

# Comparación de modelos simples para el estudio de la radiación eritemática global sobre planos inclinados

J.A. Martínez-Lozano<sup>(1)</sup>, M.J. Marín<sup>(2)</sup>, A.R. Esteve<sup>(1)</sup>, V. Estellés<sup>(1)</sup>, F. Tena<sup>(1)</sup>, J. Cañada<sup>(3)</sup> y M.P. Utrillas<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Grupo de Radiación Solar. Departamento de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia.

<sup>(2)</sup>Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), Charles R. Darwin 14, 46980 Paterna, Valencia.

<sup>(3)</sup>Grupo de Radiación Solar. Departamento de Termodinámica Aplicada, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia.

jmartine@uv.es

## Introducción

Los efectos de la radiación ultravioleta sobre los seres vivos han merecido una atención considerable en los últimos veinte años [Frederick y Lubin, 1988; Scotto *et al.*, 1988], desarrollándose guías y recomendaciones sobre los umbrales de exposición a la radiación UV para evitar daños puntuales o crónicos [WMO, 1998; ICNIRP, 2004].

De todos los efectos que desencadena la radiación UV en los seres humanos, el más común es el eritema o quemadura solar. La respuesta de la piel a esta agresión es el espectro de acción eritemático [McKinlay y Diffey, 1987; CIE, 1998]. La radiación UV convolucionada con esta curva recibe el nombre de radiación eritemáticamente activa o radiación eritemática (UVER).

La medida de la irradiancia eritemática incidente sobre superficies horizontales no es siempre el método más adecuado para poder estimar la dosis real recibida por los seres humanos. Por este motivo, el conocimiento de la radiación incidente sobre superficies inclinadas resulta fundamental para estudios dosimétricos.

Para poder modelizar la radiación incidente sobre un plano distinto al horizontal es preciso calcular sus componentes directa y difusa. La determinación de la irradiancia directa, si nos limitamos a intervalos temporales pequeños, inferiores a una hora, se reduce a un simple problema geométrico. La estimación de la difusa, sin embargo, es más compleja, y debe tener en cuenta factores de configuración y la anisotropía de la bóveda celeste.

En este trabajo se ha estimado la radiación sobre planos inclinados en una primera aproximación, suponiendo para ello que los modelos desarrollados para la irradiancia difusa de banda ancha son válidos en el intervalo espectral de la UVER. Estos modelos, en su gran mayoría, fueron desarrollados en las

décadas de los 70 y los 80 [Utrillas *et al.*, 1991]. De entre ellos hemos elegido los que se siguen utilizando en trabajos recientes [Loutzenhiser *et al.*, 2007; Notton *et al.*, 2005; Díez-Mediavilla *et al.*, 2005]. Los resultados obtenidos en la modelización se han comparado con los valores experimentales.

## Instrumentación

La medida de la UVER se ha realizado con radiómetros UVB-1 de YES [Dichter *et al.*, 1993]. Son instrumentos de banda ancha, tipo Robertson-Berger cuyo intervalo espectral abarca el rango de UVB y UVA y cuya respuesta espectral es similar al espectro de acción eritemático.

Para estudiar los efectos de la irradiancia sobre planos inclinados, se ha diseñado y puesto en funcionamiento una plataforma giratoria instalada en la terraza de Facultat de Física por el Grupo de Radiación Solar de Valencia. El dispositivo se construyó en base a dos premisas: por un lado, realizar medidas de UVER sobre planos inclinados; por otro se deseaba que los radiómetros tomaran medidas encarados hacia cuatro ángulos azimutales, correspondientes a las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste. El inconveniente era que sólo se disponía de dos radiómetros. La solución fue diseñar un dispositivo, consistente en una plataforma capaz de girar 90° sobre su propio eje, de tal forma que, si se disponen los piranómetros en orientaciones opuestas, son capaces de medir en una posición hacia el Norte y el Sur y, en la otra, hacia el Este y el Oeste (Figura 1). Los radiómetros están inclinados un ángulo próximo a la latitud de Burjassot (Valencia) (39.5°), que según distintos estudios es el ángulo óptimo para captar la máxima radiación en planos inclinados [Hartley *et al.*, 1999]. A través de dos temporizadores se consigue que la plataforma gire cada 5 minutos, alternando ambas posiciones.



**Figura 1.** Dispositivo experimental para la medida de la UVER sobre planos inclinados.

### Desarrollo experimental y resultados

Para el cálculo de la irradiancia total sobre un plano inclinado, es necesario conocer las distintas componentes de la radiación solar. Así, la irradiancia sobre un plano inclinado un ángulo  $\beta$ , será la suma de la irradiancia directa ( $I_{b\beta Ap}$ ), la difusa del cielo ( $I_{d\beta Ap}$ ) y la difusa reflejada por el suelo ( $I_{r\beta Ap}$ ):

$$I_{T\beta Ap} = I_{b\beta Ap} + I_{d\beta Ap} + I_{r\beta Ap} \quad (1)$$

La irradiancia directa se puede calcular a partir de:

$$I_{b\beta Ap} = I_n \cos \theta \quad (2)$$

siendo  $\theta$  el ángulo que forma la normal a la superficie con la dirección de los rayos solares.

La contribución de la irradiancia difusa se calcula a partir de:

$$I_{r\beta Ap} = I_{T00} \rho \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (3)$$

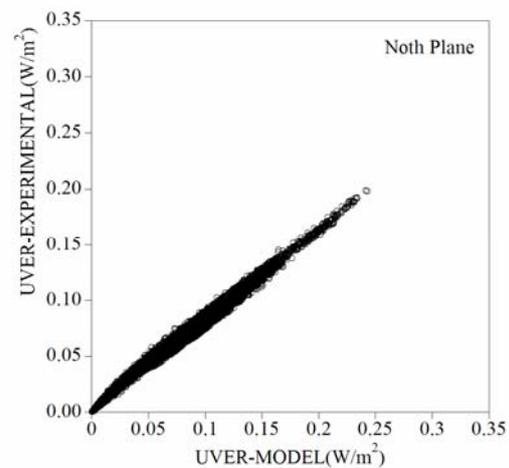
siendo  $\rho$  el albedo del suelo.

La diferencia entre los distintos modelos radica en la forma de calcular la irradiancia difusa del cielo. En este trabajo, Los modelos que se han utilizado para simular la UVER han sido el modelo Isótropo [Liu y Jordan, 1961], modelo de Klucher [1979], modelo de Hay [1979], modelo de Muneer [1997] y el modelo de Reindl [1990].

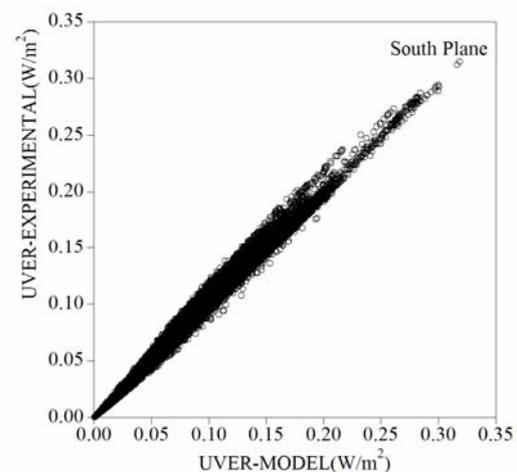
Para la comparación con los valores simulados se ha utilizado una base de datos experimentales de los años 2005 y 2006. Este análisis se ha realizado en las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste con el dispositivo antes descrito.

Posteriormente, se han analizado las discrepancias entre los valores modelizados y experimentales mediante los parámetros estadísticos MBD, MAD y RMSD que indican la desviación relativa entre ambos.

Se han comparado los valores de la irradiancia UVER global medidos experimentalmente sobre planos inclinados con los estimados por los modelos. Para obtener la irradiancia UVER global modelizada se han sumado los valores proporcionados por la expresión (2) que da la radiación directa con la expresión (3) que proporciona la radiación reflejada por el suelo y con los correspondientes valores de UVER difusa simulados con los modelos. Se ha considerado un albedo medio del suelo de 0.2. Los resultados de los indicadores estadísticos al comparar los valores estimados con los medidos experimentalmente se encuentran resumidos en la Tabla I. En las Figuras 2 y 3 se muestran a modo de ejemplo los valores obtenidos con el modelo de Hay para los planos Norte y Sur frente a los experimentales.



**Figura 2.** Comparación de valores medidos y estimados con el modelo de Hay de la UVER global sobre el Plano Norte.



**Figura 3.** Comparación de valores medidos y estimados con el modelo de Hay de la UVER global sobre el plano Sur.

Modelo (Norte) (%)	MBD	MAD	RMSD
Isótropo	8.5	10.0	13.5
Klucher	10.9	12.1	15.8
Hay	8.6	10.2	13.7
Muneer	7.6	9.6	13.1
Reindl	10.2	11.4	14.9

Modelo (Sur) (%)	MBD	MAD	RMSD
Isótropo	-0.5	4.8	8.4
Klucher	4.0	5.0	9.0
Hay	-0.7	4.6	7.2
Muneer	-1.1	4.7	8.2
Reindl	0.8	5.0	8.4

Modelo (Este) (%)	MBD	MAD	RMSD
Isótropo	5.3	9.1	13.7
Klucher	8.7	9.2	15.6
Hay	5.2	9.0	13.3
Muneer	4.4	8.8	13.2
Reindl	6.5	9.4	14.3

Model (Oeste) (%)	MBD	MAD	RMSD
Isótropo	2.8	8.6	12.4
Klucher	6.2	7.7	12.9
Hay	2.5	8.5	12.7
Muneer	1.7	8.4	12.3
Reindl	4.0	8.8	12.9

**Tabla I.** Valores de los indicadores estadísticos MBD, MAD y RMSD relativos, obtenidos por comparación de los valores experimentales de UVER global con los modelizados.

Analizando el plano Norte, los valores de RMSD para la UVER global están comprendidos entre el 13 % para el modelo de Muneer y el 16 % con el modelo de Klucher. Para el plano Sur los resultados son excelentes, obteniéndose para casi todos los modelos, a excepción de el de Klucher, valores comprendidos entre el 7 % y el 8 %. Para los planos Este y Oeste se obtienen valores que rondan el 13-16% para el Este y el 12-13% para el Oeste.

Se observa como la diferencia entre los distintos modelos analizados no es significativa en ninguna de las orientaciones. Sin embargo, se deduce que los modelos estudiados reproducen adecuadamente los valores experimentales registrados en el plano Sur, donde el MAD es del 5 % para todos ellos. El resto de orientaciones presentan valores de MAD sensiblemente mayores, alcanzando el 10 % en el plano Norte.

## Conclusiones

Se ha modelizado la irradiancia UVER global para planos inclinados a partir de modelos que fueron desarrollados para estimar la irradiancia en planos

distintos del horizontal y en banda ancha. Los modelos utilizados han sido el Isótropo, Klucher, Hay, Muneer y Reindl. Los resultados de la simulación han sido comparados con los valores experimentales obtenidos para los años 2005 y 2006 para las orientaciones Norte, Sur, Este y Oeste y en planos con una inclinación similar a la latitud.

Se han calculado los parámetros estadísticos MBD, MAD y RMSD para comparar los valores de UVER global calculada con los modelos propuestos con respecto a los valores experimentales. En general los resultados muestran que las desviaciones son mucho menores que las obtenidas al aplicar estos mismos modelos a valores del rango visible, que es el intervalo para el que se desarrollaron los modelos utilizados en este trabajo.

Los valores de RMSD están comprendidos entre el 7 % y el 16 % correspondiendo el caso más favorable al plano Sur y el más desfavorable al Norte. En este caso, el modelo que más discrepancia presenta es el de Klucher, obteniendo para el resto de modelos resultados muy próximos entre sí. El que mejores resultados ofrece es el de Muneer. En cualquier caso no se aprecian diferencias significativas entre los modelos analizados.

También se ha observado como todos los modelos analizados reproducen con bastante precisión la UVER en el plano Sur, con un MAD en torno al 5 % para irradiancia global, obteniéndose para los demás planos discrepancias mayores, que pueden alcanzar el 10 % como en el caso del plano Norte. Por lo tanto, es necesaria la búsqueda de algún otro modelo o adaptar los ya existentes al rango de la UVER con el fin de minimizar los errores que se obtienen para los planos diferentes al Sur, proporcionando así buenos resultados para todas las orientaciones.

## Bibliografía

CIE. Erythema reference action spectrum and standard erythema dose. Vienna. ISO 17166:1999/CIE S007-1998.

Dichter, B.K., A.F. Beaubien y D.J. Beaubien. Development and Characterization of a New Solar Ultraviolet-B Irradiance Detector. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **10**, 337-344, 1993.

Díez-Mediavilla, M., A. de Miguel y J. Bilbao. Measurements and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain). *Energy Conversion Management* **46**, 2075-2092, 2005.

Frederick, J.E. y D. Lubin. The budget of biologically active radiation in the earth atmosphere

system. *Journal of Geophysical Research* **93**, 3825-3832, 1988.

Hartley, L.E., J.A. Martínez-Lozano, M.P. Utrillas, F. Tena y R. Pedrós. The optimisation of the angle of inclination of a solar collector to maximise the incident solar radiation. *Renewable Energy* **17**, 291-309, 1999.

Hay, J.E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy* **23**, 301-307, 1979.

ICNIRP. Guidelines on limits of exposure of UV radiation. *Health Physics* **87**, 171-186, 2004.

Klucher, T.M. Evaluations of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* **26**, 179-184, 1979.

Liu, B.Y.H. y R.C. Jordan. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASRHAE Journal* **3**, 53-59, 1961.

Loutzenhiser, P.G., H. Manz, C. Felsman, P.A. Strachan, T. Frank y G.M. Maxwell. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy* **81**, 254-257, 2007.

McKinlay, A.F. y B. L. Diffey. A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE Journal* **6**, 17-22, 1987.

Muneer, T. Solar radiation and daylight models for the energy efficient design of buildings. *Architectural Press*, Oxford, 1997.

Notton, G., C. Cristofari y P. Poggi. Performance evaluation of various hourly slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio. *Energy Conversion Management* **47**, 157-173, 2005.

Reindl, D.T., W.A. Beckmann y J.A. Duffie. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* **45**, 1-7, 1990.

Scotto, J., G. Cotton, F. Urbach, D. Berger y T. Fears. Biologically effective ultraviolet radiation: surface measurements in the United States. 1974 to 1985. *Science* **239**, 762-764, 1988.

Utrillas, M.P., J.A. Martínez-Lozano y A.J. Casanovas. Evaluation of models for estimating solar irradiation on vertical surfaces at Valencia, Spain. *Solar Energy* **47**, 223-229, 1991.

World Meteorological Organization (WMO). Report of the WMO-WHO Meeting of Experts on Standardization of UV Indices and Their Dissemination to the Public. WMO Global Atmosphere Watch No. 127, WMO/TD No. 921, Geneva. 1998.