

Componentes espectrales directa y difusa, UVA y UVB y de acciones biológicas de la radiación solar incidente sobre Buenos Aires. Mediciones y modelización

Direct and diffuse spectral components, UVA and UVB and biological actions of the solar radiation incident on Buenos Aires. Measurements and modelization

M.M. Raponi^{1*}, G. Salum², F. Gonzalez¹, E. Quel¹, R.D. Piacentini³

1. CEILAP (CITEFA-CONICET), Juan B. de La Salle 4397 - B1603ALO Villa Martelli, Argentina
2. Fac. de Cs. Exactas, Ing y Agrim, UNRosario y UTN, Regional Concepción del Uruguay
3. IFIR/CONICET - UNRosario y Fac. de Cs. Exactas, Ing y Agrim, UNRosario, Argentina
e-mail: mraponi@citefa.gov.ar

Se presentan mediciones de irradiancia espectral solar en el rango ultravioleta, efectuadas en el CEILAP, Gran Buenos Aires, utilizando el espectrorradiómetro portátil Ocean Optics HR4000, recientemente incorporado. La relación global/difusa crece y la relación difusa/directa decrece con la longitud de onda, pasando por el valor uno (igualdad de ambas componentes) a longitudes de onda cada vez mayores. Este comportamiento se debe a la gran atenuación atmosférica de la componente directa en mayor proporción que la difusa que se produce a ángulos zenitales grandes. Hemos comparado la relación entre los espectros medidos con resultados teóricos generados utilizando el algoritmo TUV, que soluciona la ecuación de transferencia radiativa atmosférica. Modelizamos además, las irradiancias de acciones biológicas eritémica y carcinogénica que pueden ser derivadas de las mediciones espectrales y las irradiancias solares UVB, UVA, 305 nm y 320 nm.

Palabras claves: radiación solar, UVA, UVB, acciones biológicas, modelo TUV.

Measurements of solar spectral irradiance in the ultraviolet range made in CEILAP, Great Buenos Aires, using the recently incorporated spectroradiometer Ocean Optics HR4000 are presented. The relationship global/diffuse increases and the diffuse/direct one falls with the wavelength, passing at the value one (equality of both components) with increasing wavelengths. This behavior is due to the great atmospheric attenuation of the direct component in more proportion than the diffuse one, to large zenith angles. We compared the measured ratio between the spectra with theoretical results generated using the algorithm TUV, that solves the atmospheric radiative transfer equation. We also made model calculations of the irradiances of biological actions (erythemal and carcinogenic) that can be derived from spectral measurements and of the UVB, UVA, 305 nm and 320 nm solar irradiances.

Key Word: solar radiation, UVA, UVB, biological actions, TUV model.

I. INTRODUCCIÓN

El conocimiento detallado de la radiación solar más energética que llega a la superficie terrestre, la componente UV, tiene gran importancia para la vida de los humanos, para el ecosistema terrestre y para materiales expuestos al Sol⁽¹⁾. Por ello, presentamos en este trabajo, mediciones de irradiancia solar en el rango ultravioleta, efectuadas en el CEILAP (CITEFA-CONICET), Villa Martelli, Gran Buenos Aires (34°33' Sur, 58°30' Oeste, 20m snm).

Empleamos un espectroradiómetro supercompacto portátil derivado de la tecnología espacial, Ocean Optics HR4000 (que indicamos con la sigla ERO) recientemente incorporado. El ERO puede sensar radiación espectral solar en el rango UV-VIS, a través de una semiesfera integradora acoplada a una fibra óptica de 400 µm resistente a la solarización (figura 1). Al ERO le asociamos un ocultador con el objetivo de medir irradiancia global y difusa, para luego obtener la relación entre las componentes *difusa/directa* y *global/difusa*. Los datos así obtenidos son comparados con los valores determinados mediante la solución de la ecuación de transferencia radiativa atmosférica realizada con el

modelo TUV v4.2, desarrollado por Madronich y colaboradores (www.acd.ncar.edu/TUV).

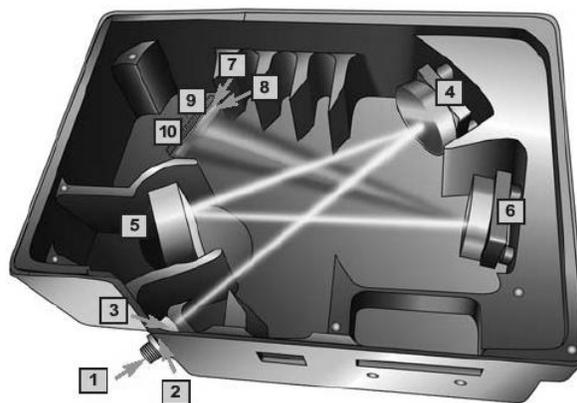


Figura 1. Detalle del instrumento espectroradiómetro/monocromador simple portátil Ocean Optics HR4000: 1) conector SMA 905, 2) slit de entrada de 25 µm de ancho y 1mm de altura, 3) filtro, 4) espejo de colimación, 5) grating H2 (600 líneas/mm, blaze 400nm), 6) espejo de enfoque, 7) lente cilíndrica, 8) filtro OFVL, 9) detector UV2, 10) detector CCD Toshiba de 3648 píxeles (array lineal de alta sensibilidad).

II. RESULTADOS

Se presentan a continuación resultados típicos, representativos de las distintas mediciones efectuadas en día de cielo claro en el CEILAP, Gran Buenos Aires. En la figura 2 se puede apreciar que la relación global/difusa exhibe hacia el mediodía solar el comportamiento esperado (por la predominancia de la componente directa a relativamente bajos ángulos zenitales), de alto valor relativo para prácticamente todo el rango de longitudes de onda superiores a los 350 nm con tendencia creciente y de valor relativo tendiendo a uno hacia el final del día para todas las longitudes de onda medidas (por la importante reducción de la componente directa a altos ángulos zenitales). Análogamente, la relación difusa/global, muestra un comportamiento decreciente con la longitud de onda por los mismos motivos.

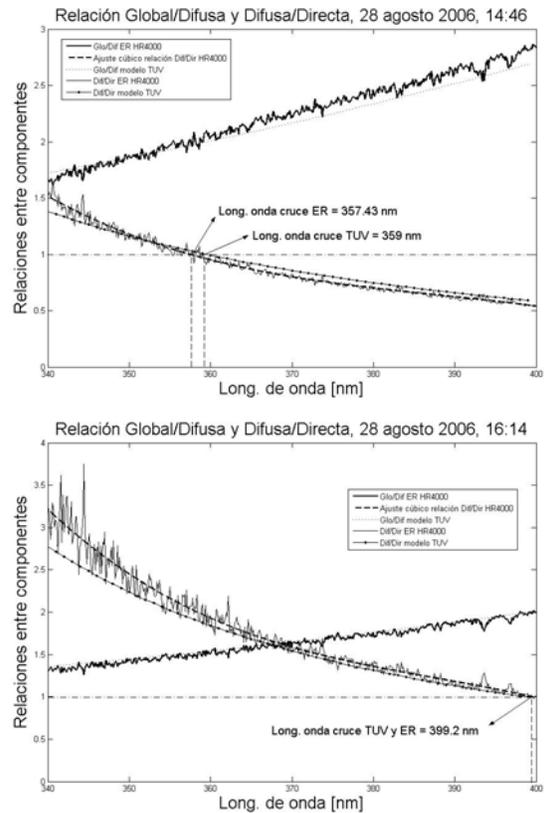
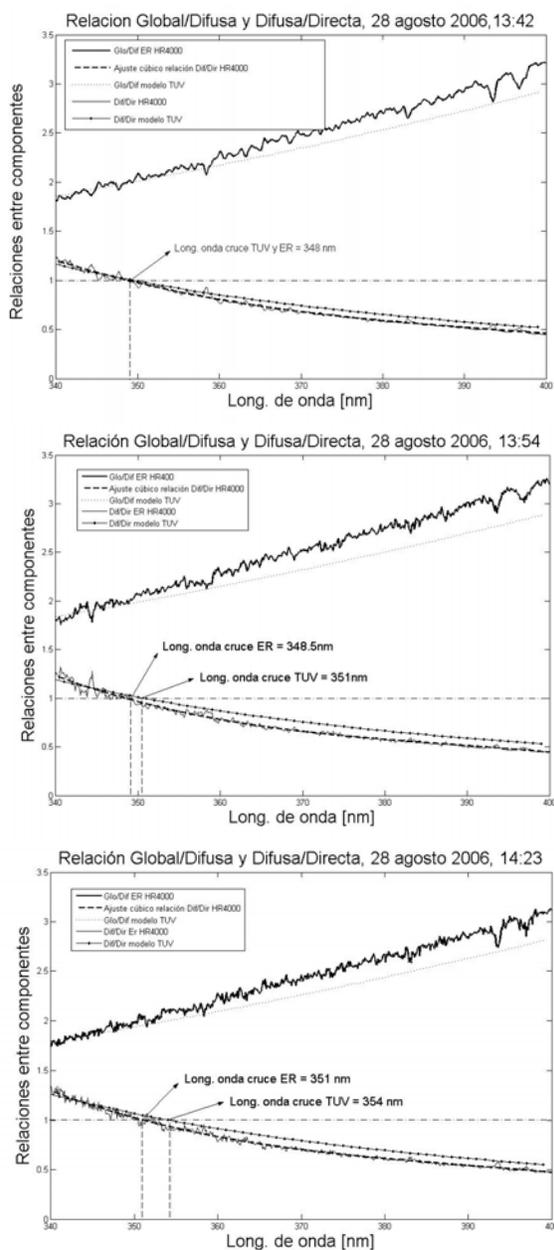


Figura 2. Relación entre la irradiancia global y su componente difusa y entre las componentes difusa y directa medidas en el CEILAP con el equipo ERO y modelizadas con el TUV, el día de cielo claro 28 de agosto de 2006, a las siguientes horas: a) 13:42, b) 13:54, c) 14:23, d) 14:46, e) 16:14 (hora local UT-3).

Los valores de las variables y parámetros atmosféricos empleados para solucionar la ecuación de transferencia radiativa empleando el modelo TUV, fueron los siguientes: ozono (O_3) = 328 DU (según datos TOMS en jwocky.gsfc.nasa.gov); profundidad óptica de aerosol (AOD) a 550nm = 0.08 (según el promedio de la medición realizada por el equipo CIMEL de AERONET/NASA ubicado en CEILAP para ese día); albedo de la superficie terrestre = 0.06 (tal como fue considerado en trabajos anteriores⁽²⁾). Podemos también observar que en los resultados de la modelización, a medida que la longitud de onda disminuye para un dado momento del día, la contribución difusa se hace cada vez mayor por la mayor contribución de los aerosoles a estas longitudes de onda.

En la figura 3 se resumen los valores del cruce de las componentes directa y difusa (valor de la relación entre ambas componentes igual a 1), obtenidos mediante la determinación de dicho cruce en la figura 2, donde se representan las mediciones y los datos teóricos derivados de la aplicación del modelo TUV. Ambas curvas presentan un comportamiento muy similar, creciente con el tiempo a partir del mediodía solar y por ende con el ángulo zenital. Esto es debido al consecuente aumento del camino óptico de los fotones solares en la atmósfera hacia el final del día.

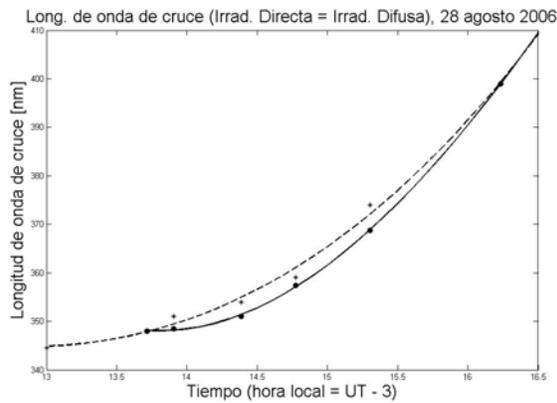


Figura 3. Variación de la longitud de onda de cruce de las componentes directa y difusa de las irradiancias espectrales solares UV (determinada al valor de igualdad de estas componentes), en función de la hora local del día 28 de agosto de 2006 (círculos) y su comparación con los resultados obtenidos con el modelo TUV (asteriscos). Se presentan además las aproximaciones polinómicas a las mediciones (línea sólida) y a los valores determinados empleando la modelización matemática (línea de trazos).

IV. MODELIZACIÓN

El espectrorradiómetro presentado en este trabajo tiene la posibilidad de ser utilizado para determinar diferentes acciones biológicas, a partir de la multiplicación de dicha acción por la irradiancia espectral en el rango UV obtenida de la bibliografía internacional. A los efectos de mostrar los resultados que son posibles de obtener cuando sea factible completar la calibración absoluta, se describen a continuación algunos de ellos.

En la figura 4, se presentan resultados de la modelización de las irradiancias solares de banda angosta de 305 nm y 320 nm (FWHM = 10 nm) y de las componentes UVB (280 -315 nm), UVB (280 -320 nm), UVA (315 - 400 nm) y UVtotal, determinados empleando el mismo programa TUV que en el ítem anterior. Los parámetros y variables atmosféricos y de superficie fueron los mismos que los considerados para los datos teóricos incluidos en la figura 2.

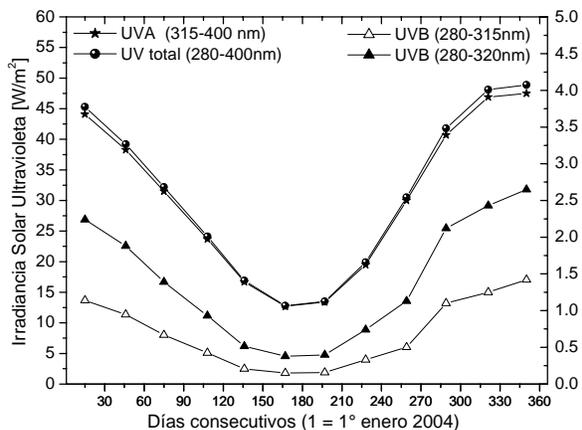


Figura 4. Irradiancia solar ultravioleta en sus distintas componentes: UVB (280-315nm), UVB (280-320nm), UVA (315-400nm), UVtotal(280 -400nm) = UVB (280-315nm) +

UVA (315-400nm). La escala de la derecha corresponde a la irradiancia UVB en unidades de W/m^2 .

Observamos, como es de esperar, que la contribución mayor a la radiación UV proviene de la componente UVA. Además, según donde se tome el límite superior, si a 315 nm como lo hacen los biólogos o a 320 nm, como es usual en Dermatología, la componente UVB difiere significativamente, en más de un 50% debido al fuerte incremento promedio en este intervalo (315-320 nm) de la irradiancia espectral solar, por la reducción significativa de la sección eficaz de fotodisociación del ozono en este rango. De allí la importancia de precisar el rango UVB, a los efectos de evitar dificultades en la realización de intercomparaciones con mediciones y/o modelizaciones.

En la figura 5 se detallan las irradiancias de acciones biológicas de eritema (señal de alarma de la piel), correspondientes a los espectros de acción dados por CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) empleados como referencia internacional⁽³⁾ y por Anders⁽⁴⁾, para el mismo lugar geográfico que el indicado anteriormente. Este último espectro de acción, fue obtenido usando una fuente de luz láser monocromática.

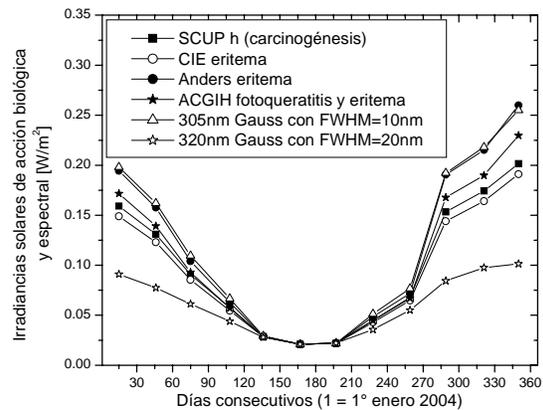


Figura 5. Irradiancias solares de acciones biológicas de carcinogénesis en humanos (denominada a nivel internacional SCUPh^{(1) y (5)}), eritema (CIE⁽³⁾ y Anders⁽⁴⁾) y fotoqueratitis y eritema convolucionadas (ACGIH⁽⁶⁾), para Buenos Aires, Argentina, con datos de ozono (del equipo satelital TOMS/NASA) y de aerosol (CIMEL/AERONET, ubicado en el CEILAP, Villa Martelli, Gran Bs Aires) correspondientes al año 2004. Se presentan también las irradiancias solares de banda angosta de 305 nm y 320 nm, ambas con un ancho a altura mitad (FWHM) de 10 nm. Las irradiancias han sido normalizadas al mínimo de la curva SCUPh que es de 0.021, siendo los factores correspondientes: 0.4468 para CIE, 304.35 para Anders, 4.6875 para ACGIH, 4.2424 para 305 nm y 0.34596 para 320 nm.

En general ambas curvas varían razonablemente del mismo modo y en sintonía con la de 305 nm, ya que esta última, al estar calculada con un ancho de banda de 10 nm y al tener su máximo centrado cerca de 305 nm, se comporta en forma similar a la irradiancia eritémica espectral (producto de la irradiancia solar por la acción biológica eritémica). No ocurre lo mismo con la irradiancia de 320 nm, ya que en este intervalo de longitudes de onda, se tiene una influencia significativamente menor del ozono (cuya sección eficaz

de fotodisociación decrece fuertemente y ya es muy baja a partir de estas longitudes de onda), lo que condiciona fuertemente el comportamiento de las irradiancias eritémica y de 305 nm. Es de señalar que esta última está centrada esencialmente en el pico de absorción de estas radiaciones solares UV por parte del ADN, de allí su efecto carcinogénico. Este hecho queda evidenciado por el comportamiento también similar de la curva de acción biológica de carcinogénesis en piel de humanos (intencionalmente denominada SCUPh)⁽⁵⁾. Por ser este efecto el más grave en relación a la acción de la radiación UV sobre las personas que deben exponerse al Sol intenso, lo hemos tomado como referencia en este trabajo y hemos normalizado las demás curvas a la misma. Es de señalar que las acciones biológicas son curvas *relativas* (*normalmente al valor 1*), pero pueden desplazarse en el eje vertical, ya que miden la *efectividad relativa* de las distintas radiaciones UV para producir una alteración dada. Esto permite observar que las distintas irradiancias de acciones biológicas que hemos considerado, se comportan en forma similar a lo largo del año, con pequeñas variaciones. También lo hace de forma parecida la irradiancia de 305 nm.

Otra irradiancia de acción biológica de gran importancia es la indicada con ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), ya que convoluciona dos acciones significativas de la radiación solar UV sobre humanos, como son la eritémica y el efecto de fotoqueratitis (intensa radiación con daño temporal en los ojos, como en el caso de reflexión en nieve)⁽⁶⁾.

V. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos (tanto a partir de las primeras mediciones del espectrorradiómetro portátil de última generación presentado en la figura 1, como a través de la modelización), permiten separar las contribuciones directa y difusa de la irradiancia solar espectral en el rango UV que incide en el Gran Buenos Aires y determinar las componentes UVB y UVA, las irradiancias de banda angosta de 305 nm y 320 nm, la radiación total en el rango UV y las acciones biológicas asociadas. Respecto de los resultados de la modelización de la intensidad UV total, es de señalar que una verificación indirecta de dichos resultados, a modo de control, proviene de comparar en el período del solsticio de verano, su valor extremo diario registrado en Rosario (cuya irradiancia es sólo algunos porcientos superior a Bs. Aires en promedio). El valor publicado a nivel internacional⁽⁷⁾ para esa ubicación de la irradiancia solar UV total, en el rango (280 - 385 nm) fue de 52 W/m², que está algo por encima de los valores presentados en el presente trabajo para la misma época del año, lo cual es razonable, ya que el cálculo es para un valor intermedio y para una latitud un grado y medio mayor.

- Hemos determinado la contribución relativa de la componente difusa respecto de la directa, la cual va aumentando dicha contribución a medida que avanzan las horas del día.

- A partir de la irradiancia espectral solar en el UV, es posible determinar una serie de importantes acciones

biológicas (eritema, carcinogénesis, combinación de eritema, señal de alarma por enrojecimiento de la piel y daño a los ojos), como las obtenidas a partir de modelización y presentadas en la figura 5, las que serán validadas mediante mediciones a lo largo del año. Es de señalar que la irradiancia de 305 nm se comporta en forma similar en los distintos meses del año que las demás irradiancias de acciones biológicas.

Estos resultados son de interés para la determinación de las acciones biológicas sobre los humanos y el ecosistema y de las acciones sobre materiales expuestos a la radiación solar UV.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a JICA, Japan International Cooperation Agency, por su apoyo para la realización del presente trabajo a través de la provisión del Espectrorradiómetro Ocean Optics, como así también al Dr Brent Holbern del Goddard Space Flight Center/NASA por facilitar los datos del equipo CIMEL/AERONET instalado en el CEILAP y al Dr Alexander Cede del Goddard Space Flight Center/NASA, por fructíferas discusiones relativas al espectrorradiómetro portátil.

VII. REFERENCIAS

1. UNEP, "Environmental effects of ozone depletion and its interaction with climate change", UNEP Report, 2003.
2. Raponi M et al. Espectrorradiómetro computarizado para estudios de aerosoles y especies contaminantes en la atmósfera. Anales AFA, vol. 15, 339-342, 2003.
3. McKinlay A.F, Diffey B. A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. CIE J. 6,17-22, 1987.
4. Anders A, Altheide H-J, Knalmann M, Knalmann M and Tronnier, H. Action spectrum for erythema in humans investigated with dye lasers. Photochem Photobiol. 61,200-205, 1995.
5. de Gruijl F R and J C van der Leun. Estimate of the wavelength dependency of ultraviolet carcinogenesis in humans and its relevance to the risk assessment of a stratospheric ozone depletion. Health Phys.,67, 319-325, 1994.
6. ACGIH action spectrum (general, como convolución de fotoqueratitis y eritema) http://i115srv.vu-ien.ac.at/uv/actionspectra/uv_actionspecs.htm
7. Piacentini R D, Alfano O M, Albizzati E D, Luccini E A and Herman J R. Journal of Geophysical Research, 107 (D15), doi: 10.1029/2001JD000586, 2002.