

# MEDICIÓN DEL ESPECTRO DE RADIACIÓN UV DE EFECTIVIDAD BIOLÓGICA EN LA CIUDAD DE SAN LUIS,

**LAT: 33.263° S LONG: 66.35° O, 730 msnm.**

## MEASUREMENTS OF BIOLOGICAL SOLAR IRRADIANCE OVER SAN LUIS LAT: 33.263° S LONG: 66.35° O, 730 msl.

**P. A. Morales Zimmermann, E. Crinó, D. L. Valladares\***

Departamento de Física - Universidad Nacional De San Luis -  
Chacabuco 917 - (5700) -San Luis - Argentina  
*e-mail: dvalla@unsl.edu.ar*

Entre Diciembre de 2003 y Enero de 2005 se realizaron en la ciudad de San Luis mediciones de irradiancia eritémica. Los datos se obtuvieron utilizando un espectralradiómetro de banda ancha Biómetro RB modelo 501-A y fueron comparados con los que surgieron a partir de la resolución de la ecuación de transferencia radiativa con un modelo de atmósfera plana no-refractiva. También se los cotejó con los valores de irradiancia eritémica suministrados por el Goddard Space Flight Center para las coordenadas geográficas correspondientes a San Luis y obtenidos a partir de la medición de la radiación UV solar retrodispersada por el sistema Atmósfera-Tierra con el espectralradiómetro TOMS a bordo del satélite Earth Probe/NASA.

In this work we inform the measurements of the erythemal irradiance realized in the city of San Luis Latitude 33.263°S and longitude 66.35°W (Argentina) between December 2003 and January of 2005. The data were obtained using a broadband spectroradiometer Biometer RB model 501-A and its were compared with the results of the resolution of the radiative transfer equation with a not-refracting flat atmosphere model. Also we compared the measurements with the values of erythemal irradiance obtained from the measurement of solar radiation UV backscattered by the Atmosphere-Earth system with spectroradiometer TOMS on board of the satellite Earth Probe/NASA, provided by the Goddard Space Flight Center for the geographical coordinates corresponding to San Luis.

### I. INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta (UV) comprende solo una pequeña parte del espectro solar. A pesar de esto, puede producir importantes cambios en muchas funciones biológicas debido a la alta energía que poseen sus fotones. Estos cambios se pueden manifestar como severos daños en los organismos vivos, como por ejemplo fallas en la replicación del ADN, lesiones en la piel (eritema solar), retardo del crecimiento de vegetales, etc. La medición del efecto biológico de la radiación UV ha cobrado un creciente interés en la comunidad científica en la última década debido principalmente a la problemática asociada con la aparición del agujero de ozono en el Cono Sur y a la constatación de la disminución de la capa de ozono sobre el planeta <sup>(1)</sup>. Se considera que una disminución considerable de la cantidad de ozono produciría un aumento importante de la radiación UV-B, con los consiguientes efectos sobre la Biosfera. Una relación entre el cambio de la concentración de ozono y la variación de la irradiancia biológicamente activa vinculada al mismo ha sido propuesta por Madronich <sup>(2)</sup>.

Desde el punto de vista de la efectividad biológica, la región de radiación UV más importante es la comprendida entre  $\lambda = 290$  nm y  $\lambda = 320$  nm. Para una dada longitud de onda  $\lambda$ , la posibilidad de que la radiación influya en un dado proceso fotobiológico depende tanto de la cantidad de energía disponible a esa longitud de onda (medida por la irradiancia Espectral  $F_\lambda$ ) como también de la sensibilidad del proceso a dicha radiación (medida por el espectro de acción  $B_\lambda$ ). Cada proceso fotobiológico posee su propio espectro de acción. Algunos de ellos, como por ejemplo el espectro de acción eritémica, se encuentran bien determinados <sup>(3)</sup>. Debido a que los efectos biológicos de la radiación UV dependen del producto  $B_\lambda \cdot F_\lambda$ , una medida útil de la efectividad de la radiación UV para producir un determinado efecto biológico es la irradiancia biológicamente activa  $UV_{BIO}$ , definida como el área bajo la función de solapamiento espectral. En el caso de eritema la irradiancia biológicamente activa, irradiancia eritémica  $UV_{eri}$  es:

\* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

$$UV_{eri}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\lambda}(t) B_{\lambda} d\lambda$$

donde  $t$  es la variable tiempo. Las unidades de  $UV_{eri}(t)$  son  $[W/m^2]$  y  $[MED/h]$ . La integración en el tiempo de la irradiancia eritémica  $UV_{eri}$ , para un período determinado constituye la dosis eritémica.

## II. MÉTODOS

Para determinar la irradiancia eritémica sobre la superficie terrestre se utiliza un Biómetro RB Modelo 501-A (Solar Light). Este instrumento está diseñado para medir radiación  $UV_{eri}(t)$ , mediante un sensor, compuesto por un detector de UV-B, una capa de fósforo que convierte la radiación UV-B en radiación visible y un fotodiodo de GaAsP; los cuales en conjunto, dan una respuesta espectral cercana a la del espectro de acción eritémica  $B_{\lambda}$ . Este equipo fue originalmente calibrado en fábrica para reproducir el Espectro de Acción Eritémica de McKinley-Diffey en el cual  $210 J/m^2$  producen un eritema mínimo. En la gráfica de la Figura (1) se hallan representados el espectro de acción eritémica y la curva de respuesta del Biómetro<sup>(3)</sup>. El instrumento fue instalado en la terraza de uno de los edificios de la Universidad Nacional de San Luis en la ciudad de San Luis, Argentina. Lat:  $33.263^{\circ}$  S Long:  $66.35^{\circ}$  O, a 730 msnm. La respuesta angular del Biómetro está afectada por el denominado error del coseno, que da la desviación de la respuesta respecto del coseno ideal. Un valor típico de este error para este tipo de instrumento es de aproximadamente  $\pm 5\%$  para ángulos cenitales mayores de  $60^{\circ}$ .

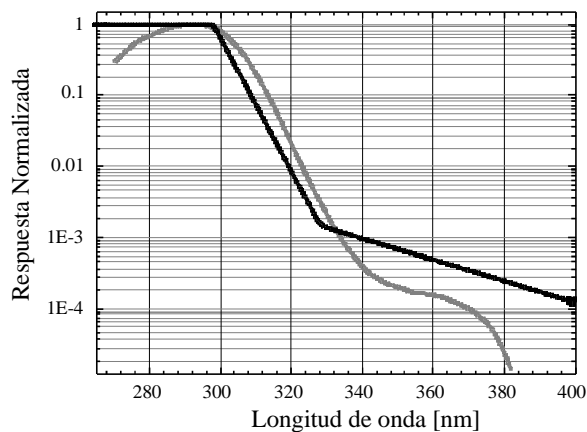


Figura 1: Espectro de acción eritémica CIE (línea oscura) y respuesta espectral del detector del Biómetro-UV 501 (línea clara).

Para comparar los datos experimentales de  $UV_{eri}$  con un modelo teórico, se utilizan los valores obtenidos al resolver la ecuación de transferencia radiativa en un modelo de atmósfera plana no-refractiva. Este cálculo se realiza utilizando el Tropospheric Ultraviolet-Visible Model (TUV)<sup>(5)</sup>, que toma en cuenta los efectos de absorción por ozono y dispersión múltiple debida a aerosoles y moléculas presentes en la Atmósfera. Para comparar los datos de  $UV_{eri}$  medidos con el Biómetro con los valores de irradiancia eritémica derivados de las mediciones del TOMS, se utiliza la grilla de datos

satelitales diaria para todo el planeta suministrada por el Goddard Space Flight Center.

## III. RESULTADOS

### Análisis de los resultados experimentales.

En la Figura (2) se presentan los valores de irradiancia eritémica al mediodía solar para todos los días en que se realizaron medidas. En ésta gráfica se destacan las mediciones correspondientes a días claros. Un día se considera claro si el sol se encuentra descubierto y la nubosidad total es menor o igual al 15%. Como es posible observar en esa figura, los valores mas altos de irradiancia eritémica alrededor del mediodía solar se registran principalmente en días claros entre Setiembre (comienzo de la primavera en el Hemisferio Sur (HS)) y Marzo (comienzo del otoño en el HS). El máximo valor de irradiancia eritémica medido al mediodía durante todo el período fue de  $\sim 6$  MED/h mientras que el mínimo valor de irradiancia eritémica medida al mediodía (para un día claro) fue de  $\sim 1$  MED/h.

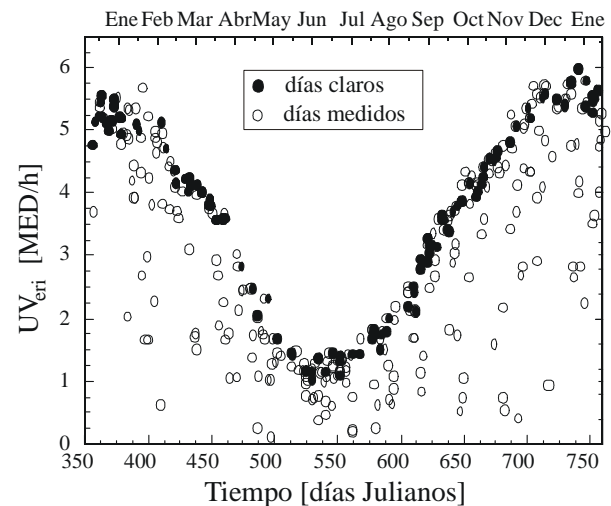


Figura 2: Irradiancia eritémica al mediodía solar para todos los días en que se realizaron mediciones. Se considera como día Juliano 1 el 1° de Enero 2003

En la Figura (3) se presentan los valores del índice UV que corresponden al mediodía solar local. Este índice cuantifica el riesgo de exposición excesiva a este tipo de radiación<sup>(4)</sup>. Los valores del índice UV indican que ya desde el mes de Noviembre, el riesgo de someterse a una exposición excesiva de la radiación, al mediodía solar, es extremo (Índice UV  $> 11$ ). Este riesgo se mantiene como extremo hasta la primera quincena de Febrero.

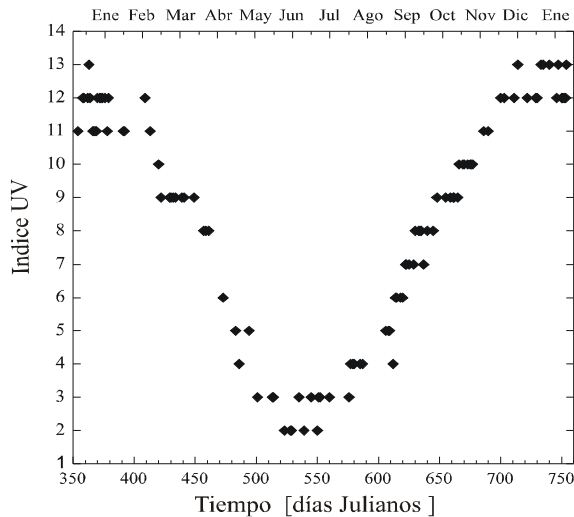


Figura 3: Índice UV para días claros en función del día Juliano.

Debido a que la exposición a la irradiancia eritémica tiene un efecto acumulativo es importante conocer la dosis eritémica diaria  $D_{eri}$ . Los valores de ésta magnitud se presentan en la Figura (4). Se observa que  $D_{eri}$  toma valores por encima de 30 MED entre los meses de Noviembre y Febrero con un valor máximo de 38 MED. El valor máximo de 38 MED, que ocurre en el mes de Enero, implica que durante un día de exposición se recibiría 38 veces la dosis mínima necesaria para presentar eritema. Se observa también que la razón entre los valores máximos de  $D_{eri}$  de verano y de invierno es seis.

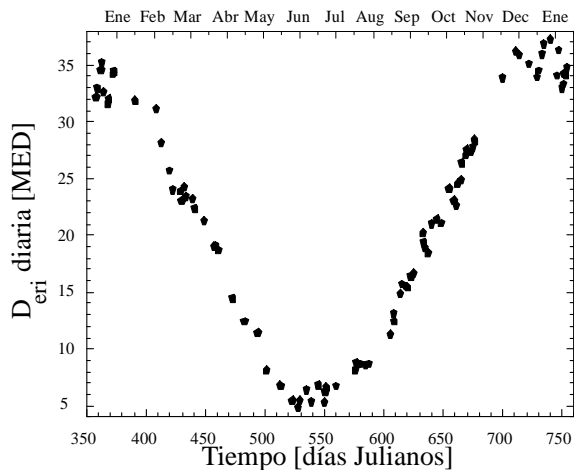


Figura 4 :Dosis eritémica diaria  $D_{eri}$  diaria para días claros, en función del día Juliano.

El valor del máximo diario de irradiancia eritémica depende del período estacional que se considere. En la Figura (5) se pueden observar los valores de irradiancia eritémica para cuatro días claros típicos de cada estación anual. Los valores de otoño y primavera difieren muy poco entre sí, como es de esperar si se tiene en cuenta que el ángulo de declinación es prácticamente el mismo, ya que los días claros elegidos en ambos períodos anuales son muy cercanos a los respectivos equinoccios. La pequeña diferencia que se observa puede deberse a la diferente concentración de aerosoles en el lugar de medición en las dos épocas. Dicha concentración es

mayor en primavera, época en la que existe mas polvo en suspensión debido a las condiciones climáticas locales.

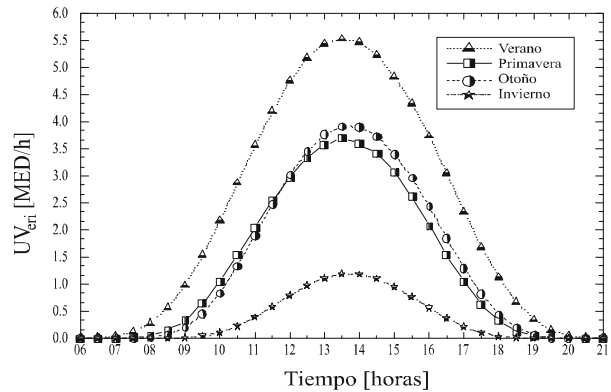


Figura 5: Irradiancia eritémica para cuatro días típicos de las estaciones para HS.

### Comparación con el modelo

En esta sección se realiza un análisis de la comparación de los datos medidos con el Biómetro con los calculados mediante el algoritmo TUV suponiendo un modelo de atmósfera plana no-refractiva. En la Tabla I se dan los valores de las distintas magnitudes que intervienen en el cálculo que realiza el algoritmo. Para realizar los cálculos de  $UV_{eri}$ , los datos de columna total de ozono para cada uno de los días corresponden a los obtenidos por el espectrómetro TOMS a bordo del satélite Earth Probe/Nasa<sup>(6)</sup>.

En la Figura (6) se comparan los valores medidos de  $UV_{eri}$  con los valores de esta magnitud calculados al resolver la ecuación de transferencia radiativa mediante el algoritmo TUV(5) sin considerar la presencia de aerosoles. Teniendo en cuenta el error experimental

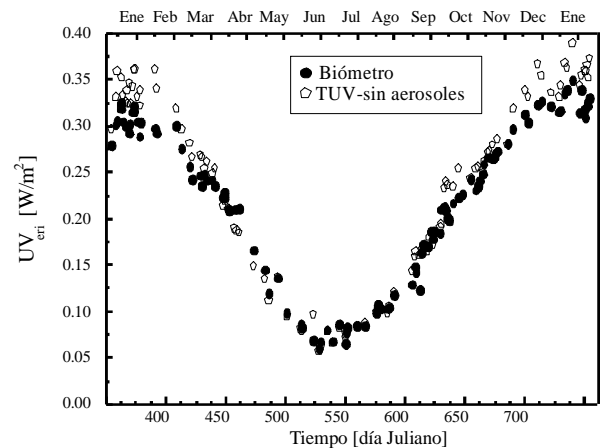


Figura 6: Comparación de los datos medidos con los calculados por el algoritmo TUV usando el modelo sin aerosoles.

se puede concluir que existe una buena concordancia entre los datos experimentales y los del modelo durante todo el año, salvo durante el periodo estival (Diciembre y Enero). Con el objetivo de analizar si la diferencia en este periodo se debe a la no-incorporación de los aerosoles en el modelo, se calcularon los valores de

TABLA 1: VALORES UTILIZADOS EN EL MODELO.

Magnitud	Valores
Rango de Longitudes de onda	280 -340 nm, resolución de 1 nm
Altitud de la superficie terrestre	730 msnm
Latitud	-33.263°
Longitud	-66.35°
Rango de alturas	1 – 80 km., resolución de 1 km.
Radiación extraterrestre	Combinación de diversas fuentes (ATLAS3, SUSIM, TOMS, Neckel)
Aerosoles	si: perfil de Elterman / no
Albedo	0.02
Perfil de ozono	TOMS/ LIDAR/ SAGE II/ USA 76
Col. total de Ozono	Valor correspondiente al día modelado (TOMS)
Perfil de Atmósfera	USA 76

UV<sub>eri</sub> incorporando los efectos radiativos de los aerosoles utilizando el perfil de aerosoles de Elterman que el algoritmo utiliza por defecto <sup>(5)</sup>, ya que no se poseen mediciones locales directas del perfil de aerosoles.

En la gráfica de la Figura (7) se muestran las diferencias relativas medias mensuales porcentuales entre los datos medidos y los calculados con y sin aerosoles. Se observa que la incorporación de aerosoles en el cálculo no produce un incremento apreciable de la concordancia entre los datos experimentales y los calculados. Las diferencias porcentuales son siempre menores a  $\pm 10\%$ , cambiando de signo en distintos períodos del año. Esto último podría deberse a que al utilizar el TUV para resolver el modelo se consideran algunos parámetros constantes, siendo que podrían tener una dependencia estacional.

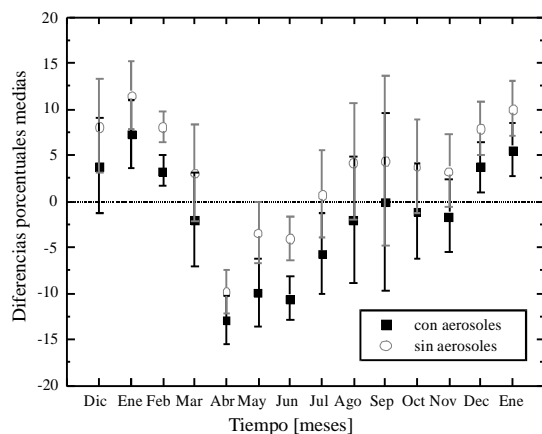


Figura 7 : Diferencias relativas medias mensuales porcentuales, entre los valores obtenidos para el modelo de Atmósfera plana paralela no-refractiva por el algoritmo TUV y los datos experimentales obtenidos con el Biómetro.

### Sensibilidad del modelo al perfil de ozono

Existen claras evidencias de la dependencia entre los valores de irradiancia eritémica UV<sub>eri</sub> y el valor de la columna total de ozono <sup>(7)</sup>. También se ha evaluado la dependencia que posee la intensidad de radiación UV de  $\lambda = 305$  nm calculada mediante el TUV al utilizar diferentes perfiles de concentración de ozono <sup>(8)</sup>. Para evaluar la influencia del perfil de ozono en el cálculo de UV<sub>eri</sub> se realizaron cálculos de esta

magnitud utilizando los cuatro diferentes perfiles que se muestran en la Figura (8-a) y que corresponden a:

- \* Perfil LIDAR: obtenido en la ciudad de Buenos Aires, el 29 de Marzo del 2000 con la técnica LIDAR (Light Detection and Ranging) en el CEILAP (Centro de Investigaciones en Laser y Aplicaciones) mediante un sensor remoto activo.
- \* Perfil TOMS: es uno de los perfiles que posee el TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) para hacer el cálculo de la columna total de ozono. El perfil utilizado es el perfil correspondiente a latitudes entre 30° y 60° para una columna total de ozono de 275DU.
- \* Perfil SAGE II: obtenido desde el SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) a bordo del satélite ERBS-2 (Earth Radiation Budget Satellite), determinado mediante una técnica de ocultamiento solar. El perfil utilizado se obtuvo para latitudes medias el 29 de Marzo de 1999.
- \* Perfil USA 76: es el perfil de ozono que el algoritmo TUV trae por defecto. Este perfil es un promedio de perfiles medidos para 45° N normalizados a una columna total de ozono de 349.82 DU.

Los datos medidos y los resultados de los cálculos de irradiancia eritémica llevados a cabo con los cuatro perfiles de concentración de ozono, se presentan en la gráfica de la figura (8-b). A fin de realizar estos cálculos cada perfil fue adaptado al valor de columna total de ozono indicada por el TOMS para el correspondiente día. Se puede observar que no existe una diferencia apreciable entre los valores calculados de UV<sub>eri</sub> con los diferentes perfiles, a pesar de que los perfiles ubican la mayor concentración de ozono en diferentes altitudes. La mejor concordancia con los datos experimentales se obtiene con el perfil LIDAR, siendo la diferencia entre los valores experimentales, y los valores calculados menor que el 10% en todos los casos

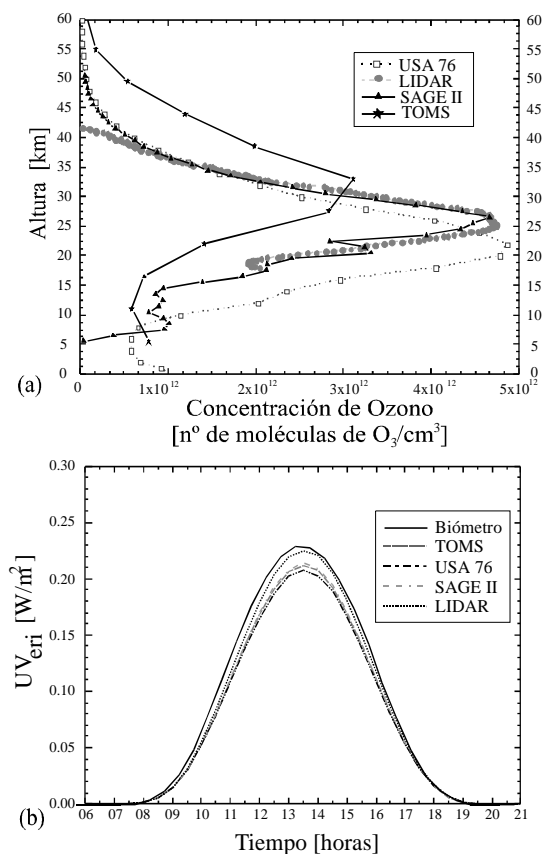


Figura 8 : (a) Cuatro perfiles diferentes para la concentración de ozono en la Atmósfera en función de la altura, que se adaptaron para la concentración de ozono en la Atmósfera correspondiente, para la ciudad de San Luis. (b) Comparación de la irradiancia eritemática modelada para 24 de marzo del 2004 con cuatro perfiles de ozono diferentes: LIDAR, SageII, USA 76 y TOMS.

### Comparación con la irradiancia eritemática medida por TOMS

Para realizar la comparación entre los datos experimentales de  $UV_{eri}$  con datos satelitales, se utilizaron los datos provistos por el espectrómetro TOMS. La grilla de valores provista por el satélite posee datos de  $UV_{eri}$  para longitudes entre  $179,375^\circ$  O y  $179,375^\circ$  E con paso  $1,25^\circ$ , y latitudes entre  $89,5^\circ$  S a  $89,5^\circ$  N con pasos de  $1,0^\circ$ . Para estimar los valores informados por el espectrómetro TOMS para la ciudad de San Luis se realizó una interpolación lineal para la latitud y longitud de esta ciudad, utilizando los valores de la grilla correspondientes a longitudes  $66,875^\circ$  O y  $65,625^\circ$  O y latitudes  $32,5^\circ$  S y  $33,5^\circ$  S. Los resultados de esta comparación se muestran en la Figura (9).

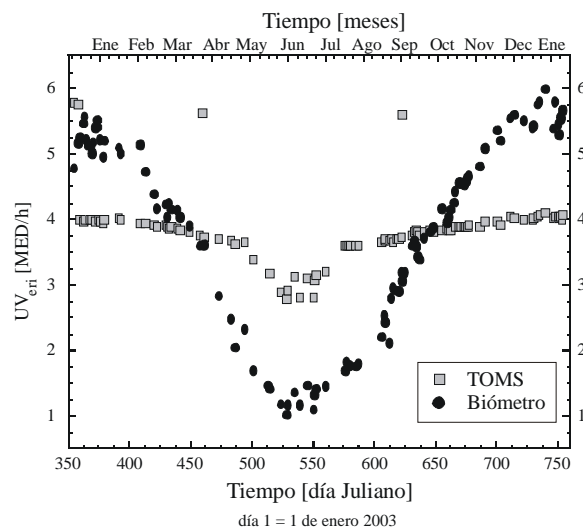


Figura 9: Comparación de la irradiancia eritemática medida con el Biómetro para días claros al mediodía solar, con los valores suministrados por TOMS.

Se puede apreciar que los valores obtenidos por el TOMS para días claros no estiman adecuadamente los valores de irradiancia eritemática medidos experimentalmente para la ciudad de San Luis, ocurriendo diferencias extremas entre ambos conjuntos de datos del orden de 200% para los valores de  $UV_{eri}$  de junio. A partir de los valores informados por el espectrómetro TOMS podrían inferirse valores del índice UV en invierno para San Luis cercanos a 8, esto corresponde con un riesgo de exposición muy alto. Esto no está de acuerdo ni con los valores medidos localmente con el Biómetro ni con los valores estimados por otras fuentes para la zona.

Dado que la confiabilidad de los datos obtenidos por el Biómetro, demostrada por las mediciones realizadas en diferentes estaciones de todo el mundo<sup>(1)</sup> o por la similitud de los valores medidos con los resultados obtenidos con el algoritmo del TUV, es posible concluir que la discrepancia entre los resultados brindados por el espectrómetro TOMS y los medidos localmente con el Biómetro se deben a estimaciones erróneas de la irradiancia eritemática realizadas por el espectrómetro TOMS.

### Conclusiones

A partir de las mediciones realizadas en la ciudad de San Luis con un Biómetro 501A de Solar Light en condiciones de cielo claro, se concluye que:

Los valores mas altos de irradiancia eritemática se registran principalmente alrededor del mediodía solar entre los meses de Setiembre y Marzo. Puede alcanzar valores máximos de 6 MED/h. La dosis eritemática diaria máxima es de hasta 38 MED, se registra en días cercanos al solsticio de verano.

La incidencia de nubes provoca disminuciones en la irradiancia eritemática de hasta el 90%.

La exposición al Sol en horarios cercanos al mediodía solar no es segura, sin algún tipo de protección, entre Noviembre y Marzo.

Los datos de  $UV_{eri}$  obtenidos utilizando el modelo de atmósfera plana no refractiva resuelto con el algoritmo TUV concuerdan satisfactoriamente con los datos medidos para la ciudad de San Luis.

La discrepancia entre los resultados brindados por el espectrómetro TOMS y los medidos localmente con el Biómetro se deben a estimaciones erróneas de la irradiancia eritémica realizadas por el espectrómetro TOMS.

### Conclusiones

A partir de las mediciones realizadas en la ciudad de San Luis con un Biómetro 501A de Solar Light en condiciones de cielo claro, se concluye que:

\* Los valores más altos de irradiancia eritémica se registran principalmente alrededor del mediodía solar entre los meses de Setiembre y Marzo. Puede alcanzar valores máximos de 6 MED/h. La dosis eritémica diaria máxima es de hasta 38 MED, se registra en días cercanos al solsticio de verano.

\* La incidencia de nubes provoca disminuciones en la irradiancia eritémica de hasta el 90%.

\* La exposición al Sol en horarios cercanos al mediodía solar no es segura, sin algún tipo de protección, entre Noviembre y Marzo.

Los datos de  $UV_{eri}$  obtenidos utilizando el modelo de atmósfera plana no refractiva resuelto con el

algoritmo TUV concuerdan satisfactoriamente con los datos medidos para la ciudad de San Luis.

\* La discrepancia entre los resultados brindados por el espectrómetro TOMS y los medidos localmente con el Biómetro se deben a estimaciones erróneas de la irradiancia eritémica realizadas por el espectrómetro TOMS.

### Referencias

- 1 - Scientific Assessment of Ozone Depletion, Global Ozone Research and Monitoring Project Reports. World Meteorological Organization (WMO), (1994).
- 2 - S. Madronich. "The atmosphere and UV-B radiation at ground level in Environmental UV Photobiology". Plenum Press, (1993).
- 3 - A.F. MacKinlay and B.L. Diffey. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. CIE Journal **6**, 17 (1987).
- 4 - OMS. Ultraviolet radiation. Environmental health criteria. Technical Report **160**, OMS, Ginebra, (1994).
- 5 - S. Madronich "UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, in Environmental Effects of UV (Ultraviolet) Radiation". Lewis Publisher, Boca Raton, (1993).
- 6 - <http://toms.gsfc.nasa.gov/>
- 7 - S. Madronich, R.L. McKenzie, L.O. Björn, y M.M. Caldwell, Photochem. And Photobiol. **46**, 5 (1998).
- 8 - M.I. Micheletti, E. Wolfram, R.D. Piacentini, A. Pazmiño, E. Quel, V. Orce, y A.A. Paladini, J Opt. A: Pure Appl. Opt. **5**, 262 (2003).