

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RADIACION GLOBAL ULTRAVIOLETA EN SAN JOSE, COSTA RICA

Jaime Wright

Departamento de Física, Universidad Nacional
86-3000 Heredia, Costa Rica

RESUMEN

Se midieron las radiaciones ultravioleta global y solar global en San José, Costa Rica (latitud: 9° 56', longitud: 84° 54', altitud: 1.172 m.) durante el período de octubre 1993 a enero 1995 y se analizaron en función de su variación estacional y de la correlación entre ambas. La dependencia entre la radiación ultravioleta y el índice de claridad del cielo también fue investigada, y se encontró una pobre correlación entre el cociente de la radiación ultravioleta y la radiación solar global (H_v/H_g) y el índice de claridad. El coeficiente de correlación entre H_v/H_g y H_g/H_o no fue mayor de 0,25 para cuatro categorías de tipos de cielos, i.e., cielos cubiertos, cielos despejados, así como dos ámbitos intermedios, lo que demuestra que la radiación ultravioleta no solamente está asociada con la claridad del cielo, sino también con otras condiciones de transmisión atmosférica. Un análisis de regresión entre los valores horarios de las radiaciones ultravioleta y global mostró una relación lineal con un coeficiente de determinación mayor del 98%. Esta regresión simple es confiable para la estimación de la radiación ultravioleta a partir de datos de radiación global.

ABSTRACT

The ultraviolet global radiation and the global solar radiation at San José, Costa Rica (latitude: 9° 56', longitude: 84° 54', altitude: 1172 m.) during the period October 1993 to January 1995 were analyzed with respect to their seasonal variations and their interdependence. The dependence between the ultraviolet radiation and

the clearness index of the skies was also investigated. A poor correlation was found between the quotient of the ultraviolet radiation and the global solar radiation (H_v/H_g) and between the global solar radiation and the extraterrestrial solar radiation (H_g/H_o). The correlation coefficient found between H_v/H_g and H_g/H_o was not greater than 0,25 for four categories of clearness index; i.e., covered skies, clear skies, and two intermediate conditions. This demonstrates that the ultraviolet radiation is not only associated with the clearness of the skies, but also with other atmospheric transmission conditions. A regression analysis between the hourly values of the ultraviolet and global radiation yielded a linear relationship with a determination coefficient greater than 98%. Thus a simple linear regression is reliable for the estimation of the ultraviolet radiation in San José from global solar radiation data.

INTRODUCCION

La radiación ultravioleta (UV), tanto en el tope de la atmósfera como en la superficie terrestre, es una pequeña fracción del flujo de radiación total. En el espacio exterior, la radiación UV es solamente el 8,73% de la radiación total (AL-ARURI *et al.* 1988), mientras que el valor de la radiación UV en la superficie de la tierra depende, entre otros factores, de las condiciones atmosféricas, incluyendo el tipo de nubosidad, humedad, tamaño y cantidad de las partículas de polvo, tamaño y distribución vertical de las gotas de lluvia y por la contaminación atmosférica (DIFFEY 1977). La contaminación atmosférica puede ser significativa en San José, por las actividades domésticas, industriales y de transporte.

La humedad relativa de la ciudad exhibe una moderada variación diurna con máximos de alrededor del 90% y mínimos del 70% durante la mayoría de los meses del año, y un promedio anual del orden de 85% (WRIGHT 1980 a,b). La cantidad de polvo troposférico es pequeña en la época lluviosa, pero es importante en los meses de la estación seca, por lo que afecta las radiaciones solar global y ultravioleta en la baja atmósfera.

La radiación ultravioleta es conocida como uno de los principales factores para el cáncer de piel (COULSEN 1975). También es responsable de indeseables reacciones químicas en plantas industriales (SUKHANOV y SAFAEV 1971) y es el factor principal para la degradación de polímeros, pinturas y otros materiales (DAVIS y SIMS 1983). Por otra parte, ya sea a partir de fuentes naturales o artificiales, la radiación ultravioleta se utiliza en tratamientos de tuberculosis, curaciones de heridas y controles bactericidas del agua (COULSEN 1975, AKILOV *et al.* 1977).

La radiación global ultravioleta en las longitudes de onda de 0,295-0,385 μm está compuesta de dos partes: UV-A, que cubre el rango espectral de 0,320-0,385 μm y UV-B, que cubre el rango espectral 0,285-0,320 μm . El rango UV-B es importante por sus efectos dañinos en los organismos vivos y materiales plásticos. En los humanos el recipiente principal de la radiación UV-B es la piel (KOLLIAS y BAGER 1984).

La necesidad de datos detallados de radiación solar se ha incrementado drásticamente en los últimos años en Costa Rica y en el mundo. Se solicitan datos precisos y detallados de radiación solar en muchas tecnologías de aplicaciones solares, como la conservación de la energía térmica, la valoración del rendimiento de los colectores solares, aplicaciones de enfriamiento y calentamiento, agricultura, estudios médicos, etc. Los datos de radiación UV son de particular interés, porque dicha radiación es suficientemente energética para romper varias moléculas biológicas, incluyendo el ADN (DIFFEY 1991). Un incremento de la radiación UV puede incrementar la incidencia del cáncer de la piel, cataratas, etc. Asimismo, puede dañar cosechas, ecosistemas y materiales (GIESE 1982, PARRISH *et al.* 1978). A pesar de la reconocida

importancia de los datos de radiación ultravioleta, sus mediciones han tenido poco énfasis en la mayoría de las naciones del mundo y sus datos observacionales son pocos y esporádicos.

MATERIAL Y METODOS

Las mediciones utilizadas en este trabajo fueron tomadas en la azotea del Hospital de Niños, situado en el centro de la ciudad de San José. El sitio tiene una excelente exposición solar y el horizonte se encuentra libre de obstáculos (árboles y edificios), salvo las montañas que rodean el Valle Central. Los datos fueron monitoreados durante todo el día solar, con los siguientes sensores:

- a. Un piranómetro Eppley de precisión espectral, modelo 8-48, para la medición de la radiación solar global en el rango 295 nm a 2.800 nm.
- b. Un radiómetro (fotómetro) Eppley de precisión UV, modelo TUVR, para la medición de la radiación global ultravioleta (UV-A + UV-B) en el rango 295 nm a 385 nm.

Los radiómetros UV y global se conectaron a un sistema de adquisición de datos (SAD), con lectura automática de cada componente UV por medio de una microcomputadora vía interfase RS232.

La ciudad de San José, por estar ubicada dentro de un clima tropical, presenta una época seca y una época lluviosa. Generalmente, la época seca inicia a mediados de diciembre y finaliza a mediados de mayo, mientras que la época lluviosa inicia a mediados de mayo y finaliza a mediados de diciembre.

RESULTADOS Y DISCUSION

Variaciones horarias de la radiación UV global y radiación solar global

Las figuras 1 y 2 presentan los valores horarios medios mensuales de la radiación solar global I_g y de la radiación global ultravioleta I_v , medidos desde octubre 1993 a enero 1995. En los meses de enero, febrero, marzo y abril se registran

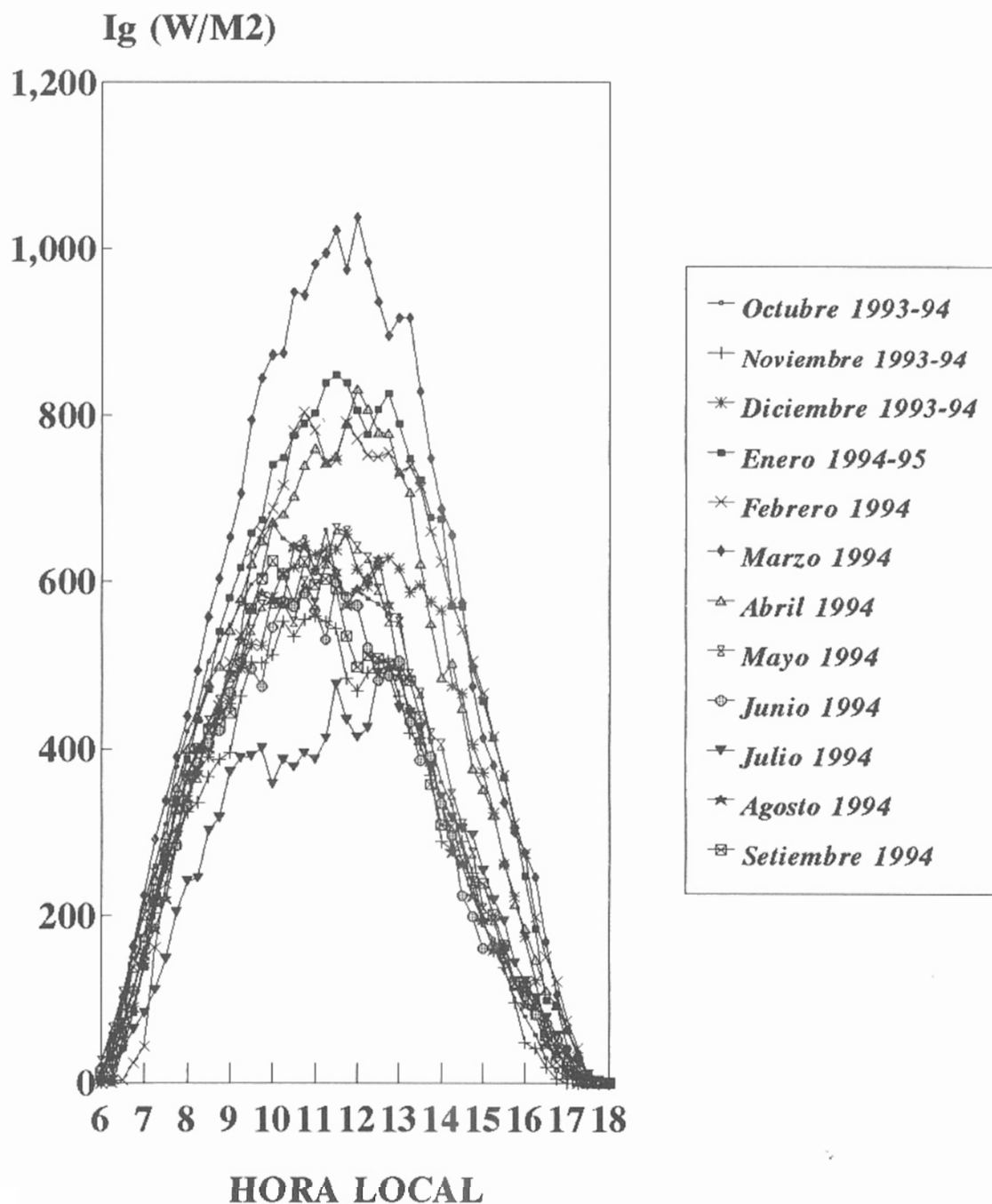


Fig. 1. Variación diurna de los valores horarios medios mensuales de la radiación solar global I_g .

los picos máximos de I_g e I_v en horas del mediodía. Los valores más altos de I_g e I_v se obtuvieron en el mes de marzo con 1.040 y 37 W/m^2 , respectivamente. Los valores máximos de I_g e I_v en los meses

de mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre y diciembre, están por debajo de 700 W/m^2 y 25 W/m^2 , respectivamente. Es interesante constatar una reducción de hasta de un 60% en la

Iv (W/M2)

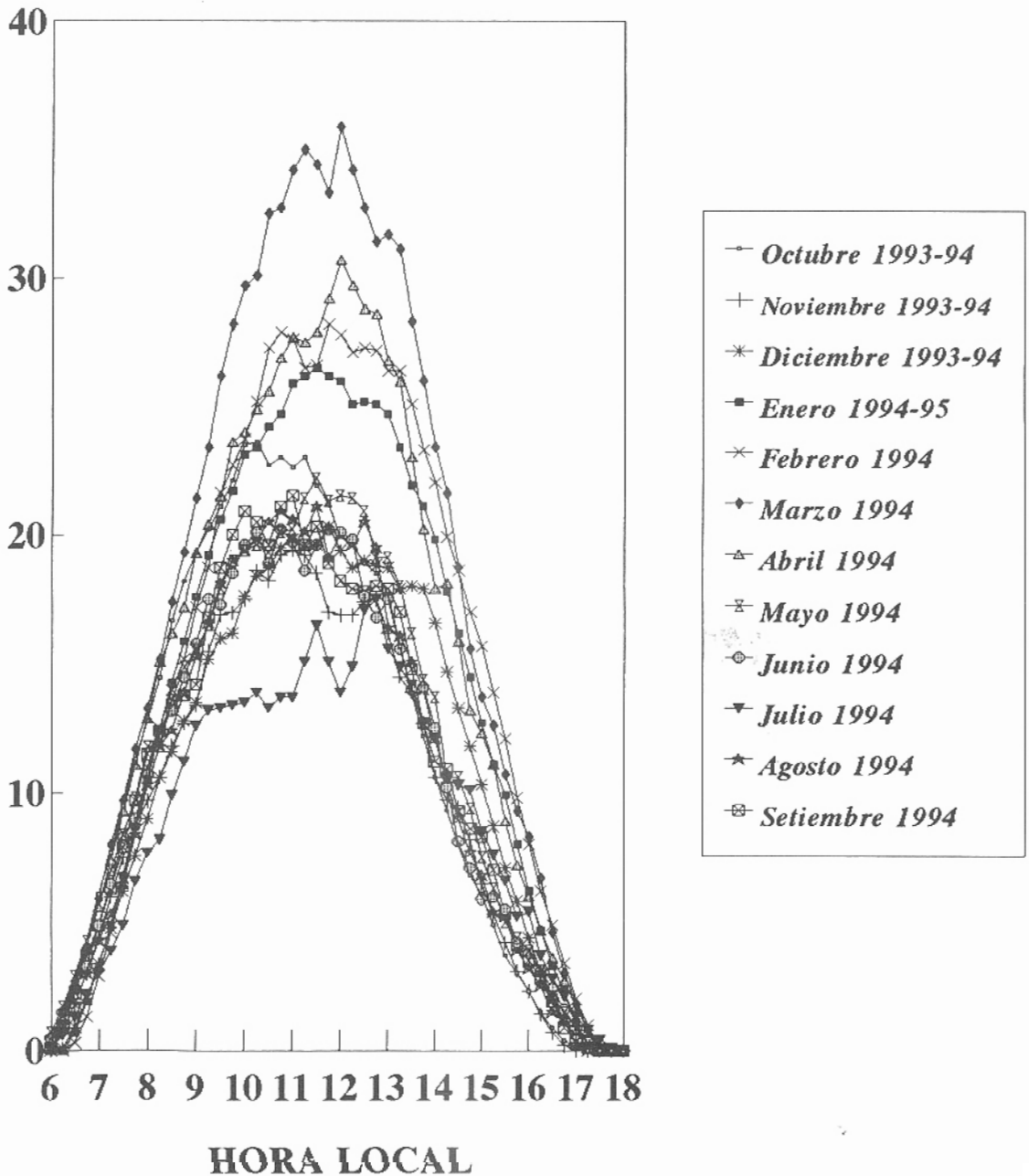


Fig. 2. Variación diurna de los valores horarios medios mensuales de la radiación ultravioleta Iv.

radiación global ultravioleta medida en julio con respecto a la de marzo, lo cual se atribuye principalmente a la nubosidad y la precipitación. Las mediciones de julio en San José son menores a las

obtenidas en Santa Cruz en julio de 1991 (FERNANDEZ *et al.* 1992), debido a la mayor contaminación atmosférica y a la menor condición de transparencia atmosférica de la ciudad de San José

Los valores horarios medios mensuales de la radiación ultravioleta y la radiación solar global fueron agrupados de acuerdo con las estaciones seca (diciembre a abril) y lluviosa (mayo a noviembre). Los valores horarios medios de I_v y de I_g para los períodos seco y lluvioso se muestran en la figura 3. En la época seca los valores máximos de I_v e I_g son 28,2 y 823 W/m^2 , mientras que en la época lluviosa alcanzan 19,2 y 568 W/m^2 , respectivamente. Esto representa una diferencia mayor del 30% entre ambas épocas climáticas. Por otra parte, la relación I_v/I_g aumenta en la época lluviosa (3,30%) con respecto a la época seca (3,25%). Esto se debe a que los cambios de I_v son menores que los de I_g , porque el agua en las nubes atenúa más la radiación solar visible e infrarroja que la radiación ultravioleta (WRIGHT 1993).

Característica del flujo diario de radiación ultravioleta y global

La figura 4 a y b muestra los valores de la radiación total diaria ultravioleta H_v y de la radiación solar global H_g durante el año. Los valores promedios anuales fueron de 0,14 y 4,44 kWh/m^2 , respectivamente. Se observa mucha dispersión en los puntos graficados, lo que se debe a los diferentes niveles de nubosidad. Sin embargo, se puede observar una cierta similitud en la variación anual de H_v y H_g , a pesar de que entre ellos existe una diferencia que excede un orden de magnitud. La mayoría de los valores diarios de H_v están por encima del valor medio anual de 0,14 kWh/m^2 en los primeros 150 días del año (época seca), con un H_v máximo de 0,26 kWh/m^2 . No obstante, algunos valores de H_v relativamente altos se dan también en la época lluviosa. En la figura 4b se observan valores de H_g mayores a 7,0 kWh/m^2 en algunos días de la época lluviosa, lo cual puede ser atribuido a la limpieza de la atmósfera producida por las fuertes lluvias caídas en horas previas a los registros máximos (WRIGHT 1993). Se observa además, que en la mayoría de los primeros 150 días del año (época seca), los valores de H_g son mayores que el promedio anual de 4,4 kWh/m^2 . La ausencia de registros en los días 60 a 70 se debió al mal funcionamiento de los sensores. Los valores de I_v diarios pueden variar, sobre todo durante la época lluviosa, en más del 500%, debido a factores climáticos, por lo que conviene aclarar el hecho de

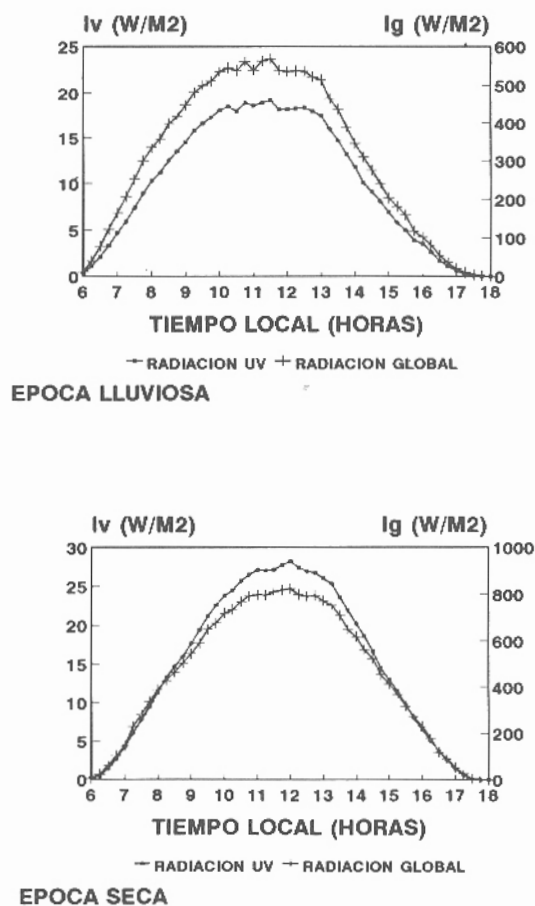


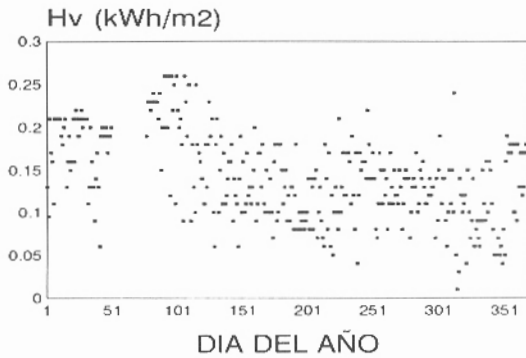
Fig. 3. Variación diaria de los valores horarios medios mensuales de la radiación ultravioleta I_v y la radiación solar global I_g , en épocas lluviosa (mayo a noviembre) y seca (diciembre a abril).

que las medias mensuales no se pueden usar de ninguna forma para predecir los I_v diarios.

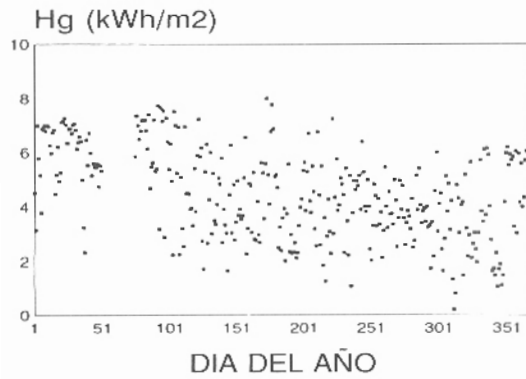
Correlación lineal entre la radiación ultravioleta y global

En la figura 5 se grafican los valores de radiación máxima diaria de I_v versus I_g para todo el período (784 puntos). Aplicando el método de mínimos cuadrados se obtuvo una ecuación lineal de regresión de la forma:

$$I_v = -0,425 + 0,034 I_g \quad (1)$$



(a)



(b)

Fig. 4. Curso anual de los valores diarios de la radiación ultravioleta H_v y la radiación solar global H_g .

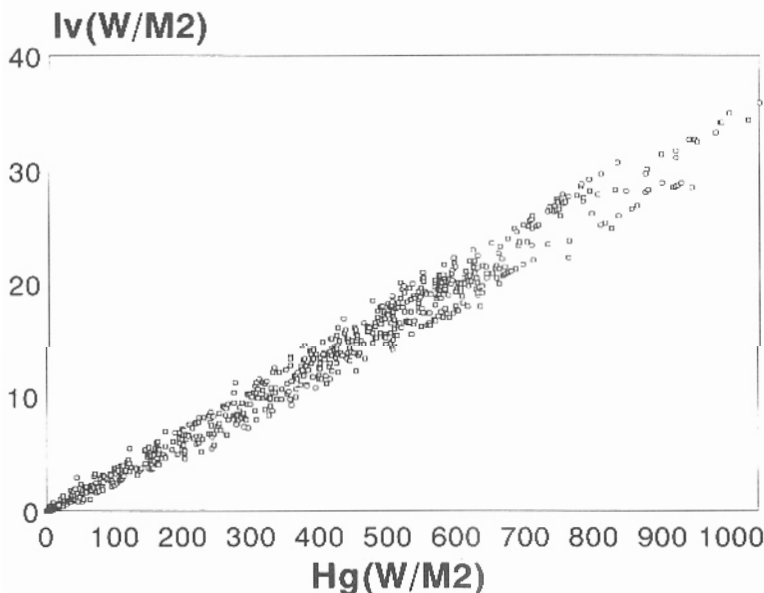


Fig. 5. Relación entre los valores horarios medios mensuales de la radiación solar global I_g y la radiación ultravioleta I_v .

El coeficiente de correlación entre ambas variables fue de 0,99, lo que representa un coeficiente de determinación (r^2) mayor del 98%. Por lo tanto la ecuación (1) tiene un alto grado de confiabilidad para estimar la radiación ultravioleta a partir de datos de radiación solar global en San José.

El cuadro 1 muestra los valores de las regresiones lineales, calculados para cada mes del año por separado.

Valores diarios de la radiación ultravioleta y global máxima, mínima y media

Los valores diarios máximos, mínimos y medios de la radiación ultravioleta y global, así como el cociente porcentual entre ambos, para el período en cuestión, se muestran en el cuadro 2. En los meses de junio y noviembre de 1994 se registraron los valores totales máximos y mínimos de la radiación solar global, con 8,0 kWh/m² y 0,21 kWh/m², respectivamente. En los meses de marzo y abril de 1994 se registraron los valores máximos de radiación ultravioleta (0,26 kWh/m²), mientras que el valor más bajo se registró en noviembre de 1994 (0,008 kWh/m²). En el promedio total la radiación ultravioleta constituyó el 3,35% de la radiación solar global.

Basados en las mediciones tabuladas del

Cuadro 1.
Valores de los coeficientes A y B en la ecuación de regresión
 $Iv=A+B I_g$ con base en valores medios mensuales

<i>Mes</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	r^2	<i>E (Iv)</i>	<i>n</i>	<i>E (r)</i>	<i>Gl</i>
Ene.	-0,85392	0,032009	0,994262	0,735	49	0,000355	47
Feb.	-0,60529	0,035873	0,995354	0,70483	49	0,000357	47
Mar.	-1,16073	0,035363	0,996991	0,683285	49	0,000283	47
Abr.	-0,83591	0,037503	0,997509	0,515449	49	0,000273	47
May.	-0,37989	0,034393	0,993955	0,597406	49	0,000391	47
Jun.	-0,34168	0,035362	0,99163	0,688628	49	0,000475	47
Jul.	-0,00614	0,034584	0,995402	0,382472	49	0,000343	47
Ago.	-0,11353	0,033266	0,992179	0,679461	49	0,000431	47
Set.	-0,28616	0,034536	0,99216	0,662121	49	0,000448	47
Oct.	-0,76790	0,035397	0,98865	0,913172	49	0,000553	47
Nov.	-0,28930	0,034636	0,994657	0,511106	49	0,000370	47
Dic.	-0,63403	0,031292	0,994282	0,564227	49	0,000346	47

A,B coeficientes de la ecuación, r^2 coeficiente de determinación, E (Iv) error estándar de Iv, E (r) error estándar de r, n número de datos, Gl grados de libertad.

Cuadro 2.
Valores diarios máximos, mínimos y medios de la radiación global y ultravioleta,
medidos durante el período octubre 1993 a enero 1995

<i>Mes/Año</i>	<i>Radiación global</i> (<i>kWh/m²</i>)			<i>Radiación UV</i> (<i>kWh/m²</i>)			<i>UV/G</i> (%)
	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Medio</i>	<i>Máximo</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Medio</i>	
Oct. 1993	6,73	1,87	4,30	0,22	0,073	0,16	3,72
Nov. 1993	6,04	1,33	3,82	0,21	0,046	0,12	3,14
Dic. 1993	6,87	2,43	4,80	0,21	0,072	0,14	2,92
Ene. 1994	7,27	3,13	6,20	0,22	0,113	0,19	3,06
Feb. 1994	6,72	2,32	5,33	0,22	0,086	0,18	3,38
Mar. 1994	7,41	4,67	6,56	0,26	0,150	0,22	3,35
Abr. 1994	7,74	2,23	5,20	0,26	0,086	0,18	3,46
May. 1994	7,24	1,63	4,14	0,23	0,061	0,14	3,38
Jun. 1994	8,00	2,26	4,63	0,20	0,088	0,13	2,81
Jul. 1994	6,76	2,00	3,78	0,18	0,060	0,11	2,91
Ago. 1994	7,02	1,07	3,84	0,21	0,046	0,13	3,39
Set. 1994	6,40	2,02	3,92	0,22	0,077	0,13	3,32
Oct. 1994	6,01	1,73	3,65	0,19	0,068	0,13	3,56
Nov. 1994	5,73	0,21	3,25	0,24	0,008	0,10	3,08
Dic. 1994	6,19	1,11	4,17	0,18	0,036	0,13	3,12
Ene. 1995	6,38	2,01	4,06	0,19	0,060	0,15	3,26
Promedio anual			4,48			0,15	3,35

cuadro 2, los valores medios anuales de la radiación solar global y de la radiación ultravioleta, para el período en cuestión, fueron 4,48 kWh/m² y 0,15 kWh/m², respectivamente.

Efecto de la claridad del cielo en la fracción ultravioleta

El índice de claridad, K_T , representa una evaluación general de las condiciones de transmisión atmosférica, y se define como el cociente de la radiación solar global en una superficie horizontal H_g y la radiación solar extraterrestre H_o , $K_T=H_g/H_o$ (DUFFIE y BECKMAN 1974).

En el cuadro 3 se muestran los valores promedio de H_v/H_g en función del índice de claridad, K_T . Para ello se distribuyeron los días comprendidos entre octubre de 1993 hasta enero de 1995 en función de cuatro intervalos del índice de claridad, K_T . Un 65% de todos los días (303 días) dan un K_T menor del 60%. Los coeficientes de determinación r^2 obtenidos para la fracción H_v/H_g en función de las cuatro categorías de K_T son muy pobres, siendo el mayor valor de 6,3% ($K_T<0,5$) y el menor valor de 2,2% ($K_T>0,75$), correspondientes a los días nublados y despejados, respectivamente. Asimismo, se observa que los valores medios de H_v/H_g (%) varían desde un máximo de 3,46% ($K_T<0,5$) hasta un mínimo de 3,0% ($0,65<K_T<0,75$ y $K_T>0,75$). Esto indica que la nubosidad y la precipitación reducen más drásticamente H_g que H_v , resultando en un incremento del cociente H_v/H_g en días nublados.

Las variaciones diarias de la fracción porcentual de la radiación ultravioleta H_v/H_g (%) en dependencia de K_T (H_g/H_o) se muestran en la figura 6. La línea de mejor ajuste se obtuvo con el método de los mínimos cuadrados. El coeficiente de determinación r^2 fue del 13%, lo cual indica que los valores del cociente H_v/H_g no solamente dependen de K_T sino también de otras condiciones de transmisión atmosférica.

La dispersión de los valores altos de H_v/H_g que se observa en la figura 6 se debe probablemente al cambio del tamaño de la gota de lluvia y a la cantidad y variancia en el tipo de nubosidad. La dispersión de los valores bajos de H_v/H_g (%), probablemente se debe al cambio en la cantidad y tamaño de las partículas aerosólicas, núcleos de condensación, etc. En este caso los efectos de dispersión aerosólica son mayores que los efectos de absorción de vapor de agua. El tamaño y la concentración aerosólica aumentan con la cantidad disponible de agua, la dispersión es más eficiente a menores longitudes de onda: la fracción difusa decrece con el índice de claridad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ecuación (1) es válida para evaluar con alto grado de precisión la intensidad de la radiación UV si conocemos la intensidad de la radiación solar global, la cual es fácilmente accesible en las estaciones actinométricas del país. Este tipo de relación puede ser aplicada en otras localidades del país y aún en otras zonas geográficas, teniendo en cuenta

Cuadro 3.
Valores promedio de H_v/H_g en función del índice de claridad, K_T

	<i>Intervalos del índice de claridad (K_T)</i>			
	$K_T<0,5$	$0,5<K_T<0,6$	$0,65<K_T<0,75$	$K_T>0,75$
Número de días	225	78	73	30
P (%)	48,8	16,9	15,8	6,5
r^2 (%)	6,3	4,6	2,9	2,2
σ_s	0,52	0,41	0,26	0,21
H_v/H_g (%)	3,46	3,16	3,0	3,0

P(%) porcentaje del número de días con respecto al total, r^2 (%) coeficiente de determinación, σ_s desviación estándar.

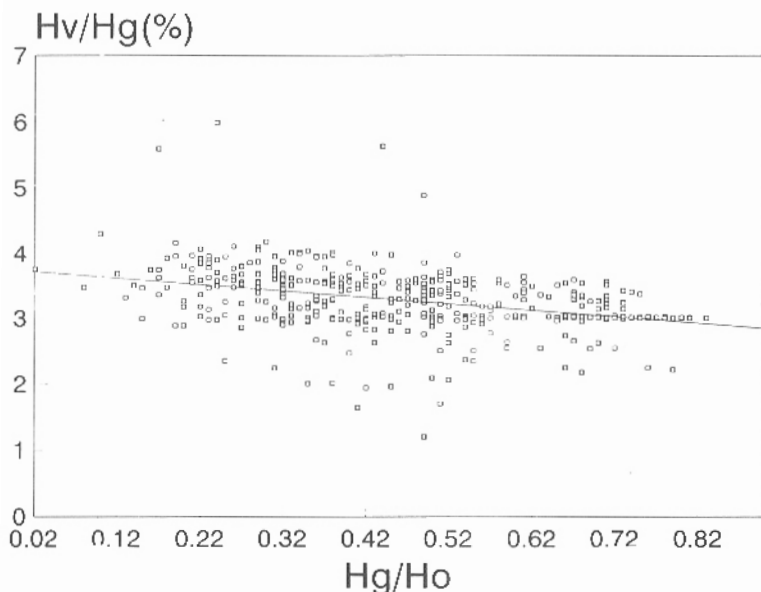


Fig. 6. Variación de la fracción ultravioleta porcentual, H_v/H_g (%), con el índice de claridad del cielo, H_g/H_o .

la contaminación del aire y otras condiciones de transmisión atmosférica.

A las personas interesadas en la exposición a la radiación solar con fines recreativos se les puede hacer la siguiente recomendación: una hora de exposición en el período de las 11 a.m. a las 2 p.m. (3 horas) produce en general el doble de exposición UV que si se hace de 8 a 9 a.m. ó de 3 a 4 p.m. Antes de las 8 a.m. y después de las 4 p.m., la exposición es prácticamente segura e inversa. En resumen, el que quiere «broncearse», debería hacerlo antes de las 11 a.m. o después de las 2 p.m. para no correr riesgos.

REFERENCIAS

- Akilov Yu Zu, V.A. Turulov, A. Safaev y K.K. Khahimov. 1977. Computer calculation of ultraviolet radiation in the interior of buildings under natural illumination. *Geolotekhnika*, 13: 49-55.
- Al-Aruri S., M. Rasas, K. Al-Jamal y N. Shaban. 1988. An assessment of global ultraviolet in the (0.290-0.385 μm) range in Kuwait. *Solar Energy*, 41: 159-162.
- Coulsen, K.L. 1975. Solar and terrestrial radiation. Academic Press, New York.
- Davis, A. y D. Sims. 1983. Weathering of polymers. Applied Science Publication, Essex, England.
- Diffey, B.L. 1977. The calculation of the spectral distribution of natural ultraviolet radiation under clear day conditions. *Phys. Med. Biol.*, 22:309-316.
- Diffey, B.L. 1991. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. *Phys. Med. Biol.* 36:299-328.
- Duffie, J.A. y W.A. Beckman. 1974. Solar energy thermal processes. Wiley Interscience, New York.
- Giese, A.C. 1982. Living with the sun's ultraviolet rays. Plenum Press, New York.
- Fernández, W., V. Castro, J. Wright y H. Hidalgo. 1992. Changes in the solar irradiance and determination of atmospheric turbidity during the Solar Eclipse of July 11, 1991. *Earth, Moon, and Planets* 63: 119-132. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Kollias, N. y A. Bager. 1984. Measurements of solar middle ultraviolet radiation in Kuwait. *Solar and Wind Technology*, 1: 59-62.
- Parrish, J.A., R.R. Anderson, F. Urbach y D. Pitts. 1978. UV-A. Plenum Press, New York.
- Sukhanov, I.S. y A.S. Safaev. 1971. Estimation of the natural ultraviolet irradiation of buildings. *Geliotekhnika* 7: 64-69.
- Wright, J. 1980a. Correlación lineal entre la radiación solar global y otros parámetros climáticos en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 11-12: 167-172.
- Wright, J. 1980b. Estimación de la radiación solar global en Costa Rica utilizando horas de sol y otros datos meteorológicos. *Revista Geográfica de América Central*, 11-12: 157-166.
- Wright, J. 1993. Variación anual de la radiación solar global ultravioleta en Heredia, Costa Rica. *Revista Geofísica*, 38: 159-173.