

IRRADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA ERITEMÁTICA EN VALENCIA DURANTE EL AÑO 2000

José A. MARTÍNEZ-LOZANO, Fernando TENA, M. Pilar UTRILLAS, M. José MARÍN

Departamento de Termodinámica, Facultad de Físicas, Universidad de Valencia.

RESUMEN

Se ha estudiado el comportamiento de la radiación solar ultravioleta eritemática integrada recibida sobre una superficie horizontal y correspondiente a Valencia durante el año 2000. En dicho estudio se han considerado los índices estadísticos más representativos como son la media aritmética (M), la mediana (Md), la desviación estándar (DE) y los valores máximo (Mx) y mínimo (Mn). Se han considerado valores de irradiación semihoraria y diaria obtenidos a partir de registros continuos de irradiancia. También se han analizado los valores acumulados a lo largo de un día para diferentes meses y para todo el año.

Palabras clave: Irradiación solar ultravioleta, eritema, índices UV estadísticos, valores acumulados, Valencia.

ABSTRACT

Experimental data concerning the integrated erythematic ultraviolet radiation on a horizontal surface measured at Valencia during the year 2000 have been analysed. A study of the most representative statistical indexes: arithmetic mean (M), median (Mn), standard deviation (DE), maximum (Mx) and minimum (Mn) values has been carried out. The study has focused on both the half hourly and daily values of the solar ultraviolet irradiation. The accumulated values along a day and through a whole year have also been considered.

Key words: UV solar radiation measurements, erythema, UV statistical indexes, accumulated values, Valencia.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar ultravioleta tiene efectos considerables sobre la atmósfera terrestre. La absorción atmosférica de la radiación ultravioleta origina la elevación de la temperatura del aire en las capas altas de la atmósfera y es causa de la existencia y variabilidad del ozono estratosférico. A nivel del suelo produce fenómenos de tipo fotobiológico como son efectos bactericidas, eritema,

hemólisis, cataratas y otros muchos (DIFFEY, 1991). Además la acción ultravioleta resulta ser muy importante en otros procesos tales como la degradación de materiales de construcción (YAMASAKI, 1983), la detoxificación fotocatalítica (MEHOS y TURCHI, 1993), etc. Todas esas razones justifican la creciente demanda por parte de la sociedad de datos experimentales de radiación solar ultravioleta.

Un método apropiado para el estudio de las características de la radiación solar ultravioleta es la espectrorradiometría. Desafortunadamente los espectrorradiómetros más comunes tienen una precisión relativamente pequeña en el rango UV, particularmente en el correspondiente a la UVB (280-320 nm) que incluye la mayor parte de la radiación solar eritemáticamente activa (UVE). La radiación solar eritemáticamente activa se obtiene a través de la convolución de la radiación solar ultravioleta con la curva del espectro de acción eritemático que representa la respuesta de la piel humana a la acción de dicha radiación (McKINLAY y DIFFEY, 1987). En la Figura 1 puede verse la forma de dicho espectro. Por otro lado, el elevado precio de los espectrorradiómetros justifica como alternativa para la evaluación de valores medios diarios los resultados obtenidos a partir de sensores de banda ancha. Fuera de la atmósfera, la irradiancia UVB representa el 1.3% de la constante solar (IQBAL, 1983). Sin embargo debido al ozono estratosférico, dicha componente llega a la superficie muy disminuida, representando menos del 10% de la irradiancia ultravioleta total

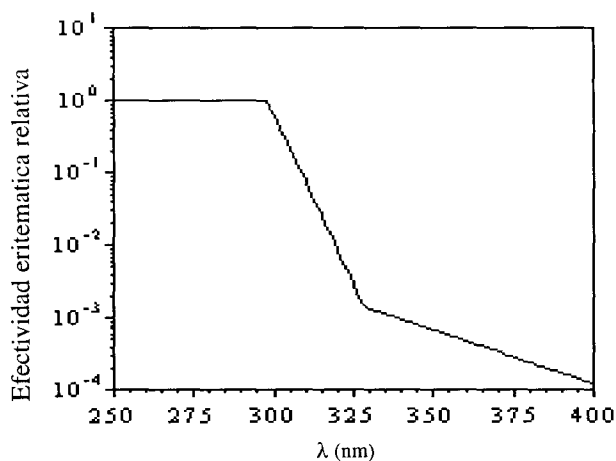


Fig. 1: Espectro de acción eritemático correspondiente a la respuesta de la piel humana a la acción de la radiación solar ultravioleta.

(HENRIKSEN *et al.*, 1989; LUBIN *et al.*, 1989). La sección eficaz de absorción del ozono disminuye en dos órdenes de magnitud si la longitud de onda aumenta desde 295 hasta 330 nm (MOLINA y MOLINA, 1986). A partir de los 330 nm, la absorción del ozono se hace despreciable.

Las estaciones que realizan mediciones de radiación UVB integrada lo hacen empleando radió-

metros del tipo Robertson-Berger (BERGER, 1976). Hay muchas estaciones de medida de radiación solar de banda ancha que miden la radiación ultravioleta total. Hoy día hay cada vez un número más elevado de estaciones de medida de UVB, mientras que las medidas sistemáticas de UVA (320-400 nm) han recibido menor atención. De todos modos la mayor parte de las estaciones de medida de irradiancia ultravioleta han sido establecidas recientemente y hay muy pocos resultados referentes a largos periodos de tiempo (AL ARURI, 1990; ELHADIDY *et al.*, 1990; NAGARAJA RAO *et al.*, 1984; SADLER, 1992).

El Grupo de Radiación Solar del Departamento de Termodinámica (Universidad de Valencia) está desarrollando un programa de medida y evaluación de la radiación ultravioleta desde el año 1991 (MARTÍNEZ-LOZANO *et al.*, 1994 y 1996), y en particular de la UVB desde el año 1999 (TENA *et al.*, 2000) En este trabajo se presenta el análisis de valores de radiación UVE obtenidos en el año 2000.

2. INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS

Las medias de irradiancia UVB han sido obtenidas mediante un piranómetro YES UVB-1 del tipo Robertson-Berger. El rango espectral de dicho aparato está comprendido entre 280 y 330 nm y presenta una respuesta al coseno inferior al 2% para ángulos cenitales menores de 60°. Las medidas son obtenidas sobre una superficie horizontal y corresponden a valores de irradiancia solar ultravioleta B (UVB) y ultravioleta eritemática (UVE)

Las medidas son tomadas en las instalaciones del Instituto Nacional de Meteorología en el Parque de Viveros de la ciudad de Valencia, de modo que las obstrucciones sobre el horizonte son prácticamente despreciables. Las medidas son obtenidas y registradas de forma continua y guardadas en un sistema de adquisición de datos cada minuto como valores de irradiancia media (W/m^2). Los valores así obtenidos son acumulados cada media hora y proporcionados en forma de irradiación total (J/m^2). El YES UVB-1 es recalibrado adecuadamente por el Instituto Nacional de Meteorología por comparación con un estándar del propio Instituto y mediante intercomparaciones periódicas con otros aparatos similares.

El análisis aquí presentado de los datos así obtenidos corresponde al año 2000. Se han obtenido valores de cada media hora y diarios a partir de los registros originales de un minuto. Los valores semihorarios se presentan como valores de irradiación (J/m^2). Los valores diarios se han obtenido también a partir de los registros originales de un minuto incluyendo incluso las horas incompletas para tomar en consideración incluso la pequeña irradiación correspondiente a las horas extremas del día. Los valores diarios se presentan exclusivamente como valores integrados, por tanto en J/m^2

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de los valores horarios de irradiación UVE

Hemos realizado la evaluación de los índices estadísticos más significativos correspondientes a los

datos disponibles de irradiancia UVE. Dichos índices han sido evaluados para cada uno de los 12 meses del año y son: la media aritmética (M), la mediana (Md), la desviación estándar (DE), el valor máximo (Mx) y el valor mínimo (Mn). La media aritmética y la desviación estándar se emplean muy frecuentemente en los cálculos estadísticos de datos. Sin embargo, si tenemos en cuenta que la distribución diaria de la irradiancia solar integrada es frecuentemente asimétrica (BENNETT, 1967; THOMAS y NORRIS, 1982), la media aritmética y la desviación estándar pueden no tener un significado totalmente correcto para describir las características de la radiación. En lugar de la media y la desviación estándar, se pueden emplear medidas no paramétricas como la mediana y las distancias intercuartilares. Esas medidas no paramétricas no dependen de la forma

Tabla 1. CARACTERÍSTICAS ESTADÍSTICAS DE LOS VALORES SEMIHORARIOS DE IRRADIACIÓN SOLAR ULTRAVIOLETA ERITEMÁTICA (UVE) EN J/M² REGISTRADOS EN VALENCIA DURANTE EL AÑO 2000

Intervalo Hora	Mn	Mx	M	Md	DE
6:00	1.0	9.00	3.9	3.0	2.6
6:30	1.0	19.0	7.5	6.0	5.5
7:00	1.0	35.0	12.6	10.0	10.8
7:30	1.0	64.0	19.8	12.0	19.4
8:00	1.0	102.0	30.9	16.0	30.6
8:30	1.	145.0	48.1	35.0	42.8
9:00	4.0	194.0	70.3	55.0	56.1
9:30	5.0	245.0	96.5	81.0	69.7
10:00	1.0	291.0	123.8	109.0	83.0
10:30	1.0	338.0	149.1	127.0	94.1
11:00	1.0	371.0	171.7	162.0	102.5
11:30	1.0	386.0	185.6	170.0	109.1
12:00	2.0	401.0	193.4	180.0	110.8
12:30	2.0	415.0	193.1	177.0	111.9
13:00	3.0	386.0	186.2	175.0	108.5
13:30	3.0	358.0	172.0	156.0	103.0
14:00	3.0	333.0	152.3	134.0	94.8
14:30	5.0	285.0	126.9	111.0	83.8
15:00	3.0	243.0	101.0	84.5	72.3
15:30	1.0	193.0	75.6	59.0	59.5
16:00	1.0	147.0	53.3	38.0	45.6
16:30	1.0	106.0	35.0	23.0	32.8
17:00	1.0	70.0	23.9	17.0	21.9
17:30	1.0	42.0	15.9	13.0	13.0
18:00	1.0	23.0	9.1	7.0	6.7
18:30	1.0	10.0	4.4	4.0	2.8
19:00	1.0	4.0	1.9	2.0	0.8
19:30	0.0	2.0	0.3	0.0	0.5
20:00	0.0	2.0	0.2	0.0	0.5

(M = media aritmética; Md = mediana; Mx = valor máximo; Mn = valor mínimo; DE = desviación estándar)

de la distribución de valores y no exigen el conocimiento previo de una determinada densidad de probabilidad como exige la distribución normal.

En la Tabla 1 se presenta el análisis estadístico correspondiente a todo el año 2000 y empleando valores de radiación integrada para intervalos de media hora.

Las características principales que pueden deducirse de este análisis estadístico pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- i) Los valores de la media son generalmente más altos, aunque similares a los de la mediana. Las diferencias entre ellos son muy variables y no parece que sigan un determinado esquema diario o estacional.
- ii) El valor máximo absoluto alcanza los 415 J/m² y corresponde al intervalo horario comprendido entre las 12 y las 12.30 h.
- iii) Los valores mínimos absolutos son más irregulares pero no sobrepasan el valor de 5 J/m² en media hora.

Los valores horarios de la irradiación solar UVE han sido también reducidos a valores medios

Tabla 2. VALORES MEDIOS SEMIHORARIOS DE IRRADIACIÓN SOLAR UVE (J/M²) MEDIDOS EN VALENCIA EN EL AÑO 2000

Hora	ENERO	FEBR	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OCT	NV	DC
6:00	0.0	0.0	1.0	1.8	4.8	7.4	6.7	2.8	1.3	1.2	1.0	1.0
6:30	0.0	0.0	1.4	5.1	11.6	15.1	13.2	6.0	3.1	1.1	1.0	1.0
7:00	0.0	1.1	3.5	12.1	21.6	27.9	26.4	10.5	6.8	2.0	1.0	1.1
7:30	1.0	3.0	9.2	25.4	39.2	47.2	49.7	19.6	12.3	4.9	1.5	1.2
8:00	2.5	8.5	18.8	43.2	61.8	74.6	79.8	34.9	25.2	10.1	3.4	1.9
8:30	6.5	18.1	33.6	65.8	90.2	105.2	113.6	59.3	46.0	21.3	7.5	4.5
9:00	13.0	32.9	54.0	98.4	125.0	140.7	151.3	90.4	69.7	38.0	14.5	8.5
9:30	22.7	50.0	75.6	132.6	158.0	188.5	194.1	130.9	98.3	55.0	31.0	13.7
10:00	33.5	69.6	96.2	165.1	195.9	234.8	236.5	167.4	132.9	76.4	45.6	24.9
10:30	45.3	88.8	117.4	190.8	230.7	271.7	277.5	202.3	159.1	99.4	60.8	37.0
11:00	55.8	106.2	142.5	218.7	256.6	304.4	312.8	231.1	189.8	114.5	74.0	47.2
11:30	62.8	121.4	157.3	232.9	279.1	322.4	329.4	247.7	211.3	122.2	82.2	54.0
12:00	66.9	131.2	170.9	242.0	294.2	327.9	335.5	253.7	214.7	137.7	84.3	57.7
12:30	64.9	130.7	167.1	229.2	288.6	334.6	345.7	254.7	218.4	137.3	85.5	57.1
13:00	60.8	124.9	159.4	209.9	276.2	336.5	334.2	248.6	208.3	132.3	79.9	55.2
13:30	54.9	112.2	141.7	199.1	264.2	308.7	311.0	235.9	189.8	120.4	69.0	47.8
14:00	45.2	95.3	129.5	184.0	230.4	281.1	279.0	212.9	166.8	105.2	56.2	37.5
14:30	34.1	74.6	104.4	142.4	195.9	247.5	238.6	181.3	138.4	86.7	42.7	27.9
15:00	23.5	53.8	81.5	112.2	164.2	207.2	198.2	144.8	108.6	64.0	29.3	18.1
15:30	14.1	34.9	58.2	86.0	130.4	164.7	158.2	107.4	76.5	43.3	17.3	8.8
16:00	7.2	19.7	37.1	64.7	96.5	122.8	119.4	76.1	51.6	25.6	7.8	4.2
16:30	2.7	9.3	20.8	44.3	65.3	86.4	84.9	52.2	31.9	12.2	3.2	1.5
17:00	1.0	3.3	10.0	25.7	42.7	56.8	54.1	31.5	16.3	4.9	1.2	0.0
17:30	0.0	1.1	3.7	12.5	25.5	33.2	31.9	15.8	6.9	1.9	0.0	0.0
18:00	0.0	0.0	1.3	5.0	12.5	18.0	16.0	6.7	3.0	1.0	0.0	0.0
18:30	0.0	0.0	1.0	1.6	5.0	8.1	7.0	3.1	1.5	1.1	0.0	1.0
19:00	0.0	0.0	0.0	1.0	1.6	2.9	2.3	1.7	1.5	1.0	0.0	1.0
19:30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	0.5	1.3	1.2	0.3	0.0	0.1
20:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.2	1.2	0.3	0.0	0.0

mensuales. La irradiación UVE recibida durante el periodo de medidas y correspondiente a los 12 meses del año puede verse en la Tabla II. Dicha tabla muestra, por tanto, las medias mensuales de irradiación global UVE distribuida por medias horas a lo largo de todo el día y para todos los meses del año. De forma gráfica, los resultados correspondientes a los diferentes índices estadísticos considerados pueden verse en las figuras 1 a 5.

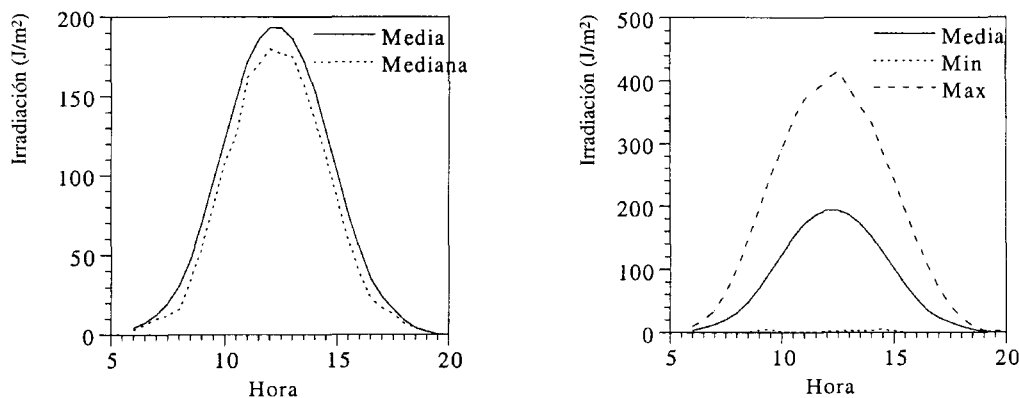


Fig. 2: Evolución comparativa de los valores de diferentes índices estadísticos de irradiación solar UVE (J/m^2). a) media aritmética frente a mediana. b) Media aritmética frente a valores máximo y mínimo.

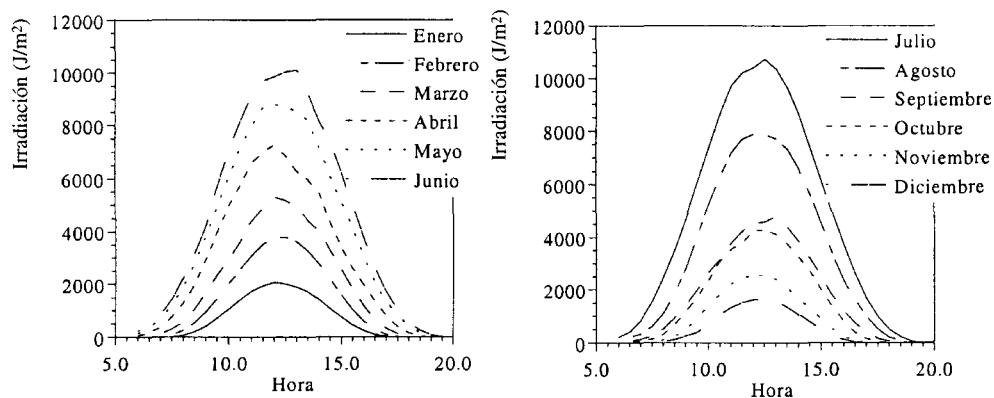


Fig. 3: Evolución diaria de los valores medios mensuales de irradiación solar UVE (J/m^2). Valencia, año 2000.

En la Fig. 2 se han representado simultáneamente los valores de la media y de la mediana pudiéndose comprobar las características anteriormente descritas a partir de la Tabla I. En la Fig. 3 puede verse la suma total mensual de la irradiación solar UVE correspondiente a cada uno de los 12 meses del año.

Los valores de la irradiación solar semihoraria máxima registrada al mediodía oscila entre los 58 J/m^2 registrados en Diciembre y los 346 J/m^2 correspondientes al mes de Julio. Puede obser-

vase una gran simetría en la distribución anual de la irradiancia solar UVE. El valor medio correspondiente a las horas centrales del día muestra un esquema parecido desde Abril hasta Septiembre. Lo mismo ocurre durante los meses de Invierno. En Primavera (entre Marzo y Abril) y en Otoño (entre Septiembre y Octubre) tiene lugar una fuerte variación. Los meses de Primavera muestran un comportamiento similar al correspondiente a los meses de Verano mientras que el Otoño puede ser comparado con el Invierno. Ese hecho puede ser fácilmente explicado a partir de la simetría estacional existente con respecto a los solsticios de Verano e Invierno. De todos modos el aumento de nubosidad y la lluvia que tiene lugar particularmente en el mes de Octubre deben ser también tomados en consideración. La cantidad total de agua de lluvia registrada en Octubre en Valencia es generalmente del orden del doble de la registrada en cualquier otro mes del año (PÉREZ, 1994).

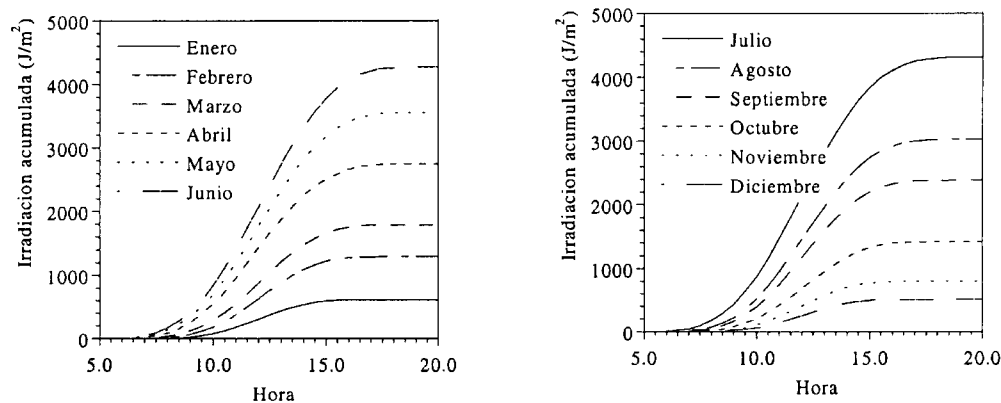


Fig. 4: Valores diarios acumulados de irradiación solar UVE (J/m^2) a partir de los valores medios semihorarios correspondientes a los 12 meses del año. Valencia, año 2000.

Hace ya muchos años que se ha llegado a la conclusión de que el ozono estratosférico alcanza un máximo anual en Abril y un mínimo en Noviembre en el Hemisferio Norte (VAN HEUKLON, 1979). El ozono resulta ser el factor de reducción más importante de la radiación UVB es el ozono de la misma manera que el factor más importante de la reducción de la radiación UVA es la nubosidad. Los resultados registrados en ambas bandas no siguen necesariamente el mismo esquema temporal (JUSTUS y MURPHY, 1994). Este esquema de evolución anual del ozono hace que el máximo de irradiación UVE corresponda a Julio y no a Junio.

Frecuentemente es interesante conocer el tiempo requerido para alcanzar una cantidad de irradiación previamente fijada, especialmente si se trata de estudiar los efectos biológicos de dicha radiación. Con ese propósito y a partir de los datos de la Tabla II, se han representado en la Fig. 4 los valores de la irradiación total acumulada correspondientes a un día medio de cada uno de los 12 meses del año dividido en dos mitades. Como puede verse las dos mitades son prácticamente simétricas. Esas curvas pueden ser utilizadas para evaluar dosis biológicas efectivas.

3.2. Análisis de valores diarios de irradiación UVE

Para determinar los valores correspondientes a un año se ha estudiado la evolución con el tiempo de los valores diarios a lo largo de todo el periodo analizado (año 2000). Sin embargo debido a lo corto de la serie de datos disponibles, dicho año no puede ser considerado como un año de referencia ya que para ello debería disponerse de series más largas de medidas. La evolución de la radiación solar UVB a lo largo de dicho año puede observarse en la Fig. 5. Los valores diarios medios muestran fluctuaciones tan grandes que parece imposible predecir valores de irradiación

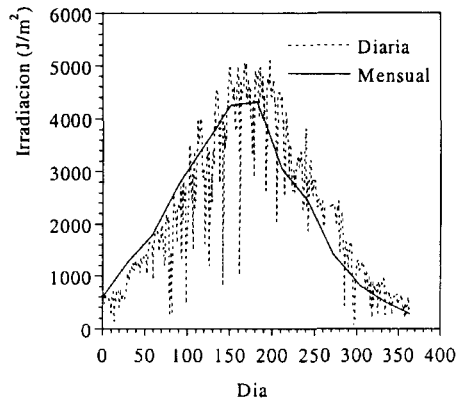


Fig. 5: Evolución de la irradiación solar UVE diaria total en Valencia a lo largo del año 2000. También se representan los valores medios mensuales como referencia.

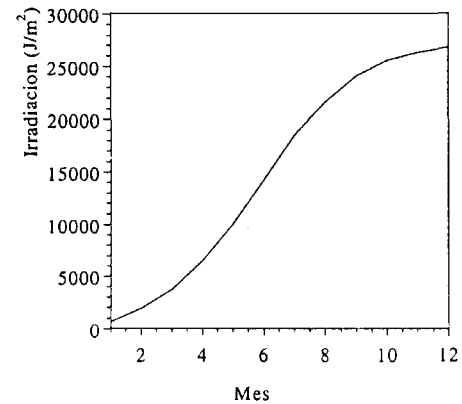


Fig. 6: Irradiación solar UVE media acumulada en Valencia a lo largo de todo el año 2000. El valor total acumulado resulta ser de 2.68 kJ/m².

para intervalos de tiempo tan cortos. En dicha figura se representa también la evolución de la radiación media mensual. El valor máximo tiene lugar en Junio-Julio y el valor mínimo en Diciembre. La figura es bastante regular, pero no completamente simétrica. La caída correspondiente al período Verano-Otoño (de Agosto a Noviembre) es bastante más acusada que el aumento en el período Invierno-Primavera (de Febrero a Junio). Dicha asimetría sugiere el interés del empleo de los valores medianos en vez de los medios en el análisis estadístico de los valores estudiados. Por fin en la Fig. 6 se presentan los valores totales de UVE acumulados para todo el año a partir de los valores medios.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con financiación de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) a través de los Proyectos Coordinados CLI97-0345-C05 y REN2000-0903-C08CLI.

6. REFERENCIAS

- AL-ARURI, S.D. (1990): "The empirical relationship between global solar radiation and global ultraviolet (0.290-0.385 nm) solar radiation components". *Solar Energy*, 45, 61-64.
- BENNETT, I. (1967): "Frequency of daily insolation in Anglo North America during June and December". *Solar Energy*, 11, 41-55.
- BERGER, D.S. (1976): "The sunburning ultraviolet meter: design and performance". *Photochem. Photobiol.*, 24, 587593.
- DIFFEY, B.L. (1991): "Solar ultraviolet radiation effects on biological systems". *Phys. Med. Biol.*, 36, 299-328.
- ELHADIDY, M.A., ABDEL-NABI, D.Y. y KRUSS, P.D. (1990): "Ultraviolet solar radiation at Dhahran, Saudi Arabia". *Solar Energy*, 44, 315-319.
- HENRIKSEN, K. STAMNES, K. y OSTENSEN, P. (1989): "Measurements of solar U.V., visible and near I.R. irradiance at 78 °N". *Atmospheric Environment*, 23, 1573-1579.
- IQBAL, M. (1983): "An Introduction to Solar Radiation". Academic Press, New York.
- JUSTUS, C.G. y MURPHEY, B.B. (1994): "Temporal trends in surface irradiance at ultraviolet wavenlengths". *J. Geophys. Res.*, 99, D1, 1389-1394.
- LUBIN, D., FREDERICK, J.E., BOOTH, C.R., LUCAS, T. y NEUSCHULER, D. (1989): "Measurements of enhanced springtime ultraviolet radiation at Palmer station, Antarctica". *Geophys. Res. Let.*, 16, 783-785.
- MARTÍNEZ-LOZANO, J.A., CASANOVAS, A.J. y UTRILLAS, M.P. (1994): "Comparison of global ultraviolet (290-385 nm) and global irradiation measured during the warm season in Valencia, Spain". *I. J. of Climatology*, 14, 93-102.
- MARTÍNEZ-LOZANO, J.A., TENA, F. y UTRILLAS, M.P. (1996): "Measurement and analysis of ultraviolet solar irradiation in Valencia, Spain". *I. J. of Climatology*, 16, 947-955.
- MCKINLAY, A.F. y DIFFEY, B.L. (1987): "A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin". *CIE J.*, 6, 17-22.
- MEHOS, M y TURCHI, C.S. (1993): "Field testing solar photocatalytic detoxification of TCE-contaminated groundwater". *Environm. Progress*, 12, 194.
- MOLINA, L.T. y MOLINA, M.J. (1986): "Absolute absorption cross sections of ozone en the 185- to 350- nm wavelength range". *J. Geophys. Res.*, 91, D13, 14501-14508.
- NAGARAJA RAO, C.R., TAKASHIMA, T., BRADLEY, W.A. y LEE, T.Y. (1984): "Near ultraviolet radiation at the earth s surface: measurements and model comparisons". *Tellus*, 36B, 286-293.
- PEREZ, A.J., (ed.) (1994): "Atlas Climático de la Comunidad Valenciana (1961-1990)". COPUT, Generalitat Valenciana, Valencia.
- SADLER, G.W. (1992): "Ultraviolet radiation at Edmonton, Alberta, Canada". *Solar Energy*, 49, 13-17.

TENA, F., MARÍN, M.J., MARTÍNEZ-LOZANO, J.A., UTRILLAS, M.P. y GÓMEZ, J.L. (2000): "Spectral and broad band ultraviolet measurements in Valencia (Spain): a preliminary comparison". *Radiation Protection Dosimetry*, 91, 119-122.

THOMAS, H. y NORRIS, I.B. (1982): "Seasonal variations in frequency distribution of daily totals of short-wave solar radiation". *Agricultural Meteorology*, 25, 267.

VAN HEUKLON, T. (1979): "Estimating atmospheric ozone for solar radiation models". *Solar Energy*, 22, 63-68.

YAMASAKI, R. S. (1983): "Solar ultraviolet radiation on horizontal, South/45° and South/vertical Surfaces". *Durability of Building Materials*.