

IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN UV-A A PARTIR DE MEDIDAS CON RADIÓMETROS A 380 NM PARA APLICACIONES AMBIENTALES DE LA ENERGÍA SOLAR

C. Navntoft^{1,2}; E. Wolfram³, A. Paladini^{4,5}, L. Dawidowski^{1,6}; M. A. Blesa^{1,2,5}

¹Unidad de Actividad Química, Comisión Nacional de Energía Atómica, Avenida General Paz 1499, 1650 San Martín (Provincia de Buenos Aires), Argentina;

²Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de San Martín

³Centro de investigaciones en láseres y aplicaciones, Centro de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas (CEILAP-CITEFA-CONICET)

⁴Instituto de Genética y Biología Molecular; ⁵Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Tel. 0054-11-6772-7144 – Fax 0054-11-6772-7130 e-mail: navntoft@cnea.gov.ar

RESUMEN

El correcto dimensionamiento de plantas de tratamiento por fotocatalisis solar requiere del conocimiento del recurso solar UV (280-400 nm) a nivel de la superficie terrestre. El UV-B (280-315nm), sólo constituye el 10% del total y se transmite sólo el 55% al ingresar al reactor, mientras que el UV-A(315-400 nm) se transmite en un 89%. En este trabajo se presenta y evalúa un método para calcular la irradiancia e irradiación UV-A a partir de mediciones a 380nm por medio del uso de un factor de escala dependiente del ángulo cenital solar. Los errores en la irradiancia calculada van del 18% a $\theta = 90^\circ$ hasta 4% a $\theta = 10^\circ$. El error en la irradiación UV-A calculada es del 10.2% para las integrales diarias. Estos errores están dentro del rango de incertidumbre aceptable para la mayoría de los sistemas fotocatalíticos solares y pueden ser usadas para los estudios de factibilidad.

Palabras clave: UV-A, irradiación solar, fotocatalisis solar.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha crecido notablemente el interés en la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie de la tierra como consecuencia del adelgazamiento de la capa de ozono. El entendimiento de la cantidad de radiación UV que recibe el ser humano, los animales y las plantas es de gran importancia para muchos campos [1]. Para nuestros fines, esta información es de crucial importancia en el diseño de los sistemas fotocatalíticos solares usados para la descontaminación de aguas residuales [2]. El proceso fotocatalítico requiere que los contaminantes entren en contacto con un fotocatalizador, tal como el dióxido de titanio, bajo iluminación con radiación ultravioleta de manera que la reacción de mineralización se lleve a cabo [3].

El dimensionamiento de un reactor fotocatalítico depende de la velocidad de reacción del efluente (constante cinética). Dicha velocidad a su vez depende de parámetros propios del sistema y de la disponibilidad de radiación UV-A en la superficie terrestre. La escasa información mundial sobre radiación UV obliga al uso de métodos indirectos de estimación: modelos de transferencia radiativa [12], correlaciones con radiación solar global [10,11] o estimaciones satelitales. Todos estos métodos se aproximan a los valores reales con un cierto error.

En la Argentina opera desde 1994 una red de monitoreo de la radiación UV que tiene 4 estaciones de medición a 4 longitudes de onda, con equipos GUV (Biospherical Instruments). Los GUVs son un compromiso entre espectralradiómetros y radiómetros de banda puntual, con cuatro canales en la región UV, centrados en 305, 320, 340 y 380 nm, con anchos de banda aproximados de 10 nm. Un quinto canal mide la radiación PAR (400-700nm). Los radiómetros son calibrados contra un patrón secundario una vez al año y contra un patrón primario una vez cada dos años [1, 6, 7]. Se pueden usar varias metodologías para reconstruir el espectro UV a partir de las mediciones de los GUVs. [4, 6, 8, 9].

¹ Investigador CNEA

³ Investigador CEILAP-CITEFA

⁵ Investigador CONICET

Se han establecido algunas correlaciones empíricas en una de las estaciones de la red pero no en las demás. Dado que la radiación UV depende del ozono, los aerosoles y la nubosidad, esta correlación solo puede ser utilizada en lugares con condiciones climáticas similares a aquellas en donde fue calculada [5]. Por otro lado, las metodologías más precisas requieren más recursos computacionales y el conocimiento de la respuesta absoluta del instrumento. Estas herramientas y datos no siempre están disponibles para aquellos que necesitan la irradiancia e irradiación UV.

El presente trabajo apunta a proveer un método simple y directo de cálculo del espectro UV-A a partir de los datos del GUV, que sea accesible a cualquier persona que necesite de ella, conservando una precisión aceptable. La metodología propuesta utiliza un factor de escala dependiente solamente del ángulo cenital solar, que usa como referencia las mediciones a 380 nm. Se puede así determinar medias mensuales de UV-A y correlacionarlas con las de radiación solar global. Se aplicó el modelo al análisis de las mediciones del año 2001 de la estación de Buenos Aires (latitud 34° 35', longitud 58° 28') y se contrastaron los resultados con las mediciones de un radiómetro UV-A (ECO Inst. Trading Co., modelo MS-210) ubicado en el área perimetral de la Ciudad de Buenos Aires, 6 km del punto de monitoreo de la red (latitud 34° 33', longitud 58° 30').

MATERIALES Y MÉTODOS

Dado que el UV-A y la irradiancia a 380 nm son afectadas proporcionalmente por los mismos fenómenos atmosféricos, se define un factor llamado F_4 , ecuación (1), donde I_{UV-A}^{MOD} simboliza irradiancia UV-A modelada, I_{380}^{MOD} es la irradiancia a 380 nm modelada y $F_{4(\theta)}$ es el factor de escala dependiente del ángulo cenital solar.

$$F_{4(\theta)} = \frac{I_{UV-A}^{MOD}}{I_{380}^{MOD}} \quad (1)$$

Para identificar los procesos dominantes en el espectro UV-A y evaluar la inclusión de variables adicionales en el factor de escala, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad utilizando el modelo de transferencia radiativa, TUV 4.1 [13]. Para cada ángulo cenital solar entre 0° y 90°, se calculó el factor de escala F_4 simulando diferentes situaciones atmosféricas. Se eligieron valores de condiciones atmosféricas de manera de evaluar desde atmósferas limpias hasta turbias de acuerdo con [12,13,15] Las distintas condiciones atmosféricas evaluadas fueron:

- Profundidad óptica vertical (T): 0.1-0.5-1.0
- Coeficiente alfa (Ångstrom)(A): 0.85-1.3
- Albedo de dispersión simple(S): 0.85-0.99
- Columna de ozono: 200-300 DU

La Fig. 1 muestra que la dependencia de F_4 con el ángulo cenital solar no se ve afectada mucho por cambios en T, S ó A. El ozono tampoco ejerce una influencia apreciable en esta región espectral (resultados no mostrados). Los valores de aerosoles en general fluctúan suavemente alrededor de un valor medio y solo en episodios importantes de contaminación ocurren fluctuaciones más drásticas. De esta manera, el conocimiento exacto de los valores de los distintos parámetros no es necesario, y pueden usarse valores promedio para calcular F_4 como una función del ángulo cenital solar solamente, independiente de las condiciones atmosféricas. Para ángulos cenitales bajos, la atenuación es proporcionalmente igual en el UV-A y en la banda de 380 nm. A medida que el sol baja (ángulos cenitales altos) el UV-A se atenúa más que la banda de 380 nm por dispersión Rayleigh y por esto disminuye el factor de escala. Para ángulos cenitales entre 0° y 30°, F_4 es prácticamente constante.

Usando los valores de parámetros medios de la Ciudad de Buenos Aires (T=0.6, S=0.85, A=0.8) [14], se obtiene la ecuación (2) a través de un ajuste polinomial de segundo grado de la curva de la figura 1.

$$F_4 = -0.0009 \cdot \theta^2 + 0.0127 \cdot \theta + 73.106 \quad R^2 = 0.9962 \quad (2)$$

La Tabla 1 muestra el número de días con mediciones útiles a lo largo de 249 días de 2001 en el período disponible (enero-noviembre).

Mes	Días analizados
Enero	25
Febrero	8
Marzo	29
Abril	30
Mayo	10
Junio	26
Julio	26
Agosto	23
Septiembre	30
Octubre	20
Noviembre	23
TOTAL	249

Tabla 1. Distribución mensual de días analizados.

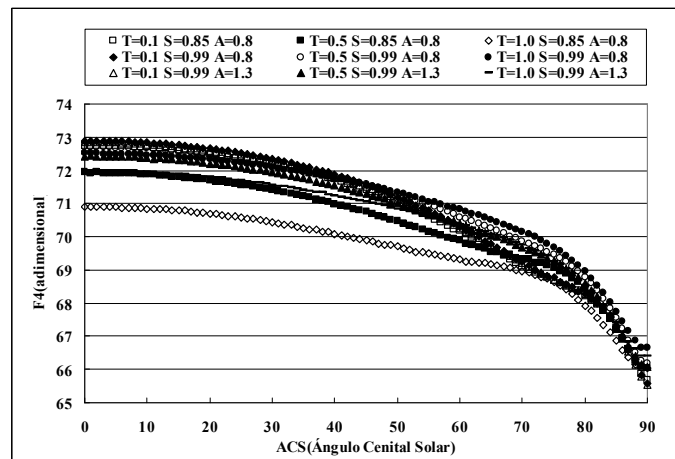


Figura 1. Variación de F_4 con el ángulo sola para distintas situaciones atmosféricas

La irradiancia UV-A [I_{UV-A}^{CALC} (W/m^2)] se calcula a partir del factor de escala con la ecuación (3), donde I_{380}^{MED} es la irradiancia medida a 380 nm y F_4 el factor de escala correspondiente al ángulo cenital usado para el cálculo. El valor del ángulo cenital para cada minuto del día se calcula según la ref.[16]

$$I_{UV-A}^{CALC} = F_4(\theta) \cdot I_{380}^{MED} \quad (3)$$

La irradiancia (I_{UV-A}^{CALC}) y la irradiación total diaria (E_{UV-A}^{CALC}) UV-A fueron calculadas y comparadas con mediciones de UV-A (I_{UV-A}^{MED} y (E_{UV-A}^{MED})) realizadas con un radiómetro MS-210A (ver Introducción). Dada la distancia entre ambos puntos de monitoreo, se utilizaron solo días despejados para evaluar el error del modelo de irradiancia. La variabilidad de la nubosidad hace que las diferencias en irradiancia sean muy grandes de un lugar a otro. En cambio la irradiación, que es la integral total a lo largo del día, esas variabilidades son, en promedio, las mismas. Se seleccionaron 30 días despejados para evaluar el modelo para el cálculo de la irradiancia (I_{UV-A}^{CALC}) y 126 para evaluar el error del modelo del cálculo de irradiación (E_{UV-A}^{CALC}).

RESULTADOS

Irradiancia.

La figura 2 muestra la correlación de I_{UV-A}^{CALC} con respecto a I_{UV-A}^{MED} . No se encontraron días despejados en mayo. Para cada intervalo de 10° de θ de cada día despejado, seleccionado se calculó el error porcentual ($\epsilon\%$) de acuerdo con (4) y (5) y luego se calculó el error promedio porcentual y la desviación estándar correspondiente a cada intervalo. En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum (I_{UV-A}^{CALC} - I_{UV-A}^{MED})^2}{N-1}} \quad (4)$$

$$\varepsilon(\%) = \left(\frac{\varepsilon}{I_{UV-A}^{MED}} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

θ	90-80	80-70	70-60	60-50	50-40	40-30	30-20	20-10
Error %	17.1%	14.8%	10.6%	9.5%	9.1%	6.5%	4.9%	3.9%
Desv. Est. %	9.1%	5.5%	5.9%	5.3%	5.3%	4.0%	3.1%	3.4%

Tabla 2. Errores promedio porcentuales para cada intervalo de θ .

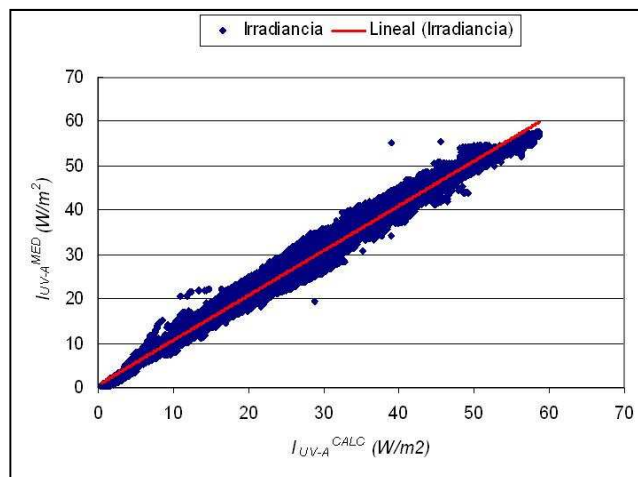


Figura 2. Correlación entre irradiancia UV-A calculada y medida.

Irradiación

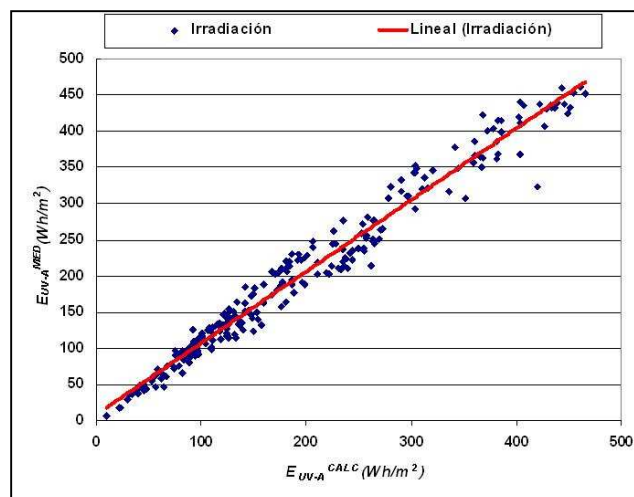


Figura 3. correlación entre la irradiación UV-A calculada y la medida.

Al comparar la irradiación calculada y la medida se obtuvo una correlación lineal que se observa en la figura 2 y cuya ecuación es:

$$E_{UV-A} = 0.989 \cdot E_{UV-A}^{CALC} + 8.3256 \quad (R^2=0.9722) \quad (6)$$

El error de predicción del modelo de regresión es de ± 20.781 (Wh/m²) y el error porcentual del mismo es de 10.194%. Ambos calculados también según (4) y (5).

CONCLUSIONES

Es necesario conocer el recurso solar UV y particularmente el UV-A para poder dimensionar adecuadamente sistemas de tratamiento de efluentes por fotocatalisis heterogénea solar. Es esencial contar con métodos de estimación que puedan ser extrapolados a cualquier latitud del país para contrarrestar la escasez de mediciones existentes. Se propuso y se evaluó un método para calcular la irradiancia e irradiación UV-A(315-400nm) a partir de mediciones de irradiancia a 380 nm. Para la irradiancia, los errores dependen del ángulo cenital y fueron desde 18% para ángulos cenitales de 90° a 4% para ángulos cenitales entre 20° y 10°. El error en la irradiación estimada por integración de la curva de irradiancia calculada es de 10.2%. Si bien sólo se analizó un año de datos (2001), el procedimiento resulta útil para la evaluación del recurso solar UV-A en el desarrollo de reactores fotocatalíticos solares en su etapa de prefactibilidad, y también puede encontrar aplicaciones en otros campos particularmente en la biología. Cabe aclarar que a pesar de que las correlaciones fueron halladas con datos de mediciones de la ciudad de Buenos Aires, es posible su uso en otras latitudes. El análisis de sensibilidad realizado en función del ángulo cenital es equivalente a simular distintas atmósferas en distintas latitudes. De manera que resta validar el error de esta metodología en latitudes distintas a aquella de la cual fue obtenida y corroborar su extrapolación. Sin embargo, nada indica que halla una diferencia sustancial con el uso del método propuesto en otras localidades, salvo aquellas que surjan de la diferente calibración de los distintos equipos. La validación estadística de las correlaciones obtenidas debe ser llevada a cabo con mediciones provenientes de series de tiempo más extensas, aumentando de esta manera, la precisión de los datos obtenidos con la misma.

REFERENCIAS.

- [1] K. O. Ogunjobi, Y. J., Kim. (2004). Ultraviolet(0.28-0.4 μ m) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research* 71, 193-214.
- [2] J. Cañada, G. Pedros, J. V. Bosca. (2003). Relationships between UV (0.290-0.385 μ m) and broadband solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy* 28, 199-217.
- [3] M. S. Mehos, K. A. Pacheco, H. Limk. (1992). Measurement and análisis of near ultraviolet solar radiation. *Solar Engineering Vol. 1*, ASME.
- [4] Dahlback A. (1996). Measurements of biologically effective UV doses, total ozone abundances, and cloud effects with multichannel, moderate bandwidth filter instruments. *Appl. Opt.*, 35(33), 6514-6521.
- [5] C. Navntoft, L. Dawidoski, A. Paladini, M. Blesa. (2004). Assessment of a simple UV radiation model for applications in photocatalytic systems in Argentina, *Solar Paces XXIII*, Mexico.
- [6] Bernhard G., Booth C. R., Ehranjian C. (2002). Real-time UV and column ozone from multi-channel UV radiometers deployed in the National Science Foundation's UV monitoring network, www.biospherical.com.
- [7] S. Diaz, R. Booth, R. Armstrong, S. Cabrera, C. Cassiccia, H. Fuenzalida, C. Lovengreen, A. Paladini, J. Pedroni, A. Rosales, H. Zagarese, C. Brunat, G. Deferrari, C. Camilion, M. Vernet. (2002). "Calibration improvement of the IAI Network for the measurement of UVR: Multi-channel instruments", *Proceeding of SPIE. Ultraviolet Ground- and Space-based Measurements, Models and Effects II*, Vol. 4896, pp 106-113.
- [8] Orce L. V., Helbling W. E., Paladini A. (1997). Latitudinal UVR-PAR measurements in Argentina: extent of the ozone hole. *Global and Planetary Change* 15, 113-121.
- [9] Fuenzilda H. A. (1998). Global ultraviolet spectra derived directly from observations with multichannel radiometers. *Applied Optics*, 37, No 33.
- [10] Kudish A. I., Lyubansky V., Evseev E.G., Ianetz A. (2005). Inter-comparison of the solar UVB, UVA and global radiation clearness and UV indice for Beer Sheva and Neve Zohar(Dead Sea), Israel. *Energy* 30, 1623-1641.
- [11] P. S. Koronakis, G. K. Sfantos, A. G. Paliatsos, J. K., Kaldellis, J.E. Garofalakis, I. P. Koronakis (2002). Interrelations of UV-global/global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuation on air pollution episode days in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 36, 3173-3181.
- [12] A.F. Bais et. Al (2003). International Photolysis Frequency Measurement and Model Intercomparison(IPMMI): Spectral actinic solar flux measurements and modeling. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, NO. D16, 8543.
- [13] Madronich S. (2001). Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the earth's surface. *NATO ASI Series, Series I*, Vol:52, p23-63 *Solar Ultraviolet Radiation, Modelling Measurements and Effects*.
- [14] Otero A. L. P.R. Ristori, G. J. Fochesatto, E. J. Quel, B. Holben. (2003) Estadística de la evolución de los aerosoles medidos en las estaciones de la red aeronet en argentina desde 1999, AFA.
- [15] Muhammed Iqbal (1983). An introduction to solar radiation. Academic Press. New York.

ABSTRACT

Proper dimensioning of plants for photocatalytic treatment of wastewaters require the knowledge of the UV solar resource availability. In this work, a method to calculate UV-A irradiance and irradiation from measurements at 380 nm by means of a scale factor dependant only on the solar zenith angle is proposed and evaluated. Errors in the calculated UV-A irradiance range from 18% at $\theta = 90^\circ$ to 4% at $\theta = 10^\circ$. Errors in the calculated UV-A irradiation are less than 11% for daily integrals. These errors are well within the range of acceptable uncertainty for most photocatalytic systems dimensioning and the procedure may be use for other applications as well. The next step is the establishment of relationships between UV-A and global solar radiation, and a map of the solar UV-A resource for Argentina.

Keywords: UV-A, UV resource, solar irradiation, solar photocatalysis.