

AMPLIACIÓN DEL MODELO DE ANGSTRÖM-BLACK PARA UNA MEJOR ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA UV ERITEMÁTICA EN BADAJOZ (ESPAÑA)

M. Antón, M.L. Cancillo, A. Serrano, y J.A. García

Dpto. Física, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06071 Badajoz, España

Tfno.: (+34) 924289536 Fax: (+34) 924289651

mananton@unex.es, mcf@unex.es, asp@unex.es, agustin@unex.es

A. de la Casinière, J. Lenoble y T. Cabot

IRSA, Université J. Fourier, 17, quai Claude Bernard, 38000 Grenoble, Francia

Tfno.: (+33) 476575050 Fax: (+33) 476575026

alain.de-la-casiniere@ujf-grenoble.fr

Resumen

En este trabajo se comparan dos métodos con el objetivo de obtener valores diarios de transmisividad atmosférica de radiación ultravioleta eritemática a partir de parámetros fácilmente calculables. En primer lugar, se emplea la relación lineal de Angström-Black y, posteriormente, una correlación lineal múltiple con tres variables: horas de sol relativas diaria, coseno del ángulo cenital mínimo diario y cantidad diaria de ozono. Cuando ambos métodos son comparados, la correlación múltiple obtiene los mejores resultados. Así, los coeficientes obtenidos a partir de la correlación para 2001 permiten reconstruir la serie de valores diarios para 2002 con un error relativo medio que oscila entre el -0.3 % (julio) y el -5.0 % (abril).

Abstract

This work is aimed at analyzing the capacity of two simple algorithms for retrieving daily doses of atmospheric transmissivity of ultraviolet erythemal radiation from commonly parameters. Firstly, the transmissivity is linearly related according to Angström-Black's method and finally by a multiple linear correlation with three variables: the daily sunshine fraction, the cosine of the daily minimum solar zenith angle and the daily total ozono column. This multiple correlation method obtains better results. Thus, coefficients obtained from year 2001 correlation, permit to retrieve daily doses for year 2002 with an average monthly error running from -0.3 % (July) to -5.0 % (April).

Palabras claves

Radiación ultravioleta, método de Angström-Black, correlación múltiple, horas de sol relativas, ángulo cenital solar, ozono

Key words

Ultraviolet radiation, Angström-Black's method, multiple correlation, sunshine fraction, solar zenith angle, ozone.

1. INTRODUCCIÓN

Son conocidos los efectos contrapuestos que tiene la radiación ultravioleta (UV) sobre los organismos vivos. Por una parte, es responsable de la formación del ozono en la alta atmósfera, sin el cual la vida terrestre no existiría, y por otra, puede desencadenar distintas enfermedades entre la que destaca, por su alta mortandad, el cáncer de piel (Diffey, 1991). Así, cobra un gran interés la vigilancia de los niveles radiativos en la superficie de la Tierra.

Estas medidas muestran una elevada variabilidad temporal, siendo importante el estudio de las fuentes que inducen a dicha variabilidad.

Los dos principales factores que determinan la cantidad de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, tanto ultravioleta (100-400 nm) como de otras bandas espectrales, son el ángulo cenital solar y la nubosidad. Además, la absorción por ozono estratosférico y, en menor medida, la atenuación por aerosoles poseen un efecto predominante en la atenuación de la radiación UV-B (280-320 nm) (Tena et al., 1998). Finalmente existen otras fuentes de variabilidad relacionadas con la actividad humana que pueden provocar cambios notables en la radiación UV, como son los aerosoles antropogénicos, ozono troposférico y SO₂.

En los últimos años se han realizado numerosos estudios que intentan cuantificar los efectos de las variables anteriormente mencionadas sobre la radiación UV. Debido a que éstas actúan conjuntamente, los primeros estudios se realizaron con valores radiativos tomados en condiciones atmosféricas bien definidas y para uno o dos valores de ángulo cenital solar (McKenzie et al., 1991; Madronich, 1992; Bais et al., 1993). Estudios posteriores incluyen datos para toda condición atmosférica y diferentes valores de ángulo cenital solar (Blumthaler et al., 1996; Bodeker y McKenzie, 1996; Estupinan et al., 1996). En todos los casos, la principal dificultad estriba en determinar los diferentes parámetros que caracterizan las nubes (género, espesor óptico, desarrollo vertical, altura, etc).

El objetivo del presente estudio es obtener una relación empírica sencilla que permita estimar valores de radiación UV eritemática, a partir de tres variables fácilmente calculables, para toda situación nubosa. Mediante esta parametrización, aparte de conocer la influencia de esas variables en la radiación UV, también se pueden conocer los niveles de radiación UV en zonas donde actualmente no existen medidas directas.

Inicialmente, en este trabajo, se estudia un modelo tipo Angström-Black, que relaciona linealmente la transmisividad atmosférica (cociente entre la radiación medida en superficie y la extraterrestre) con las horas de sol relativas (cociente entre las horas de sol medidas y las horas de sol máximas para la localización de estudio).

Como mejora del modelo, se añade a la anterior correlación otras dos variables, que consideraremos independientes, el ozono estratosférico y el coseno del ángulo cenital mínimo para cada día de estudio.

2. MATERIAL Y METODOLOGÍA

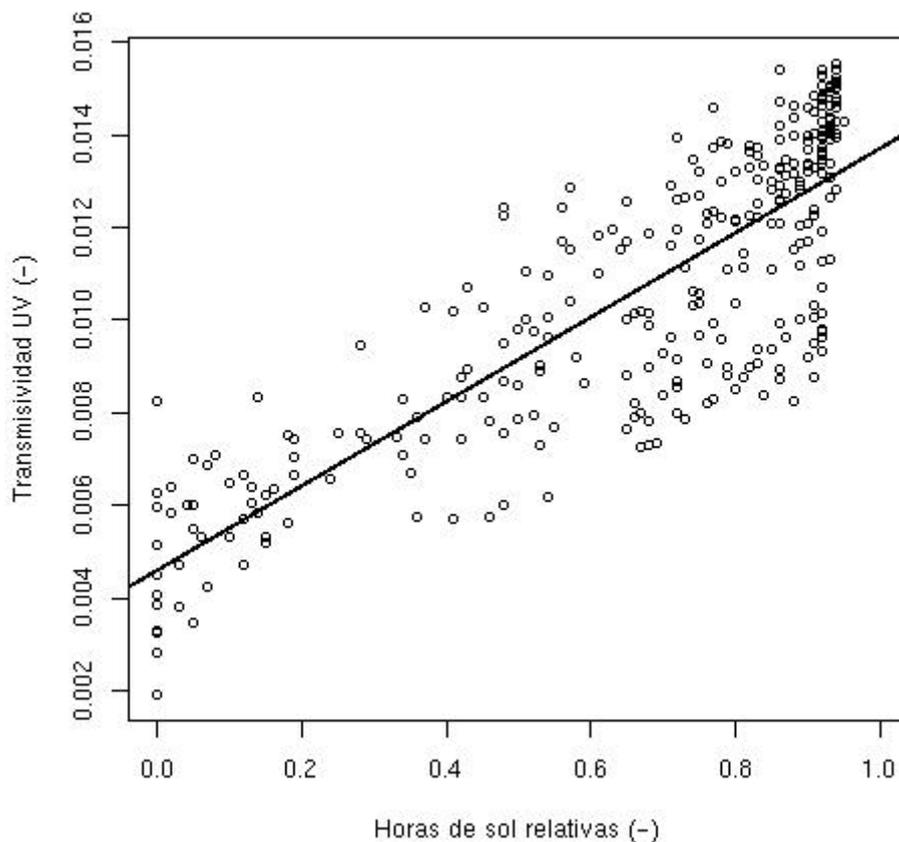
En la ciudad de Badajoz, el grupo de trabajo de Física de la Atmósfera del Departamento de Física de la Universidad de Extremadura (UEx) posee una estación de medida de radiación UV, ubicada en el campus universitario, en la terraza del mencionado departamento (38.99° N, 7.01° W, altitud =199 m).

La estación de medida posee un radiómetro UV de banda ancha (UV-S-E-T, de la firma Kipp&Zonen/Scintec) que mide radiación UV eritemática (UVER) desde el 1 de febrero de 2001. La respuesta espectral de este instrumento es similar al espectro de acción eritemática estandarizado por el CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) (MacKinlay y Diffey, 1987). El sistema de adquisición de datos toma valores de radiación cada 10 segundos, almacenando los promedios cada minuto (señal en milivoltios). Aplicando el coeficiente de calibración obtenido en la intercomparación con un espectrofotómetro Brewer, realizada en el INTA (El Arenosillo, Huelva) (Cancillo et al., 2002) se convierten esos valores de salida a valores UVER (en mW/m²).

A partir de los datos originales se calculan los valores integrados diarios de UVER. En el presente trabajo se estudia la serie de datos que abarca desde el 1 de febrero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2002, existiendo dos intervalos en los que no se disponen de datos, debidos a tareas de mantenimiento y calibrado. El primer periodo entre el 17 de septiembre

y el 1 de octubre de 2001, y el segundo entre el 7 de noviembre y el 19 de diciembre de 2002.

Fig. 1. Relación entre la transmisividad UV eritemática y las horas de sol relativas para el periodo comprendido entre el 1 de febrero de 2001 y el 31 de diciembre de 2001.



Las horas de sol relativas ($_$) es, sin duda, la variable solar mejor conocida experimentalmente, debido a que se registra en un gran número de estaciones meteorológicas. Las relaciones propuestas para relacionar las medidas de irradiación solar global medida en superficie (I_{sup}) con $_$ son de dos tipos (Sfeir y Guarracino, 1981):

- Relación de tipo Angström: $I_{sup}/I_{des} = a + b \times _$

- Relación de tipo Angström-Black: $I_{sup}/I_{toa} = a + b \times _$

Donde I_{des} es la irradiación para cielo totalmente despejado e I_{toa} es la irradiación en el tope de la atmósfera.

Las correlaciones de tipo Angström-Black son generalmente preferidas, ya que I_{toa} depende exclusivamente de variables geométricas y, por tanto, las influencias climáticas locales estarán reflejadas en los coeficientes de la correlación, los cuales se determinan experimentalmente.

Así, en el presente trabajo, utilizamos inicialmente la correlación de Angström-Black para relacionar los valores de UVER integrados diarios con la variable $_$. Posteriormente, se intenta mejorar dicha relación, y para ello, se emplea la correlación múltiple propuesta por de La Casinière et. al (2002). Esta relación, además de incluir las horas de sol relativas, utiliza otras dos nuevas variables; la cantidad de ozono estratosférico ($_$) y el coseno del ángulo cenital mínimo diario ($_{min}$). La primera la obtenemos mediante el instrumento TOMS que se encuentra a bordo del satélite Earth-Probe. Este instrumento satelital estima

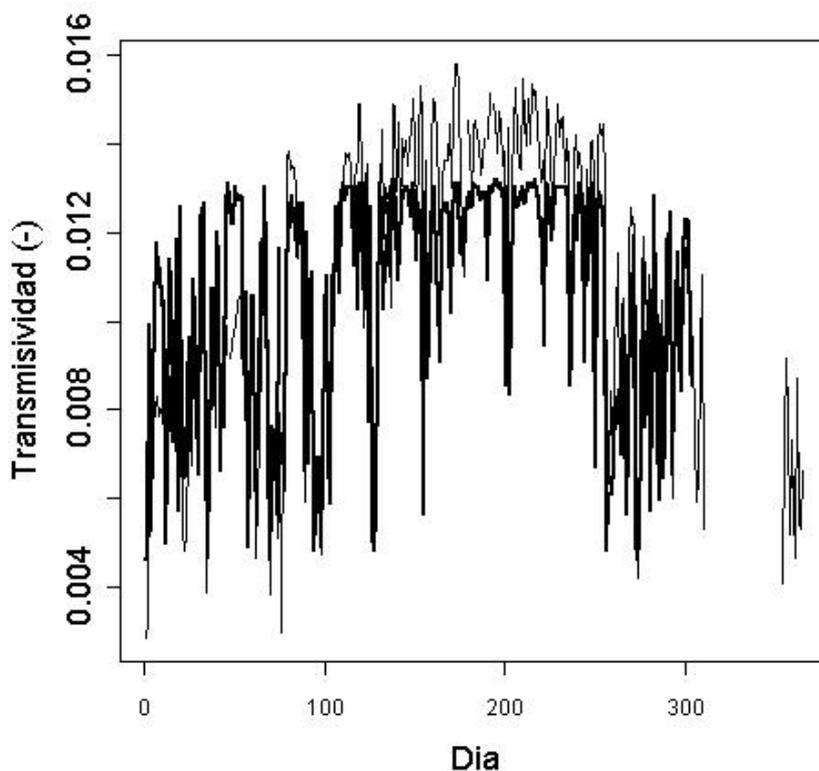
valores diarios de cantidad de ozono estratosférico en unidades Dobson, con una resolución de 1° de latitud \times 1.25° de longitud. El coseno del ángulo cenital mínimo diario es una variable geométrica que se puede calcular teóricamente para cualquier localización. Por tanto, la correlación múltiple propuesta será de la forma,

$$T = a + b \times _ + c \times _ + d \times _ \text{min} \quad (1)$$

Siendo T la transmisividad atmosférica UV eritemática, que vendrá dada por el cociente entre el valor de UVER diaria medida en superficie y el correspondiente valor al tope de la atmósfera.

En todas las correlaciones realizadas en el presente estudio los errores de los coeficientes de regresión vienen dados como dos veces su desviación típica.

Fig. 2 Evolución de los valores de transmisividad UV eritemática experimentales (línea fina) y calculados (línea gruesa) para el año 2002.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

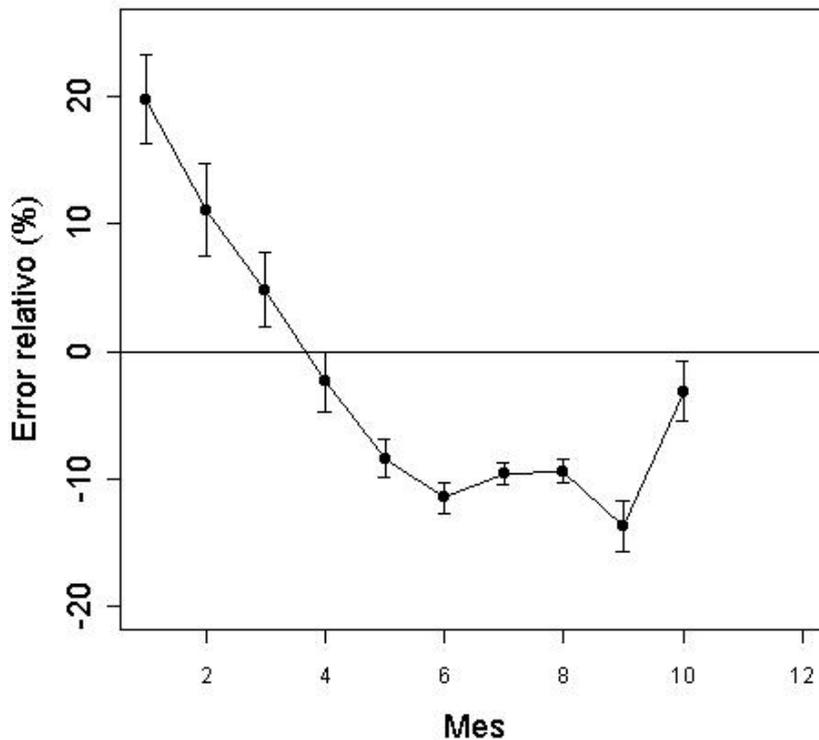
Mediante la relación de tipo Angström-Black se calcula la correlación entre la transmisividad atmosférica UV eritemática (T) y las horas de sol relativas ($_$) para los valores correspondientes al año 2001 (Figura 1). La ecuación de la recta de regresión viene dada por la expresión:

$$T = (0.0046 \pm 0.0004) + (0.0091 \pm 0.0006) \times _ \quad (2)$$

Con un coeficiente de correlación de $r^2=0.70$

En la figura mencionada se puede observar la importante dispersión que existe en torno a la recta de regresión. Este hecho sugiere que la variable horas de sol relativas, aunque está relacionada con la situación nubosa existente en el punto de medida, no recoge totalmente las variaciones que se producen en la transmisividad UV debidas a la nubosidad.

Fig.3 Evolución del error relativo entre la transmisividad medida y la calculada para el año 2002



A partir de la ecuación 2, estimamos los valores de transmisividad para el año 2002 mediante los valores de $T_{calculada}$ correspondientes a ese año. Así, si se correlacionan los valores medidos en superficie y los calculados se obtiene la siguiente recta:

$$T_{medida} = (0.0002 \pm 0.0007) + (1.02 \pm 0.07) \times T_{calculada}$$

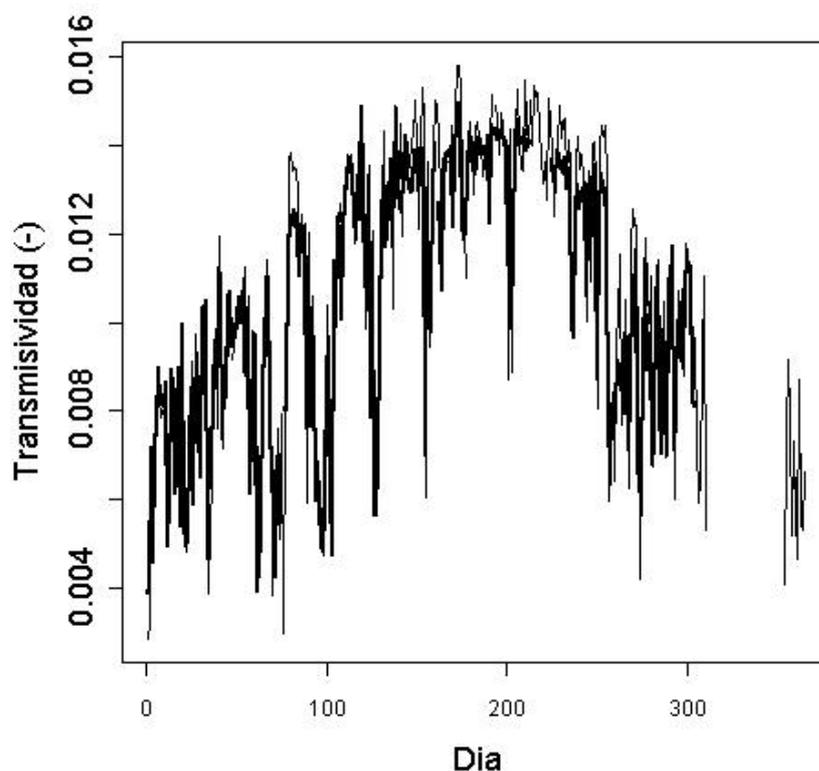
Siendo $r^2 = 0.76$.

En la figura 2 se representan conjuntamente los valores experimentales de transmisividad UV eritemática para el año 2002 y los valores calculados mediante la relación de Angström-Black. Se puede observar claramente que durante los meses de verano los valores calculados son inferiores a los medidos experimentalmente.

Para analizar la bondad de la estimación es interesante calcular el error relativo ($[T_{calculada} - T_{medida}] / T_{medida}$) entre el valor obtenido experimentalmente y el estimado a partir de la expresión de Angström-Black. Así, en la grafica 3 se presentan los valores medios mensuales del error relativo junto con las barras de error correspondientes al error estándar de los mismos. Los meses de noviembre y diciembre se han excluido al poseer únicamente 8 y 11 datos experimentales respectivamente. Se puede observar la existencia de un claro ciclo anual. Así, la transmisividad es sobreestimada durante los meses invernales, con un valor máximo del 19 ± 3 % en el mes de enero. En cambio, los valores estimados están por debajo

de las medidas experimentales durante los meses de verano, llegando el error relativo al -13.7 ± 1.9 % en septiembre. Durante los meses de abril y octubre se alcanzan los errores más bajos en valor absoluto, -2 ± 2 % y -3 ± 2 % respectivamente. Este comportamiento periódico en el error relativo sugiere que existen otros factores, a parte de la nubosidad, que influyen sistemáticamente en la transmisividad y no están siendo considerados.

Fig. 4 Evolución de los valores de transmisividad UV eritemática experimentales (línea fina) y calculados (línea gruesa) mediante la ecuación modificada de Angström-Black para el año 2002.



Por tanto, para intentar caracterizar mejor la transmisividad UV, y una vez estudiada la relación de Angström-Black, se propone una correlación múltiple (ecuación 1) en la que intervienen como variables independientes, además de las horas de sol relativas, el ozono estratosférico y el coseno del ángulo cenital mínimo diario. Así, para los valores correspondientes al año 2001, se obtiene la expresión:

$$T = (0.0061 \pm 0.0012) + (0.0063 \pm 0.0004) \times _ + (0.0111 \pm 0.0008) \times _ - (0.000026 \pm 0.000004) \times __{min}$$

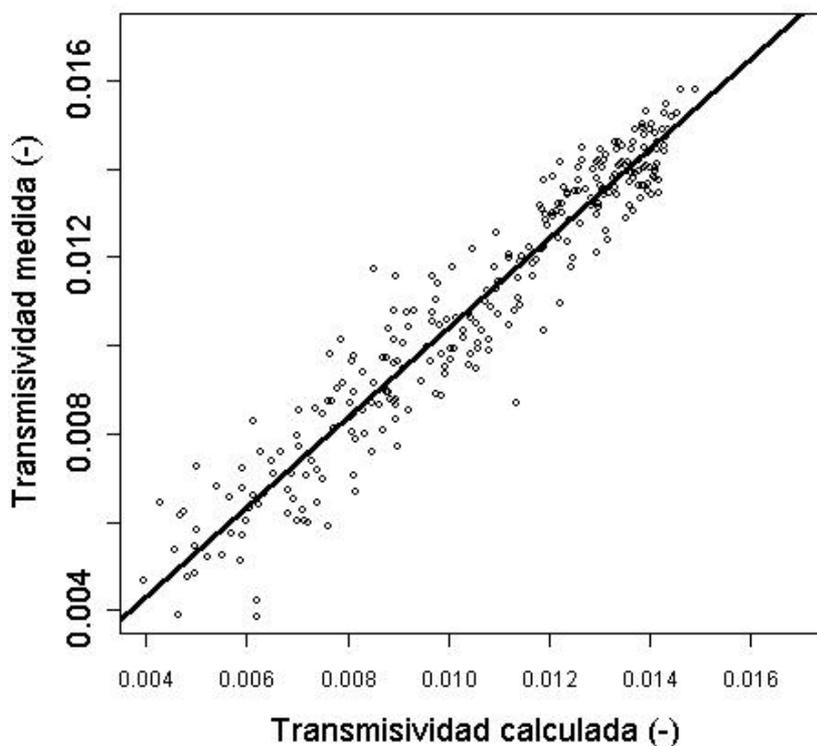
Con un valor de r^2 igual a 0.91.

A partir de esta ecuación, se calculan los valores estimados de transmisividad para el año 2002, empleando, para ello, los valores de las tres variables; $_$, $_$ y $__{min}$ para ese año. La figura 4 representa conjuntamente la transmisividad medida y la calculada. Mediante este modelo se observa como la estimación mejora sensiblemente respecto a la obtenida a partir de la expresión de Angström-Black.

Por tanto, a partir de una expresión sencilla, con variables fácilmente calculables, podemos llegar a reconstruir la serie de valores de transmisividad UV para un año dado. Este hecho tiene una indudable importancia ya que, si se determinan con bastante exactitud los coeficientes de la correlación propuesta, podemos obtener valores precisos de

transmisividad UV, y por tanto, de irradiancia UV, en determinados periodos en los que no se disponen de los radiómetros de medida, como pueden ser, por ejemplo, campañas de calibración. Además, en estaciones de medida que no disponen de radiómetros UV, debidos a su alto coste, es posible tener una estimación aproximada de la irradiancia UV. Por tanto, este tipo de correlaciones puede ser una herramienta eficaz para la obtención de mapas distribuidos de radiación UV, en regiones como Extremadura, donde actualmente únicamente existen radiómetros UV en las ciudades de Badajoz, Cáceres y Plasencia.

Fig. 5. Correlación entre la transmisividad experimental y la estimada a partir de la expresión modificada de Angström-Black.



Para comprobar la excelente relación existente entre los valores estimados y los medidos experimentalmente se representan ambos en la figura 5. Una correlación lineal con 286 pares de valores arroja una recta de regresión con un coeficiente de correlación de $r = 0.92$. La ecuación obtenida viene dada por:

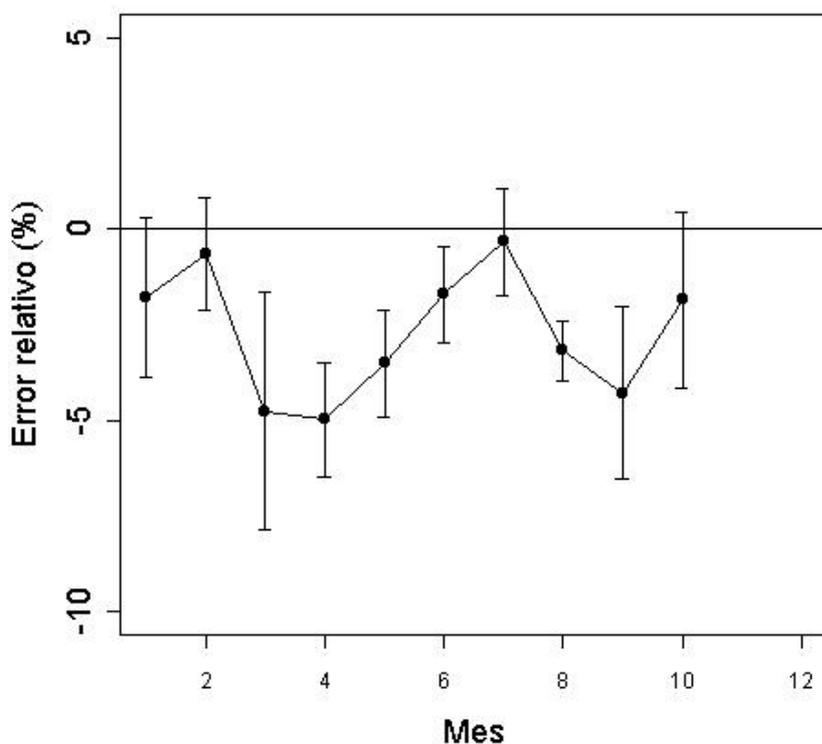
$$T_{medida} = (0.0002 \pm 0.0004) + (1.01 \pm 0.03) \times T_{calculada}$$

Se puede comprobar como la regresión lineal entre las dos transmisividades mejora sustancialmente cuando empleamos la expresión correspondiente a la regresión múltiple. Así, el coeficiente de correlación r^2 pasa de 0.76 a 0.92, así mismo el error atribuido a la pendiente de la recta de regresión baja de 0.007 a 0.003.

Por tanto, se puede decir que la correlación múltiple propuesta en el presente trabajo mejora claramente las estimaciones de transmisividad UV que se obtuvieron con el modelo original de Angström-Black. Esto hecho concuerda con los resultados obtenidos por Touré (2003) en la estación de medidas de Briançon (Francia). Por tanto, la transmisividad atmosférica UV

aparte de estar estrechamente relacionada con variables atmosféricas, como la nubosidad o el ozono, también esta influenciada por factores geométricos, como resulta de nuestro análisis con el coseno del ángulo cenital mínimo diario. Esto puede estar motivado por el hecho de que alguna de las variables atmosféricas que influyen fuertemente en la transmisividad, como puede ser el ozono estratosférico, tiene un ciclo anual bastante claro. Con objeto de analizar con más detalle las posibles diferencias entre los valores medidos y los calculados, mediante el modelo basado en la correlación múltiple, se realiza un análisis del error relativo cometido para 2002. Así, el error relativo medio para el periodo estudiado fue de -2.7 ± 0.6 %. El 74.5% de los días (213 de un total de 286) muestran errores relativos acotados entre $\pm 10\%$, pero además, en el 44% del total (127 días) el error relativo se encuentra acotado entre $\pm 5\%$.

Fig. 6 Evolución del error relativo entre la transmisividad medida y la calculada mediante el modelo de regresión múltiple para el año 2002.



En la figura 6 se representa la media mensual de dicho error. Se obtiene que el error relativo no es constante, experimentando cierto ciclo semestral, siendo su evolución totalmente diferente a la que se observaba con los errores del modelo tipo Angström-Black (figura 3). En el año 2002 alcanza los valores mínimos (en valor absoluto) durante los meses de invierno y verano, concretamente, -0.6 ± 1.5 % en febrero y -0.3 ± 1.4 % en julio. Por otra parte, los errores máximos se alcanzan durante los meses de abril y septiembre con -5.0 ± 1.5 % y -4.3 ± 2.2 , respectivamente. Una posible causa para explicar este ciclo semestral pudiera encontrarse en la evolución anual que experimenta la cantidad de ozono estratosférico. Es conocido que esta variable alcanza sus valores máximos en los meses de primavera y los mínimos durante el otoño. Así, importantes variaciones en la columna de ozono durante esos periodos pudieran no recogerse en los valores de transmisividad debido, principalmente, a la nubosidad.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado el análisis de dos métodos, uno basado en el modelo de Angström-Black y otro mediante un modelo de regresión múltiple, que permiten estimar valores diarios de transmisividad atmosférica de radiación ultravioleta eritemática. El estudio se ha aplicado a medidas realizadas en la ciudad de Badajoz durante los años 2001 y 2002 pudiendo concluirse que:

1. La variabilidad nubosa, factor de primer orden en la atenuación de la radiación UV, no está totalmente recogida en la variable horas de sol relativas, ya que, al considerar los valores del año 2001, la relación lineal de Angström-Black da un coeficiente de correlación bajo ($r^2=0.70$). Además, este resultado podría deberse al hecho de considerar únicamente una variable en la relación.
2. El resto de variables que atenúan la radiación UV y que, inicialmente, no fueron consideradas, como ozono y aerosoles, influyen considerablemente en la estimación de valores de transmisividad UV. Así, al representar la evolución del error relativo medio mensual entre el valor estimado y el medido se observa un claro ciclo anual, con errores máximos en invierno y mínimos en verano.
3. La correlación múltiple propuesta mejora ostensiblemente la estimación de la transmisividad UV. Así, se obtiene un excelente ajuste lineal entre los valores estimados y los medidos experimentalmente ($r=0.92$).
4. Por tanto, podemos decir que la correlación múltiple propuesta representa un excelente método para determinar valores de transmisividad UV, y por tanto, de irradiancia UV cuando se carezca de medidas, siempre y cuando se disponga de medidas de horas de sol y de cantidad de ozono. Además, esta relación puede ser muy útil para obtener mapas distribuidos de radiación UV.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación REN2002-04558-C04-03/CLI (CICYT), concedido por el MCyT.

Los autores agradecen al equipo de trabajo del TOMS en NASA Goddard Space Flight Center por proporcionar los datos satelitales empleados en este estudio.

D. Manuel Antón Martínez agradece al MECD la concesión de una beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU) con expediente AP2001-0845. Además, este autor agradece a los miembros del equipo de investigación IRSA perteneciente a la Universidad Joseph Fourier de Grenoble (Francia) la ayuda prestada durante su estancia de investigación en dicho centro.

REFERENCIAS

Bais, A.F., C.S. Zerefos, C. Meleti, I.C. Ziomas and K. Tourpali (1993) Spectral measurements of solar UVB radiation and its relations to total ozone, SO_2 and clouds. *J. Geophys. Res.* 98, 5199-5204

Blumthaler, M., Ambach, W., Cede A., and Stahelhin (1996) Attenuation of erythemal effective irradiance by cloudiness at low and high altitude in the Alpine region. *Photochem. Photobiol.* 63, 193-196

Bodoker, G.E., and McKenzie R.L. An algorithm for inferring surface UV irradiance including clouds effects. *J. Appl. Meteor.* 35, 1860-1877

Cancillo, M.L., Garcia, J.A., y Vilaplana, J.M. (2002). Comparacion de medidas de piranómetros de UV y espectrofotómetro Brewer, En libro de resúmenes de la III Asamblea Hispano-portuguesa de Geodesia y Geofísica (Valencia)

de La Casinière A., Touré M.L., Masserot T., Cabot T. and Pinedo Vega J.L. (2002) Daily doses of biologically active UV radiation retrieved from commonly available parameters. *Photochem. Photobiol.* 76(2)

Diffey, B.L.(1991) Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Physics in Medicine and Biology*, 36(3), 299-328

Estupinan, J.G. and Raman, S. (1996) Effects of clouds and haze on UV-B radiation. *J. Geophys. Res* 101, 16807-16816

Madronich, S. (1992) Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Geophys. Res. Lett.* 19, 37-40.

McKenzie, R.L., Matthews, W.A. and Johnston, P.V. (1991). The relationship between erythemal UV and ozone, derived from spectral irradiance measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2269-2272

McKinlay, A.F. y Diffey, B.L. (1987) A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal*, 6:21-27

Sfeir A.A. and Guarracino, G. (1981) *Ingénierie des systèmes solaires. Technique & Documentacion*

Tena, F., Martínez-Lozano, J.A. y Utrillas, M.P. (1998) Radiación solar ultravioleta y prevención del eritema. *Revista española de física*, 12, 18-24

Touré M.L. (2003) *Exposition UV spectrale: Instrumentation et modélisation. Tesis doctoral, Universidad Joseph Fourier de Grenoble. Francia*