

## SEIS AÑOS DE MEDIDAS DE OZONO Y RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN LA PAZ, BOLIVIA

Francesco Zaratti<sup>1</sup>, Ricardo Forno<sup>1</sup>, Lucy Cuarita<sup>2</sup> y Pablo Saavedra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Física de la Atmósfera  
Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
<sup>2</sup>Carrera de Estadística  
Facultad de Ciencias Puras y Naturales  
Universidad Mayor de San Andrés

### RESUMEN

En este artículo se analizan los datos de la columna de ozono, tomados por el Brewer 110 en operación en el Laboratorio de Física de la Atmósfera en La Paz, Bolivia, durante seis años y se los compara con las medidas equivalentes del instrumento TOMS, a bordo del satélite Earth Probe, en el mismo periodo. Asimismo se hace una caracterización de la radiación ultravioleta en la ciudad de La Paz, determinando valores típicos mensuales del índice de la radiación ultravioleta.

#### 1. INTRODUCCION

El espectrofotómetro Brewer MKIV [1], No. 110, funciona en La Paz, gracias a un Convenio con el INPE-Brasil, desde julio de 1996 ininterrumpidamente. Seis años son un período suficiente, si no para analizar tendencias, por lo menos para caracterizar la columna de ozono y la intensidad de la radiación ultravioleta en la ciudad de La Paz. La importancia de esos análisis radica en la peculiar posición geográfica de La Paz, en el trópico y a gran altitud (16.5°S, 68.1°W, 3600m.s.n.m.), y en la incidencia que tiene la radiación ultravioleta en la salud y en la economía de los habitantes de Bolivia. Adicionalmente, se dispone de los datos tomados por el espectrofotómetro TOMS, a bordo del satélite Earth Probe [2], que, en el caso analizado del ozono, merecen ser comparados con los datos de superficie, con el fin de controlar la calibración de ese instrumento desde una localidad peculiar por sus condiciones ambientales.

Los objetivos propuestos han implicado una serie de tareas que se enumeran a continuación:

1. Recolección, ordenamiento, depuración y validación de los datos de ozono de ambos instrumentos;
2. Recálculo de los datos de UVB del Brewer, con base a las dos calibraciones de fábrica de los años 1997 y 2001;
3. Análisis estadístico de los datos de ozono y comparación entre datos de superficie y del satélite;
4. Análisis estadístico de los datos de UVB eritémica del Brewer;

A continuación analizaremos los resultados obtenidos en cada actividad.

#### 2. VALIDACION Y ANÁLISIS DE DATOS DE OZONO

Inicialmente, los 2192 datos posibles se redujeron, previa depuración de días incompletos o en los cuales los instrumentos no operaron, a 2112 datos útiles para el Brewer y 1762 para el EPTOMS.

Después de la depuración de los promedios diarios de ozono a lo largo de seis años (julio 1996 a junio 2002), se ha detectado un problema con los datos del año 2000 y 2001. En el período enero 2000 a agosto 2001, los valores de  $O_3$  del Brewer se apartan sensiblemente de sus equivalentes del EPTOMS. De hecho, durante la recalibración del Brewer, en agosto de 2001, se constató que el reloj del instrumento estaba desfasado más de 3 minutos con respecto a la hora solar, lo que inducía un error en las medidas. El error no era sistemático ni aleatorio, y dependía del ángulo cenital (SZA) en el momento de la medida: para grandes SZA la diferencia era más marcada debido a la mayor rapidez del movimiento del Sol. La alternativa era: echar a perder los datos de casi dos años o bien recuperar esos datos con criterios de validación. Escogimos el segundo camino, imponiendo a los datos diarios de  $O_3$  tomados por el Brewer los siguientes criterios:

- I. Error en la serie de la medición  $\leq 2.5DU$ , que equivale a un 1% del promedio de  $O_3$ .
- II. Número mínimo de medidas diarias = 3.
- III. *Air mass*,  $m \leq 2$ , lo que equivale a  $SZA < 60^\circ$ , debido a la definición de  $m = 1/\cos(SZA)$ .
- IV. Intervalo de medición: toda la serie. O sea que el criterio de validación se aplicó por igual a todos los datos, lo que representa un test adicional de la bondad de los criterios.

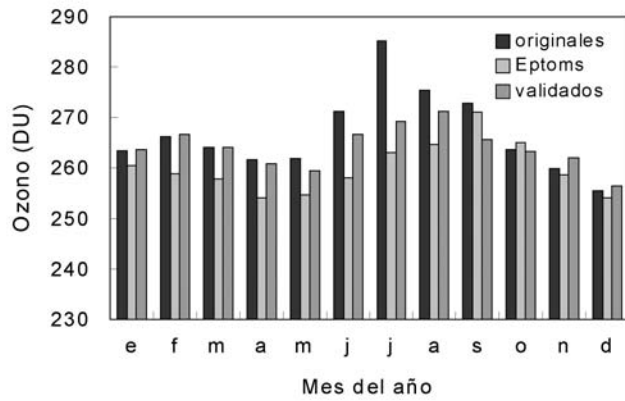


Figura 1. Columna de ozono en La Paz para el año 2000.

V. Rango aceptable de los valores de ozono (220, 290), con base a los valores medios mensuales de esa magnitud en los años anteriores.

En el caso que las medidas de un día cumplieran todos esos criterios, se calculaba y aceptaba el promedio del día, caso contrario se realizaba una media móvil de los 5 datos válidos anteriores.

Asimismo se establecieron criterios de depuración de los datos del EPTOMS debido a la necesidad de mantener la medida dentro de una rejilla centrada en torno a La Paz, considerando la proximidad de la cordillera y de los valles andinos. En vista de que el TOMS mide el ozono sobre una región de 1° de latitud por 1.25° de longitud, se impuso la restricción que el centro de esa celda estuviera entre 15.5° y 17° de latitud y entre 67.5° y 68.6° de longitud.

Finalmente, vista la variabilidad diaria de los valores del TOMS y del Brewer, se eligió trabajar con los promedios mensuales, obteniéndose, como resultado, primeramente una mejora de los valores del año 2000 (Figura 1), luego la validación de la serie total de los seis años (Figura 2). Las mejoras son evidentes a lo largo de toda la serie.

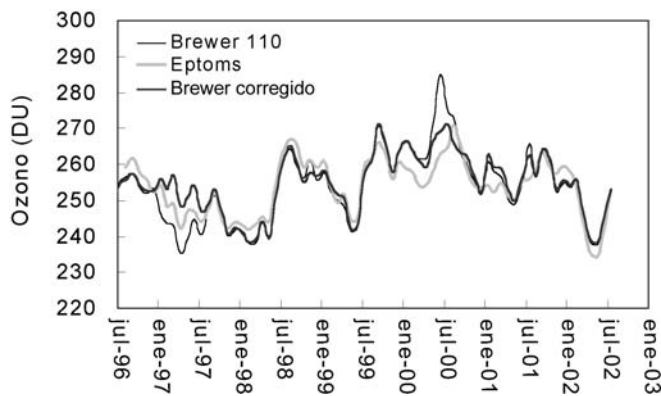


Figura 2. Serie temporal de ozono en La Paz, 1996-2002.

De ese modo, la comparación entre Brewer y TOMS, conduce a un acuerdo bastante bueno entre los dos

TABLA 1

Valores característicos del ozono en La Paz (en DU).

	Brewer	TOMS
promedio	254.9	254.0
STD	8.3	7.8
máximo	271.4	271.0
mínimo	238.4	235.7
máx. diferencia	8.5	

instrumentos, ya que los respectivos valores caen dentro del error estadístico de cada dato mensual.

Además, se comprobó indirectamente la bondad del criterio de restringir el SZA, en cuanto en los meses de menor SZA (verano) las correcciones al dato original resultan menores que en los meses invernales.

Un resumen de los resultados que caracterizan el ozono en La Paz, está consignado en la Tabla 1.

Finalmente en la Figura 3 se reporta las medias mensuales de ozono sobre los 6 años, con la respectiva dispersión. Es interesante observar que el mes de mayor dispersión es junio, debido al incremento de ozono del año 2000, en el Brewer y en el TOMS. La razón de ese incremento puede estar en la combinación de dos factores: la mayor actividad solar de ese año y el aporte de la Quasi-Biennial Oscillation (QBO), con período entre 2 y 3 años, reconocible en la Figura 2.

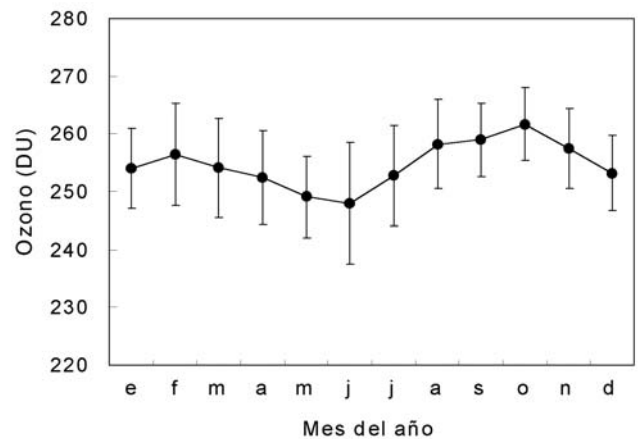


Figura 3. Promedio mensual de ozono en La Paz (6 años).

### 3. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS DE UVB ERITÉMICA

Los datos de seis años de la UVB eritémica tomados por el espectrofotómetro Brewer MKIV han sido re-procesados con base a las dos calibraciones de fábrica, realizadas respectivamente los años 1997 y 2001. Se ha aplicado una regresión lineal a los factores espectrales de calibración, en el supuesto razonable que el desgaste de las lámparas de calibración sea proporcional al tiem-

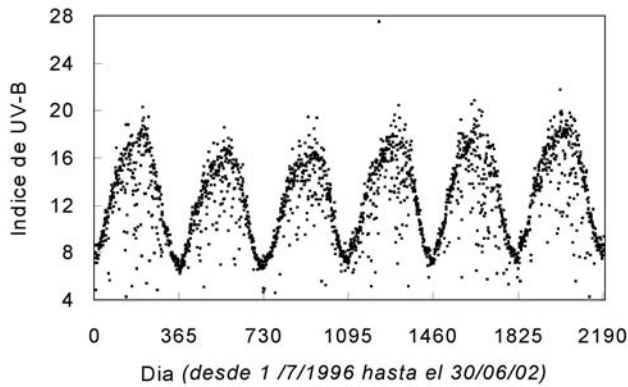


Figura 4. Serie temporal de máximos diarios de UVB eritémica en La Paz (1996-2002).

po de uso. De ese modo se ha generado un archivo de calibración por cada año, mediante el cual se han re-procesado los datos correspondientes de ese año.

De ese modo se obtiene la serie temporal de los máximos diarios de UVB que se muestra en la Figura 4. En esa gráfica son fácilmente distinguibles las altas fluctuaciones de la intensidad de la RUV eritémica en verano y su regularidad en invierno, ambos comportamientos debidos a la particular climatología local. Además se aprecian variaciones anuales, dependientes de factores climáticos y astronómicos (actividad solar, principalmente).

Se destacan algunos días con excepcional intensidad de RUV, días no precisamente soleados, sino que resienten de los efectos de la intensificación de la UVB que producen las nubes por dispersión y reflexión.

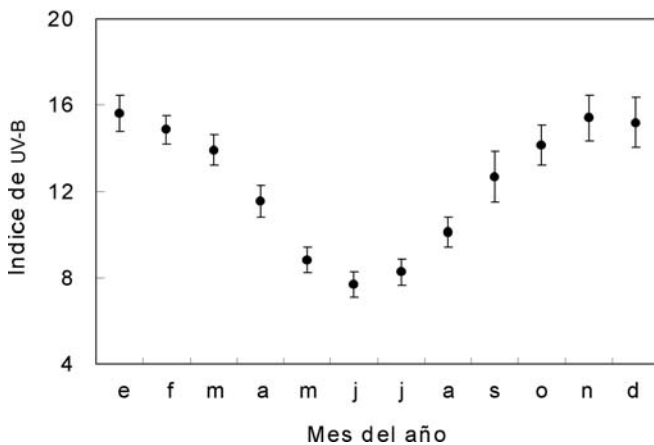


Figura 5. Promedios mensuales del IUV en La Paz (6 años).

Con la serie depurada de los máximos diarios es posible construir la serie de los promedios mensuales, la misma que resiente de la variabilidad climática de año a año. En efecto, el mes de máxima irradiancia oscila entre octubre y enero. Al contrario la irradiancia invernal parece bastante más regular, con mínimos en junio. En todo caso se confirma que los mínimos invernales del Índice de UVB (IUV) corresponden a valores elevados de ese indi-

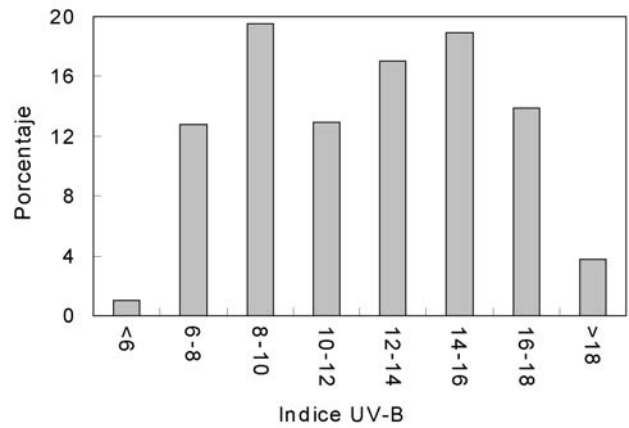


Figura 6. Distribución días del año según IUV (6 años).

cador en países de latitudes medias. En la Figura 5 se presenta el promedio mensual del IUV con su desviación estándar. Se aprecia que los meses de máxima variabilidad del índice son de septiembre a diciembre.

Finalmente se ha construido un cuadro con los porcentajes de días del año que muestran un cierto valor del IUV (Figura 6). Si se considera que 10 es un valor muy elevado, según la escala internacional que va del 1 al 16, vemos que 2/3 de los días del año tienen valores superiores a ese límite. Asimismo casi el 18% de los días del año muestran un IUV superior al máximo de la escala internacional.

Otros análisis de los datos han permitido confirmar conceptos ya conocidos como que la dosis de UVB eritémica que se recibe en las tres horas centrales en torno al medio día representa el 50% de la dosis total del día, hecho que da fundamento a las recomendaciones de evitar de exponerse al sol en ese horario. Asimismo, se ha comprobado que la dosis recibida entre las 10 y las 15 horas (intervalo de tiempo considerado en épocas de alerta) alcanza al 80% de la dosis diaria [3].

Para terminar este análisis de la serie temporal de los máximos diarios, resumimos las características de la RUV eritémica medida en La Paz (Tabla 2).

TABLA 2

Valores característicos de la RUV en La Paz.

Promedio IUV	12.3
STD IUV	3.5
Promedio $mW/m^2$	308.2
STD $mW/m^2$	88.6

#### 4. AGRADECIMIENTOS

El Brewer 110, fuente de los datos analizados en este artículo, es de propiedad del INPE-BRASIL, institución a la cual va nuestro agradecimiento en la persona del Dr. V. Kirchhoff, Director del Laboratorio de Ozono.

## REFERENCIAS

- [1] Brewer, A.W., *A replacement for the Dobson spectrophotometer?*, Pure Appl. Geophys., 106—108: 919—927, 1973.
- [2] <http://jwocky.gsfc.nasa.gov>.
- [3] Zaratti F. y Forno R., *“La Radiación Ultravioleta en Bolivia”*, Edic. OPS/OMS, La Paz, 2003.