

COMPARACIÓN DE MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA INCIDENTE EN EL PLANO HORIZONTAL

Luis L. Altamirano¹, Enrique D. Albizzati¹, Orlando M. Alfano²

1 Facultad de Ingeniería Química (UNLitoral) - Stgo. del Estero 2654 -3000-
Santa Fe - Argentina - Fax: 042-571162 - E-mail: aleo@fiquis.unl.edu.ar

2 INTEC (CONICET-UNLitoral) - Güemes 3450- 3000 - Santa Fe - Argentina

RESUMEN

Se comparan dos modelos teóricos (Gueymard, 1995 y Bird y Riordan, 1986) para predecir la radiación solar ultravioleta al mediodía en días típicos de cielo límpido sin nubosidad para Santa Fe, Argentina. Se hallan los valores de la radiación global, directa y difusa, y de cada una de las componentes de ésta originadas en las dispersiones de Rayleigh, de aerosol y la reflexión aire-suelo. Con los resultados de ambos modelos se verifica que no hay diferencias notables en la radiación directa, especialmente para los rangos UVA y UVT. En cambio, los valores de radiación difusa predichos por Gueymard superan a los de Bird y Riordan, excepto en el UVB y para un elevado ángulo cenital. Con ambos modelos se comprueba que existe una muy importante contribución de la radiación difusa, siendo inferior a la radiación directa solo en el UVA y UVT para un bajo ángulo cenital.

INTRODUCCIÓN

Resulta de gran interés para el hombre el conocimiento de la variación de la radiación ultravioleta (UV) incidente sobre la superficie terrestre. En la actualidad se estudian tanto los efectos perjudiciales que acusa el aumento de la radiación UV sobre los seres vivos y los materiales, como sus aplicaciones para la degradación de especies químicas en procesos fotolíticos (Rossetti y colab., 1998) y fotocatalíticos (Cabrera y colab., 1997). Dadas las dificultades que se presentan para realizar mediciones de la radiación solar UV, tales como la confiabilidad, costo y mantenimiento del instrumento necesario, resulta muy conveniente disponer de modelos teóricos con el fin de predecir la radiación solar UVB (290-315nm), UVA (315-400nm) y UVT (290-400nm).

En este trabajo se aplican los modelos teóricos propuestos por Gueymard (1995) y Bird y Riordan (1986) para estimar la radiación solar global y sus componentes directa y difusa sobre el plano horizontal. Los cálculos son válidos en condiciones de cielo claro y sin nubes, para el ámbito rural cercano a la ciudad de Santa Fe, Argentina.

Al comparar ambos modelos se analizan además de las componentes directa y difusa, las que contribuyen al valor de esta última, debidas a la dispersión de Rayleigh, de aerosoles, y a la reflexión entre el aire y el suelo.

Debe hacerse notar que el modelo de Gueymard ha sido desarrollado poniendo especial atención en los rangos de radiación solar UV y visible, habiéndose verificado su comportamiento a través de modelos de transferencia radiativa en la atmósfera y de mediciones realizadas con espectrorradiómetros. Por dicho motivo, se toma este modelo como referencia para llevar a cabo las comparaciones realizadas en este trabajo.

MODELOS PARA LA PREDICCIÓN

La predicción de la radiación solar UV sobre la superficie terrestre en días de cielo límpido sobre el plano horizontal se realiza con los modelos espectrales de Gueymard (1995) y Bird y Riordan (1986). Éste último ya ha sido aplicado con algunas modificaciones, por los autores de este trabajo en todo el espectro solar (Albizzati y colab., 1997), y en el rango ultravioleta solar (Piacentini y colab., 1997).

El espectro original de Bird y Riordan tiene un rango de 5 nm hasta la longitud de onda de 350 nm, de 10 nm hasta 570 y luego posee intervalos variables con solo 122 puntos de cálculo en todo el espectro solar. Este modelo incluye para el rango UV un factor de corrección menor a la unidad que ajusta los valores de la radiación solar difusa y que crece a medida que aumenta la longitud de onda.

En el modelo de Gueymard se han introducido una serie de mejoras que lo distinguen entre los denominados modelos simples o "parametrizados". Entre las más importantes se destaca la utilización de un espectro solar extraterrestre con intervalos de 1 nm entre 280 y 1700 nm e intervalos de 5 nm entre 1700 y 4000 nm, lo que incrementa la resolución espectral en los cálculos de la radiación y transmitancia atmosférica. Además incluye funciones más exactas para los procesos de extinción en la atmósfera, considerando los efectos de la temperatura y de la humedad en la estimación de los parámetros, y valores muy exactos de los coeficientes de absorción en base a datos espectroscópicos recientes. Finalmente, por primera vez se incluye el dióxido de nitrógeno como especie química absorbente en este tipo de modelos, compuesto que absorbe radiaciones de longitudes de onda menores a 700 nm.

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

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

La radiación directa normal (I_{DN}), es calculada a partir de la radiación solar extraterrestre normalizada ($H_{O,\lambda}$) y de las transmitancias de la atmósfera, que incluyen los siguientes procesos: dispersión Rayleigh ($T_{r,\lambda}$), dispersión y absorción de aerosoles ($T_{a,\lambda}$), y absorción del ozono ($T_{o,\lambda}$), del vapor de agua ($T_{w,\lambda}$), de otros gases también presentes en la atmósfera ($T_{u,\lambda}$) y del dióxido de nitrógeno ($T_{N,\lambda}$). Un factor relacionado con la distancia sol - tierra (D), que es independiente de la longitud de onda, corrige el valor de la radiación extraterrestre según la época del año. En el modelo de Bird y Riordan la transmitancia debido al dióxido de nitrógeno ($T_{N,\lambda}$) no es considerada.

$$I_{DN,\lambda} = H_{O,\lambda} D T_{r,\lambda} T_{a,\lambda} T_{w,\lambda} T_{o,\lambda} T_{u,\lambda} T_{N,\lambda} \quad (2)$$

La radiación difusa ($I_{d,\lambda}$) se obtiene como la suma de la componente de dispersión de Rayleigh ($I_{r,\lambda}$), la dispersión de aerosoles ($I_{a,\lambda}$), y la componente de múltiple reflexión aire - tierra ($I_{g,\lambda}$):

$$I_{d,\lambda} = I_{r,\lambda} + I_{a,\lambda} + I_{g,\lambda} \quad (3)$$

En cada uno de los modelos se emplean funciones propias para evaluar las transmitancias de los componentes atmosféricos; el modelo de Gueymard particularmente considera una transmitancia efectiva del ozono en la evaluación de la radiación difusa de Rayleigh y de aerosol.

Para calcular la radiación en el UVB, UVA y UVT, los resultados teóricos para cada longitud de onda se integran numéricamente en el espectro deseado con el fin de calcular la radiación solar en forma instantánea.

PARÁMETROS DE LOS MODELOS

Para comparar los modelos teóricos se han fijado dos condiciones típicas, los días 21 de junio y 21 de diciembre al mediodía solar. La localización geográfica corresponde a los alrededores de la ciudad de Santa Fe, en un ámbito rural y sin nubes.

Tabla 1. Condiciones y parámetros de cálculo.

Día	θ_z (°)	HR(%)	T(°C)	P(mb)	O ₃ (atm-cm)	NO ₂ (atm-cm)	β	α_1	α_2	$\tau_{0,5}$
21/06	55,1	50	20	1010	0,275	0,0001	0,05	0,931	1,431	0,135
21/12	8,2	70	30	1010	0,275	0,0002	0,10	0,917	1,423	0,268

En la Tabla 1 se muestran los parámetros más relevantes usados en el cálculo. La humedad relativa (HR), la temperatura (T) y la presión (P) son característicos de la zona en esa época del año. El cálculo del espesor de la capa de ozono se realizó con la fórmula de Piacentini (1992) aplicada para el presente año, mientras que el valor para el dióxido de nitrógeno (NO₂) se extrajo de Gueymard (1995).

Con respecto a los parámetros relacionados con la extinción producida por los aerosoles atmosféricos, se adoptó un valor del coeficiente de la fórmula de Ångström correspondiente a cielo muy claro, para el día 21 de junio ($\beta = 0,05$) y a cielo claro, para el día 21 de diciembre ($\beta = 0,10$). El valor del exponente α involucrado en dicha fórmula, según la propuesta de Gueymard (1995), posee valores diferenciados: α_1 en las longitudes de onda menores a 500 nm, y α_2 en las longitudes de onda mayores a 500 nm. Los valores de la turbidez atmosférica calculados fueron: $\tau_{0,5} = 0,135$ para junio y $\tau_{0,5} = 0,268$ para diciembre.

Otros parámetros propuestos por el modelo por Bird y Riordan son: albedo de dispersión de aerosol a la longitud de onda 400 nm ($\omega_{0,4} = 0,945$), el exponente para hallar su variación espectral ($\omega = 0,095$) y el factor de asimetría de aerosol ($\langle \cos\theta \rangle = 0,65$). El modelo de Gueymard estima los parámetros utilizando el modelo de Shettle y Fenn (1979) para aerosol rural, que contempla, además de la longitud de onda, su dependencia con la humedad ambiental. Los valores medios obtenidos por este modelo son $\omega = 0,945$ y $\langle \cos\theta \rangle = 0,688$ en todo el rango UV.

RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

La computación de la radiación UV en las condiciones especificadas se realiza en los intervalos UVB (290-315 nm), UVA (315-400 nm) y UVT (290-400 nm). En ambos modelos se usó el espectro solar extraterrestre con un intervalo de 1 nm y los coeficientes de absorción en el UV propuestos por Gueymard (1995). Los resultados predichos por los modelos "parametrizados" se muestran en la Figura 1 (radiación solar global, directa y difusa). Las tendencias detectadas en el UVT se reflejan en el UVA, por lo cual se representan solamente los espectros UVB y UVA.

Como puede esperarse, los valores de radiación global UVB, UVA (y por lo tanto UVT) que se estiman para el 21 de diciembre, superan notablemente a los estimados para el 21 de junio, siendo determinantes los siguientes factores: un ángulo cenital menor y la existencia de una menor distancia entre la Tierra y el Sol.

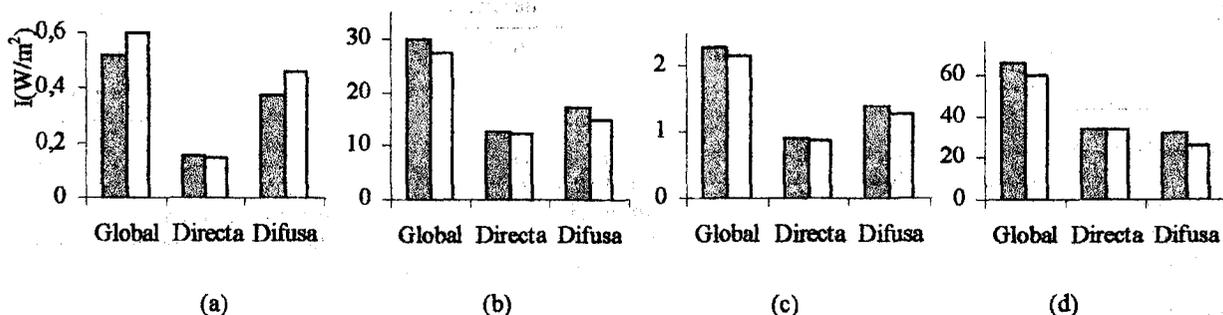


Figura 1. Radiación solar UV calculada con los modelos de Gueymard y Bird y Riordan : (a) 21 / 06 UVB, (b) 21 / 06 UVA, (c) 21 / 12 UVB, (d) 21 / 12 UVA.

La radiación UVB global tiene un mínimo de 0,52 W/m² según el modelo de Gueymard para el mes de junio, y un máximo de 2,30 W/m² para el mes de diciembre. La radiación UVA global alcanza con el mismo modelo y para los mismos meses, 30,1 W/m² y 65,6 W/m², respectivamente.

Se observa en la figura que no existe una importante diferencia en los valores predichos de radiación solar directa para el rango UVA, pero que es más significativa la diferencia relativa en el UVB para el 21 de junio (ángulo cenital más alto y menor turbidez). En todos los casos la radiación directa calculada con el modelo de Gueymard supera a la de Bird y Riordan.

Las predicciones efectuadas para la radiación solar difusa muestran una importante discrepancia entre los modelos, tanto en el UVB como en el UVA. Las diferencias que se perciben afectan asimismo los valores de la radiación solar global, puesto que la contribución de la componente difusa es muy significativa (en el UVB supera siempre a la directa y en el UVT y UVA es mayor a la directa el 21 de junio y es menor el 21 de diciembre).

Para proceder a investigar la incidencia de las componentes de la radiación difusa predicha por los modelos, se vuelcan los valores de cada una de ellas en la Figura 2. La componente debida a la dispersión de Rayleigh supera a la componente de dispersión debida a los aerosoles y a la de reflexión aire-suelo en ambos modelos y en todos los casos considerados. La componente de reflexión aire-suelo presenta en general valores inferiores al resto de las componentes, excepto en el UVB el día 21 de junio.

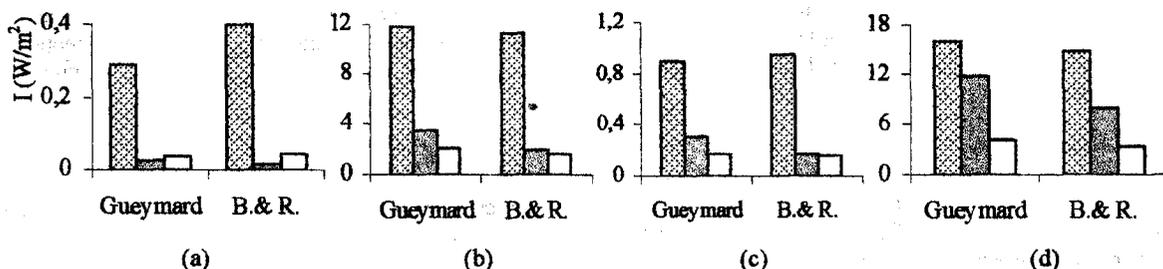


Figura 2. Componentes de la radiación solar UV difusa calculada con los modelos de Gueymard y Bird y Riordan. Componentes: Rayleigh , de aerosol , reflexión aire - suelo . (a) 21 / 06 UVB, (b) 21 / 06 UVA, (c) 21 / 12 UVB, (d) 21 / 12 UVA.

El modelo de Bird y Riordan subestima la componente de aerosol para los dos ángulos cenitales y cualquier rango de longitudes de onda en el UV. Los resultados alcanzados al calcular las componentes de dispersión de Rayleigh y de reflectancia aire-suelo indican que la tendencia anterior se mantiene en el UVA. Sin embargo, en el espectro UVB Gueymard predice valores de la componente de Rayleigh menores a los de Bird y Riordan. En este rango también el último modelo citado predice un valor algo superior de la componente de reflexión cuando es más grande el ángulo cenital.

Tabla 2. Relaciones entre componentes de la radiación solar UVB (290-315 nm).

Día	R.Directa / R.Global		C. Rayleigh / R. Difusa		C. Aerosol / R. Difusa		C.Reflexión / R. Difusa	
	Gueymard	B. & R.	Gueymard	B. & R.	Gueymard	B. & R.	Gueymard	B. & R.
21/06	0,290	0,240	0,784	0,871	0,081	0,033	0,108	0,098
21/12	0,396	0,413	0,640	0,743	0,223	0,137	0,129	0,120

Tabla 3. Relaciones entre componentes de la radiación solar UVA (315 - 400 nm).

Día	R.Directa / R.Global		C. Rayleigh / R. Difusa		C. Aerosol / R. Difusa		C.Reflexión / R. Difusa	
	Gueymard	B. & R.	Gueymard	B. & R.	Gueymard	B. & R.	Gueymard	B. & R.
21/06	0,420	0,458	0,676	0,767	0,205	0,128	0,119	0,105
21/12	0,510	0,560	0,502	0,567	0,369	0,302	0,130	0,131

En las Tablas 2 y 3 se reproducen relaciones entre las distintas componentes de la radiación solar estimada con ambos modelos. La relación entre la radiación directa y la global en el UVB es menor que en el UVA, aumentando por lo tanto a menor longitud de onda la importancia de la componente difusa. Dicha relación es menor a mayor ángulo cenital, aunque en estas condiciones se ha considerado menor turbidez atmosférica. Sólomente para el caso de radiación UVA y el menor ángulo cenital, la contribución de la radiación directa supera a la difusa (valor mayor al 50% en la Tabla 3).

En relación con las componentes de la radiación difusa, la componente de Rayleigh supera siempre a la suma de las correspondientes a aerosoles y reflexión aire-suelo. La componente Rayleigh tiene mayor importancia a mayor ángulo cenital (21 de junio) y menor turbidez atmosférica (menor dispersión de aerosoles); este comportamiento es más acentuado para la radiación UVB. La contribución debida a los aerosoles aumenta al decrecer el ángulo cenital (21 de diciembre) y naturalmente al crecer la turbidez, siendo más significativa su incidencia sobre la radiación difusa en el UVA.

CONCLUSIONES

- ◆ El modelo de Bird y Riordan es más simple que el de Gueymard, tanto en la carga de datos como en sus algoritmos de cálculo internos. En cambio, el modelo de Gueymard posee funciones muy exactas para los fenómenos de extinción y mayor cantidad de alternativas para evaluar los parámetros de cálculo, por lo que resulta más completo y actualizado, y por lo tanto más confiable, en el rango UV solar.
- ◆ Empleando en ambos modelos el espectro extraterrestre y los coeficientes de absorción propuestos por Gueymard, no se observan diferencias notables en las predicciones de la radiación directa, aunque el modelo de Bird y Riordan estima valores menores que el de Gueymard.
- ◆ Los valores de la radiación difusa predichos por Gueymard son mayores a los de Bird y Riordan, excepto en el UVB para elevados ángulos cenitales.
- ◆ En las condiciones analizadas en este trabajo, el modelo de Bird y Riordan subestima la componente de aerosol en todos los intervalos de radiación UV.
- ◆ Se comprueba que en ambos modelos existe una mayor contribución de la radiación difusa al valor de la radiación global, excepto en el UVA con un bajo ángulo cenital donde ambos valores se equiparan. Además, la componente de Rayleigh supera siempre a la suma de las componentes de aerosol y de reflexión aire-suelo, tanto en el UVB como en el UVA y UVT.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional del Litoral (Beca de Iniciación en la Investigación y financiamiento del Proyecto CAID 96 N° 116/017) y al CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas) por la colaboración recibida para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Albizzati E.D., Rossetti G.H. y Alfano O.M. (1997) Measurements and predictions of solar radiation incident on horizontal surfaces at Santa Fe, Argentina (31°39'S, 60°43'W). *Renewable Energy*, 11, 4, 469-478.
- Bird, R.E. y Riordan C. (1986) Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres, *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 1, 87-97.
- Cabrera M.I., Negro A.C., Alfano O.M. y Cassano A.E. (1997), Photocatalytic reactions involving hydroxyl radical attack II: kinetics of the decomposition of trichloroethylene using titanium dioxide, *J. Catal.*, 172, 2, 380-390.
- 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, USA.
- Piacentini, R.D., Alfano O.M. y Albizzati E.D.(1997) Radiaciones ultravioletas solares global y difusa: mediciones y modelación en el periodo agosto 1995 - mayo 1997 para Rosario (Argentina), *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 1, 1, 181-184.
- Piacentini, R.D.(1992) Comportamiento espacio-temporal de la capa de ozono para latitudes bajas e intermedias (50°N, 50°S), Congreso de la Asociación de Geofísicos y Geodestas, Buenos Aires, Argentina.
- Rossetti G.H., Albizzati E.D. y Alfano O.M.(1998) Modeling and experimental verification of a flat-plate solar photoreactor, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, 9, 3592-3601.
- Shettle E.P. y Fenn R.W. (1979) Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties. Rep. AFGL-TR-79-0214, Air Force Geophysics Lab., Hanscom, MA, USA.