



Resultados preliminares de la campaña de ozonosondeo en una localidad de altura (La Paz, Bolivia)

Francesco Zaratti, Marcos Andrade y Ricardo Forno

Laboratorio de Ozono y RUV, Instituto de Investigaciones Físicas
Universidad Mayor de San Andrés. La Paz. Bolivia

ABSTRACT

Se analizan los datos de once lanzamientos de sondas de ozono realizados en la región de La Paz (3400 m snm) en el mes de Junio de 1998. Se estudia el comportamiento de variables como la temperatura, la altura de la tropopausa, el contenido troposférico de ozono, la distribución estratosférica del ozono y el valor integral del mismo. Se comparan los resultados obtenidos en esa campaña con los datos de un trabajo similar realizado en 1963 en la misma localidad con el fin de poner en evidencia eventuales modificaciones en la atmósfera local. Se discute también un posible origen de la disminución del ozono total sobre las tierras altas tropicales.

INTRODUCCION

La ciudad de La Paz se halla ubicada a 16.5°S de latitud y 68.1°W de longitud, rodeada por la cordillera oriental de los Andes (con cumbres superiores a 6000 m snm) hacia el Este y por el Altiplano, con una altura media de 3800 m snm, en las otras direcciones. Esta particular situación geográfica, sumada a su singular orografía (la ciudad se extiende desde 4100 hasta 3200 m snm) es un primer motivo de interés para estudiar los parámetros principales de la baja atmósfera.

El año 1963, en el entonces Laboratorio de Rayos Cósmicos de Chacaltaya, se realizó una serie de lanzamientos de globo-sondas con el fin de obtener el perfil del ozono en la baja atmósfera de la región de La Paz, cuyos resultados gráficos están reportados en [1], de modo que se planificó una campaña similar para 1998 con el fin de comparar datos y detectar eventuales variaciones en contenido y distribución del ozono, en un período de tiempo caracterizado por el incremento de CFC's en la atmósfera y un adelgazamiento global de la capa de ozono.

Un ulterior motivo de interés para realizar el ozonosondeo está ligado al fenómeno del "min agujero" de ozono sobre el altiplano [2], o sea una sistemática disminución del ozono total sobre las tierras altas andinas. Los datos obtenidos permiten evaluar algunas posibles explicaciones del fenómeno, relacionadas con la altura de la tropopausa, a partir de una comparación de datos con campañas similares realizadas en la ciudad de Natal, Brasil (6°S, 35°W).

INSTRUMENTOS Y ANALISIS DE DATOS

Por las razones mencionadas, el Instituto de Pesquisas Espaciais del Brasil y el Laboratorio de Ozono y RUV de la UMSA realizaron, entre el 6 y el 17 de junio de 1998, un total de 11 lanzamientos de globo-sondas, con el fin de medir el perfil de ozono, temperatura, humedad y presión entre la superficie (3400 m snm) y la estratosfera (máximo 34 km). De los 11 lanzamientos, 10 resultaron exitosos. Consecuentemente el análisis del presente artículo está basado en los datos de esos lanzamientos.

Hay que remarcar que el período elegido para el ozonosondeo corresponde aproximadamente al solsticio de invierno y, por ende, al mínimo de ozono en la estratosfera en la región.

Los equipos utilizados durante la campaña de La Paz en 1998 y las mediciones en Natal fueron los siguientes:

- Sistema de radiosondeo VIZ modelo W9000
- Sondos meteorológicas Mark II (VIZ) para Presión, Temperatura y Humedad Relativa.
- Sondos de ozono EN-SCI Corporation modelo Z ECC-O₃
- Ozonizador EN-SCI Corporation modelo KTU-2

Por otro lado, los datos de La Paz del año 1963 se obtuvieron empleando equipos de químico-luminiscencia del tipo T-8 (Regener)

En cada lanzamiento se ha medido las siguientes magnitudes: presión, humedad relativa, temperatura y altitud, medidas por la sonda meteorológica, y la correspondiente presión parcial de ozono, medida por la sonda de ozono. Se recolectaban datos sólo durante el ascenso de las sondas a una velocidad de unos 200 m/minuto, con datos transmitidos cada 20 s aproximadamente.

El análisis de los datos permite, a partir de curvas como la Fig. 1, analizar el comportamiento de las magnitudes mencionadas. Para fines estadísticos y de intercomparación, se ha reducido los datos a valores promedio cada 0.5 km. Sucesivamente se ha realizado promedios de los diez lanzamientos para soslayar particularidades diarias de cada serie temporal y así relacionar diferentes magnitudes.

Finalmente se disponía de los datos diarios del espectrofotómetro Brewer 110 ubicado en el Laboratorio y los datos

diarios del instrumento satelital TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) de la NASA, disponibles vía Internet.

PRINCIPALES RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos del análisis de los datos son los siguientes:

3.1 Perfil de la Humedad Relativa (RH) con la altura: los datos muestran una gran dispersión del comportamiento de la RH versus la altura, en correspondencia a las diferentes condiciones meteorológicas del día e inclusive de la hora del lanzamiento. Sin embargo si separamos la curva troposférica de la estratosférica, vemos que esta última tiene un comportamiento más regular, casi la misma forma funcional (**Fig. 2**) ya que resiente menos de la variabilidad meteorológica de la troposfera. Una característica, posiblemente estacional, de la humedad, es su elevado gradiente entre 6 y 7 km de altura.

3.2 Variación de la temperatura con la presión. En este caso el comportamiento es normal, conforme al modelo estándar, **Fig. 3**. La temperatura baja casi uniformemente hasta la tropopausa para volver a incrementarse en la estratosfera. El "lapse rate", definido como "menos el gradiente de la temperatura con la altura)" [**3**]: $\Gamma = -dT/dh$, tiene, hasta alturas de 16 km, valores constantes más elevados (7.2 °K/km) que la atmósfera estándar, debido a que la ascensión del globo empieza en altura, **Fig. 4**.

Una característica curiosa de los perfiles de temperatura de 4 de los 11 días es la inversión de temperatura entorno a los 6500 m de altura, **Fig. 1**, con un salto de hasta 3°C en 500 metros, en correspondencia al gradiente de humedad mencionado. A nuestro criterio este hecho se debe a las capas situadas sobre las cumbres andinas, que se mantienen más calientes del ambiente a esa altura. En los días en que no se presenta ese fenómeno, las sondas posiblemente no llegaron a cruzar la cordillera cerca de una cumbre. Lamentablemente el sistema de rastreo no permitía determinar la dirección de la sonda.

3.3 Tropopausa: un estudio estadístico de la tropopausa (**Tabla I**) permite ubicarla alrededor de 17.5 km, lo que es ligeramente más alto de lo previsto por los modelos [**3**] y por las medidas efectuadas a latitudes cercanas [**4**]. Este resultado es importante a los fines de evaluar la hipótesis del *efecto GHOST* [**2,5**] (*Global Hidden Ozone Structures from Toms*) de una elevación de la tropopausa sobre las tierras altas, como explicación de la disminución del ozono estratosférico sobre esas regiones. El criterio utilizado para definir la tropopausa es el cambio abrupto del *lapse rate*, hasta valores inferiores a 2 °K/km en un estrato de 2 km, siguiendo la definición de la WMO. Hay que señalar que la transición de la troposfera a la estratosfera no sigue un patrón constante: en algunos días se nota un cambio repentino en el *lapse rate* mientras en otros aparece toda una franja en que la temperatura se mantiene uniforme. De todos modos el ancho de la tropopausa nunca supera los 2 km. En cuanto a la temperatura mínima que se alcanza en la troposfera, se tienen puntas inferiores a -80°C, aunque el promedio de los lanzamientos es -75.5°C.

3.4 Ozono en Troposfera: La **Fig. 5** muestra el perfil promedio, con el respectivo error, del ozono sobre La Paz. Con los datos de los lanzamientos y la ubicación de la tropopausa es posible calcular la cantidad de ozono contenido en la troposfera. Para ese fin se utiliza la relación [**6**]:

$$O_3(a,b)_{DU} = 0.790 p_{nb}(O_3) \log[p(a)_{mb}/p(b)_{mb}]$$

Que da la concentración de ozono entre las alturas **a** y **b** en unidades Dobson (DU), en función de la presión parcial de ozono (en nanobares) y la presión atmosférica en milibares de los extremos **a,b** del intervalo. La **Tabla I** muestra que el contenido promedio de los 10 lanzamientos es 19.5 DU, con una dispersión del 10%. Este resultado es muy importante ya que confirma la poca incidencia que tiene la troposfera en el contenido total de ozono, en particular por lo que se refiere al "miniagujero" de ozono [**1**]. La **Tabla I** muestra también los valores extremos de la presión parcial de ozono en la tropopausa: el máximo se alcanza a 4 km con valores del orden de 25 nbars, similares a los valores que se miden en superficie, mientras el mínimo llega a 7 nbars a 15 km de altura.

3.5 Ozono en Estratosfera: Se ha analizado el valor máximo, en nanobares, que alcanza el ozono, la altura que corresponde a ese máximo y la temperatura correspondiente, **Tabla II**. No ha sido posible estimar estadísticamente el ancho de la "capa" de ozono en cuanto la mayoría de los lanzamientos no alcanzaron una altura suficiente para ese análisis. Sin embargo la sucesiva comparación con datos de ozonosondeo en Natal muestran indirectamente que la capa de ozono sobre La Paz no se extiende excesivamente en altura. En cuanto al máximo de ozono se ha obtenido el valor elevado de 170 nbars, con una desviación estándar de 10 nbars, que corresponde a un 6% de dispersión. En cuanto a la altura del máximo de ozono, se halla el valor de 27.5 km (o 18 mbars de presión), lo que es un tanto elevado respecto al valor esperado de 25 km [**6**] para esas latitudes. A su vez, la temperatura del máximo de ozono es (-47.3 ± 1.3)°C, bastante estable. Se ha calculado el contenido total de ozono por debajo del máximo, pero no se ha hallado ninguna relación significativa al respecto, lo que hace presumir que la distribución del ozono en la estratosfera no sigue un patrón único en cuanto a ancho de la curva.

3.6 Ozono total: Se ha calculado el ozono total utilizando los valores locales medidos por las sondas y un programa de integración incorporado al software de las sondas. Finalmente se ha comparado el resultado con las medidas instantáneas realizadas por el espectrofotómetro Brewer a la misma hora del lanzamiento y eventualmente con los datos del instrumento TOMS. La columna de ozono calculada muestra una gran variabilidad, que no encuentra correspondencia con los valores del Brewer, instrumento que tiene un óptimo acuerdo con el satélite (**Fig. 6**). Con referencia a la **Tabla II**, se tiene un promedio de 258±16 DU, cercano a los valores del Brewer y del TOMS. Creemos que la diferencia se debe básicamente a la imprecisión del algoritmo de extrapolación utilizado y a la acumulación de errores en el sondeo. Sin embargo, aún el contenido de ozono integrado hasta la altura a que llegó la sonda muestra una dispersión similar, con puntas superiores al promedio del ozono total, como se aprecia en la misma tabla..

COMPARACION CON LOS DATOS DE 1963

En septiembre de 1963 se realizó una campaña de lanzamientos de globos para medir el perfil de ozono sobre esta región de Bolivia. Los lanzamientos fueron hechos desde el mismo lugar donde se llevó a cabo la presente campaña.

Debido a la diferencia entre los equipos usados entre una y otra campaña, de la dificultad de acceder a los datos para que estos puedan ser utilizados correctamente (sólo se tiene una Memoria Técnica con gráficas de cada lanzamiento, **Fig. 7**), y de la falta de mayor información respecto al trabajo realizado hace 25 años, es difícil comparar ambos trabajos. Sin embargo es posible indicar lo siguiente: la altura donde la concentración de ozono es máxima para septiembre del '63 es 19 mb aproximadamente, unos 27 km, similar a la hallada durante la campaña del '98 (Tabla I). En lo referente al valor de la concentración máxima del ozono, se tienen valores pequeños (menores a 140 nbars) comparados con los obtenidos actualmente (170 nbars). En todo caso la relación de mezcla en correspondencia al máximo para esa época (10 mg/g) también es inferior a los 14 mg/g actuales. Estos resultados son sorprendentes si tomamos en cuenta que los lanzamientos realizados durante 1963 fueron hechos en septiembre, mes donde se espera tener el máximo de ozono total. Otro dato rescatable fue la altura donde se tiene el mínimo de ozono: hace 25 años este valor estaba alrededor de 120 mb, unos 15 km, que corresponde a los valores actuales.

COMPARACION CON LOS DATOS DE NATAL

Se disponía de datos de ozonosondeo realizado en la estación de Natal, Brasil (6°S,35°W, nivel del mar) para diferentes meses del año. La comparación con los datos de La Paz podía ser importante por varias razones: la cercanía latitudinal de las dos localidades, la diferencia de altura, la separación longitudinal y la diferente posición geográfica. Para contener lo más posible alteraciones estacionales, se ha escogido 6 lanzamientos entre mayo y julio de 1997, los más cercanos a la condiciones solares de la campaña realizada en la Paz. Los resultados están resumidos en las Tablas I y II. A continuación se comenta brevemente las similitudes y diferencias halladas para cada magnitud analizada en el párrafo 3.

5.1 Perfil de la Humedad Relativa (RH) con la altura:

La **Fig. 8** muestra valores más bajos y un comportamiento más regular de la Humedad Relativa a partir de 10 km de altura en Natal que en La Paz.

5.2 Variación de la temperatura con la presión. como se vio, las curvas son muy similares en las dos localidades, **Fig. 4**, pero no se detecta el efecto de inversión a 6500 m, lo que avala indirectamente la explicación dada líneas arriba. Además el *lapse rate* sobre Natal es 6.7 °K/km, el valor estándar de los modelos.

5.3 Tropopausa: la altura de la tropopausa en Natal, en esa época del año, es similar a La Paz (17.0 km), pero un poco más alta que el nivel medio del año. Posiblemente se confirme así una correlación entre la altura de la tropopausa y el contenido total de ozono, ya que, a esa misma época, corresponde el más bajo contenido de ozono del año. A su vez la temperatura mínima en la tropopausa es sistemáticamente inferior a la registrada en La Paz, debido a la mayor cercanía de Natal al ecuador.

5.4 Ozono en Troposfera: La concentración de ozono troposférico es sensiblemente mayor en Natal que en La Paz, aún compensando la masa atmosférica faltante, **Fig. 9**. Este resultado es intrigante ya que Natal, por el régimen de vientos, no debería tener niveles de ozono troposférico mayores que La Paz, que sí podría estar afectada por la producción amazónica y la contaminación urbana. Adicionalmente se confirma una vez más que el ozono contenido en los primeros 4 km no pasa de los 8 DU, lo que no explica las diferencia observadas en el contenido total de ozono entre el océano y el Altiplano [2]. De todos modos la máxima concentración de ozono en la troposfera se halla entre 4 y 4.5 km y oscila entorno a los 30 nb o 18 ppbv en ambas localidades.

5.5 Ozono total: Una mirada a la **Fig. 9** muestra un comportamiento similar entre La Paz y Natal en cuanto a altura del máximo (27 km). Sin embargo, comparando valores máximos y valores totales del ozono en ambas localidades a partir de las Tablas I y II, se deduce que la capa de ozono tiene que ser mucho más ancha en Natal que en La Paz, o sea que la actividad fotoquímica en Natal empieza a alturas mayores que en La Paz, debido posiblemente a su cercanía al ecuador. La columna de ozono en Natal, en Junio, medida por el satélite y por instrumentos en superficie, resulta mayor que en La Paz, a pesar de su mayor cercanía al ecuador y de los perfiles de la **Fig. 9**.

CONCLUSIONES

De lo expuesto es posible llegar a algunas conclusiones preliminares:

- Parece confirmarse la hipótesis según la cual la tropopausa es más alta en correspondencia al menor contenido de ozono, debido a que hay un límite superior a la formación de ozono por actividad fotoquímica (densidad de oxígeno).
- Se han puesto en evidencia algunas características propias de la estratosfera de La Paz: pico más alto de ozono pero ancho más estrecho de la capa, aunque no queda totalmente claro porque Natal tiene más ozono que La Paz (unos 15 DU, según el TOMS y los Brewer)
- Se confirma el bajo contenido de ozono en la troposfera, a pesar de la elevación de la tropopausa
- No se ha detectado mayores variaciones en los parámetros generales de la atmósfera baja de La Paz en 35 años, dentro de las limitaciones mencionadas de la comparación de datos en las dos campañas.

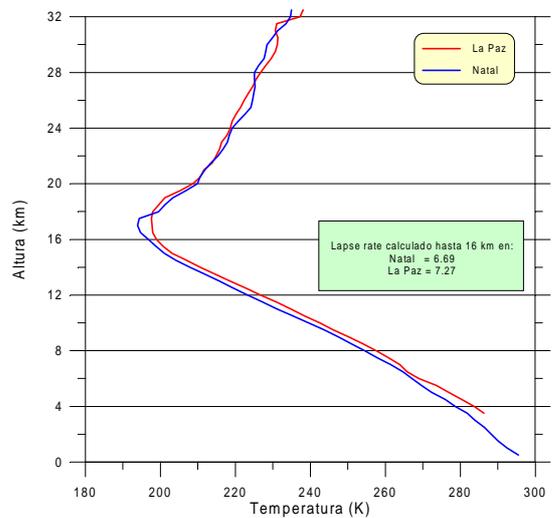
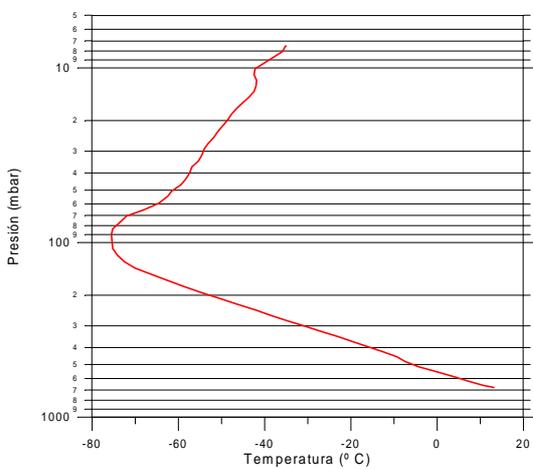
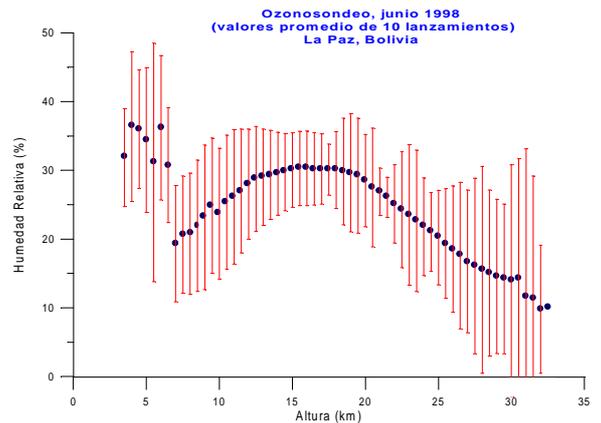
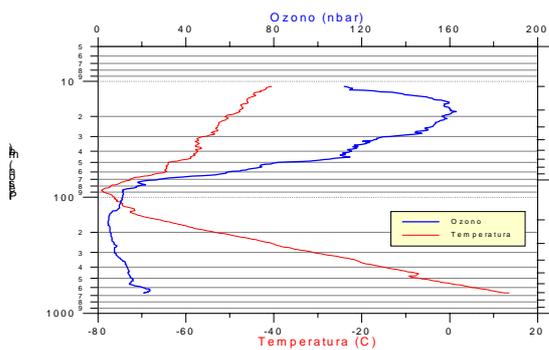
De todos modos parece importante y necesario realizar sistemáticas campañas de ozonosondeo para verificar las hipótesis planteadas en este y otros trabajos.

REFERENCES

- [1] Schulszewsky, R.H. and Sheriph, F.: *Radiosondeo*, in Resumen de Labores No. 26 del Laboratorio de Chacaltaya, Universidad Mayor de San Andrés, Edited by R. Vidaurre (1964)
- [2] Zaratti, F., Andrade M., Forno R. and Palenque E. R.: *Longitudinal and latitudinal variations of the total ozone over the Central Andes*, Nuovo Cimento C (accepted, in press), 1999.
- [3] Salby M.L., *Fundamentals of Atmospheric Physics*, Academic Press (1996).
- [4] Kirchhoff, V.W.J.H., Nakamura, Y., Marinho, E.V.A. and Mariano, M.M., *Excess ozone production in Amazonia from large scale burning*, J. Atm. Terr. Phys. Vol. 54, No. 5 (1992) 583-588.
- [5] Cuevas E., Gil M., Mc Peters, R and Rodriguez, J., *The GHOST Effect and Possible Connections with Dynamical and Radiative Processes*. Private Communication (1996)
- [6] Anderson G.P. and Muench H.S., *Atmospheric Ozone, Below 50 km*, in Hand Book of Atmospheric Physics, Chapter 21, Section 21.1
- [7] Klenk, K.F., Barthia P.K. Hilsenrath E. and Fleigh A.J., *Standard Ozone Profile from Balloon and Satellite Data Sets*, J. Climate Appl. Meteorol., 22:2012-2022, 1983

AGRADECIMIENTOS

Tanto la campaña de ozonsondeo, como el trabajo de análisis no hubiesen sido posibles sin la colaboración del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) del Brasil en la persona del Dr. V. Kirchhoff, a quien va nuestro agradecimiento. Agradecemos también a la Confederación Latinoamericana de Física (CLAF) el aporte económico para el éxito de la campaña y a la Cuenta Ambiental Iniciativa para las Américas (EIA) del Fondo Nacional para el Medio Ambiente (FONAMA), por financiar los proyectos que lleva a cabo el Laboratorio de Ozono y RUV. A los colegas técnicos del INPE, Marcelo Araujo y Luis Mangueira, quienes tuvieron a su cargo los lanzamientos de los globos, va nuestro mayor reconocimiento.



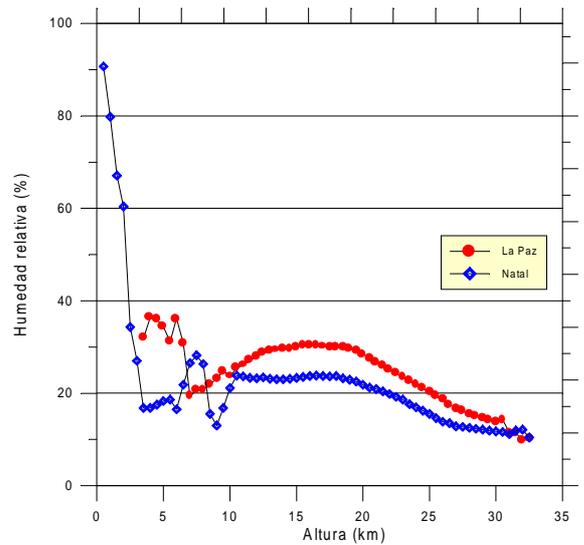
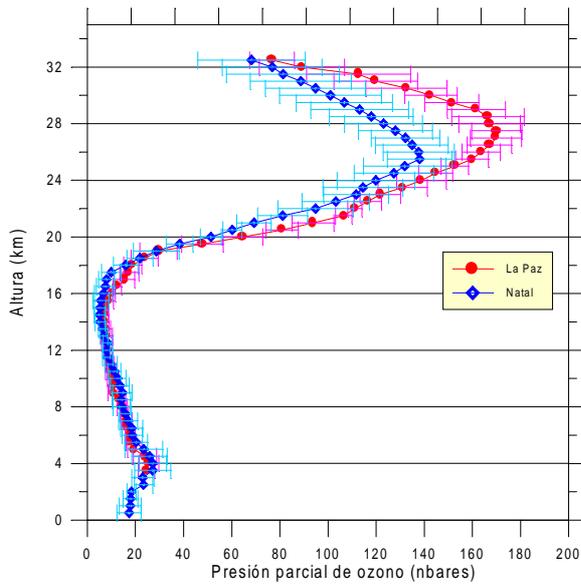
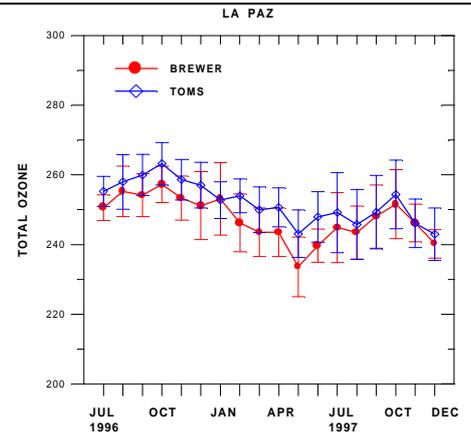
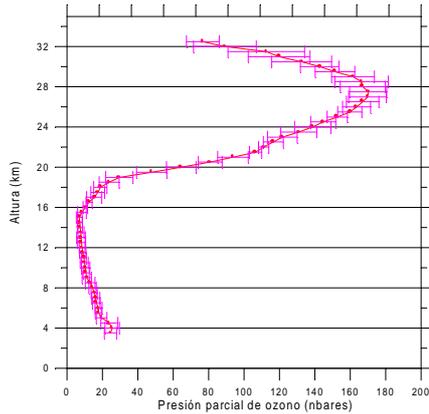


TABLA I

VALORES MEDIOS PARA TROPOSFERA	La Paz	Natal	La Paz
<i>Magnitud medida</i>	16.5°S, 68.1°W	6°S, 35°W	1963
H de máximo O3 en troposfera (km)	4.0 ± 0.5	4.0±0.5	s.d.
H de mínimo O3 en Troposfera (km)	15.0 ± 0.5	14.5 ± 0.5	15
H de Tropopausa (km)	17.5 ± 0.5	17.5±0.5	s.d.
Máximo O3 en Troposfera (nbars)	25.6 ± 4.1	27.1 ± 5.8	s.d.
Mínimo O3 en Troposfera (nbars)	6.9 ± 1.6	5.3 ± 2.2	s.d.
Temperatura mínima en troposfera (°C)	-75.5 ± 5.1	-79.3 ± 4.2	s.d.
Lapse rate en troposfera (hasta 16 km) en °C/km	7.2	6.7	s.d.
Ozono integrado hasta la Tropopausa (DU)	19.8 ± 2.0	25.0 ± 5.0	s.d.

TABLA II

VALORES PARA LA ESTRATOSFERA	La Paz	Natal	La Paz
<i>Magnitud medida</i>	16.5°S, 68.1°W	6°S, 35°W	1963
H de max Ozono en Estratosfera (KM)	27.0 ± 1.0	26 ± 0.5	27
Máximo O3 en Estratosfera (nbars)	170.2 ± 10.4	138.1± 9.0	140
Temperatura del máximo de ozono (°C)	-47.6 ± 2.1	-49.0 ± 2.9	s.d.
Ozono integrado a 32.5 km (DU)	234.0 ± 20.0	196.8 ± 20.0	s.d.
Ozono calculado por extrapolación (DU)	258.0 ± 16.3	s.d.	s.d.
Ozono medido por Brewer (110 y 073)	241 ± 6	263.0 ± 8.4	s.d.
Ozono medido por TOMS (DU)	241	267	s.d.
Presión atm. al máximo O3 (mbares)	18.4 ± 0.15	23.5 ± 0.32	18