

CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL ÍNDICE SOLAR ULTRAVIOLETA EN DÍAS TÍPICOS DEL VERANO SANTAFESINO

Enrique. D. Albizzati

Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral
Santiago del Estero 2654 - 3000 - Santa Fe – Argentina-Email: albizzati@fiquis.unl.edu.ar

RESUMEN. En este trabajo se calcula el índice solar ultravioleta (ISUV), al mediodía solar para la ciudad de Santa Fe. Se utilizan los modelos de Gueymard y de Madronich, en días de verano con cielo sin nubes. El valor máximo del ISUV global es mayor que 14, debido a muy bajos valores del espesor de ozono y de la turbidez atmosférica. El mínimo valor del ISUV global (9) se obtiene con valores medios o altos de ozono y elevada turbidez. Cuando el ISUV directo tiene su valor máximo (>8) y mínimo (<3), el cociente entre los ISUV directo y difuso vale 1,30 y 0,43 respectivamente. Los resultados muestran que al aumentar la capa de ozono la disminución del ISUV directo es más marcada que la que tiene el ISUV difuso. Además, sólo cuando la turbidez es muy baja el ISUV directo es mayor que el ISUV difuso.

Palabras clave: Índice UV - Ultravioleta - Solar -Radiación – Eritémica.

INTRODUCCIÓN.

La disminución de la cantidad de ozono estratosférico debido a las reacciones químicas provocadas durante muchos años por los gases clorofluorocarbonados ha provocado un aumento en los valores de las radiaciones solares UV incidentes sobre la Tierra, siendo especialmente preocupante el crecimiento de las radiaciones solares UVB, que son las que producen los mayores daños en los seres vivos (World Meteorological Organization, 1991; World Meteorological Organization, 1994).

Como consecuencia de lo antes expresado, en la región Litoral-Centro de la República Argentina, donde se encuentra la ciudad de Santa Fe (-31,65° S; -60,72° O), se han realizado estudios, mediciones y modelizaciones para el conocimiento de las radiaciones UV solares y sus efectos no deseados (Albizzati *et al.*, 2002; Piacentini *et al.*, 1995; Piacentini y Herman, 1996; Piacentini *et al.*, 1997; Luccini *et al.*, 1998; Piacentini *et al.*, 1999; Piacentini *et al.*, 2002; Albizzati., 2003).

En la piel humana la exposición inadecuada a las radiaciones solares UV da lugar a la aparición de enrojecimiento e inflamación. Los efectos asociados al denominado eritema humano, se determinan utilizando el espectro de acción eritémica de Mc Kinlay y Diffey (1987), que representa la sensibilidad de la piel frente a las radiaciones UV. Una combinación del espectro de acción y de la radiación solar UV incidente en la superficie terrestre, posibilita entonces calcular el valor de las radiaciones solares eritémicas, que son las que cuantifican los daños que son provocados, especialmente por las radiaciones solares UVB.

Asimismo, se emplea el índice ultravioleta solar (ISUV), el cual está directamente relacionado con las radiaciones solares eritémicas. El valor del índice es indicativo del riesgo derivado de la exposición a las radiaciones solares eritémicas, es decir de la probabilidad de la aparición de eritema en la piel al estar expuesta al Sol, sin ninguna protección. Cuanto mayor es el índice, para un determinado tipo de piel, el eritema se produce con un menor tiempo de exposición a las radiaciones solares.

En este trabajo se calcula el ISUV al mediodía solar, en Santa Fe. Para ello se seleccionan días de cielo despejado, y sólo unos pocos con muy escasas nubes, a fines de diciembre 2002 y en enero de 2003. En esta época del año, se reciben los más altos valores de las radiaciones solares, y el mediodía solar es próximo a la hora 13:00. Para determinar los índices global, directo y difuso se utiliza el modelo parametrizado SMARTS (Gueymard, 1995; Gueymard, 2001). Los resultados del ISUV global se comparan con los obtenidos con modelo TUV de transferencia radiativa (Madronich y Flocke, 1997) y se analiza la contribución que tienen las componentes directa y difusa de la radiación eritémica solar en el valor del ISUV global. Luego se determina la incidencia del espesor de la capa de ozono y de la turbidez atmosférica en los índices global, directo y difuso calculados para un día típico del verano santafesino.

CATEGORÍAS DE EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN.

Aunque las escalas empleadas para el ISUV varían actualmente en los distintos países del mundo, una escala que tiende a difundirse universalmente, es la aprobada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) entre otros organismos.

Esta escala se encuentra en la Tabla 1. La denominación de cada categorías está relacionadas con el riesgo derivado de la exposición inadecuada a las radiaciones solares, en cualquier época del año y en todo el planeta. Si el valor del ISUV global es 2, o menos de este valor, el riesgo es bajo, y si es 11 o más que este valor, es extremo. Los valores crecientes intermedios (moderado, alto y muy alto) indican el aumento gradual del riesgo por exposición al Sol.

Categoría	Baja	Moderada	Alta	Muy alta	Extrema
ISUV global	2 y menos de 2	3 , 4 y 5	6 y 7	8 , 9 y 10	11 y más de 11

Tabla 1. Categorías de exposición al Sol.

MODELO PARAMETRIZADO DE GUEYMARD.

Cálculo del índice solar UV.

Las radiaciones solares UV en un determinado lugar dependen del espesor de la capa de ozono, del ángulo cenital, de la distancia entre la Tierra y el Sol, y de la presencia de otros gases y aerosoles en la atmósfera. El conocimiento de los procesos de absorción y dispersión de la radiación solar en la atmósfera posibilita contar en la actualidad con modelos teóricos de diferente complejidad para el cálculo de las radiaciones solares eritémicas y del ISUV .Estos modelos fueron empleados para evaluar las radiaciones solares UV y verificados satisfactoriamente, por lo que pueden ser considerados confiables y útiles para efectuar predicciones o reemplazar en muchos casos a las mediciones (Koepke *et al.*,1998).

El modelo de Gueymard se desarrolló poniendo especial atención en los rangos de radiación solar UV y visible. Para los procesos de extinción considera funciones muy exactas, teniendo en cuenta el efecto de la temperatura y la humedad sobre los parámetros de cálculo. Los coeficientes de absorción de la radiación solar se basan en datos espectroscópicos recientes. El modelo utiliza un espectro de radiación solar extraterrestre de alta resolución en el rango UV del espectro, calculando la radiación cada 1 nm. Los resultados predichos con el modelo fueron verificados con mediciones espectrales de la radiación solar y mediante su comparación con los obtenidos modelos más complejos de transferencia radiativa en la atmósfera (Gueymard, 1995; 2001).

En el modelo, la radiación solar global incidente sobre la superficie horizontal ($I_{G,\lambda}$) es la suma de la radiación directa y la radiación difusa ($I_{d,\lambda}$). La radiación directa es la radiación directa normal ($I_{DN,\lambda}$) multiplicada por el coseno del ángulo cenital (θ_z).

$$I_{G,\lambda} = I_{DN,\lambda} \cos \theta_z + I_{d,\lambda} \quad (1)$$

La radiación solar directa normal, depende de la radiación solar extraterrestre, y de los procesos atmosféricos: dispersión Rayleigh, dispersión y absorción de aerosoles, absorción del ozono, , absorción del vapor de agua y de otros gases también presentes. Por otra parte, la radiación solar difusa ($I_{d,\lambda}$) es la suma de la componente de dispersión de las moléculas o de Rayleigh, la dispersión de los aerosoles, y la componente de múltiple reflexión entre el aire y el suelo.

Con respecto a la radiación solar eritémica, esta radiación global ($I_{G,\lambda}^e$) en cada punto del espectro solar se calcula como el producto entre la radiación solar global y un factor (F_λ), que representa el efecto de la radiación solar sobre la piel humana.

$$I_{G,\lambda}^e = I_{G,\lambda} F_\lambda \quad (2)$$

Las radiaciones solares eritémicas originadas en las componentes directa ($I_{D,\lambda}^e$)y difusa ($I_{d,\lambda}^e$) se calculan mediante

$$I_{D,\lambda}^e = I_{DN,\lambda} \cos \theta_z F_\lambda \quad (3)$$

$$I_{d,\lambda}^e = I_{d,\lambda} F_\lambda \quad (4)$$

El factor F_λ , variable con la longitud de onda de la radiación solar, se halla con las ecuaciones (Mc Kinlay y Diffey, 1987):

$$F_\lambda = 1 \quad (\lambda < 299 \text{ nm}) \quad (5)$$

$$F_\lambda = 10^{0,094(298-\lambda)} \quad (299 \text{ nm} \leq \lambda \leq 328 \text{ nm}) \quad (6)$$

$$F_\lambda = 10^{0,015(139-\lambda)} \quad (\lambda > 328 \text{ nm}) \quad (7)$$

Integrando los valores de las radiaciones eritémicas correspondientes a cada longitud de onda del espectro solar, se obtienen las radiaciones eritémicas global, directa y difusa. Los valores del ISUV global, directo y difuso se calcula multiplicando por cuarenta (40) el valor de la respectiva radiación solar eritémica expresada en las unidades W/m^2 . Para calcular los ISUV directo y difuso se efectuaron las correspondientes adecuaciones del programa computacional originalmente disponible.

Datos y parámetros de cálculo.

En el cálculo del ISUV es necesario incorporar para ambos modelos una serie de variables ambientales y atmosféricas características, en el período de tiempo analizado. El espesor de la capa de ozono se obtiene de datos medidos por el sensor TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)/NASA a bordo del satélite Earth Probe, disponibles en página web de INTERNET. El albedo del suelo para la radiación UV solar se adopta igual a 0,06, dadas las características de la zona.

Para el modelo de Gueymard, el coeficiente de turbidez de la atmósfera (β) se determina correlacionando los valores del mismo con W, que es el vapor de agua precipitable (Albizzati *et al.*, 2000; Albizzati *et al.*, 2002; Altamirano *et al.*, 1996; Altamirano *et al.*, 1998). W se estima con la temperatura y de la humedad relativa ambientes (Leckner, 1978). Otros parámetros empleados en el modelo parametrizado son el albedo de dispersión de aerosol (0,81) y el factor de asimetría de aerosol (0,70), que responden a una atmósfera rural-urbana (Gueymard, 1995), y se considera despreciable la absorción del dióxido de nitrógeno de la atmósfera.

En la Tabla 2 se listan los datos y parámetros para calcular el ISUV. Además de las variables antes citadas influyen en el valor del índice al mediodía, la posición del Sol en el cenit ($\theta_{z,m}$), y la radiación solar incidente, que es el producto entre el factor (D) relacionado con distancia entre la Tierra y el Sol, y la radiación solar extraterrestre (H_0).

Día	D H ₀ (W/m ²)	$\theta_{z,m}$ (°)	O ₃ (unidades Dobson)	W (cm)	β
21/12/02	1411,4	8,20	266	3,41	0,116
24/12/02	1411,8	8,24	271	1,93	0,026
27/12/02	1412,0	8,34	261	5,42	0,286
2/1/03	1412,1	8,72	267	3,39	0,114
4/1/03	1412,0	8,90	267	4,59	0,209
7/1/03	1411,8	9,23	263	3,74	0,141
13/1/03	1411,0	10,05	266	5,44	0,287
16/1/03	1410,4	10,55	252	5,11	0,256
18/1/03	1410,0	10,92	246	1,78	0,018
23/1/03	1408,6	11,94	264	2,65	0,066
27/1/03	1407,3	12,86	255	4,00	0,160
31/1/03	1405,8	13,87	256	5,28	0,272

Tabla 2. Datos y parámetros para calcular el ISUV.

Los cálculos del ISUV global que emplean el modelo de Madronich se efectúan con los valores de la turbidez de la atmósfera derivados del programa computacional al cual se accede directamente por INTERNET (<http://www.acd.ucar.edu/models>). En los cálculos sí se incluyen los valores tabulados del espesor de ozono de la tabla, y el valor del albedo terrestre.

RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN.

Índice solar ultravioleta global.

En la Figura 1 se representan los valores del ISUV global calculados con los modelos de Gueymard y de Madronich. Se observa que obtienen muy elevados valores del índice en el mediodía solar del verano santafesino. En los días seleccionados el índice calculado es superior a 9 por lo que siempre es muy alto o extremo, según la escala de la OMM, OMS y PNUMA.

El valor máximo del ISUV global es mayor que 14, el día 18 de enero de 2003, y se debe al muy bajo espesor de la capa de ozono (246 unidades Dobson) y a la relativamente baja temperatura y humedad. En este día el cielo es muy límpido y es muy baja la turbidez de la atmósfera ($\beta = 0,018$).

Según el modelo de Gueymard, el citado ISUV tiene valores mayores a 11, con categoría de extremos, en aquellos días en los cuales hay muy bajo valor del espesor de la capa de ozono, niveles bajos o medios de la turbidez atmosférica, o bien se presentan ambas situaciones simultáneamente. Con respecto al menor valor del ISUV global, que es 9, se corresponde con valores medios o altos de la capa de ozono, y una elevada turbidez atmosférica. En estos días, como consecuencia de la muy alta temperatura y humedad, se presentan cielos muy turbios.

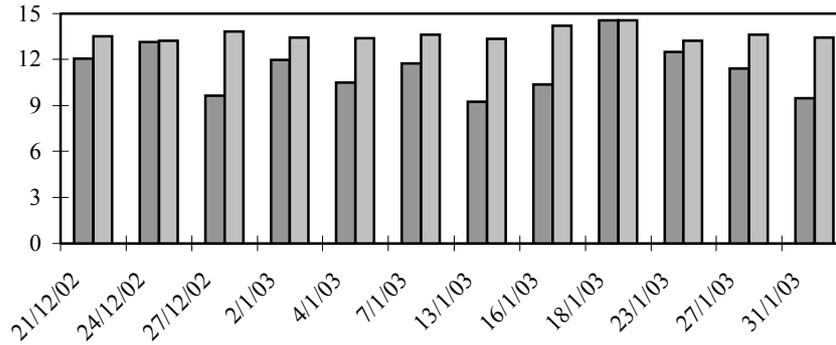


Figura 1. Índice ultravioleta solar global calculado (modelo de Gueymard , modelo de Madronich).

Con el modelo de Madronich los resultados muestran que el ISUV global es siempre superior a 13. Esto puede explicarse porque el citado modelo, tal como fue utilizado, no permite contemplar la diaria variación del coeficiente de turbidez de la atmósfera. Puede decirse que los valores obtenidos con el modelo de Madronich son siempre próximos a los calculados con el modelo de Gueymard si se consideran muy bajos coeficientes de turbidez, como se verifica en los días 24/12/02 y 18/1/03.

Analizando todos los resultados obtenidos, aunque los más altos niveles del espesor de la capa de ozono y de la turbidez de la atmósfera provocan un decrecimiento del ISUV (desde 14 hasta 9), se mantienen presentes importantes riesgos en la exposición a las radiaciones solares UV sin tomar adecuadas medidas de protección.

Índices solares ultravioleta directo y difuso.

En la Figura 2 se representan los índices solares ultravioleta directo y difuso calculados con el modelo de Gueymard.

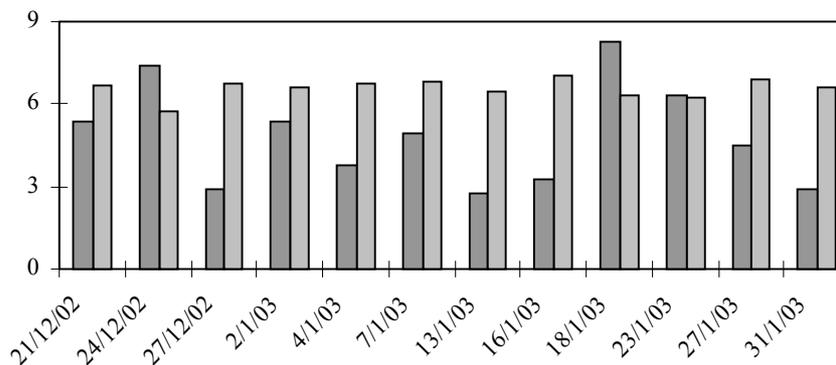


Figura 2. Índices solares ultravioleta calculados con el modelo de Gueymard (directo , difuso).

En la figura se nota que sólo en los días en que la turbidez atmosférica es muy baja, el ISUV directo supera al ISUV difuso. Según el modelo el día 18/1/03 el ISUV directo alcanza su valor máximo (superior a 8), mientras que la relación entre los ISUV directo y difuso es igual a 1,30.

El 13 de enero de 2003 el ISUV directo es mínimo (menor que 3), y el cociente entre el ISUV directo y difuso es 0,43 presentándose este día la máxima turbidez y un elevado espesor de ozono. Los referidos índices directo y difuso contribuyen en forma semejante al valor del ISUV global cuando la turbidez es $\beta = 0,066$ (día 23/1/03).

Efecto del espesor de la capa de ozono y de la turbidez atmosférica.

Dado que siempre existe una incertidumbre asociada a la metodología empleada en la determinación de cada parámetro de cálculo, en función de la influencia que tienen sobre el ISUV, se analiza el efecto de los valores de la capa de ozono y del coeficiente de turbidez. Para efectuar el citado análisis se utiliza el modelo de Gueymard, aplicado el 7 de enero de 2003, variando sólo una de las condiciones ambientales que son representativas de este día típico del verano santafesino. Los resultados obtenidos se representan en la Figura 3.

En la Figura 3.a se verifica que siendo $\beta = 0,141$, con el aumento del espesor de la capa de ozono decrecen los valores de los ISUV directo, difuso y global, disminuyendo en forma más marcada el ISUV directo que el ISUV

difuso. El ISUV global tiene valores máximo y mínimo prácticamente iguales a 13 y 11 respectivamente, con categoría de extremo riesgo de exposición.

En relación con el efecto del crecimiento de la turbidez, en la Figura 3.b se nota que para el espesor de ozono igual a 263 unidades Dobson, cuando el coeficiente es superior a 0,075 el valor del ISUV difuso es mayor que el ISUV directo. El ISUV global decrece hasta 9, para el valor máximo de β , siendo aún muy alto el riesgo de exposición a la radiación solar.

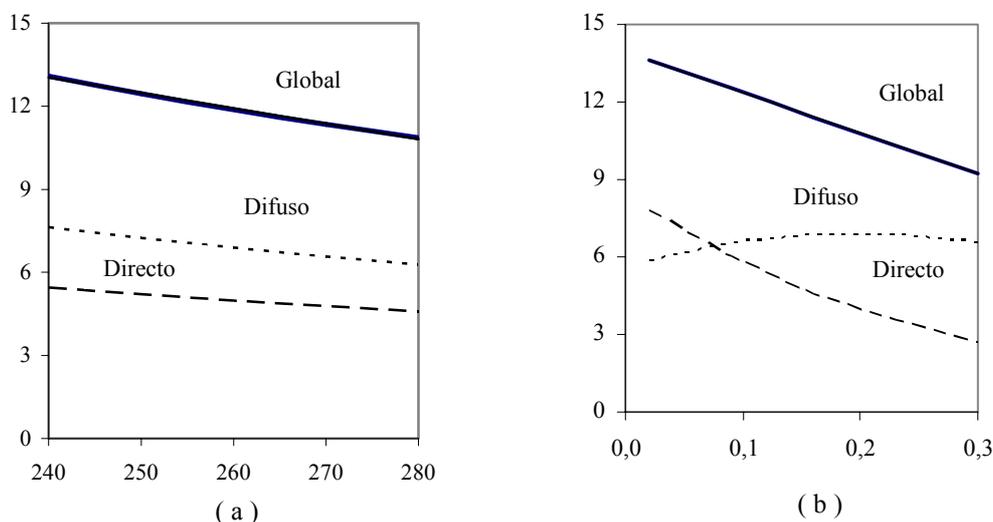


Figura 3. Dependencia del ISUV el día 7/1/03 : a) con el espesor de ozono en unidades Dobson, b) con el coeficiente de turbidez atmosférica.

CONCLUSIONES

A partir de los cálculos del ISUV realizados, para Santa Fe, al mediodía solar y en condiciones de cielos prácticamente sin nubes, se concluye que en días del verano:

- El ISUV global es siempre superior a 9, y según la escala de la OMM, OMS y PNUMA, es muy alto o extremo.
- El valor máximo del ISUV global, mayor que 14, se debe al muy bajo espesor de ozono (246 unidades Dobson), y a la muy baja la turbidez atmosférica ($\beta = 0,018$).
- El ISUV global es mayor a 11, por lo que es extremo, si hay muy bajo valor del espesor de ozono, niveles bajos o medios de la turbidez atmosférica, o si se presentan ambas situaciones simultáneamente.
- Si bien más altos niveles del espesor de ozono y de la turbidez provocan un decrecimiento marcado del ISUV global siempre son muy importantes los riesgos de la exposición a las radiaciones solares UV.
- Cuando el ISUV directo alcanza su valor máximo (superior a 8), la relación entre los ISUV directo y difuso es 1,30, y cuando es mínimo (menor que 3), dicho cociente es 0,43.
- Se verifica que al aumentar la capa de ozono la disminución del ISUV directo es más marcada que la que tiene el ISUV difuso.
- En días típicos, sólo si el coeficiente de turbidez de la atmósfera es muy bajo, menor a 0,07 aproximadamente el ISUV directo contribuye en mayor medida que el índice difuso al valor del ISUV global.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Centro de Información Meteorológica de la Facultad de Ingeniería y Recursos Hídricos de la Universidad Nacional del Litoral, el suministro de los datos de temperatura y humedad relativa usados en este trabajo.

REFERENCIAS

- Albizzati E., Altamirano L., León R. y Alfano O. (2000). Radiación solar sobre planos inclinados con cielos sin nubes y de baja turbiedad. En *Proceeding ISES Millennium Solar Forum 2000*, pp. 587-591.
- Albizzati E., Rossetti G. y Alfano O. (2002). Mediciones de la radiación solar UVB y predicción de la radiación solar UV eritémica bajo cielos claros y sin nubes. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, pp. 11.25 - 11.30.
- Albizzati E. (2003). Índice solar ultravioleta y radiaciones solares eritémicas con cielos sin nubes en el verano". *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12, 31-37 (2003).
- Altamirano L., Albizzati E. y Alfano O. (1996). Estimación del coeficiente de turbidez de Angström mediante la radiación solar directa en el mes de julio para la ciudad de Santa Fe, Argentina. En *Actas de la 19° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, pp. 4.13 – 4.16.
- Altamirano L., León R., Albizzati E. y Alfano O. (1998). Radiación solar instantánea y horaria sobre planos inclinados: predicciones teóricas y determinaciones experimentales. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2, 2, 11.5 - 11.8.
- Gueymard C.A. (1995). SMARTS2, A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine. Professional Paper FSEC-PF-270-95. Florida Solar Energy Center, Cocoa, Fl.
- Gueymard C.A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71, 325-346.
- Koepke P, Bais AF, Balis D, Buchwitz M, de Backer H, de Cabo X, Eckert P, Eriksen P, Gillotay D, Koskela T, Lapeta V, Litynska Z, Lorente J, Mayer B, Renauld A, Ruggaber A, Schauburger G, Seckmeyer G, Seifert P, Schmalwieser A, Schwander H, Vanicek K y Weber M. (1998). Comparison of models used for UV index calculations. *Photochem. Photobiol.*, 67, 657-662.
- Leckner B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface-elements of a model. *Solar Energy*, 20, 143-150.
- Luccini E., Abalone R., y Piacentini R. (1998). Análisis comparativo de dosis eritémicas solares incidentes sobre Pilar y Rosario a través de mediciones y modelos matemáticos. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 19-24.
- Madronich, S. y Flocke S. (1997). Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the Earth's surface, in *Solar Ultraviolet Radiation - Modeling, Measurements & Effects* (C. S. Zerefos and A. F. Bais, eds.) NATO ASI Series I: Global Environmental Change, Vol. 52, 23-48. Springer-Verlag. Berlin.
- McKinlay, A.F. y Diffey B.L. (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal*, 6, 17-22.
- Piacentini R., Abalone R., Nuñez L. y Talamoni G. (1995). Comparación entre mediciones en Rosario (Argentina) y predicciones de las dosis eritémicas solares en verano-otoño. En *Actas de la 18° Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 1, pp. 7-14.
- Piacentini R. y Herman J. (1996). Radiaciones solares ultravioletas sobre Sudamérica y sus mares adyacentes. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1, 7-9.
- Piacentini R., Alfano O. y Albizzati E. (1997). Radiaciones ultravioletas solares global y difusa: Medición y modelización en el período agosto 1995-mayo 1997 para Rosario (Argentina). *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1, 1, 181-184.
- Piacentini R., Alfano O. y Albizzati E. (1999). Mediciones y predicciones de la relación entre la radiación solar ultravioleta y la radiación solar total sobre Rosario (Argentina) durante el año 1995. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, 17-26.
- Piacentini R., Alfano O., Albizzati E., Luccini E. y Herman J. (2002). Solar ultraviolet irradiance for clear sky days incident at Rosario, Argentina: measurements and model calculations. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107, 10.1029/2001JD000586.
- World Meteorological Organization (1991), Scientific Assessment of Stratospheric Ozone, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 25, Geneva.
- World Meteorological Organization (1994), Scientific Assessment of Stratospheric Ozone, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 37, Geneva.

ABSTRACT. In this work, ultraviolet solar index (UVSI) is calculated at solar noon in Santa Fe city. The models of Gueymard and Madronich are used for summer days with cloudless skies. The highest value of global UVSI is 14 due to very low values of thickness of ozone and turbidity of atmosphere. The minimum value of global UVSI (9) is obtained with medium or high values of ozone and high turbidity. The ratio between direct and diffuse UVSI is 1.30 and 0.43 when the global UVSI is maximum (>8) and minimal (<3) respectively. The results show that as the ozone layer increases direct UVSI diminishes more markedly than diffuse UVSI does. Furthermore only when turbidity is very low direct UVSI is greater than diffuse UVSI.

Keywords: UV index - Ultraviolet - Solar – Radiation - Erythema.