

Irradiancia espectral solar UV-B y su relación con la efectividad de daño biológico a las plantas

María Isabel Micheletti^(1,2) y Rubén D. Piacentini^(1,3)

1. Instituto de Física Rosario (CONICET-Universidad Nacional de Rosario), 27 de Febrero 210bis, 2000 Rosario, Argentina.

2. Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas (Universidad Nacional de Rosario), Suipacha 531, 2000 Rosario, Argentina.

3. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (Universidad Nacional de Rosario), Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina.

e-mail: ruben@ifir.ifir.edu.ar

Analizamos la relación existente entre la irradiancia solar espectral UV-B y la correspondiente irradiancia de daño a las plantas. Los cálculos fueron realizados para Rosario, Argentina, como sitio representativo de latitudes medias y altura prácticamente a nivel del mar. Las irradiancias se calculan por medio de la resolución de la ecuación de transferencia radiativa empleando el código de Madronich, con los parámetros atmosféricos correspondientes a los promedios mensuales de los meses de cada uno de los solsticios y equinoccios. Usando funciones simples que logran aproximar con una precisión considerablemente buena la transmitancia atmosférica efectiva de la radiación solar UV-B, la irradiancia solar extraterrestre en dicho rango y el espectro de acción de daño a las plantas, obtenemos expresiones analíticas para las irradiancias espectrales UV-B y de daño a las plantas, las cuales muestran un buen acuerdo con los datos numéricos. El cociente entre la transmitancia espectral correspondiente a un determinado momento del día de cielo claro y la transmitancia espectral máxima, para mediodía solar, coincide con el cociente análogo para la efectividad espectral de daño a las plantas. Este hecho brinda la posibilidad de medir este cociente directamente con un espectroradiómetro UV o un instrumento de banda angosta.

We analyze the relation between the spectral UV-B solar irradiance and the corresponding plant damage. The calculations have been made for Rosario, Argentina, as a representative place of mean latitudes and sea level altitude. The irradiances are calculated through the resolution of the radiative transfer equation employing the Madronich code, with the atmospheric parameters corresponding to the mean averages of the solstice and equinox months. Using simple but quite accurate approximation functions for the atmospheric effective transmittance of solar UV-B radiation, the solar extraterrestrial irradiance in this range and the plant damage action spectrum, we obtain analytical expressions for the spectral UV-B and plant damage irradiances, showing good agreement with the numerical results. The ratio of the actual spectral transmittance to the maximum one at clear sky noon, is equal to the corresponding ratio of spectral plant damage effectiveness. This fact gives the possibility to measure this ratio directly with a spectroradiometer or a narrow band instrument.

I. INTRODUCCIÓN

Los fotones solares del rango Ultravioleta B (UV-B) corresponden a la radiación solar más energética que logra alcanzar la superficie terrestre. Son atenuados por ozono, aerosoles y demás componentes atmosféricas [1,2]. La irradiancia sobre una superficie horizontal puede ser medida con instrumentos en tierra o desde satélites si tienen una eficiencia cuántica apreciable en todo el rango UV-B [3]. También puede ser determinada en forma teórica mediante el uso de modelos que resuelven la ecuación de transferencia radiativa para un dado momento y lugar.

El rango UV-B es definido por muchos especialistas por el intervalo de longitudes de onda 280 nm (or 290 nm) – 320 nm [4-6]. Por otro lado la definición CIE standard para esta radiación solar corresponde al rango 280 nm – 315 nm.

Los efectos biológicos de esta radiación solar de alta energía están considerablemente bien documentados en humanos y algunos animales y plantas [4,7]. En particular el espectro de acción de daño a las plantas generalizado introducido por Caldwell como una medida del efecto relativo inducido por radiaciones electromagnéticas de onda corta sobre las plantas [8,9], es una referencia muy

utilizada en el estudio de la influencia sobre las plantas de la radiación solar UV-B en relación con el adelgazamiento de la capa de ozono estratosférica [10-12]. De manera análoga, el cuerpo humano puede ser afectado por la radiación solar UV de diferentes maneras, pero el espectro de acción eritémica de McKinlay y Diffey [13] es utilizado de manera generalizada como un ejemplo representativo.

En este trabajo mostraremos que podemos obtener la efectividad espectral relativa de daño a las plantas midiendo la irradiancia solar UV-B espectral. Morys and Berger [14] e independientemente Piacentini [15] propusieron correlacionar datos obtenidos con un Biómetro UV (medidor de la irradiancia eritémica) con otras efectividades de acción biológica, pero esto tiene la desventaja de depender del instrumento utilizado ya que cada compañía construye los mismos con su propio filtro eritémico, los cuales en algunos casos difieren entre ellos apreciablemente [16] debido a la dificultad de su construcción.

Los cálculos de las irradiancias se realizaron con el programa TUV desarrollado por Madronich et al. Dichas irradiancias fueron calculadas para días próximos a ambos solsticios y equinoccios, para Rosario (32.95° S, 60.63° O, 25 m s.n.m.). Como parámetros atmosféricos se han

utilizado las medias mensuales de ozono y aerosoles para los periodos mencionados y la región geográfica correspondiente a Rosario, extraídas de los datos del TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)/NASA a bordo del satélite Earth Probe (Herman J. R., Goddard Space Flight Center, NASA, comunicación privada, 1999). Con respecto al albedo o reflectividad del suelo, se ha asumido el valor 0.06 (6%), valor razonable para regiones cercanas a un ancho río en las que se tiene una composición de espacios verdes, agua y edificios.

Existen en la bibliografía varios intentos para representar analíticamente la irradiancia solar en todo el espectro [17] o en parte del mismo, en especial en el UV [18]. En este trabajo hemos obtenido funciones analíticas suaves y relativamente simples pero al mismo tiempo considerablemente precisas para representar: la irradiancia espectral extraterrestre, la irradiancia espectral atmosférica efectiva y el espectro de acción de daño a las plantas (ver las definiciones en el Apéndice). Esto permite analizar varias cuestiones interesantes, tales como la sensibilidad a las variables atmosféricas, la dependencia con la longitud de onda de la efectividad relativa espectral de daño a las plantas y la efectividad máxima a lo largo del día.

II. MÉTODOS Y RESULTADOS

Cálculos numéricos y analíticos

Diferentes códigos se han desarrollado para obtener soluciones de la ecuación de transferencia radiativa. En este trabajo consideramos el correspondiente a Madronich, que ha sido frecuentemente empleado en los últimos años para diferentes e interesantes aplicaciones [19,20].

El espectro de acción de daño a las plantas generalizado (o simplemente espectro de acción de daño a las plantas) $E_{pd}(\lambda)$ mide el efecto de alteraciones en las plantas inducidas por fotones en el rango UV [7-9]. El espectro de acción de daño a las plantas que consideramos en el presente trabajo fue introducido por Caldwell en 1968 [8] y es todavía ampliamente utilizado. Su dependencia con la longitud de onda es tal que decrece fuertemente en el rango UV-B y llega a ser prácticamente nula para valores mayores que 312 nm. A causa de este comportamiento la efectividad espectral de daño a las plantas (o irradiancia espectral pesada con el espectro de acción de daño a las plantas), dada por [19]

$$I_{pd}(\lambda, t) = E_{pd}(\lambda) I_{UV-B}(\lambda, t) \quad (1)$$

está totalmente concentrada en el rango UV-B. El tiempo t puede ser la variación horaria a lo largo del día o la variación diaria a lo largo del año. En (1) la irradiancia solar espectral I_{UV-B} incluye la irradiancia solar extraterrestre $I_{ET}(\lambda)$ (definida en la dirección normal al sol para la distancia Tierra-Sol media) la cual presenta una complicada dependencia con la longitud de onda (ver la figura 1), y el factor de corrección por la distancia Tierra-

Sol $(r_0/r)^2$ originado en el movimiento orbital de tipo elíptico de la Tierra alrededor del Sol, donde r_0 es la distancia media y r la correspondiente al día en cuestión. También incluye la transmitancia atmosférica directa proyectada, dado que I_{UV-B} es usualmente definida sobre un plano horizontal. La expresión que resulta considerando lo dicho es (ver por ejemplo ref [1]):

$$I_{UV-B}(\lambda, t) = I_{ET}(\lambda) (r_0/r)^2 [\tau_{dir} \cos(\theta_z) + \tau_{dif}] \quad (2)$$

donde τ_{dir} y τ_{dif} son las transmitancias directa y difusa y θ_z es el ángulo zenital solar.

Definimos una transmitancia espectral efectiva τ^*_λ como la razón entre la irradiancia espectral que llega a la superficie y la irradiancia extraterrestre, esta última multiplicada por el factor de corrección Tierra-Sol $(r_0/r)^2$.

$$\tau^*_\lambda = I_{UV-B}(\lambda, t) / [I_{ET}(\lambda)(r_0/r)^2] = \tau_{dir} \cos(\theta_z) + \tau_{dif} \quad (3)$$

Puede asumirse que la radiación solar en el rango UV-B fuera de la atmósfera terrestre es prácticamente constante en el tiempo, siendo la variación estimada menor que el 0.3% [21]. Debe notarse que la actividad solar, con su típico ciclo de 11 años [22], introduce fuertes variaciones pero a longitudes de onda menores.

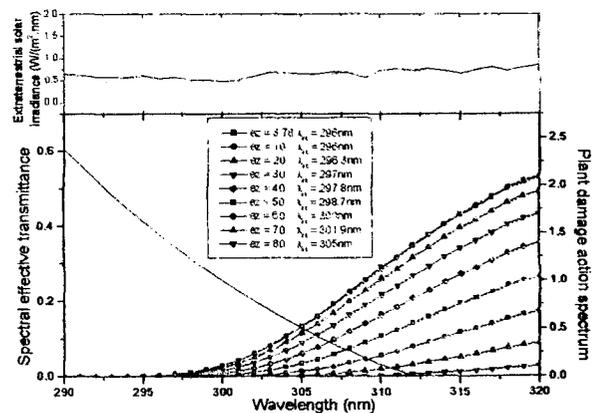


Figura 1: Parte superior: irradiancia solar extraterrestre espectral en el rango UV-B (290 nm -320 nm). La línea punteada es la aproximación lineal media (A.1.a). Parte inferior: transmitancia espectral efectiva para ángulos zenitales, expresados en grados, que varían desde el mínimo valor al mediodía solar para un día de cielo claro próximo al solsticio de verano (15 de diciembre) en Rosario, Argentina (32.95° S, 60.63° O, 25 m s.n.m.) hasta los 80°, cuando el sol está cercano al horizonte. También se representa el espectro de acción de daño a las plantas dado por su aproximación polinómica de 3^{er} grado (escala derecha). Los símbolos llenos con línea continua corresponden a los cálculos numéricos mientras que los símbolos abiertos con línea de rayas corresponden al uso de la representación analítica de la transmitancia espectral efectiva hasta la longitud de onda mínima λ_{st} . Los valores típicos (medias mensuales) considerados son: columna total de ozono, 280 DU; coeficientes de Angström de aerosoles beta, 0.14 y alfa, 1; albedo, 0.06.

La figura 1 presenta los tres términos espectrales

principales: la irradiancia solar extraterrestre, el espectro de acción de daño a las plantas y la transmitancia efectiva (las expresiones analíticas correspondientes están dadas por las ecuaciones A.1 en el Apéndice). La transmitancia espectral efectiva en el rango UV-B ha sido obtenida tanto en forma numérica como analítica para condiciones atmosféricas típicas alrededor del solsticio de verano del Hemisferio Sur, en el Observatorio de Rosario, Argentina (32.95° S, 60.63° O, 25 m s.n.m.). Éste representa un lugar típico correspondiente a latitudes medias de la Pampa Húmeda, que es la región más poblada del país. Los valores de las variables geofísicas están dados en la Tabla 1. Los cálculos se han efectuado para diferentes ángulos zenitales, desde el valor mínimo al mediodía solar hasta 80°, cuando el Sol está cerca del horizonte. En este trabajo se analizan días de cielo claro, los cuales representan el caso usual de valor máximo para un determinado momento del día y día del año, si bien se sabe que en algunos casos las reflexiones que ocurren en los bordes de las nubes pueden producir un aumento en la irradiancia que llega a la superficie terrestre.

Tabla 1. Valores de las variables geográficas ozono, aerosol y albedo para Rosario, Argentina y los periodos del año considerados en el presente trabajo.

Lugar geográfico	Mes	Ozono (DU)	Aerosol (β)	Albedo (ρ)
Rosario (32.95° S, 60.63° W, 25 m s.n.m.)	Marzo	270	0.07	0.06
	Junio	274	0.05	
	Set	295	0.07	
	Dic	280	0.14	

Una función del tipo seno cuadrado (expresión 1.c del Apéndice) ajusta con razonable precisión la transmitancia espectral efectiva τ^*_{λ} desde un límite inferior λ_{st} (que varía entre 296 nm y 305 nm a medida que los ángulos zenitales aumentan hasta 80°) hasta el final del intervalo UV-B (320 nm). En la misma figura y para el mismo rango de longitudes de onda, está representada la irradiancia solar extraterrestre. También se presenta un polinomio de 3^{er} grado que aproxima el espectro de acción de daño a las plantas $E_{pd}(\lambda)$. Como puede verse en la figura 1, los puntos obtenidos de los cálculos están bien representados en todo el rango UV-B por estas expresiones analíticas. Puede verse que aún cuando la irradiancia solar extraterrestre presenta muchas estructuras, la transmitancia espectral efectiva es una función suave de la longitud de onda.

También definimos la irradiancia espectral UV-B relativa $f_{\lambda,UV-B}$, como el cociente entre la irradiancia UV-B en cuestión y la máxima, la cual corresponde al mediodía solar.

$$f_{\lambda,UV-B} = I_{UV-B}(\lambda, t) / I_{UV-B, mx}(\lambda, t) = \tau^*_{\lambda} / \tau^*_{\lambda, mx} \quad (4)$$

El último término resulta de reemplazar I_{UV-B} de (3).

Dado que el espectro de acción de daño a las plantas está totalmente concentrado en el rango UV-B y es independiente del tiempo, es posible definir un cociente análogo al anterior, a saber, la irradiancia o efectividad de daño a las plantas espectral relativa:

$$f_{\lambda, pd} = I_{pd}(\lambda, t) / I_{pd}(\lambda, t)_{mx} = E_{pd}(\lambda) I_{UV-B}(\lambda, t) / E_{pd}(\lambda) I_{UV-B}(\lambda, t)_{mx} \quad (5)$$

Resulta entonces que este cociente es el mismo que el dado en (4). Por consiguiente,

$$f_{\lambda, UV-B} = f_{\lambda, pd} = f_{\lambda} \quad (6)$$

Este resultado brinda la posibilidad de determinar la variación temporal de la irradiancia espectral relativa de daño a las plantas con el uso directo de un espectroradiómetro UV o un fotómetro de banda angosta.

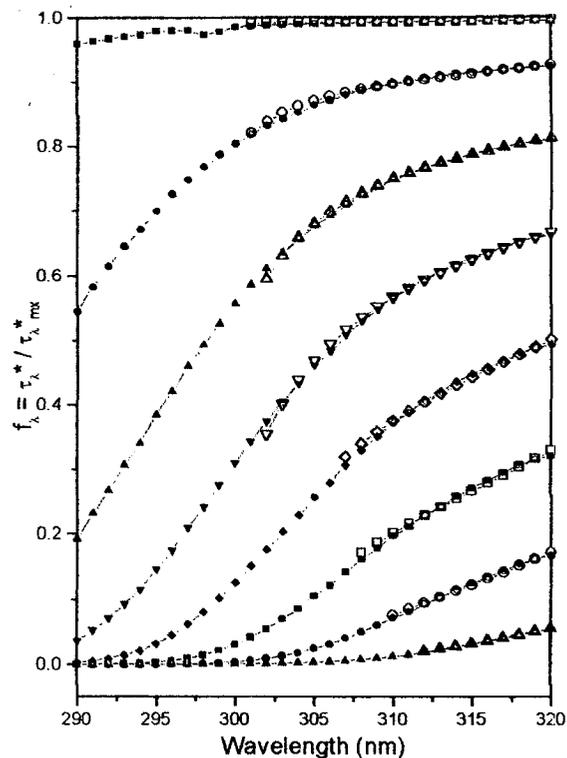


Figura 2: Irradiancia espectral de daño a las plantas relativa (que coincide con la irradiancia espectral UV-B relativa) para las condiciones típicas de ozono y aerosoles correspondientes al mismo lugar y periodo del año de la figura 1, en días de cielo claro. Resultados obtenidos de resolver la ecuación de transferencia radiativa con el código de Madronich (símbolos llenos) y con la aproximación analítica del tipo seno cuadrado (símbolos abiertos), para ángulos zenitales desde 10 a 80 grados desde la curva superior hasta la inferior, respectivamente. La mínima longitud de onda λ_{min} para la cual la diferencia porcentual relativa entre los cálculos del modelo y la aproximación analítica es menor que el 6% toma los valores: 301, 301, 302, 302, 307, 308, 310 y 312 nm, para el rango de θ , descrito más arriba.

Debe notarse que f_{λ} no está limitada al valor máximo 1, ya que las reflexiones en las nubes [23,24] así como la variabilidad interanual de la capa de ozono [25] puede inducir un incremento en la irradiancia solar con respecto al máximo normal para día de cielo claro.

En la figura 2 se representan los cocientes dados por la fórmula (4), determinados tanto numéricamente como analíticamente, para los mismos ángulos zenitales de la figura 1. El acuerdo entre ellos puede ser considerado bueno (dentro del 6%, ver la leyenda de la figura) ya que el error relativo de un cociente de dos funciones seno cuadrado es mayor que el correspondiente para cada función individual. Para valores menores que 312 nm, es decir, para valores no nulos del polinomio cúbico que aproxima el espectro de acción de daño a las plantas y, por consiguiente, de la irradiancia espectral de daño a las plantas, el $f_{\lambda,UV-B}$ coincide con el $f_{\lambda,pl}$ dado por (5). Esto hace posible la determinación de la irradiancia espectral relativa de daño a las plantas a partir de la medición de las irradiancias espectrales UV-B y el correspondiente cociente entre las mismas. Para valores de longitudes de onda mayores que 305 nm - 310 nm, un espectroradiómetro con un monocromador simple será suficiente, pero para valores menores se presentan grandes errores experimentales y debe utilizarse un doble monocromador [22]. Los radiómetros UV-B de banda angosta también resultan de importancia en la determinación de este daño biológico, ya que las curvas en todo el rango de ángulos zenitales son apreciablemente suaves y los puntos individuales intermedios pueden ser interpolados.

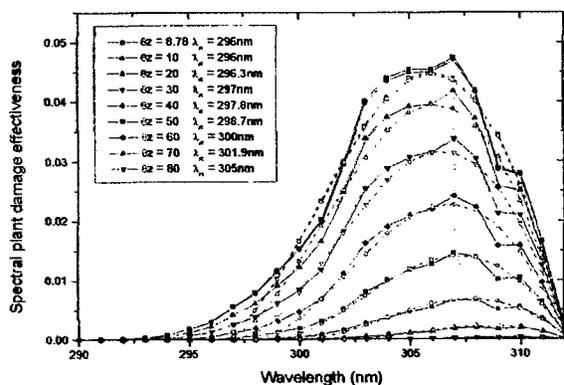


Figura 3. Efectividad espectral de daño a las plantas calculada numéricamente (símbolos llenos y línea continua) como el producto de la irradiancia solar extraterrestre, la transmitancia espectral efectiva y el espectro de acción de daño a las plantas, tal como se muestran en la Figura 1, para distintos ángulos zenitales. Las estructuras están originadas en la componente extraterrestre. Las líneas punteadas muestran los valores máximos. Los símbolos abiertos y línea de rayas corresponden a la aproximación analítica del tipo seno cuadrado.

La figura 3 representa la efectividad espectral de daño a las plantas dada en (1), evaluada numéricamente y analíticamente. Los resultados numéricos muestran estructuras directamente relacionadas con las correspondientes estructuras en la irradiancia solar

extraterrestre, dado que la transmitancia efectiva tiene un comportamiento suficientemente suave. El máximo de la

Tabla 2. Longitud de onda λ_{mx} obtenida para Rosario, Argentina en función de θ_z con cálculos analíticos (columna 2) y directamente a partir del máximo de efectividad espectral de daño a las plantas determinada numéricamente (columna 3).

θ_z (°)	λ_{mx} (analítica)	λ_{mx} (numérica)
8.78	306	307
10	306	307
20	306	307
30	306.5	307
40	306.8	307
50	307.3	307
60	307.8	308
70	308.5	308
80	309.7	310

efectividad espectral de daño a las plantas está aproximadamente a la misma longitud de onda (307 nm), desde el ángulo zenital mínimo hasta 50°, aumentando hasta los 310 nm cuando el Sol está cercano al horizonte. Este máximo también ha sido determinado analíticamente (ver ecuaciones A.4 y A.5 en el Apéndice). Los resultados correspondientes a las longitudes de onda de los máximos, dados en la Tabla 2, concuerdan dentro de una diferencia menor que el 0.4%, lo cual demuestra el interés en usar el formalismo analítico para describir comportamientos generales.

Con la intención de analizar la variación de la irradiancia espectral descrita anteriormente para distintas estaciones del año con los correspondientes contenidos de ozono y aerosoles, hemos hecho cálculos numéricos para días típicos (centrales) de los meses correspondientes a los solsticios y equinoccios (días 15 de diciembre, marzo, junio y septiembre) en Rosario, Argentina.

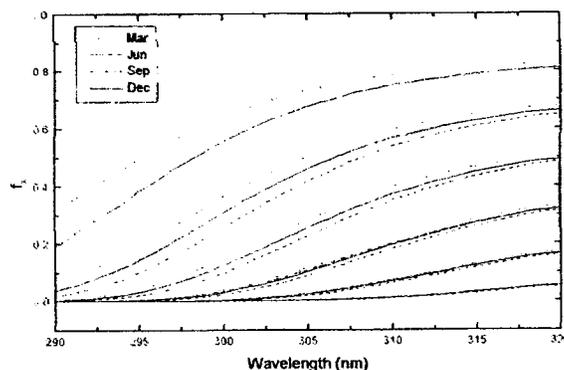


Figura 4. Igual que la figura 2, para ángulos zenitales variando entre 30° y 80° en saltos de 10°, para los periodos de marzo (ozono: 270 DU, $\beta = 0.07$), junio (ozono: 274 DU, $\beta = 0.05$), septiembre (ozono: 295 DU, $\beta = 0.07$) y diciembre (ozono: 280 DU, $\beta = 0.14$).

La figura 4 muestra la irradiancia espectral relativa f_{λ} según se ha definido en (4), (5) y (6), para diferentes ángulos zenitales y estaciones del año. En todos los casos se observa el mismo comportamiento general, pero las curvas difieren de forma bastante significativa entre sí, en especial a longitudes de onda y ángulos zenitales pequeños, debido a las diferencias en las principales variables geofísicas (ozono y aerosoles).

III. CONCLUSIONES

En presente trabajo hemos hecho un análisis detallado de la correlación existente entre la irradiancia solar espectral UV-B y la irradiancia espectral de daño a las plantas. Los resultados principales son los siguientes: la *efectividad espectral relativa de daño a las plantas* puede describirse directamente a través de la *irradiancia espectral solar UV-B relativa*, ya que ambas coinciden para cada longitud de onda, tiempo y posición geográfica.

Esto permite el uso de espectroradiómetros y medidores de radiación UV-B de banda angosta para medir los efectos de daño a las plantas. En particular, los medidores de UV-B no necesitan un filtro específico para simular el espectro de acción de daño a las plantas, como sucede en el caso del biómetro que mide eritema. Así, es posible analizar los efectos biológicos en las plantas producidos por esta radiación solar energética y que se originan en los cambios bruscos de los constituyentes atmosféricos de ozono y aerosoles, o bien en la propagación de plantas desde un lugar a otro con diferentes niveles de radiación UV-B.

El hecho de que $f_{\lambda,UV-B}$ y $f_{\lambda,pd}$ sean coincidentes, hace posible la obtención de $f_{\lambda,pd}$ para valores cercanos a 312 nm, los cuales serían prácticamente imposibles de obtener por medición directa aún cuando se desarrollara un instrumento con un filtro específico para la acción biológica de daño a las plantas. En efecto, dado que el espectro de acción de daño a las plantas toma valores muy próximos a cero para dichas longitudes de onda, lo mismo sucede con la irradiancia espectral de daño a las plantas I_{pd} y tanto numerador como denominador tienden a cero en la ecuación (5), dando por consiguiente un límite indefinido para $f_{\lambda,pd}$, que daría lugar a grandes errores dado que las mediciones tenderían a cero. Esta dificultad puede entonces salvarse mediante el uso de $f_{\lambda,UV-B}$ para dichas longitudes de onda, e incluso se pueden extrapolar los resultados para longitudes de onda aún mayores (dentro del rango UV-B) si se supusiera que la curva de acción de daño a las plantas se acerca a valores prácticamente nulos para longitudes de onda aún mayores que las dadas por el espectro de acción de Caldwell (Micheletti et al, trabajo en realización).

En este trabajo también hemos obtenido expresiones analíticas para las irradiancias espectrales UV-B y de daño a las plantas. Éstas pueden ser usadas: para determinar la longitud de onda de máximo efecto biológico, para interpolar o extrapolar los resultados correspondientes a distintos periodos del año, para estudiar la sensibilidad a los cambios en las variables

geofísicas, para integrar las expresiones obteniendo la irradiancia integrada en cualquier rango de longitudes de onda deseado, entre otras aplicaciones.

El análisis se efectuó para Rosario, como lugar representativo de latitudes medias y nivel del mar, pero los cálculos pueden realizarse de manera análoga para otros lugares del mundo, así como también para distintos periodos del año o situaciones extremas particulares como presencia del agujero de ozono antártico y zonas con quema de biomasa.

Agradecimientos – Agradecemos al Dr. Jay Herman del Goddard Space Flight Center. NASA por facilitarnos los datos del espesor óptico de aerosoles del TOMS para Rosario, que hemos empleado en el presente trabajo, al Dr. Sasha Madronich por las interesantes discusiones sobre su código computacional y a Pablo García del Observatorio Astronómico de Rosario, por su asistencia técnica. Al CONICET, por la beca de postgrado de M.I.Micheletti, y a la ANPCyT y U.N.Rosario, por subsidios recibidos.

APÉNDICE. Expresiones analíticas.

Presentamos las expresiones analíticas de los tres términos espectrales principales: irradiancia solar extraterrestre, espectro de acción de daño a las plantas y transmitancia efectiva, respectivamente

$$A_{ET} + B_{ET} \lambda \quad (A.1.a)$$

$$B_0 + B_1 \lambda + B_2 \lambda^2 + B_3 \lambda^3 \quad (A.1.b)$$

$$A \sin^2(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) \quad (A.1.c)$$

donde $A_{ET} = -3.17152$, $B_{ET} = 0.01245$, $B_0 = 570.25$, $B_1 = -4.70144$, $B_2 = 0.01274$ y $B_3 = -1.13118 \cdot 10^{-5}$, en las unidades correspondientes y λ_{st} es el valor inicial del rango de longitudes de onda para la aproximación analítica. En (A.1.c) A , λ_{st} y ω son funciones dependientes del tiempo (o ángulo zenital). Pueden ser ajustados ya sea usando los cálculos obtenidos a partir de los modelos (como es el caso del presente trabajo) o bien datos medidos. En el parámetro A está incluida la corrección por distancia Tierra-Sol. Hay que destacar que, debido al comportamiento particular de $IET(\lambda)$ en el rango UV-B, una función cuadrática o cúbica en lugar de (A.1.a) da un valor de R^2 menor que para el caso de la aproximación lineal. Hicimos varios tests para verificar que los resultados de los cálculos obtenidos con la curva extraterrestre real y con la aproximación lineal son muy similares, dentro de un 5 %. El producto de los tres términos dados por las expresiones (A.1) es la *efectividad espectral de daño a las plantas analítica*.

$$G_{pd}(\lambda, t) = (A_{ET} + B_{ET}\lambda)(B_0 + B_1 \lambda + B_2 \lambda^2 + B_3 \lambda^3) A \sin^2(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) \quad (A.2)$$

La irradiancia espectral UV-B analítica está dada por

$$G_{UV-B}(\lambda, t) = (A_{ET} + B_{ET}\lambda) A \sin^2(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) \quad (A.3)$$

con (A.1.b) reemplazado por la unidad en (A.2). Notar que las expresiones analíticas G_{pd} y G_{UV-B} corresponden a I_{pd} y I_{UV-B} de las definiciones (1) y (2), respectivamente.

Es de interés conocer la longitud de onda correspondiente al máximo de (A.2), con el objeto de analizar que radiación solar específica afecta más a las plantas. Esto puede obtenerse fácilmente igualando la derivada en función de la longitud de onda de $G_{pd}(\lambda, t)$ a cero, como se indica a continuación:

$$\begin{aligned} \partial G_{pd} / \partial \lambda = A \sin(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) [K_1(\lambda) \sin(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) + \\ K_0(\lambda) 2 \cos(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) (\pi/\omega)] = 0 \end{aligned} \quad (A.4)$$

Un cero se obtiene para $\sin(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) = 0$. Esto ocurre a $\lambda = \lambda_{st}$, pero este valor corresponde a un mínimo, en lugar de al máximo investigado. Entonces,

$$K_1(\lambda) \sin(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) + K_0(\lambda) 2 \cos(\pi(\lambda - \lambda_{st})/\omega) (\pi/\omega) = 0 \quad (A.5)$$

donde:

$$K_0(\lambda) = \sum_{i=0}^4 J_i \lambda^i \quad (A.6.a)$$

$$K_1(\lambda) = \sum_{i=0}^4 i J_i \lambda^{i-1} \quad (A.6.b)$$

y

$$J_i = A_{ET} B_i + B_{ET} B_{i-1} \quad (A.10)$$

para $i = 0, 1, 2, 3, 4$, con $B_{-1} = B_4 = 0$, y donde los demás coeficiente están dados luego de (A.1.c).

REFERENCES

- 1- Iqbal, M., *An Introduction to Solar Radiation*, (Academic Press, Toronto, 1983).
- 2- DeLuisi, J., Atmospheric ultraviolet radiation scattering and absorption. In *Solar Ultraviolet Radiation: Modelling, Measurements and Effects*, C. S. Zerefos and A. F. Bais (Eds.), pp. 65-84 (Springer, Berlin, 1997).
- 3- Herman, J. R., R. Mc Kenzie et al, Ultraviolet radiation at the Earth's surface. In *Scientific Assessment of Ozone Depletion, Chapter 9* (WMO, Geneva, 1999).
- 4- Jagger, J., *Solar-UV Actions on Living Cells*, (Praeger, New York, 1985).
- 5- Whitehead, R. F., S. J. de Mora and S. Dermes. Enhanced UV radiation – a new problem for the marine environment. In *The Effects of UV Radiation in the Marine Environment*, S. de Mora, S. Dermes and M. Vernet (Ed.), pp. 1-34 (Cambridge University Press, U. K., 2000)
- 6- Fitzpatrick, T. B., A. Z. Eisen, K. Wolff, I. N. Freedberg, and K. F. Austen. *Dermatology in General Medicine*. (Mc Graw-Hill, 1987).
- 7- Tevini, M., Effects of enhanced UV-B radiation on terrestrial plants. In *UV-B Radiation and Ozone Depletion: Effects on Humans, Animals, Plants, Microorganisms, and Materials*. Tevini, M. (Ed.). (Lewis Publishers, Boca Ratón, Florida, 1993).
- 8- Caldwell, M. M. (1968) Solar ultraviolet radiation as an ecological factor for alpine plants. *Ecol. Monogr.* **38**, 243-268.
- 9- Caldwell, M. M., L. B. Camp, C. W. Wagner and S. D. Flint. Action spectra and their key role in assessing biological consequences of solar UV-B radiation change. In *Stratospheric Ozone Reduction, Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life*. R. C. Worrest and M. M. Caldwell (Eds.), (Springer-Berlag, Berlin, 1986).
- 10- D'Antoni, H. L., R. Armstrong, J. Coughlan, J. Skiles and G. R. Daleo, Effects of stratospheric ozone depletion and increased levels of ultraviolet radiation on the subantarctic forests and western patagonian steppe: A research project. In *Stratospheric Ozone Depletion/UV-B Radiation in the Biosphere*. R. H. Briggs and M. E. B. Joyner (Eds.), (Springer-Verlag, Berlin, 1994).
- 11- M. M. Caldwell, A. H. Teramura, M. Tevini, J. F. Bornman, L. O. Björn and G. Kulandaivelu (1995) Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial plants. *AMBIO* **24**, 166-173.
- 12- Madronich, S., R. L. McKenzie, M. M. Caldwell and L. O. Björn (1995) Changes in ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *AMBIO* **24**, 143-152.
- 13- McKinlay and A.F. Diffe (1987) A reference action spectrum for UV induced erythema in human skin *CIE Journal* **6**, 17.
- 14- Morys, M. and D. Berger, The accurate measurements of biologically effective ultraviolet radiation. Presented at the International Symposium on High Latitude Optics, Tromsø, Norway, July 1993.
- 15- Piacentini, R. D. (1995) UV-B Radiation and its effect on the skin in spring and summer, (in spanish). *Actualizaciones Terapéuticas Dermatológicas* (Journal under the auspice of the Ibero-Latinamerican College of Dermatology) **18**, 449-460.
- 16- Seckmeyer, G., A. Albold and B. Mayer, Methods to derive geographical differences of UV irradiances. In *Solar Ultraviolet Radiation: Modelling, Measurements and Effects*, C. S. Zerefos and A. F. Bais (Eds.), pp. 155-164 (Springer, Berlin, 1997).
- 17- Gueymard, C. (1993) Mathematically integrable parameterization of clear-sky beam and global irradiances and its use in daily irradiation applications. *Solar Energy* **50**, 385-397.
- 18- Schippnick, P. F. and A. E. S. Green (1982)

- Analytical characterization of spectral actinic flux and spectral irradiance in the middle ultraviolet. *Photochem. Photobiol.* **35**, 89-101.
- 19- Madronich, S. UV Radiation in the Natural and Perturbed Atmosphere. In *UV-B Radiation and Ozone Depletion: Effects on Humans, Animals, Plants, Microorganisms, and Materials*. (Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1993).
- 20- Lantz, K. O., R. E. Shetter, C. A. Cantrell, S. J. Flocke, J. G. Calvert and S. Madronich (1996) Theoretical, actinometric and radiometric determinations of the photolysis rate coefficient of NO₂ during the Mauna Loa Observatory Photochemistry Experiment 2. *J. Geophys. Res.* **14**, 613-614.
- 21- Lean, J. L., G. J. Rottman, H. Lee Kyle, T. N. Woods, J. R. Hickey and L. C. Puga (1997) Detection and parametrization of variations in the solar mid- and near-ultraviolet radiation (200-400 nm). *J. Geophys. Res.* **102**, 29939-29956.
- 22- Calvo, R., H. A. Ceccatto and R. D. Piacentini (1995) Neural network prediction of solar activity. *Astrophysical Journal* **444**, 916-921.
- 23- Mims, F. M. and J. E. Frederick (1994) Cumulus clouds and UV-B. *Nature* **371**, 291.
- 24- Piacentini, R. D., A. Cede and H. Bárcena, Extreme solar global and UV irradiances due to clouds effect measured near the summer solstice at Puna of Atacama high altitude desert (Argentina). Submitted for publication.
- 25- Herman, J. R., R. D. Piacentini, J. Ziemke, E. Celarier and D. Larko, Interannual variability of ozone and UV-B ultraviolet exposure. *J. Geophys. Res.* **105**, 29189.