

RADIACION ULTRAVIOLETA SOLAR INCIDENTE SOBRE ROSARIO (ARGENTINA). DEPENDENCIA ANGULAR E INFLUENCIA DE LA CAPA DE OZONO

Rubén D. Piacentini

Grupo de Energía Solar, Instituto de Física Rosario (CONICET-UNRosario), Facultad de Cs. Exactas, Ing. y Agrimensura (UNRosario) y Observatorio Astronómico de Rosario, C.C. 606, 2000 Rosario.

Orlando M. Alfano

Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, INTEC (CONICET-UNLitoral), Guemes 3450, 3000 Santa Fe.

Enrique D. Albizzati

Dpto. de Ing. Química, Facultad de Ingeniería Química (UNLitoral), Santiago del Estero 2654, 3000 Santa Fe.

RESUMEN

Se presenta un estudio sobre la dependencia de la radiación UV solar para la ciudad de Rosario ($32^{\circ} 55' S$, $60^{\circ} 44' W$), Argentina, en días de cielo claro, a través de las predicciones efectuadas con el modelo espectral de Bird y Riordan (1986), modificado con la inclusión del modelo de Piacentini (1992) para calcular el espesor de la capa de ozono. Los resultados se comparan con mediciones de UV global total realizadas con el UV-meter J-221, ubicado sobre una base móvil que permite registrar la radiación incidente para distintos ángulos de inclinación entre 0° y 180° .

INTRODUCCION

Las radiaciones solares emitidas en los rangos UV, V e IR, deben atravesar la atmósfera de la Tierra antes de llegar a interactuar con su superficie y la biosfera. Diversos componentes reducen las intensidades en diferentes zonas del espectro: gases atmosféricos, vapor de agua, partículas en suspensión y ozono. Además, la transmitancia de la atmósfera en los distintos rangos espectrales, es altamente dependiente del ángulo cenital y de la posición relativa del sol respecto del plano de captación.

En lo que respecta a la radiación ultravioleta solar, debido a la capacidad de absorción del ozono atmosférico, sólo se reciben radiaciones con intensidad significativa en la región del UVB (300 nm - 320 nm) y en la del UVA (320 - 400 nm). La comprobada disminución del espesor de la capa de ozono en el planeta verificada en los últimos diez años, ha provocado un aumento importante de la radiación UVB, que es la más perjudicial para los seres vivos. Una menor modificación se ha encontrado en la región correspondiente al UVA y a la radiación UV total.

En este trabajo se aplica un modelo para evaluar la distribución espectral de la radiación solar UV sobre una superficie horizontal en días de cielo claro y para distintos ángulos cenitales. En el cálculo se incluyen diferentes expresiones para calcular el espesor de la capa de ozono, analizándose el efecto de los valores obtenidos sobre la intensidad de la radiación en distintos rangos del espectro solar UV.

El modelo espectral extendido mediante un algoritmo para superficies inclinadas, se utiliza también para obtener la intensidad de la radiación solar UVB y UV global, y comparar los resultados con valores globales medidos variando la posición del instrumento detector.

EVALUACION DE LA RADIACION SOLAR UV HORIZONTAL

La evaluación de la radiación solar UV sobre la superficie terrestre en un plano horizontal y en días de cielo claro, se realizó en base al modelo de Bird y Riordan (1986). La irradiancia global espectral sobre una superficie horizontal ($I_{G\lambda}$), se obtiene considerando la componente directa normal al sol ($I_{d\lambda}$), el ángulo cenital (θ_z) y la componente difusa ($I_{s\lambda}$) de la radiación solar (1):

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

La irradiancia directa normal sobre la superficie terrestre, para una cierta longitud de onda, se calcula a partir de la irradiancia solar extraterrestre y a las transmitancias de la atmósfera que incluyen los procesos siguientes: scattering Rayleigh, scattering y absorción de aerosol, y absorción del ozono. La absorción del vapor de agua y de otros gases también presentes en la atmósfera, no es importante en esta región del espectro.

La irradiancia difusa sobre una superficie horizontal, puede evaluarse considerando las tres componentes siguientes (1): scattering Rayleigh, scattering de aerosol, y reflexiones múltiples entre el suelo y el aire. Cada una de estas componentes también puede obtenerse considerando la radiación solar extraterrestre y distintas funciones de transmitancia de la atmósfera (de absorción y scattering).

En este trabajo se introdujeron modificaciones al modelo original de Bird y Riordan (1986). La primera modificación consistió en utilizar la irradiancia solar UV extraterrestre, a la distancia media sol-tierra, propuesta por Frohlich y Wehrli (2), con valores promediados en un estrecho ancho de banda (2 nm). Esto permitió obtener un mayor detalle en las predicciones espectrales del modelo, particularmente al analizar el efecto del scattering y de la absorción del ozono, para distintos valores de la masa de aire y diferentes estados de la atmósfera. Otra modificación fue utilizar el modelo de Piacentini (3) para predecir el espesor de la capa de ozono, en reemplazo del modelo propuesto por Van Heuklon (4). El modelo de Piacentini (1992), elaborado en base a datos actualizados de mediciones satelitales, tiene en cuenta la latitud del lugar, el mes del año, y la reducción de la capa de ozono para el año considerado.

En la Figura 1 se muestran las predicciones de la distribución espectral de la radiación UV para el día 21 de diciembre y para distintos ángulos cenitales. En la misma se representa la variación del coeficiente de absorción del ozono con la longitud de onda, en la misma región del espectro. La radiación extraterrestre de referencia que se muestra en la figura, es la obtenida por Frölich y Wehrli (1981) para una distancia media sol-tierra, multiplicado por el factor de corrección por variación de esta distancia para el día 21-12. La incorporación de este espectro extraterrestre, con valores promediados en el ancho de banda de 2 nm, permite observar con gran detalle el efecto provocado por la atmósfera sobre la radiación ultravioleta, para distintas masas de aire.

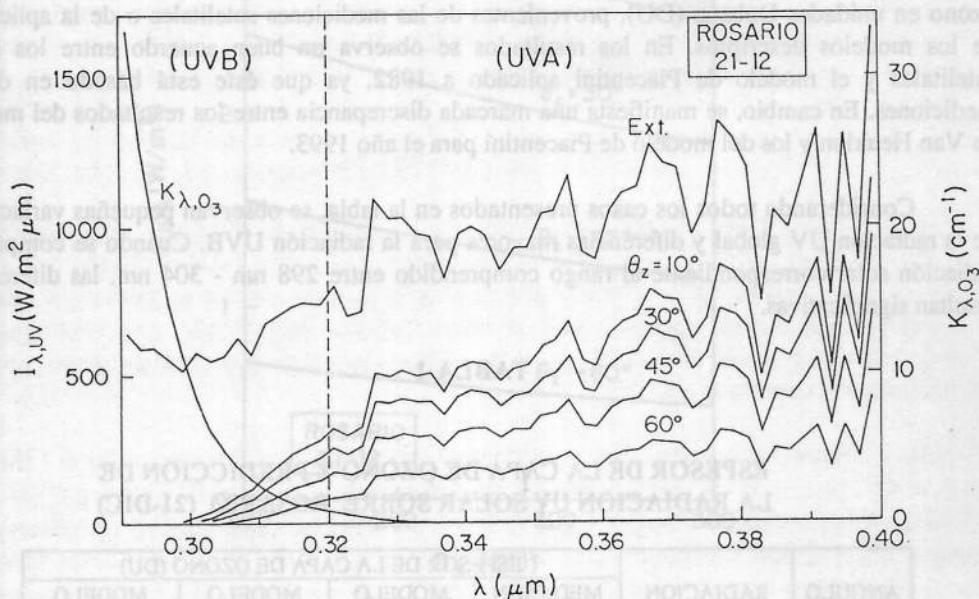


Figura 1: Distribución espectral de la Radiación Solar UV para distintos ángulos cenitales y coeficiente de absorción del ozono en función de la longitud de onda.

En la figura citada se aprecia el efecto de la capacidad de absorción del ozono sobre las radiaciones UVB y UBA. Debido al elevado valor del coeficiente de absorción del ozono por debajo de los 320 nm, se produce una muy significativa disminución de la radiación para cualquier ángulo cenital. En cambio, cuando la longitud de onda es mayor que 320 nm, esta reducción de la radiación resulta menos importante.

EFFECTO DEL ESPESOR DE LA CAPA DE OZONO SOBRE LA RADIACION UV

Se determina la influencia del espesor de la capa de ozono sobre la intensidad de la radiación horizontal en distintos rangos del espectro solar UV, empleando el modelo de Piacentini ⁽³⁾ aplicado a los años 1982 y 1993, el modelo de Van Heuklon ⁽⁴⁾, y mediciones satelitales efectuadas entre 1978 y 1986.

El modelo de Piacentini (1992) correlaciona datos aportados por los satélites SVUB y Nimbus 7/NASA, y contempla la reducción observada en la capa de ozono en los últimos años. Esta reducción es del 2,66% por década para toda la tierra ⁽⁵⁾. El modelo de Van Heuklon (1979) considera el efecto de la latitud, la longitud y el día del año, aunque no tiene en cuenta la variación temporal del espesor de la capa de ozono.

En la Tabla 1 se presentan las predicciones computacionales de la radiación solar ultravioleta, para el día 21 de diciembre y para distintos rangos del espectro. En el cálculo se consideraron diferentes ángulos cenitales (según la hora del día), y los espesores de la capa de ozono en unidades Dobson (DU), provenientes de las mediciones satelitales o de la aplicación de los modelos descritos. En los resultados se observa un buen acuerdo entre los datos satelitales y el modelo de Piacentini aplicado a 1982, ya que éste está basado en dichas mediciones. En cambio, se manifiesta una marcada discrepancia entre los resultados del modelo de Van Heuklon y los del modelo de Piacentini para el año 1993.

Considerando todos los casos presentados en la tabla, se observan pequeñas variaciones de la radiación UV global y diferencias mayores para la radiación UVB. Cuando se compara la radiación solar correspondiente al rango comprendido entre 298 nm - 304 nm, las diferencias resultan significativas.

TABLA 1

ESPESOR DE LA CAPA DE OZONO Y PREDICCIÓN DE LA RADIACION UV SOLAR SOBRE ROSARIO (21-DIC)

| ANGULO CENITAL (θ_z) | RADIACION UV SOLAR | ESPESOR DE LA CAPA DE OZONO (DU) | | | |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| | | MEDICION SATELITAL 1978-86 | MODELO VAN HEUKLON | MODELO PIACENTINI 1982 | MODELO PIACENTINI 1993 |
| | | 288.0 | 315.1 | 286.6 | 276.2 |
| 10° | $I_{UV}(W/m^2)$ | 52.65 | 52.44 | 52.66 | 52.75 |
| | $I_{UVH}(W/m^2)$ | 2.88 | 2.72 | 2.89 | 2.96 |
| | $I_{298-304}(mW/m^2)$ | 132.1 | 107.4 | 133.5 | 144.7 |
| 30° | $I_{UV}(W/m^2)$ | 43.23 | 43.05 | 43.24 | 43.31 |
| | $I_{UVH}(W/m^2)$ | 2.17 | 2.04 | 2.18 | 2.23 |
| | $I_{298-304}(mW/m^2)$ | 80.0 | 63.5 | 81.0 | 88.6 |
| 45° | $I_{UV}(W/m^2)$ | 31.37 | 31.24 | 31.38 | 31.44 |
| | $I_{UVH}(W/m^2)$ | 1.37 | 1.27 | 1.37 | 1.41 |
| | $I_{298-304}(mW/m^2)$ | 34.0 | 25.8 | 34.5 | 38.4 |
| 60° | $I_{UV}(W/m^2)$ | 17.84 | 17.76 | 17.85 | 17.88 |
| | $I_{UVH}(W/m^2)$ | 0.608 | 0.557 | 0.610 | 0.632 |
| | $I_{298-304}(mW/m^2)$ | 6.4 | 4.4 | 6.5 | 7.5 |
| 75° | $I_{UV}(W/m^2)$ | 6.30 | 6.26 | 6.30 | 6.32 |
| | $I_{UVH}(W/m^2)$ | 0.119 | 0.104 | 0.120 | 0.126 |
| | $I_{298-304}(mW/m^2)$ | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 |

En la Figura 2 se estudia el efecto del espesor de la capa de ozono sobre el valor de la radiación solar UVB, para distintos ángulos cenitales. Para el día considerado en el cálculo, el valor mínimo de este ángulo se aproxima a los 10° (mediodía solar). Como es de esperar, se observa una caída del valor de la radiación UVB a medida que aumenta el espesor de la capa de ozono. Esta variación es más pronunciada a medida que disminuye el ángulo cenital.

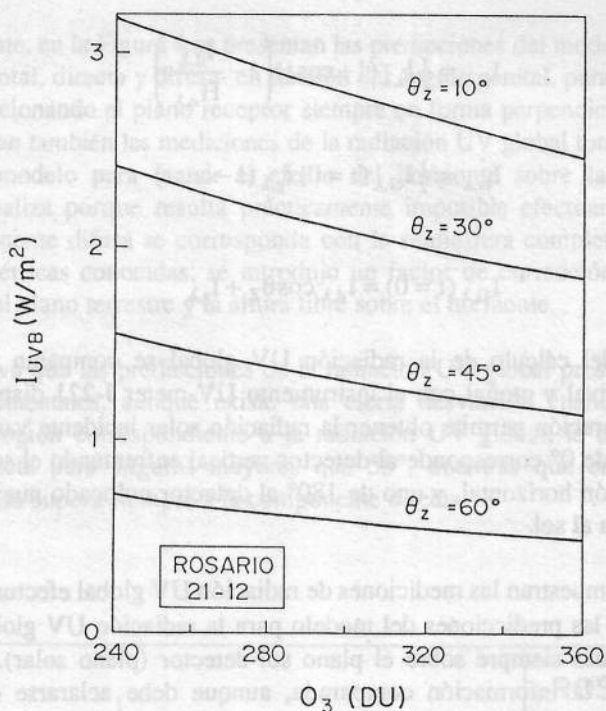


Figura 2: Intensidad de Radiación UVB Solar para Rosario (Argentina) en función del espesor de la capa de ozono en unidades Dobson (DU), para distintos ángulos cenitales.

DEPENDENCIA ANGULAR DE LA RADIACION UV SOLAR

Se ha investigado la influencia del ángulo del plano receptor sobre los valores de la radiación en el espectro UV global y UVB. Para ello se usó la fórmula de Piacentini (1992) para la capa de ozono y el modelo espectral de Bird y Riordan (1986) extendido con el algoritmo de Hay y Davies (1978). Este algoritmo permite evaluar la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada, a partir de la información correspondiente al plano horizontal.

La radiación solar incidente sobre una superficie inclinada, se calcula considerando la radiación directa y la radiación difusa. Esta última, a su vez, se obtiene como la suma de la componente circunsolar ($I_{cs,\lambda}$), la componente isotrópica ($I_{is,\lambda}$) y la componente de reflexión en el suelo ($I_{rs,\lambda}$):

$$I_{G,\lambda}(t) = I_{d,\lambda} \cos\theta_z + I_{cs,\lambda} + I_{is,\lambda} + I_{rs,\lambda} \quad (2)$$

Cada una de estas componentes responde a las siguientes expresiones:

$$I_{cs,\lambda} = I_{s,\lambda} \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \frac{I_{d,\lambda}}{H_{o,\lambda}} \quad (3)$$

$$I_{rs,\lambda} = \frac{1}{2} I_{s,\lambda} (1 + \cos t) \left(1 - \frac{I_{d,\lambda}}{H_{o,\lambda}} \right) \quad (4)$$

$$I_{rs,\lambda} = \frac{1}{2} I_{G,\lambda}(t=0) r_{g,\lambda} (1 - \cos t) \quad (5)$$

donde:

$$I_{G,\lambda}(t=0) = I_{d,\lambda} \cos \theta_z + I_{s,\lambda}^* \quad (6)$$

Los resultados del cálculo de la radiación UV global se comparan con mediciones obtenidas en período estival y otoñal con el instrumento UV-meter J-221 dispuesto sobre una base móvil. Esta configuración permite obtener la radiación solar incidente variando el ángulo del detector. Un ángulo de 0° corresponde al detector vertical enfrentando el sol, un ángulo de 90° al detector en posición horizontal, y uno de 180° al detector colocado nuevamente vertical pero en dirección opuesta al sol.

En la Figura 3 se muestran las mediciones de radiación UV global efectuadas el 17/04/93 para $\theta_z = 42^\circ$, junto con las predicciones del modelo para la radiación UV global y UVB. Las mediciones están realizadas siempre sobre el plano sol-detector (plano solar). Se observa un razonable acuerdo entre la información comparada, aunque debe aclararse que el medidor presenta limitaciones en su capacidad de registro, por lo que los valores máximos no pueden ser obtenidos.

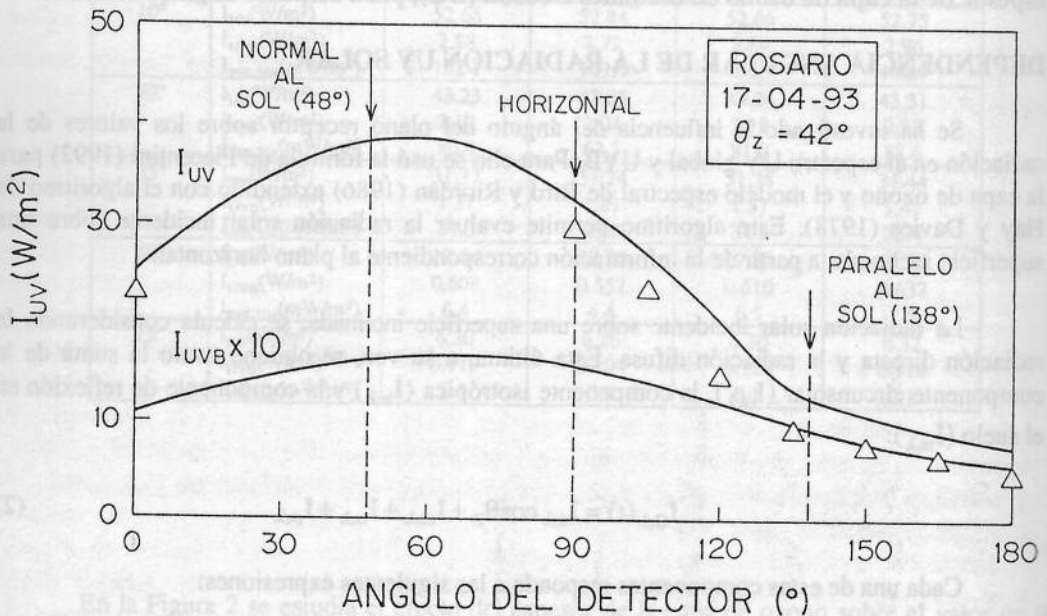


Figura 3: Radiación UV y UVB Solar para Rosario (Argentina), en función del ángulo del detector. Resultados experimentales (Δ). Predicciones del modelo (—).

Finalmente, en la Figura 4 se presentan las predicciones del modelo para la radiación UV global y UVB -total, directa y difusa- en función del ángulo cenital, para un día típico de verano (01/02/93), posicionando el plano receptor siempre en forma perpendicular al sol. En la misma figura se muestran también las mediciones de la radiación UV global total, y los resultados de la corrección del modelo para incluir el efecto del horizonte sobre la radiación difusa. Esta corrección se realiza porque resulta prácticamente imposible efectuar mediciones en lugares donde la componente difusa se corresponda con la semiesfera completa del cielo. A partir de relaciones geométricas conocidas, se introdujo un factor de corrección en función del ángulo promedio entre el plano terrestre y la altura libre sobre el horizonte.

Se observa que las predicciones de la radiación UV global presentan buen acuerdo con los datos experimentales, aunque existe una cierta desviación cuando el ángulo cenital es elevado. En la región correspondiente a la radiación UV global, la componente solar difusa supera a la directa para ángulos mayores que 55° , mientras que en la zona del UVB, la componente difusa supera siempre a la componente directa.

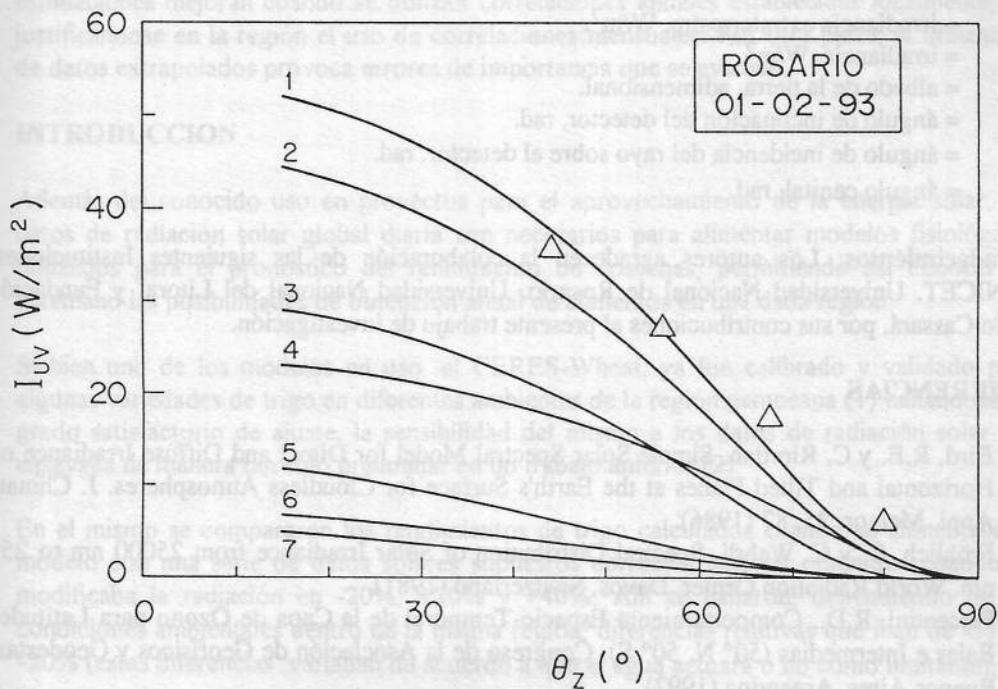


Figura 4: Radiación UV y UVB solar para Rosario (Argentina), en función del ángulo cenital. Resultados experimentales (Δ). Predicciones del modelo (—): 1) UV normal al sol, 2) UV normal al sol corregida por efecto de sombra del horizonte, 3) Componente directa de 1, 4) componente difusa de 1, 5) UVB ($\times 4$) normal al sol, 6) Componente difusa de 5, y 7) Componente directa de 5.

CONCLUSIONES

Mediante modelización teórica y mediciones experimentales, se ha obtenido información detallada sobre las radiaciones solares UV para los períodos estival y otoñal, en una ciudad típica de la zona más densamente poblada del país (Rosario, Argentina).

Existe una elevada dependencia de la radiación UVB con el espesor de la capa de ozono, para distintos ángulos cenitales (horas del día). Esta dependencia es menos importante para la radiación UV global.

Como resultado de la aplicación del modelo, se han obtenido predicciones teóricas del incremento de la radiación UV solar con la disminución de la capa de ozono.

Se ha verificado la importancia de una adecuada descripción de la fluctuación espacio-temporal de la capa de ozono, para una correcta evaluación de la radiación solar ultravioleta.

Existe una elevada dependencia de la radiación solar UV con el ángulo de inclinación de la superficie receptora. Se observa un razonable acuerdo entre las predicciones del modelo teórico y las mediciones experimentales, para distintos ángulos de inclinación del detector.

NOMENCLATURA

| | |
|------------|---|
| H | = irradiancia extraterrestre, W/m^2 . |
| I | = irradiancia, W/m^2 . |
| r_g | = albedo de la tierra, adimensional. |
| t | = ángulo de inclinación del detector, rad. |
| θ | = ángulo de incidencia del rayo sobre el detector, rad. |
| θ_z | = ángulo cenital, rad. |

Agradecimientos: Los autores agradecen la colaboración de las siguientes Instituciones: CONICET, Universidad Nacional de Rosario, Universidad Nacional del Litoral y Fundación Pablo Cassará, por sus contribuciones al presente trabajo de investigación.

REFERENCIAS

1. Bird, R.E. y C. Riordan, 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, 87 (1986).
2. Fröhlich, C. y C. Wehrli, Spectral Distribution of Solar Irradiance from 25000 nm to 250 nm. World Radiation Center, Davos, Switzerland (1981).
3. Piacentini, R.D., 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 (1992).
4. Van Heuklon, T.K., Estimating Atmospheric Ozone for Solar Radiation Models. *Solar Energy* 22, 63 (1979).
5. Herman, J.R., R. McPeters y R. Stolarski, Global Average Ozone Change from November 1978 to May 1990. *Journal of Geophysical Research*, 96, 17297 (1991).
6. Hay, J.E. y J.A. Davies, Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface. Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop, J. E. Hay y T.K. Won, Eds., Toronto, Ontario, Canada (1978).