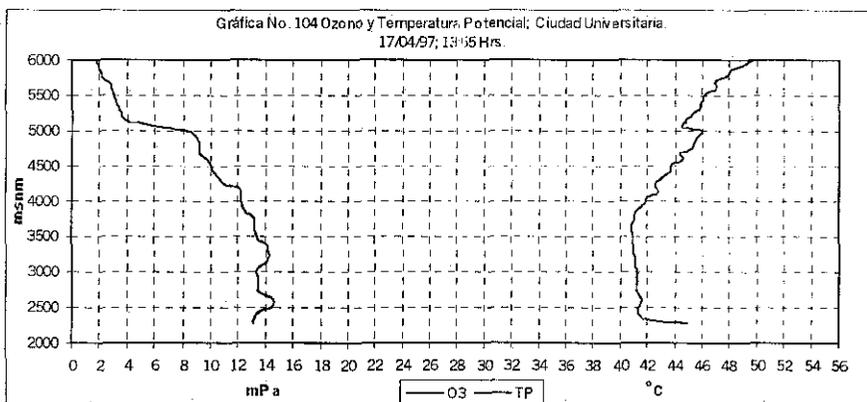
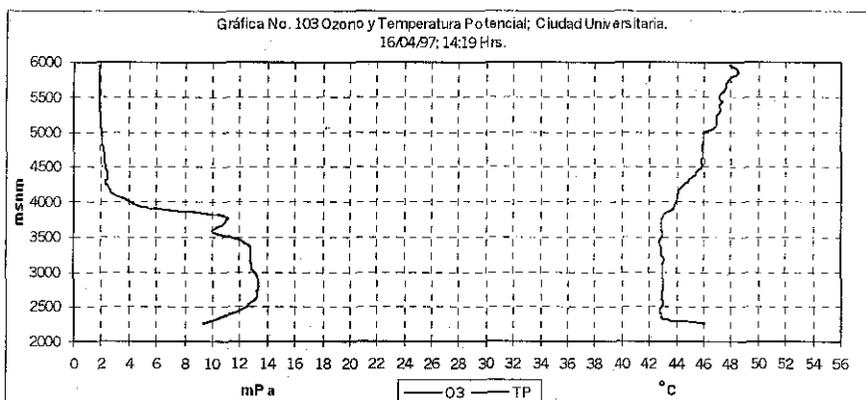
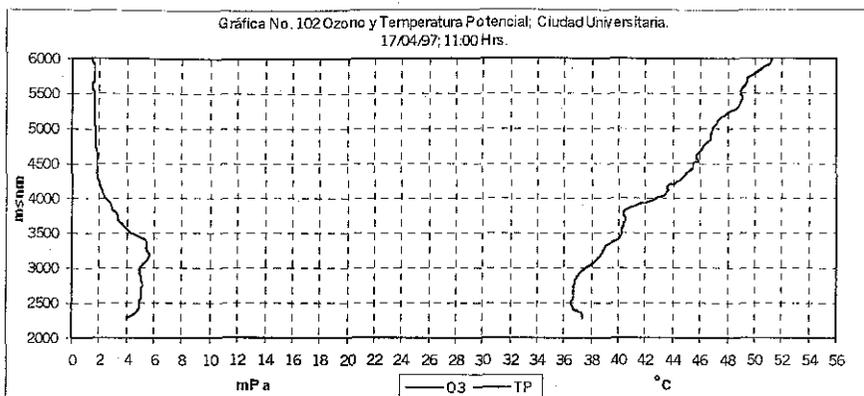
De la propia formulación se aprecia que si la presión inicial disminuye, la temperatura potencial aumenta. Es decir, si dos masas de aire tienen la misma temperatura absoluta, tendrá mayor temperatura potencial la que descienda desde el nivel más alto.

### 4.3. Análisis de la Temperatura Potencial y el Ozono

En los gráficos del No. 99 al No. 104 se presentan los perfiles de ozono y de temperatura potencial para los días 13 (11:35 Hrs.), 15 (10:48 y 17:20 Hrs.), 16 (14:19 Hrs.) y 17 (11:00 y 13:55 Hrs.) de abril.

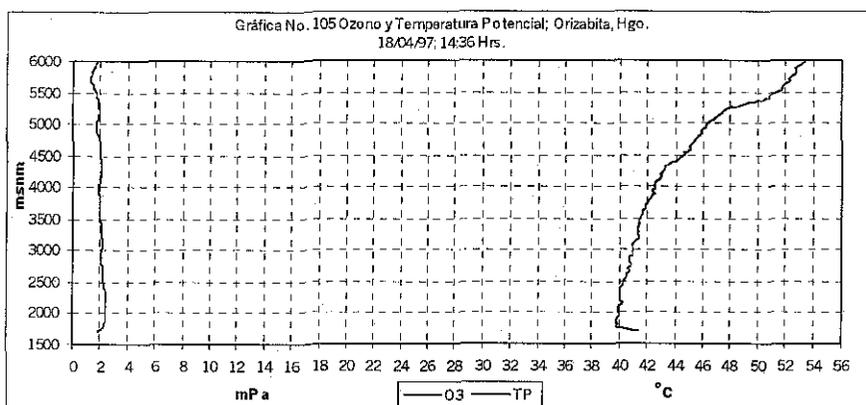
ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA





Al analizar las seis gráficas, se aprecia que la temperatura potencial (TP) esta íntimamente ligada a la distribución vertical del  $O_3$ , ya que como se puede apreciar, donde la TP presenta un rompimiento brusco en su pendiente disminución, se localizan los máximos valores de ozono, y a la inversa podemos mencionar, los máximos valores de  $O_3$  en la troposfera, nos permiten ubicar la profundidad de la capa de mezcla.

Por último en los perfiles de ozono y temperatura potencial considerados como de "referencia" del 18 de abril (gráfica 105), es posible observar que el comportamiento presentado en la Ciudad Universitaria no existe, debido básicamente a la poca presión parcial de ozono en superficie.



Como se puede observar en los gráficos descritos anteriormente, la relación entre el límite de la capa de mezclado y los máximos de ozono, es mas evidente mientras mas altas son las concentraciones de ozono en la troposfera.

Por otro lado, la relaciones entre el ozono y la humedad relativa, no son tan evidentes con altas concentraciones de este gas, mientras que para concentraciones menores, la

relación es un poco mas clara, pero es necesario recordar que el comportamiento de la humedad está dictado por la temperatura, por lo que la relación ozono humedad, está determinada en realidad por la misma temperatura.

## CONCLUSIONES.

La distribución del ozono troposférico no solamente está modificada en superficie debido a las altas concentraciones que se presentan, sino que esta alteración alcanza toda la capa de mezcla de una manera no uniforme, ya que conforme aumenta la altitud, las concentraciones de  $O_3$  se incrementan también en todos los casos. Por lo anterior, siempre existirán concentraciones mayores de ozono en los límites superiores de la capa de mezclado; este comportamiento es de suma importancia, debido básicamente a que las concentraciones en los límites de la capa de mezclado es muy superior al de la superficie, y en cualquier momento estas altas concentraciones pueden literalmente bajar y sumarse a las de superficie, ocasionando eventos que pueden poner en grave riesgo la salud de millones de personas, tanto por los índices tan altos que puede alcanzar, como por la velocidad con que pueden incrementarse.

El número de radiosondeos que se realizaron, no son suficientes para poder hablar de algún tipo de relación entre las concentraciones de superficie y las que existen a diferentes altitudes; ya que como se puede apreciar en los gráficos, la pendiente de aumento de concentración de  $O_3$  con respecto a la altitud, varía de un gráfico a otro; es necesario realizar un número mayor de lanzamientos para estudiar la existencia o no de alguna relación entre concentraciones de ozono en superficie-condiciones atmosféricas-concentraciones de ozono en el límite de la capa de mezcla.

Es necesario pensar que la temperatura, es el principal modulador de la distribución vertical del ozono en la troposfera; de los lanzamientos que se realizan cotidianamente de radiosondeos, se puede conocer de una manera rápida y confiable el perfil de la temperatura potencial, la altura de la capa de mezclado y por tanto, la altura en la que se encuentran las

mayores concentraciones de  $O_3$  troposférico; como una tarea de máxima prioridad, resultado de este trabajo, es tratar de encontrar una relación entre las condiciones atmosféricas, las concentraciones de ozono en superficie y la concentración de  $O_3$  en el límite de la capa de mezcla, de tal manera que con un radiosondeo y valores de ozono superficiales, se podrán describir las concentraciones a lo largo de la capa de mezcla.

Es también importante la colocación de medidores de  $O_3$  en las partes altas de las sierras que rodean la Cuenca de Ciudad de México, sobre todo al sur y sureste de ésta, ya que debido a la climatología propia del lugar, los vientos predominantes a lo largo del año, limpian el centro y norte de la cuenca, provocando altas concentraciones de contaminantes en el sur y sureste de la misma, y partiendo del hecho de que conforme aumenta la altitud las concentraciones de ozono son mayores, en condiciones de valores IMECA altos, los habitantes de poblaciones como el Ajusco se verán expuestos a concentraciones aún mayores que las medidas en estaciones como la de Ciudad Universitaria o Pedregal.

Del mismo modo, es necesario llevar a cabo un programa intensivo de monitoreo vertical de la atmósfera, sobre todo en cuanto a las concentraciones de ozono y precursores de éste, ya que para el desarrollo y aplicación de modelos de dispersión de contaminantes, éstos no cuentan con la información adecuada para reflejar la realidad de la atmósfera de la ZMCM, pues en el caso específico del ozono, un modelo que no tome en cuenta altas concentraciones de este gas en las partes altas de la capa de mezclado, cuando se calcule la dispersión por convección, en la realidad existirá un incremento del ozono en superficie, y el modelo reportará una disminución, ya que existe una fuente mucho más importante de ozono en la altura que la generada en la superficie, la cual se puede incorporar en cualquier momento a los primeros metros de la troposfera.

## BIBLIOGRAFÍA

Bojkov, Rumen D. & Fabian, Peter. (1988); **Ozone in the Atmosphere, "Quadrennial ozone symposium 1988 and tropospheric ozone workshop"**; A. Deepak Publishing, Virginia, U.S.A.

Bravo A., H. (1997); **El ozono y otros contaminantes fotoquímicos en la Ciudad de México, Ecología - Los retos ambientales de la Ciudad de México**; Centro de Ecología y Desarrollo (Cecodes), México, D.F.

Bravo A., H. y Torres J., R. (1985); **Ozone monitoring and night concentrations events at the campus of the University of Mexico**, for presentation at the 78th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association; Detroit, Michigan, U.S.A.

Bravo A., H. y Torres J., R. (1997); **Perspectivas científicas del problema de la contaminación atmosférica fotoquímica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Revisión Histórica, Seminario de Aire y política: acuerdos y desacuerdos en torno a la contaminación atmosférica de la Ciudad de México**, El Colegio de México.

Bravo A., H., et al. (19¿?); **Ozone and its nighttime concentration in the Southern Mexico City Metropolitan Area**; GEOFÍSICA INTERNACIONAL, No.¿? de ¿? de 19¿?, México, pp. 84-97.

Bravo A., H., et al. (1991); **Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México**; CIENCIA, No. 22 de abril de 1991, México, pp. 33-38.

Bravo A., H. (1987); **La contaminación del aire en México**; Universo Veintiuno, México, D.F.

Bravo, J.L. (1974); **Efecto de la contaminación atmosférica en la calidad de las mediciones de ozono**, noviembre de 1974, Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana; México, D.F.

Bravo, J.L. (1976); **Estudio de ozono atmosférico en la Ciudad de México**, noviembre de 1976, Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana; San Luis Potosí, S.L.P.

Bravo, J.L. (1981); **Algunos aspectos sobre las mediciones ozonométricas en la Ciudad de México**, mayo de 1981, Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana; Manzanillo, Colima.

Bravo, J.L., et al. (1992); **El comportamiento del ozono antropogénico al suroeste del Valle de México**, noviembre de 1992, Reunión Anual de Unión Geofísica Mexicana; Vallarta, Jalisco.

Bravo, J.L., et al. (1993); **El ozono en la parte sur de la Ciudad Universitaria de la UNAM**, reporte de investigación de la UAM, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, México, D.F.

Bravo, J.L., et al. (1993); **El ozono y el consumo de gasolina en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México**, Boletín de la Academia de la Investigación Científica, julio-agosto.

Bravo, J.L., et al. (1995); **Modelo de regresión para la concentración de ozono en la zona sureste del Valle de México**, mayo de 1995, Simposio Contaminación Atmosférica, Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.

Cambridge (1992); **Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment/** ed. by J.T. Houghton, B.A. Callander and S.K. Varney ; Cambridge University, U.K., Pág. 200.

Gobierno del Distrito Federal y la Secretaría del Medio Ambiente (GDFySMA) (1998); **Informe anual de la calidad del aire en el Valle de México 1997**; GDFySMA, D.F., México.

Gordon, A.H. (1965); **Elementos de Meteorología Dinámica**; UTEHA, México D.F., México.

Grant, William B. (1989); **Ozone measuring instruments for the stratosphere**; Optical Society of America, Whashington, D.C., U.S.A.

GREENPEACE (1995); **La contaminación al nivel que respiramos**, noviembre de 1995; GREENPEACE, México, D.F.

Hess, S. L. (1959); **Introduction to Theoretical Meteorology**; Holt Rinehart Winston, New York, U.S.A.

Hilton B., R. and Joyner, M. E. B. (1994); **Stratospheric Ozone Depletion/UV-B Radiation in the Biosphere**, Series 1: Global Environmental Change, Vol. 18; Springer & NATO ASI Series, Berlin, Germany.

Jauregui O., E. (1984); **The Urban Climate of Mexico City**, Urban Climatology and its Application with Special Regard ti Tropical Areas. Proceedings of the Technical Conference. W.H.O., noviembre 1984, México, D.F.

Komhyr, W.D. (1986); **NOAA Technical Memorandum ERL ARL-149: Operations Hanbook - Ozone Measurement to 40 km Altitude with 4A Electromechanical Concentration Cell (ECC) Ozonesondes (used with 1680MHz radiosondes)**; NOAA, U.S.A.

Mycock, J. C., et al. (1995); **Handbook of air pollution control engineering and technology**; Boca Raton, U.K.

Nato Advanced Workshop On Regional and Global Ozone Interaction and its Environmental Consequences (1987: Lillhammer, Noruega) (1998); **Tropospheric ozone: Regional and global scale interactions**; Dordrecht, Holland.

S.M.A. (1977); **Situación Actual de la Contaminación Atmosférica**, Memorándum Técnico, S.S.A., México, D.F., 1977.

Salby, M. L. (1996); **Fundamentals of Atmospheric Physics**; Academic Press, San Diego, California, U.S.A.

SEDUE (1986); **Informe sobre el estado del medio ambiente en México**; s/d.

Seinfeld, T.H. (1989); **Urban air pollution: State of the science**; Science, U.S.A.

Strahler, A. N. (1979); **Introduction to Physical Geography, 2 ed**; Wiley, John & Sons, U.S.A.

The World Meteorological Organization (1990); **Ozone. The WMO Achievement, 40 Years in the Service of International Meteorology and Hydrology**, Geneva 1990, No. 729; W.M.O.

Torres J., R. (1997); **Construcción y uso de trayectorias de retroceso de parcelas de aire para el estudio de la contaminación atmosférica fotoquímica en la ZMCM**; Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.

VAISALA (1988); **Ozonosonda guía del usuario**, traducido al español; VAISALA, España.

Valdés B., M. (1997); **Caracterización de los flujos radiacionales de entrada y de sus variaciones temporales en la Ciudad de México**, Tesis Doctoral, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.

Whitten, R. C. & Prasad, S. S. (1985); **Ozone in the free atmosphere**; Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A.

Zerefos, C. S. and Bais, A. F. (1997); **Solar Ultraviolet Radiation Modelling, Measurements and Effects**, Series 1: Global Environmental Change, Vol. 52; Springer & NATO ASI Series, Berlin, Germany.

### **Otras fuentes:**

<http://asd-www.larc.nasa.gov/atmchem/ASDatmchem.html>

<http://asd-www.larc.nasa.gov/atmchem/ASDozone.html>

<http://flare.creighton.edu>

<http://larcpubs.larc.nasa.gov/randt/1995/SectionA.fm55.html>

<http://mloserv.mlo.hawaii.gov/mlinfo/programs/gases/o3profil.htm>

[http://uarsfot08.gsfc.nasa.gov/HP\\_THEME/Ozone\\_Topic/Stat\\_Ozone](http://uarsfot08.gsfc.nasa.gov/HP_THEME/Ozone_Topic/Stat_Ozone)

<http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/kinetics/#o3>

<http://www.aer.com/abstracts/rc.ozone.html>

<http://www.al.noaa.gov/WWWHD/pubdocs/TropoRural.html>

<http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/atmosphere.html>

<http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/glossary.html>

<http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/intro.html#ozone>

<http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/part1.html>

\* <http://www.cem.itesm.mx/sima/ddf/contamin.html>

\* <http://www.cem.itesm.mx/sima/ddf/ddf.html>

<http://www.cfe.gob.mx>

<http://www.cis.ohio-state.edu:80/text/f...t/ozone-depletion/intro/faq-doc-12.html>

<http://www.cmdl.noaa.gov/owv/>

<http://www.dgf.uchile.cl/ozono.html>

<http://www.epa.gov/docs/ozone/defns.html#halon>

<http://www.epa.gov/docs/ozone/science/process.html>

<http://www.ivl.se/proj/o3/o3alert.html>

<http://www.math.uiowa.edu/~ddaescu/proj.html>

[http://www.pemtropics.mit.edu/~jcho/abstracts/Mitra\\_etal-1996.html](http://www.pemtropics.mit.edu/~jcho/abstracts/Mitra_etal-1996.html)

<http://www.physics.iastate.edu/gcp/chem/nitro/nitroimages/tropozn.gif>

<http://www.vaisala.com/WWW/webcom.nsf/1...553d6c6836c225663c003a83d5?OpenDocument>

<http://www2.planeta.com/mader/ecotravel/mexico/ecologia/97/1197df2.html>

<http://wxp.atms.purdue.edu>

\* **Direcciones que han desaparecido ó cambiado de lugar.**