

## Series temporales de medida de radiación solar ultravioleta y fotosintética en Málaga

José Aguilera<sup>a</sup>, M. Victoria de Gálvez<sup>b</sup>, Rafael Conde<sup>a</sup>, Eduardo Pérez-Rodríguez<sup>a</sup>, Benjamín Viñeola<sup>c</sup>, Roberto Abdala<sup>a</sup>, María Segovia<sup>a</sup>, Enrique Herrera<sup>b</sup> y Félix L. Figueroa<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Ecología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus Universitario de Teatinos. Málaga. España.

<sup>b</sup>Cátedra de Dermatología. Facultad de Medicina. Universidad de Málaga. Campus Universitario de Teatinos. Málaga. España.

<sup>c</sup>Departamento de Biología Vegetal, Animal y Ecología. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Jaén. Campus Las Lagunillas. Jaén. España.

**Resumen.**—*Introducción.* La radiación ultravioleta es el principal factor etiopatogénico de las formas más frecuentes del cáncer de piel. En la provincia de Málaga es habitual la exposición solar continuada, sobre todo por tener una alta afluencia de turismo y, además, por ser una región donde se desarrollan gran número de actividades actínicas, tanto laborales como de ocio.

*Material y métodos.* Se determinan series temporales de medida de radiación ultravioleta UVB, UVA y radiación fotosintéticamente activa (PAR) solar en Málaga (36,5° N-4,7° O) utilizando la recién constituida Red de Medida de Radiación Ultravioleta-Fotosintética de Andalucía (UVIFAN) (<http://uvifan.scai.uma.es>).

*Resultados.* Se presentan ciclos anuales desde el año 1997 hasta finales de 2001 de la dosis diaria total para las tres bandas de radiación. Las dosis diarias máximas se observan en los meses estivales. El índice UV, que se alcanza en las horas centrales del día, osciló entre valores máximos de 7-8 durante los meses estivales y valores de 1-2 en los meses de invierno.

Las relaciones de dosis PAR/ UVA no varían a lo largo del año, aunque la relación UVB/ UVA y UVB/ PAR sigue un patrón anual de variación con valores máximos en los meses estivales, mientras que los valores más bajos se obtuvieron durante los meses invernales.

*Conclusiones.* Estos datos confirman que en la provincia de Málaga, en los meses estivales existen niveles muy altos de radiación UVA, UVB y PAR, por lo que es de suma importancia adoptar medidas específicas de fotoprotección en esta época para evitar tanto las quemaduras a corto plazo, como la fotocarcinogénesis y el fotoenvejecimiento a largo plazo.

**Palabras clave:** cáncer, fotoprotección, UVA, UVB, PAR, índice UV, medidas de radiación solar.

### TIM E SERIES OF ULTRAVIOLET AND PHOTOSYNTHETIC SOLAR RADIATION MEASUREMENTS IN MÁLAGA

**Abstract.**—*Introduction.* Ultraviolet radiation is the main etiopathogenic factor in the most frequent forms of skin cancer. In the province of Málaga (Spain), continual exposure to the sun is common, especially as there are many tourists, and because it is a region where a great many actinic activities, both occupational and leisure, take place.

*Material and methods.* Time series of solar UVB and UVA ultraviolet radiation and photosynthetically active radiation (PAR) measurements were determined in Málaga (36.5 N-4.7 W) using the recently formed Andalusian Network of Ultraviolet-Photosynthetic Measurements (UVIFAN) (<http://uvifan.scai.uma.es>).

*Results.* Annual cycles of the total daily dose for all three radiation bands were presented from 1997 to the end of 2001. The maximum daily doses were observed in the summer months. The UV index, which reaches peak values during midday hours, ranged from maximum values of 7-8 during the summer months to values of 1-2 during the winter months.

The ratios of PAR/ UV-A doses do not vary throughout the year, although the UV-B/ UV-A and UV-B/ PAR ratios follow an annual variation pattern, with maximum values in the summer months, while the lowest values were obtained during the winter months.

*Conclusions.* This data confirms that there are very high levels of UVA, UVB and PAR radiation in the province of Málaga in the summer months; therefore, it is extremely important to take specific photoprotective measures during this period to prevent both short-term burns and long-term photocarcinogenesis and photoaging.

**Key words:** cancer, photoprotection, UVA, UVB, PAR, UV, solar radiation measurements.

### INTRODUCCIÓN

Es un hecho indiscutible que la incidencia de carcinoma epinocelular está relacionada con las dosis acumuladas de radiación ultravioleta (UV), por lesión

del ADN y/ o a través de alteraciones en el mecanismo de regulación inmunitaria<sup>1</sup>. La exposición solar prolongada produce lesiones en el ADN e interfiere con los mecanismos inmunológicos y moleculares reparadores, y da lugar a mutaciones que se transmiten a células hijas tras las mitosis. Este hecho genera la aparición de lesiones precursoras de malignidad (queratosis actínicas, queilitis actínica), que si no se tratan siguen un proceso secuencial y desarrollarán finalmente un carcinoma epinocelular.

Se sabe que este efecto inductor de cáncer se debe fundamentalmente a la UVB, aunque la UVA también puede tener cierto papel carcinogénico y favorece la

*Correspondencia:*

José Aguilera.

Departamento de Ecología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus Universitario de Teatinos, s/ n. 29071 Málaga. España. [jaquilera@uma.es](mailto:jaquilera@uma.es)

Recibido el 11 de junio de 2003.

Aceptado el 21 de octubre de 2003.

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Cultura (CICYT, AMB97-1021-CO2-01 y FEDER, 1FD97-0824) y la Unión Europea (Programa Environment and Climate, proyecto ENV4-CT96-0191).

aparición de las lesiones producidas por las anteriores<sup>2</sup>. La exposición solar continuada se relaciona de forma incontestable con el desarrollo de carcinomas espinocelulares donde se sigue el proceso secuencial anteriormente citado, y también, aunque no está totalmente esclarecido, con el carcinoma basocelular. La radiación UV también parece desempeñar un papel importante en la patogenia del melanoma, ya que existe una estrecha relación entre la incidencia y la latitud, aunque, en este caso, la radiación UV intervendría más sobre la modulación inmunológica contra el desarrollo del tumor<sup>3</sup>. Estudios clínicos han demostrado en los últimos años un incremento significativo de la incidencia de cáncer de piel de distinto tipo relacionado en parte o totalmente con la exposición a la radiación UV solar, fundamentalmente la radiación UVB<sup>4-8</sup>.

En España, las tasas de mortalidad del melanoma se han duplicado en un corto período de tiempo (Centro Nacional de Epidemiología) y, aunque no se detectan agregaciones geográficas estadísticamente significativas, las tasas más altas se concentran en las zonas costeras (costa de Levante, Baleares, Canarias y Andalucía)<sup>9</sup>. Este aumento en la incidencia y mortalidad por cáncer de piel hace que sean necesarios esfuerzos de investigación desde diferentes sectores con el fin de relacionar el cambio en los hábitos de vida que llevan a una mayor exposición de la piel a los rayos nocivos, así como la creación de campañas de sensibilización para un uso más responsable y saludable del sol. En este ámbito, la creación y desarrollo de redes de medida de radiación solar ligadas a estudios de efectividad de la radiación UV sobre organismos vivos supone una estrategia integral que permite alcanzar un conocimiento más global de los efectos de la radiación UV sobre plantas, animales y seres humanos. La monitorización de la radiación UV a escala regional permite conocer con una mayor resolución la incidencia de UV a nivel terrestre y la divulgación de los datos a un nivel comprensible en todos los ámbitos sociales es un pilar básico en la concienciación del uso razonado del sol.

La Comunidad Andaluza, al ser una de las regiones españolas con más horas de sol anuales, tiene una alta afluencia de turismo y además es una región donde se desarrollan gran número de actividades actínicas, tanto laborales como de ocio. Por ello, es fundamental la creación de una cultura sobre la fotoprotección y promover hábitos saludables que eviten o reduzcan daños en la piel. En este sentido, se ha establecido la Red Andaluza de Medida de Radiación Ultravioleta-Fotosintética con la finalidad de hacer llegar al público los cambios tanto diarios como estacionales de la radiación UVB (280-315), UVA (315-400), el índice UV y la radiación fotosintéticamente activa (400-700 nm).

En España, se ha constituido también una red de medida de radiación solar UVB que cuenta con en

instrumentos de banda ancha, radiómetros YES UVB-1, ajustados a la banda de 280-315 nm que hace medidas integradas de radiación UVB eritemática y con espectrorradiómetros Brewer para evaluar el ozono estratosférico<sup>10</sup>.

En este trabajo se describen las variaciones estacionales y diarias de la radiación UVB, UVA y radiación fotosintéticamente activa (PAR), así como del índice UV y los cambios de las relaciones entre las diferentes bandas espectrales en la ciudad de Málaga desde la ubicación del equipo de medida en el año 1996.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Equipo de medida y metodología

Para la medida de irradiancia solar se ha utilizado el dosímetro ELDONET (Real Time Computer, Alemania), el cual es un instrumento que mide la radiación solar en las bandas correspondientes al UVB (280-315 nm), UVA (315-400) y PAR (400-700 nm). Los márgenes de medida para cada banda se han tomado de acuerdo a la Comisión Internationale d'Éclairage (CIE). El equipo de medida pertenece a la red ELDONET (European Light Dosimeter Network, <http://www.ib.pi.cnr.it>), la cual consta de 31 estaciones de medida a lo largo de toda la geografía europea y otros puntos del mundo<sup>11</sup>. Por otro lado, se ha constituido la Red UVIFAN (Red de Medida de Radiación Ultravioleta-Fotosintética en Andalucía), con los mismos radiómetros empleados en la red ELDONET y con estaciones en cada una de las provincias de la Comunidad Andaluza. El equipo está dotado de una esfera integradora tipo Ulbrich que recoge la radiación difusa y directa y que pasa a tres fotodiodos de silicio, dotados de filtros específicos que filtran radiación luminosa en las tres bandas. Las medidas se realizan cada segundo y mediante un *software* de control específico se almacenan los valores medios de la radiación en cada banda a intervalos de 1 min<sup>12</sup>.

Se han realizado mediciones de las tres bandas espectrales desde la colocación del equipo en la azotea del Servicio Central de Investigación de la Universidad de Málaga en el año 1996. A partir de estas medidas se han estudiado los patrones diarios de radiación UVB, UVA y PAR incidentes en las diferentes estaciones del año y se han analizado los patrones anuales de la evolución de la dosis diaria total incidente en cada banda espectral. Se representan además medidas de las variaciones diarias y anuales de las relaciones entre las distintas bandas (UVA/ PAR, UVB/ PAR y UVB/ UVA).

### Cálculo del índice ultravioleta (índice UV)

A partir de las medidas de radiación UVB y UVA se han calculado los valores del índice UV, el cual es un indicador de la cantidad de la radiación solar con acción eritemática. Este índice se obtiene a partir de la irradiancia solar normalizada por el espectro de acción para la aparición de eritema en piel humana recomendado por la CIE y que fue propuesto por McKinley y Diffey<sup>13</sup>, por el que se obtiene la irradiancia solar eritemática efectiva. Multiplicando el valor de irradiancia efectiva por 40 se obtiene el índice UV.

En el caso de los radiómetros ELDONET, las irradiancias eritemáticas efectivas se estiman a partir de la normalización del espectro de irradiancia solar, multiplicado por el espectro de los filtros para cada banda de medida y multiplicando éstos por el espectro de acción para el eritema normalizado a 1 para la longitud de onda de máxima acción (297 nm). Por lo tanto, se obtiene un algoritmo que relaciona las irradiancias obtenidas por cada banda con la irradiancias efectivas. En este trabajo se representan los valores de índice UV obtenidos a partir de los valores máximos diarios de UVB y UVA de acuerdo con los criterios actuales recomendados por todas las organizaciones internacionales.

### RESULTADOS

En la figura 1 se representan las variaciones estacionales de las dosis totales diarias de radiación PAR, UVA y UVB en el período comprendido entre abril de 1997 y diciembre de 2001. Se alcanzaron dosis diarias máximas de radiación PAR en torno a  $1,4 \cdot 10^4$   $\text{kJ m}^{-2}$ . Estas dosis se obtuvieron en el período comprendido entre mediados de junio y julio, en los cuales se obtienen las mayores irradiancias diarias debidos a un mayor ángulo solar, acompañadas de la época donde el fotoperíodo, o número de horas de sol al día, es el mayor del año. Las dosis mínimas diarias de radiación PAR se obtuvieron en el período comprendido entre mediados de diciembre-enero, con valores en torno a  $3.000$   $\text{kJ m}^{-2}$ . La radiación UVA en la ciudad de Málaga siguió un patrón similar a la radiación PAR con dosis máximas diarias en torno a los  $1.300$   $\text{kJ m}^{-2}$  durante el mismo período estival, y con valores mínimos invernales en torno a los  $300$   $\text{kJ m}^{-2}$ .

En el caso de la radiación UVB, las dosis máximas de irradiancia se obtuvieron en el mismo período estival con valores en torno a los  $37$   $\text{kJ m}^{-2}$  y valores mínimos invernales en torno a los  $4$   $\text{kJ m}^{-2}$ .

El índice UV, indicador de la máxima irradiancia solar efectiva eritemática que se alcanza a lo largo del día, osciló entre valores máximos de 7-8 durante los meses estivales (fig. 2).

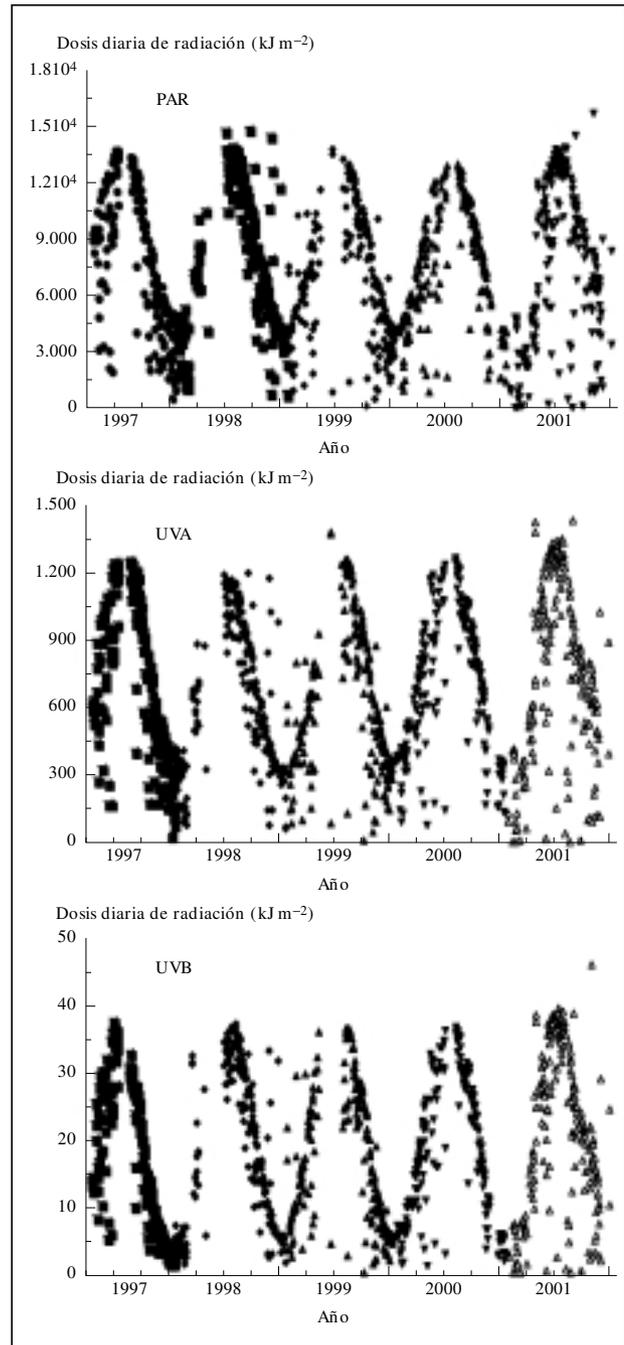


Fig. 1.—Series temporales de la dosis diaria de radiación solar en Málaga durante los años 1997-2001.

En cuanto a las relaciones entre bandas espectrales no se observaron diferencias significativas a lo largo del año de la relación UVA/ PAR (fig. 3). No obstante, la relación UVB/ UVA y UVB/ PAR tiene una variación estacional cuyos valores máximos coincidieron con la época donde se alcanzaron los valores máximos de radiación incidente para las tres bandas, en el mes de julio. Estos valores máximos de la relación UVB/ UVA y UVB/ PAR se explican a partir de una disminución en

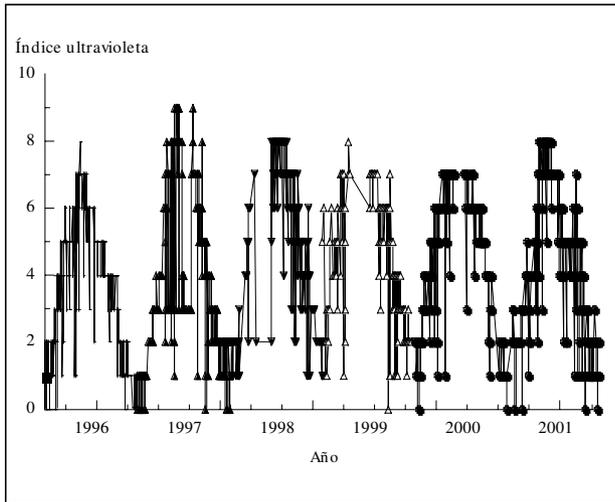


Fig. 2.—Evolución del índice ultravioleta en Málaga durante los años 1996-2001.

la época estival de la columna de ozono con respecto a la primavera (datos obtenidos por el satélite TOMS de la NASA<sup>12</sup>) y que se corresponde con el mayor ángulo solar donde la irradiancia es máxima.

En la figura 4 se representan los valores de irradiancia para las tres bandas espectrales a lo largo de un ciclo diario, y en los que se han comparado un día con cielo absolutamente despejado de verano (13-7-2000) con otro de invierno (7-1-2000). En el caso de las bandas de PAR, UVA y UVB, y para ambos días de medida, se observa un patrón diario con los valores máximos de irradiancia obtenidos en torno al mediodía solar y con valores mínimos al inicio y final del día (fig. 4). Los máximos diarios alrededor de  $450 \text{ W m}^{-2}$  de radiación PAR,  $45,3 \text{ W m}^{-2}$  de UVA y  $1,46 \text{ W m}^{-2}$  de UVB a principios de julio, mientras que a mediados de enero la radiación PAR alcanzó valores máximos en torno a  $220 \text{ W m}^{-2}$ ,  $19,3 \text{ W m}^{-2}$  de UVA y  $0,36 \text{ W m}^{-2}$  de UVB.

La relación UVA/ PAR alcanzó valores mínimos justo a la salida y puesta del sol, mientras que en el resto del día covarían ambas bandas espectrales, sobre todo las que corresponden a un día de invierno (fig. 5). En cambio, las relaciones UVB/ UVA y UVB/ PAR, al igual que lo observado a lo largo del año, siguieron un incremento gradual desde el amanecer al mediodía, coincidiendo con el máximo ángulo solar y, a partir de aquí, un descenso gradual hasta la puesta del sol. En época estival, los valores máximos de estas relaciones UVB/ UVA y UVB/ PAR se mantuvieron por un mayor período de tiempo coincidiendo con el alargamiento del sol en el céntit.

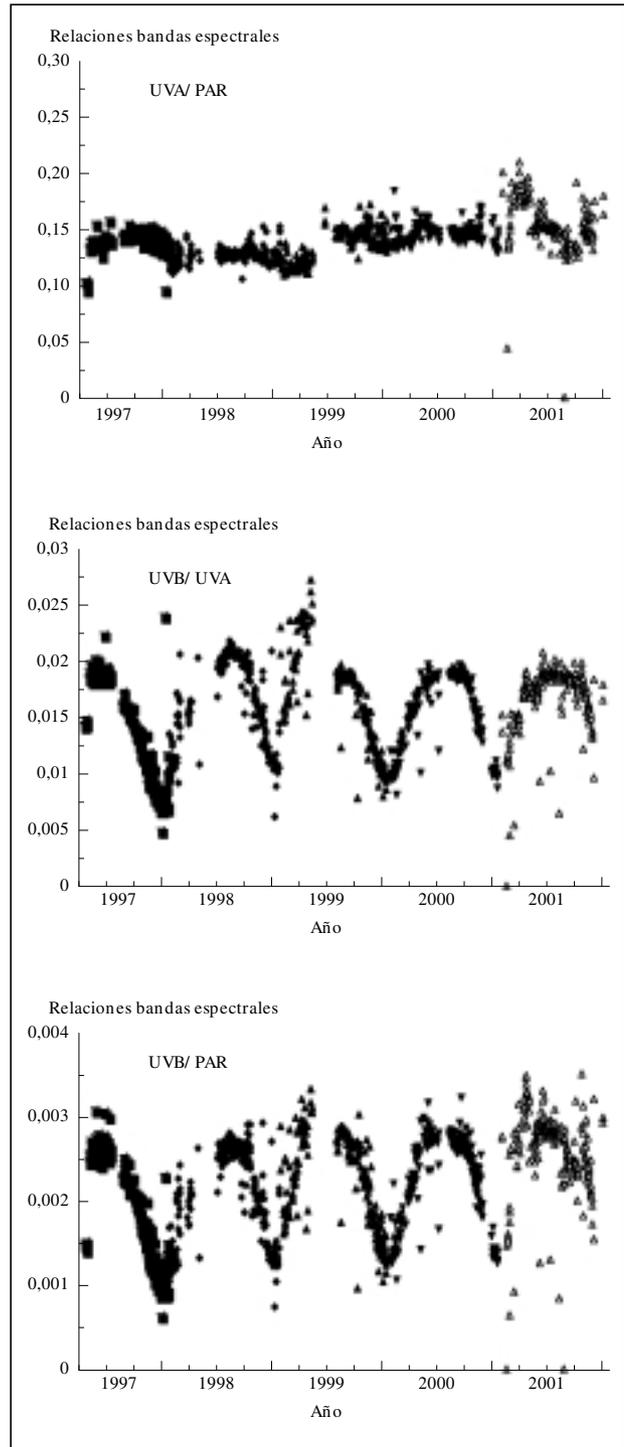


Fig. 3.—Evolución temporal de la relación entre las dosis diarias de radiación UVA/PAR, UVB/UVA y UVB/PAR en Málaga durante los años 1997-2001.

## DISCUSIÓN

Las características ambientales y climáticas en Andalucía, y concretamente en la provincia de Málaga, dada su localización geográfica, hacen que en

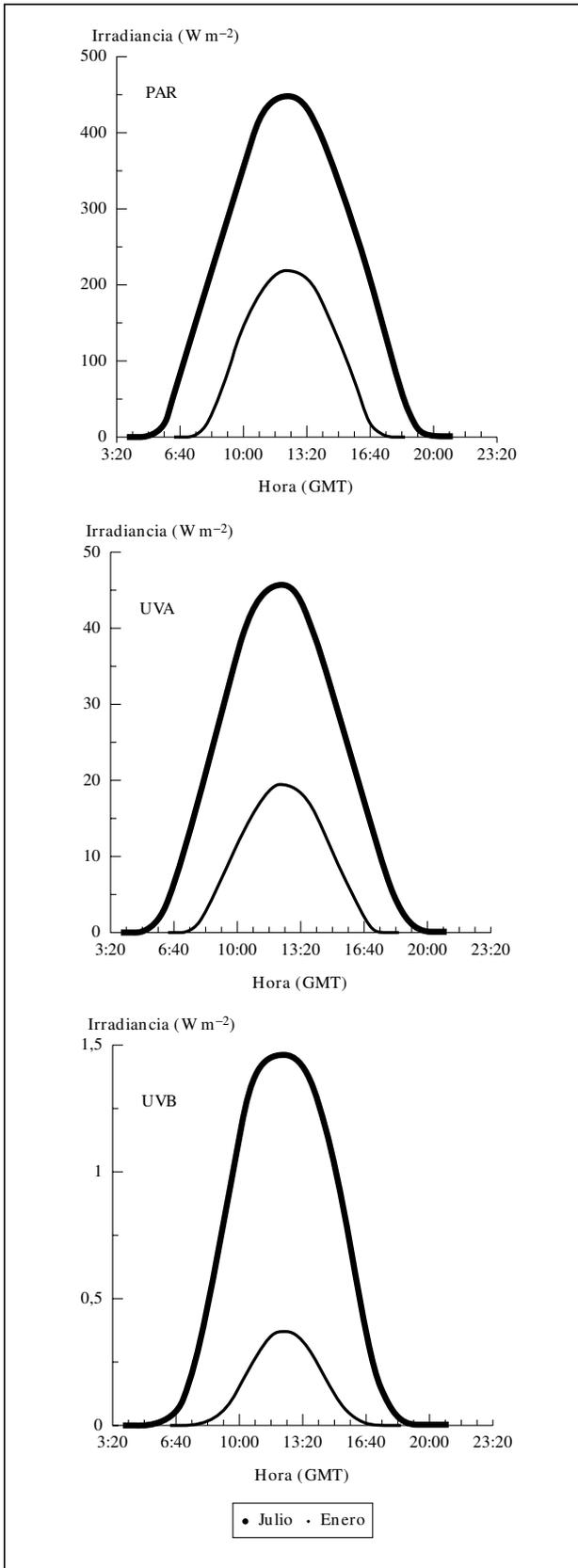


Fig. 4.—Evolución diaria de la irradiancia de radiación PAR, UVA y UVB en Málaga para un día de invierno (7/1/2000) y un día de verano (13/7/2000).

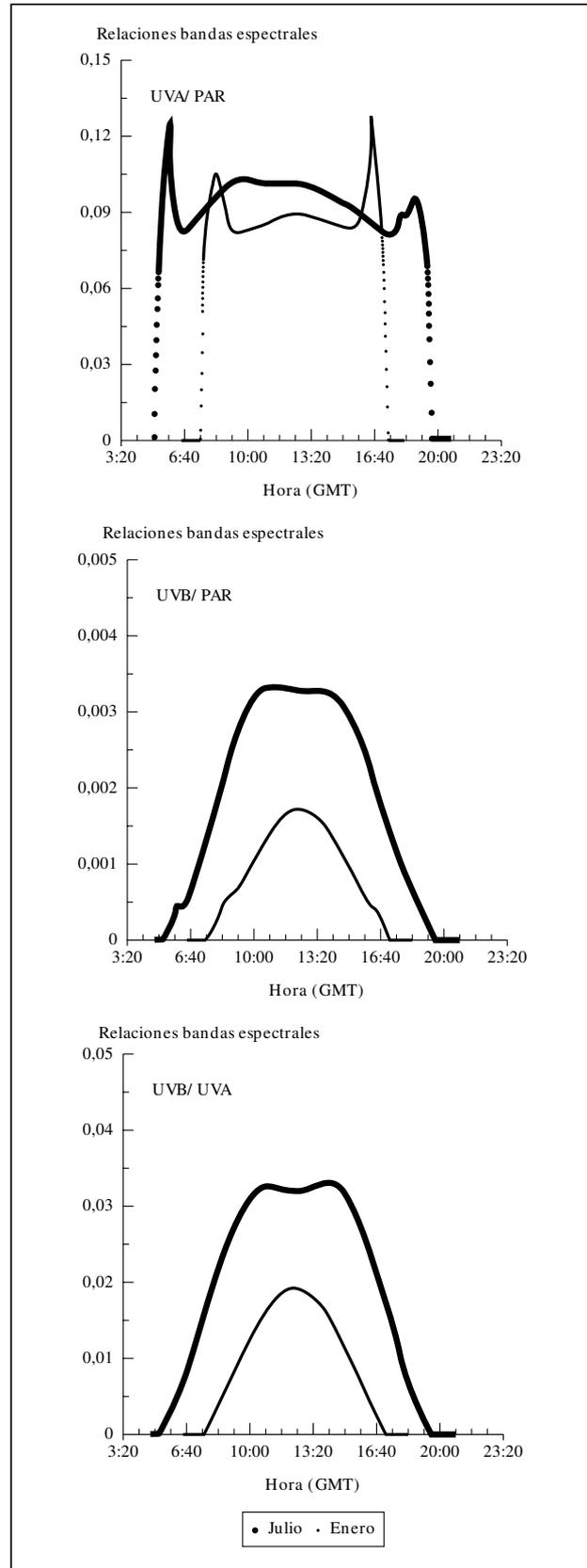


Fig. 5.—Evolución diaria de las relaciones entre las bandas UVA/PAR, UVB/UVB y UVB/PAR para un día de invierno (7/1/2000) y uno de verano (13/7/2000).

esta ciudad costera el cielo esté habitualmente despejado y se reciba una gran cantidad de insolación respecto a otras provincias españolas<sup>14</sup>.

En comparación con otros lugares donde se han tomado medidas temporales de radiación PAR con instrumentos similares dentro de la red ELDONET, es interesante indicar una mayor dosis máxima diaria de PAR en Málaga respecto a latitudes cercanas como Lisboa (39° N) o Canarias (28° N) donde se alcanzan dosis máximas para la misma época estival en torno a 10.300 y 12.500 kJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, respectivamente<sup>15,16</sup>.

Si bien las dosis de radiación PAR son mayores a las medidas en Lisboa y Canarias, las dosis máximas de UVA son significativamente menores a las obtenidas en ambos puntos de la red ELDONET donde se obtuvieron dosis máximas en torno a los 1.600 y 1.800 kJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, respectivamente<sup>15</sup>. Ortega-Resinas et al<sup>17</sup> han presentado previamente series temporales de radiación UVA en la comunidad Andaluza (ciudad de Sevilla). Los autores realizaron un estudio de los patrones diarios de radiación UVA y UVB durante el período comprendido entre los años 1991-1995. Los valores máximos de dosis diaria de irradiación UVA en Sevilla medidos por el radiómetro IL 1400 (International Light) estuvieron en torno a los 717,7 kJ m<sup>-2</sup> obtenidos entre los meses de junio-julio. Se observa así una subestimación de la radiación UVA por el radiómetro IL 1400 respecto al radiómetro ELDONET. Esto se explica por los distintos rangos espectrales de ambos equipos para la banda de UVA.

Al igual que las dosis diarias obtenidas para la radiación UVA, las dosis de UVB son menores a las obtenidas en Lisboa y Canarias, donde se alcanzan dosis máximas diarias en torno a los 430 y 460 kJ m<sup>-2</sup>, respectivamente<sup>15</sup>. Las dosis diarias de UVB están también por debajo de las obtenidas en Sevilla, en las cuales se miden dosis máximas en torno a los 55,8 kJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, respectivamente, por el radiómetro de International Light<sup>17</sup>. Esta subestimación de la radiación obtenida por el radiómetro ELDONET con respecto al de International Light es debida a que la ventana para la radiación UV del sensor está comprendida entre 280-315 nm, mientras que la ventana de UVB del radiómetro de International Light está entre 280-320 nm. Esta diferencia de 5 nm entre ambas ventanas justifica las diferencias obtenidas mediante ambos radiómetros, ya que la franja 315-320 nm supone casi el 50 % de la irradiación solar en la franja 280-320 nm.

Recientemente se ha presentado un mapa de las variaciones actuales de los índices UV en diferentes puntos de España a través de las medidas de la red nacional de medida de UVB, del Instituto Nacional de Meteorología<sup>10</sup>. Los valores del índice ultravioleta máximos obtenidos para distintos puntos de medida situados en zonas costeras (p. ej., Barcelona, Valencia, Palma de Mallorca) oscilan entre 8-9 en el período estival, es decir, un punto por encima a los obtenidos

en Málaga con del radiómetro ELDONET. Se han dado valores altos, incluso extremos, del índice de UV, por lo que las medidas de fotoprotección que se deben tomar han de ser máximas, sobre todo a finales de la primavera y durante el verano.

Tanto las variaciones diarias como estacionales de las relaciones lumínicas nos llevan a la conclusión que es necesario un mayor esfuerzo de investigación y educación sobre los efectos de la radiación UVB y sobre todo UVA, ya que existen períodos donde a pesar de tener irradiancias bajas de UVB se corresponden con las altas irradiancias de UVA a las que normalmente no se consideran tanto en los protocolos y acuerdos respecto a la fotoprotección al ultravioleta solar.

Dada la alta incidencia de lesiones tumorales cutáneas relacionadas con la exposición solar, creemos que es de gran utilidad realizar mediciones de las diferentes bandas de radiación ultravioleta en España, y más concretamente en las provincias de mayor exposición solar, como es el caso de la provincia de Málaga, y en zonas de alta montaña (como las zonas donde se practica el montañismo y el esquí) para conocer las diferencias estacionales y así hacer hincapié en campañas de fotoprotección, sobre todo en los meses anteriores a los estivales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Brash DE, Zielger A, Jonason AS. Sunlight and sunburn in human skin cancer: p53, apoptosis and tumor promotion. *J Invest Dermatol Symp Proc* 1996;1:136-42.
2. Ananthaswamy HN, Pierceall WE. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation carcinogenesis. *Photochem Photobiol* 1990;52:1119-36.
3. Carrel S, Johnson JP. Immunologic recognition of malignant melanoma by autologous T lymphocytes. *Curr Opin Oncol* 1993;5:383-9.
4. American Cancer Society. Cancer facts and figures-1996 (Brochure). Atlanta: American Cancer Society, 1996.
5. Giles GG, Marks R, Foles O. Incidence of non-melanocytic skin cancer treated in Australia. *B J M* 1988;296:3.
6. Miller DL, Weinstock MA. Nonmelanoma skin cancer in the United States: Incidence. *J Am Acad Dermatol* 1994; 30:774-8.
7. Pathak MA. Ultraviolet radiation and the development of non-melanoma and melanoma skin cancer: Clinical and experimental evidence. *Skin Pharmacol* 1991;4:85-94.
8. Robinson JK, Rigel DS, Amonette RA. Trends in sun exposure knowledge, attitudes and behaviours: 1986 to 1996. *J Am Acad Dermatol* 1997;37:179-86.
9. López-Abente G, Pollán M, Escolar A, Errezola M, Abaira V. Atlas de mortalidad por cáncer y otras causas en España. 1978-1992. Madrid: Fundación Científica de la Asociación Española contra el Cáncer, 1996.
10. Martínez-Lozano JA, Marín MJ, Tena F, Utrillas MP, Sánchez-Muniosguren L, González-Frías C, et al. UV

- Index experimental values during the years 2000 and 2001 from the Spanish Broadband UV-B Radiometric Network. *Photochem Photobiol* 2002;76:181-7.
11. Marangoni R, Gioffré G, Colombetti M, Lebert, M, Häder D-P. ELDONET-European light dosimeter network structure and function of the ELDONET server. *J Photochem Photobiol* 2000;58:174-84.
  12. Häder D-P, Lebert M, Marangoni G, Colombetti G. ELDONET –European light dosimeter network hardware and software. *J Photochem Photobiol B Biol* 1999;52:51-8.
  13. McKinlay AF, Diffey BL. A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin, *CIE J* 1987;6: 17-22.
  14. Calendario Meteorológico 1996. Madrid: Centro de Publicaciones. Instituto Nacional de Meteorología. Secretaría General Técnica. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente 1996; 28-50.
  15. Häder D-P, Lebert M, Colombetti G, Figueroa FL. European light dosimeter network (ELDONET): 1998 data. *Helgol. Mar Res* 2001;55:35-44.
  16. Lebert M, Schuster M, Häder D-P. The european light dosimeter network: four years of measurements. *J Photochem Phtobiol* 2002;66:81-7.
  17. Ortega-Resinas M, Martín Gutiérrez FJ, Camacho F. Medidas de radiación solar ultravioleta en Sevilla. *Actas Dermosifiliogr* 2001;92:271-5.