

# MEDIDAS OPERATIVAS DERIVADAS DE UN RADIOMETRO GUV2511 MULTIRANGO

Alberto Pettazzi, José Antonio Souto González

MeteoGalicia-Centro de Desenvolvemento Sostible, Xunta de Galicia

(www.meteogalicia.es)

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Compostela,  
C/ Lope Gómez de Marzoa, s/n, Campus Sur, Santiago de Compostela, 15782, (La Coruña)  
España, +34 981 563 100 Ext. 16770, mrtepax@usc.es, jasouto@usc.es

## RESUMEN

Con el objetivo de investigar los procesos de la radiación UV-B en la atmósfera, se ha dotado a la Estación de Observación de la Atmósfera de Santiago de Compostela (EOAS) del radiómetro GUV 2511 (Biospherical Instruments, Inc.). Se trata de un instrumento singular de funcionamiento automático con mantenimiento reducido, que mide valores espectrales de irradiancia en seis longitudes de onda dentro del espectro UV

Basándose en los trabajos de Stamnes et al (1991) y Dahlback (1996) y mediante la aplicación del modelo de transferencia radiativa FastRT (Engelsen et al., 2005), se ha desarrollado un procedimiento para la determinación de los valores de columna total de ozono, columna de agua líquida e Índice UV (UVI).

El procedimiento ha sido codificado en lenguaje FORTRAN, y calcula de forma automática y en tiempo real estos parámetros para su incorporación en la base de datos de MeteoGalicia y el posterior análisis de los mismos.

Los resultados obtenidos han sido validados utilizando distintas metodologías, dependiendo del parámetro derivado. En todos los casos, las tendencias de los valores estimados mediante la metodología descrita concuerdan con las obtenidas a partir de los parámetros de contraste empleados.

## 1. INTRODUCCIÓN

La distribución espectral de la radiación solar UV que alcanza la superficie de la Tierra depende de la distancia entre la Tierra y el Sol, de las propiedades ópticas de la atmósfera, del ángulo cenital del sol (SZA) y de las propiedades reflectivas de la superficie terrestre. La transmisión de la radiación solar en la región ultravioleta entre 280 nm y 315 nm a través de la estratosfera está fundamentalmente determinada por la cantidad total de ozono. En la troposfera (Jacobson, 2002), la atenuación se debe esencialmente a la difusión por

las moléculas de aire (difusión Rayleigh) y por las nubes (partículas de agua o hielo). Alteraciones de la cubierta de nubes en la troposfera afectan a la penetración de la radiación UV.

Una disminución de la cantidad de ozono estratosférico puede provocar un incremento de los efectos dañinos sobre el hombre provocados por la radiación ultravioleta, causando mutaciones del ADN, cáncer de piel (Urbach, 1989) y numerosos tipos de trastornos oculares como conjuntivitis y problemas de catarata. También otros seres vivos y el medio natural en general se ven afectados. Además, la radiación UV de tipo B (280-315 nm) incide a nivel de la troposfera favoreciendo la aparición de oxidantes fotoquímicos y contaminantes atmosféricos altamente perjudiciales, como el propio ozono troposférico, que pueden causar irritaciones en el aparato respiratorio y daños en la vegetación.

Con el objetivo de investigar los efectos de la radiación UV-B en la atmósfera, se ha dotado a la Estación de Observación de la Atmósfera de Santiago de Compostela (EOAS) (Pettazzi et al, 2006) del radiómetro GUV 2511 fabricado por la empresa estadounidense Biospherical Instruments Inc.. Se trata de un instrumento único en su género, ya que mide valores espectrales de irradiancia en seis longitudes de onda dentro del espectro UV que permiten, una vez analizados, obtener valores de columna total de ozono, de cubierta nubosa, y dosis UV efectivas. Estos valores permiten también obtener, con una buena aproximación, el espectro total de la radiación solar entre 280 nm y 400 nm. Además, un séptimo canal aporta la radiación visible fotosintética.

En este trabajo se describe, en primer lugar, el problema de la disminución regional y global del ozono estratosférico. A continuación, se describen las características del radiómetro GUV 2511 y su instalación en la EOAS. Además, se presenta la metodología e implementación de un procedimiento para la determinación de los valores de columna total de ozono, columna de agua líquida e Índice

Ultravioleta (UVI). Un programa, implementado en lenguaje FORTRAN, calcula de forma automática y en tiempo real estos parámetros para su incorporación en la base de datos de MeteoGalicia y su posterior análisis y comparación con distintos parámetros de contraste.

## 2. EQUIPO E INSTALACIÓN

### 2.1 Radiómetro GUV 2511

El radiómetro GUV 2511 (Fig. 1) es un dispositivo para la medida de la radiación UV en superficie; pertenece a la clase de instrumentos llamados “radiómetros de múltiples longitudes de onda”, es decir, radiómetros que responden a varias longitudes de onda, cuyas características son determinadas por la combinación de los distintos filtros y propiedades del sensor, junto con las otras componentes ópticas del dispositivo. Estos canales miden simultáneamente los valores de irradiancia en distintas longitudes de onda predefinidas del espectro solar.

El radiómetro GUV 2511 es un instrumento apto para monitorizaciones de radiación UV a largo plazo que mide irradiancia centrada en seis longitudes de onda: 305, 313, 320, 340, 380, 395 nm, y en el espectro visible de banda ancha “Photosynthetically Available Radiation” (PAR) entre 400 nm y 700 nm. Las irradiancias medidas por el instrumento tienen un ancho de banda de aproximadamente 10 nm, como se muestra en su respuesta espectral (Fig. 2).

El dispositivo está aislado del entorno por una caja de aluminio anodizado duro y recubrimiento especial; un cabezal de Teflón garantiza un mejor aislamiento de la temperatura exterior. El sistema está sellado por medio de juntas *O-ring* que evitan la entrada de humedad. Un controlador de temperatura la estabiliza a 40 °C o 50 °C, permitiendo una mejor estabilidad óptica y previene también el acumulo de lluvia, nieve o hielo por encima del instrumento, evitando el deterioro del radiómetro.



Fig. 1.- El radiómetro GUV 2511.

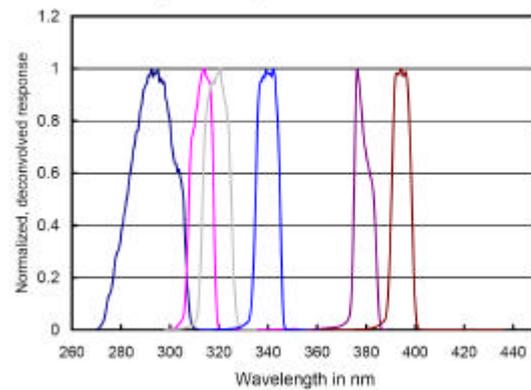


Fig. 2- Respuesta espectral del radiómetro GUV 2511. Las longitudes de onda efectivas están representadas con el máximo normalizado a 1 (Biospherical Instrument Inc.).

El dispositivo ha sido calibrado por medio del estándar de irradiancia espectral referenciable del NIST (National Institute of Standards and Technology) de 100 W tipo FEL; además, la empresa fabricante recomienda una calibración anual periódica.

El equipo se completa con un cable de intemperie apantallado que conecta el radiómetro a un controlador digital de temperatura externo. Dicho controlador permite establecer la temperatura operativa del radiómetro.

La recogida de los datos medidos por el GUV 2511 se realiza a través de un software, proporcionado por la empresa fabricante, instalado en un ordenador PC conectado al controlador de temperatura por medio de un cable serie RS-232

Con el objetivo de hacer operativo este servicio, se decidió almacenar los datos recogidos a intervalos diezminutales (promedio de diez minutos)

### 2.2 Instalación del equipo

Se ha decidido instalar el radiómetro GUV 2511 en las proximidades de la torre de observación meteorológica de la EOAS en una posición fácilmente asequible para garantizar las operaciones rutinarias de mantenimiento (Fig. 3-a y 3-b). El dispositivo se ha sujetado a un poste de metal a 1,5 metros del suelo en una zona que obstaculice lo menos posible su campo visual.

El controlador de temperatura y el ordenador se han colocado en una caja estanca anclada en la torre meteorológica. Además del software de recogida de datos, se ha instalado en el ordenador un programa de control remoto que permite su manejo desde otro terminal, vía red.



Fig. 3-a.- Estación de Observación de la Atmósfera de Santiago (EOAS), MeteoGalicia.



Fig. 3-b.- EOAS: Instalación del radiómetro GUV 2511

### 2.3 Equipo Auxiliar

La EOAS cuenta también con una serie de instrumentos que realizan medidas de magnitudes radiométricas o parámetros relacionados con ellas. Dichas medidas resultan de gran utilidad a la hora de validar los parámetros proporcionados por el radiómetro GUV 2511. A continuación se expone una breve descripción de estos aparatos, representados en Fig.4:

1. *Piranómetro Ph Schenk 8101 clase A*. Es un instrumento para la medición de la radiación solar, utilizado en la estación para proporcionar datos de irradiancia global. El elemento sensor está compuesto por 12 bandas de cobre con forma de estrella y barnizadas en blanco y negro

alternativamente. En presencia de radiación, las plaquitas de cobre se calientan de manera diferenciada, midiéndose la diferencia de temperatura por 72 celdas termoeléctricas situadas en la parte inferior de las plaquitas. Esta diferencia de temperatura es proporcional a la intensidad de la radiación y no está afectada por la temperatura ambiente. El piranómetro incorpora una cúpula protectora del sensor.

2. *Piranómetro Ph Schenk 8101 clase A con banda de sombra*. Este aparato es igual en todo al descrito anteriormente, pero está equipado con una banda de sombra que protege de la radiación directa al piranómetro. La banda es de aluminio anodizado y se puede regular según la latitud del sitio y la declinación del sol, permitiendo la medida de la componente difusa de la radiación solar.
3. *Piranómetro Biometer 501A Solar Light*. Este piranómetro es una versión mejorada del instrumento desarrollado por Robertson y Berger (Berger, 1976) y mide la irradiancia UV-B ponderada por el espectro estándar de acción eritemática definido por McKinlay y Diffey (1987). El Índice UV se obtiene multiplicando la irradiancia UV-B ponderada por un coeficiente. La radiación es transmitida a través de una cúpula de cuarzo, donde un filtro bloquea las longitudes de onda distintas de la UV. Esta radiación incide sobre un fósforo fluorescente que emite luz visible de manera proporcional a la radiación incidente. La luz producida es absorbida por un diodo GaAsP, convertida en una señal de tensión y amplificada. El Biometer cuenta también con un sistema de control de temperatura mediante bomba de calor y con una curva de respuesta del coseno mejorada (Solar Light, 1991).
4. *Medidor de horas de sol CSD1 Kipp & Zonen*. El CSD1 es un sensor para la medida de horas de sol. Se define como intervalo de sol aquel durante el cual la irradiancia solar directa supera  $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Este aparato utiliza tres detectores, y cada uno de ellos cubre una parte de cielo. Los detectores tienen exactamente las mismas características espectrales y angulares. Un sistema de calentamiento previene la formación de rocío, hielo y la acumulación de nieve.
5. *Medidor de Visibilidad PWD20 Vaisala*. Este aparato mide la visibilidad en un rango entre 10 y 20 000 m. El conocimiento de los valores de visibilidad resulta esencial en el cálculo de la irradiancia solar por medio de modelos de transferencia radiativa (Mayer et al., 1997). Estudios previos (Iqbal, 1983) han evidenciado la relación entre visibilidad y coeficiente de

turbidez de Ångström, que depende de la presencia de aerosoles en atmósfera.



Fig. 4.- Equipo auxiliar de la EOAS. De izquierda a derecha y de arriba abajo: Piranómetro Ph Schenk 8101 clase A, Piranómetro Ph Schenk 8101 clase A con banda de sombra, Piranómetro Biometer 501A Solar Light, Medidor de horas de sol CSD1 Kipp & Zonen, Medidor de Visibilidad PWD20 Vaisala

### 3. COLUMNA DE OZONO, CUBIERTA NUBOSA E ÍNDICE ULTRAVIOLETA

A partir de las medidas de irradiancia espectral del GUV 2511 es posible derivar distintos parámetros necesarios para monitorizar distintos parámetros meteorológicos e, incluso, de calidad del aire. El cálculo de estos parámetros se realiza utilizando la metodología expuesta en los trabajos de Stamnes et al. (1991) y Dalback (1996). El método propuesto ha sido validado con éxito y viene siendo usado por las principales organizaciones que recogen medidas de estos parámetros (Bernhard et al., 2005). A continuación, se describen las operaciones necesarias para derivar los valores de columna total de ozono, columna de agua líquida y UVI.

#### 3.1 Columna total de ozono

El método ideado por Stamnes et al. (1991) se basa en la comparación de los valores de irradiancia a dos longitudes de onda distintas, una que es apreciablemente absorbida por el ozono, y la otra que no lo es. Se han considerado, por ello, las irradiancias a 305 nm y 340 nm respectivamente.

Para derivar los valores de ozono, es necesaria la aplicación de un modelo de transferencia radiativa que permita construir una tabla sintética de los ratios entre las dos irradiancias, para distintos valores de ozono, en función del ángulo cenital.

A partir del ratio entre los valores de irradiancia medidos y del valor del ángulo cenital asociado al momento de la medida, se busca en la tabla generada por el modelo el valor de ozono más próximo al punto de coordenadas (SZA, ratio), como se muestra en Fig.5.

El método propuesto resulta, en una primera aproximación, insensible a la presencia de nubes y de aerosoles en la atmósfera, pues estos dos componentes actúan de la misma manera sobre las dos longitudes de onda consideradas. Sin embargo, un análisis más detallado evidencia una dependencia de la cubierta nubosa por parte del ratio entre las irradiancias. En particular, la presencia de nubes espesas tiende a sobreestimar la concentración de ozono en 10 DU.

Un caso excepcional de incertidumbre causada por este método viene ilustrado por Mayer (1998) (<http://www.bmayer.de/thceff.html>). En este análisis, se considera el efecto provocado por nubes con espesor óptico muy alto en la determinación de la columna total de ozono. La Fig. 6-a representa la irradiancia global medida el día 19 de Junio 1994: a lo largo del día se puede observar un progresivo aumento de la nubosidad que alrededor de las 14:00 reduce notablemente la radiación solar en el suelo.

A esta disminución drástica de la irradiancia corresponde un pico de ozono de más de 700 DU (Fig. 6-b), que representa un dato completamente irreal. El pico a 450 DU también se ha de rechazar debido al mismo efecto.

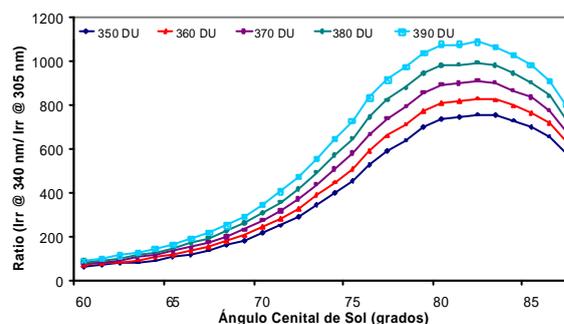


Fig. 5.- Ilustración esquemática de la tabla sintética para derivar los valores de la columna total de ozono

Este comportamiento es debido a la múltiple difusión de la radiación solar en el interior de la nube, por lo que la longitud del camino recorrido por los fotones resulta aumentada en más de diez veces. Este aumento provoca una mayor absorción de la radiación por el ozono (que provoca una disminución de la irradiancia a 305 nm), lo que causa un aumento aparente de la columna total de ozono.

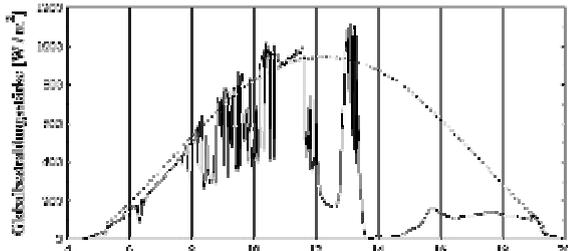


Fig. 6-a.- Evolución de la irradiancia global a lo largo del día 19 de Junio 1994 en Garmisch Partenkirchen (Alemania, <http://www.bmayer.de/thceff.html>)

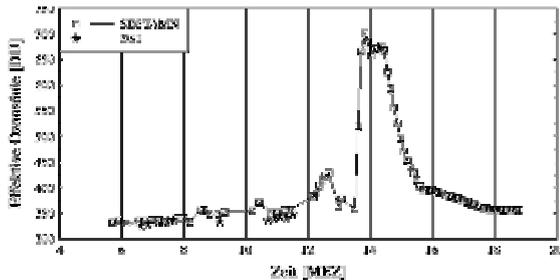


Fig. 6-a.- Evolución diaria del ozono, calculado con el metodo de Stamnes, a lo largo del día 19 de Junio 1994 en Garmisch Partenkirchen (Alemania, <http://www.bmayer.de/thceff.html>)

Desgraciadamente, no es sencillo corregir este defecto porque sería necesario conocer la fracción de la columna de ozono dentro de la nube, dato que no se puede obtener a partir de medidas a nivel del suelo. Refinando el método de Stamnes se pueden corregir los resultados, que, sin embargo, siguen siendo erróneos (Mayer, comunicación personal, 2005). En consecuencia, los valores de ozono más fiables son los recogidos en condiciones de cielo despejado. En cualquier caso, estas condiciones de cielo despejado son las de más interés para la consideración de los niveles de  $O_3$ .

### 3.2 Columna de agua líquida

Se define columna de agua líquida la cantidad de agua contenida en las nubes en una imaginaria columna vertical con sección unitaria. El trabajo de Stamnes et al. (1991) permite calcular el espesor óptico de las nubes a partir de medidas espectrales de irradiancia. Basándose en este método se plantea la estimación de la columna de agua líquida, en lugar del espesor óptico, ya que ambos parámetros son directamente proporcionales (<http://zardoz.nilu.no/~olaeng/fastrt/fastrt.html>) y el conocimiento de la columna de agua líquida puede ser útil para validar los resultados proporcionados por modelos meteorológicos operacionales, como los que se ejecutan diariamente en MeteoGalicia.

El método de Stamnes representa una aproximación del efecto que las nubes ejercen sobre la radiación UV. Es evidente que este efecto depende del tipo de nubes, de su altura y morfología; sin embargo, si no

se dispone de esta información, se puede cuantificar la influencia de las nubes sobre la radiación que alcanza el suelo comparando la irradiancia medida con su valor para cielo despejado. Por ello, se ha de considerar la irradiancia asociada a una longitud de onda donde la absorción por el ozono es mínima: por ejemplo, a 340 nm.

Análogamente a la estimación del ozono, por medio de un modelo de transferencia radiativa se construye una tabla sintética de los ratios entre la irradiancia medida y la irradiancia para cielo despejado en función de la columna de agua líquida. Se calculan distintas curvas para los distintos valores del ángulo cenital.

A partir del ratio entre los valores de irradiancia, se busca en la tabla sintética el valor de la columna de agua líquida que intercepta la curva correspondiente al ángulo cenital que más se aproxima al real.

Los resultados así obtenidos se han de interpretar como si el cielo estuviese uniformemente cubierto por una nube caracterizada por los valores de columna de agua líquida obtenido.

Este método resulta altamente dependiente de los valores de albedo superficial: solo conociendo con precisión el albedo se pueden obtener resultados correctos. Se ha estimado que una incertidumbre del 10% del albedo superficial implica una incertidumbre del 30-40% de los resultados finales, para un ángulo cenital de 60 grados.

### 3.3 Índice Ultravioleta

El Índice Ultravioleta se deriva siguiendo el método propuesto por Dahlback (1996), que proporciona indicaciones sobre el cálculo de cualquiera tasa de dosis efectiva,  $D$ , definida como:

$$\frac{dD}{dt} = \int_0^{\infty} A(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot d\lambda = \sum_{I=0}^{\infty} A_I F_I \Delta I \quad (1)$$

donde  $A(\lambda)$  representa el espectro de acción biológico y  $F(\lambda)$  la irradiancia espectral. El intervalo  $\Delta I$  está determinado por la resolución del radiómetro. Para determinar una tasa de dosis UV a partir de medidas de irradiancia procedentes de un número  $M$  de canales, se aproxima la ecuación (1) a:

$$D_{aprox} = \sum_{i=1}^M a_i F_i \quad (2)$$

donde los  $a_i$  representan un único conjunto (para un espectro particular de acción) de coeficientes para determinar  $D_{aprox}$ . Los coeficientes se determinan a

partir de medidas simultáneas de irradiancia en distintas condiciones solares.

A partir de las medidas del GUV2511, este método se traduce en la ecuación (3):

$$UVI=0.8911 \cdot F_{305}+0.0818 \cdot F_{320}+0.0078 \cdot F_{340} \quad (3)$$

Los coeficientes  $a_i$  se expresan en  $\text{cm}^2/\mu\text{W}$  y las irradiancias espectrales, respectivamente a 305 nm, 320 nm y 340 nm, se expresan en  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  (Biospherical Instruments, 1998).

Una comparación de los Índices Ultravioletas medidos por el GUV 2511 y los medidos por el espectroradiómetro de alta resolución SUV-100 en el rango 280-600 nm, revelan una correlación de más del 99% (Biospherical Instruments, 1998).

#### 4. MEDIDAS OPERATIVAS

Los valores de columna total de ozono, de columna de agua líquida y del Índice UV se calculan de forma automática y en tiempo real por medio de un programa implementado en lenguaje FORTRAN, instalado en el ordenador situado en la EOAS. El programa se ejecuta a intervalos programados.

Las tablas sintéticas de ozono y de la columna de agua líquida se han generado previamente, mediante otros códigos programas en FORTRAN desarrollados.

##### 4.1 Tablas sintéticas

Las tablas necesarias para deducir los valores de ozono y de cubierta nubosa se han construido utilizando como modelo de transferencia radiativa el FastRT (v. 0.2). Este modelo (Engelsen et al., 2005) viene siendo empleado también para la predicción operativa del UVI en Meteogalicia (<http://www.siam-cma.org/meteorologia/uv/ultravioleta.asp>). La eficacia del FastRT en la modelización de la radiación UV que alcanza la superficie terrestre ha sido verificada en trabajos anteriores (Pettazzi et al., 2004).

Las tablas se han construido variando el ángulo cenital para cada valor de concentración de ozono y de columna de agua líquida, asumiendo una visibilidad constante de 20 km. Este valor resulta acorde con las medidas históricas disponibles para cielo despejado.

Tomando como referencia el formato de las medidas de ozono en La Coruña proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM, <http://www.inm.es/web/infmtobsr/ulvio/estaciones.html>), se han considerado los valores de ozono en el rango (240-500) DU a intervalos de 5 DU. El ángulo cenital varía entre 0 y 87 grados a intervalos

de un grado, mientras la columna de agua líquida varía entre 0 y 4000  $\text{g}\cdot\text{m}^2$ , a intervalos de 10  $\text{g}\cdot\text{m}^2$ .

##### 4.2 Estimación de columna de ozono, columna de agua líquida y UVI en la EOAS

Los valores de irradiancia espectral recogidos por el radiómetro GUV 2511 se almacenan diariamente en un fichero en formato ASCII, junto a la hora en la que se ha realizado la medida.

Por medio de determinadas relaciones astronómicas (Iqbal, 1983), es posible calcular el ángulo cenital del sol correspondiente a cada medida. En los trabajos de Stammes (1991) y de Dalback (1996) se presta una particular atención a las medidas de irradiancia caracterizadas por SZA superiores a 80 grados. Según los autores, el método aplicado a valores elevados de SZA produce resultados caracterizados por una elevada incertidumbre. Además, el GUV 2511 viene calibrado por la empresa fabricante con el fin de medir irradiancia solar espectral; esto se traduce en una derivación de los parámetros aceptable solo para ángulos cenitales inferiores a 60 grados (Bernhard, comunicación personal, 2006). Valores de columna de ozono, UVI y columna de agua líquida más precisos para SZA elevados se pueden obtener previa una calibración más precisa, disponible a petición del usuario. En este trabajo, se han considerado para la derivación de los parámetros deseados, solo medidas de irradiancia espectral asociadas a un SZA inferior a 60 grados.

La derivación de los valores de ozono y de columna de agua líquida se realiza consultando las respectivas tablas sintéticas, y buscando en la columna correspondiente al SZA que más se aproxima al real el valor del ratio sintético que más se aproxima al ratio real. El valor del ratio sintético proporciona el valor del parámetro asociado. El Índice Ultravioleta se calcula por medio de la ecuación (3), como se ha explicado anteriormente.

El programa que permite derivar los parámetros deseados genera, para cada día del año, un fichero que contiene la hora de la medida, los valores de irradiancia espectral en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  (a 305 nm, 313 nm, 320 nm, 340 nm, 380 nm, 395 nm y PAR respectivamente), los valores de columna total de ozono, de columna de agua líquida y de UVI. Estos archivos se incorporan en la base de datos de Meteogalicia.

#### 5. RESULTADOS

Para estimar correctamente los valores de ozono y de columna de agua líquida es necesario calcular con buena precisión el ángulo cenital del sol. Por lo tanto, se ha llevado a cabo una comparación de los valores de SZA calculados por el programa con los

valores proporcionados por el modelo FastRT en su página web (<http://zardoz.nilu.no/~olaeng/fastrt/fastrt.html>). El análisis, que abarcó el periodo 9-12 de abril de 2005, ha revelado un error cuadrático medio del 0.0003%.

La recogida de medidas operativas de irradiancia para deducir la columna de ozono, la columna de agua líquida y el UVI comenzó a mediados de abril de 2005. De acuerdo con experiencias anteriores (Biospherical Instruments Inc., 1998), se estabilizó la temperatura del GUV 2511 a 50°C. En la Fig. 7 se representa la evolución diaria de los valores de ozono para el día 15 de marzo de 2006. Se puede observar la presencia de fluctuaciones a lo largo del día. Estas fluctuaciones son del todo normales, debidas en este caso probablemente a la resolución de la tabla sintética. De todos modos, es normal encontrar variaciones del 20% a lo largo del día; las variaciones pueden ser incluso mayores durante el periodo primaveral (<http://www.fys.uio.no/plasma/ozone/>).

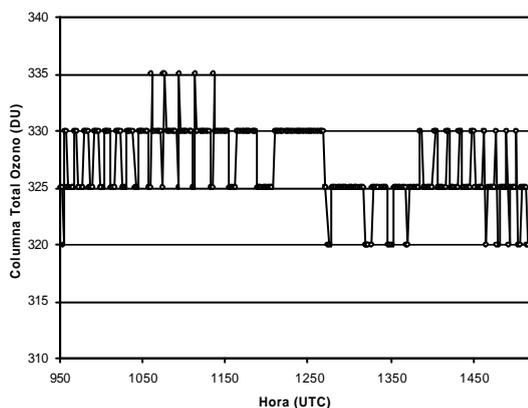


Fig. 7.- Evolución diaria de la columna total de ozono calculada para el día 15 de marzo de 2006

En la Fig. 8 se representa la evolución de la columna total de ozono para el periodo 26 de abril – 27 de octubre 2005. Los valores medios diarios deducidos a partir de las medidas del radiómetro han sido comparados con las medidas de ozono proporcionados por el satélite TOMS Earth Probe (<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>).

Como se puede observar, el ozono deducido a partir del radiómetro es sistemáticamente mayor que el medido por el satélite Earth Probe, aunque las tendencias sean las mismas.

A fin de corregir este error sistemático, inicialmente se ha focalizado la atención sobre la tabla sintética creada. Para averiguar la exactitud de la tabla, se han usado los datos de irradiancia medidos por la red de monitorización UV de la Nacional Science Foundation (NSF-UV). Estos datos, disponibles a

través de su página web (<http://www.biospherical.com/nsf/login/update.asp>), proceden de radiómetros GUV situados en distintos lugares del globo. A través de las medidas de estos radiómetros, se han deducido por medio de la tabla sintética los valores de ozono correspondientes. Los valores de ozono deducidos se han comparado con los proporcionados por la red de monitorización UV. Los resultados, obtenidos analizando el día 12 de marzo de 2006, se ilustran en la Fig. 9. Se puede notar que la concordancia entre los valores de ozono calculados por la red de monitorización UV y los derivados con la tabla sintética es muy bueno. Estos resultados permitieron descartar como causa del error posibles fallos en la construcción de la tabla sintética para deducir los valores de ozono.

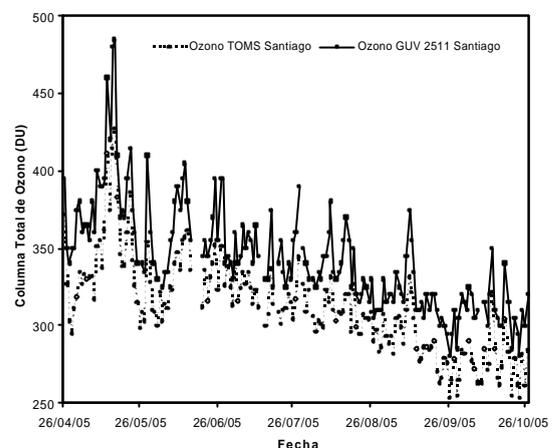


Fig. 8.- Evolución anual de la columna total de ozono en Santiago de Compostela. Comparación entre el ozono deducido por el radiómetro GUV 2511 y el ozono medido por los satélites TOMS

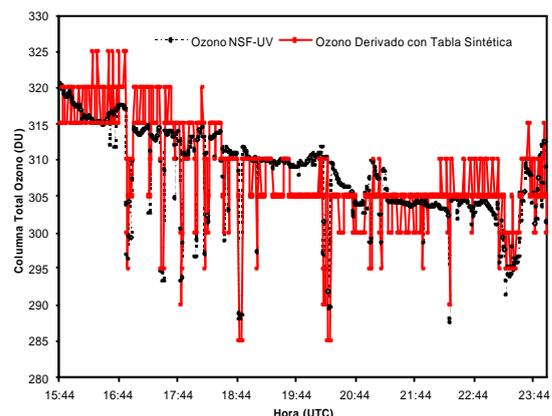


Fig. 9.- Comparación de la columna total de ozono medida por la red de monitorización de la red NSF-UV y deducida por medio de la tabla sintética

El problema se ha expuesto a los técnicos de la empresa fabricante del radiómetro que aconsejaron estabilizar la temperatura del GUV 2511 a 40°C

(Bernhard, comunicación personal, 2006). En la Fig. 10 se ilustran los valores de ozono deducidos del instrumento estabilizado a la nueva temperatura. Estos valores han sido comparados con los proporcionados por los satélites del programa TOMS. A pesar del reducido conjunto de valores disponibles, se puede notar una sensible mejora en la calidad de los datos. Las discrepancias que aún persisten se deben al hecho de que una concordancia perfecta (error menor de 1-2%) se alcanza solo en días despejados (Mayer, comunicación personal, 2005), y este periodo de análisis se caracterizó por la presencia de nubes. Aún se podrían mejorar los resultados con una calibración más precisa del radiómetro y su comparación con las medidas con las de un espectrorradiómetro (Bernhard, comunicación personal, 2006). Dicha calibración permitiría derivar valores de ozono con buena precisión también cuando el sol está próximo al horizonte.

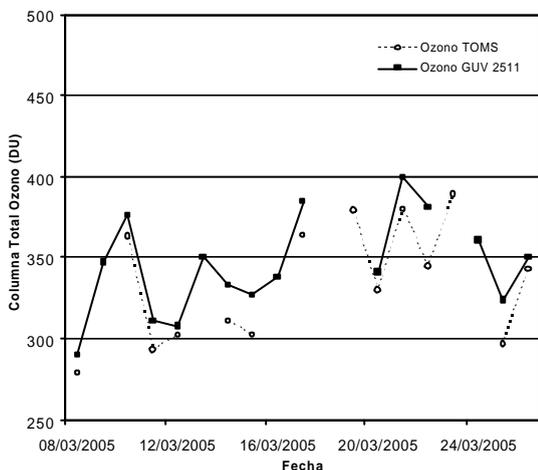


Fig. 10.- Evolución de la columna total de ozono estimada en Santiago de Compostela

La evaluación de los valores de UVI se representa en Fig. 11, para un día típico de verano, junto a los valores de cubierta nubosa, con la finalidad de evaluar cualitativamente el método expuesto. La eficacia del radiómetro GUV 2511 en la medida del UVI ha sido comprobada comparando los valores de Índice UV con los proporcionados por un radiómetro de banda ancha Solar Light Biometer 501 A. Para dar consistencia a la comparación, se han considerado sólo días despejados. A falta de medidas de radiación difusa durante el periodo de análisis, se han considerado como días despejados aquellos que cumplen con las siguientes condiciones:

- *Horas de sol:* se han considerado solo días en los que las horas de sol medidas son por lo menos el 85% de las horas de sol teóricas

- *Visibilidad:* se han considerado solo días con visibilidad superior a 19 km
- *Observación del cielo:* se han considerado solo días sin nubes visibles y caracterizados por cielo azul

La Figura 11 representa los resultados obtenidos para un típico día de verano; como se puede observar, existe una buena correlación entre UVI y columna de agua líquida: en días despejados los valores de columna de agua líquida son muy bajos y prácticamente constantes. En la Fig. 11 se puede notar el buen ajuste entre el UVI medido con el GUV2511 y con el Solar Light Biometer 501A.

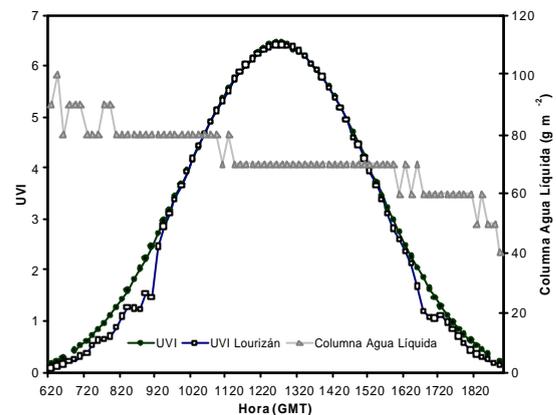


Fig. 11.- Comparación UVI medido por el GUV 2511 en Santiago y medido por el Biospherical 501 A en Lourizán (Pontevedra). Comparación realizada para el día 9 de Julio 2005, día despejado

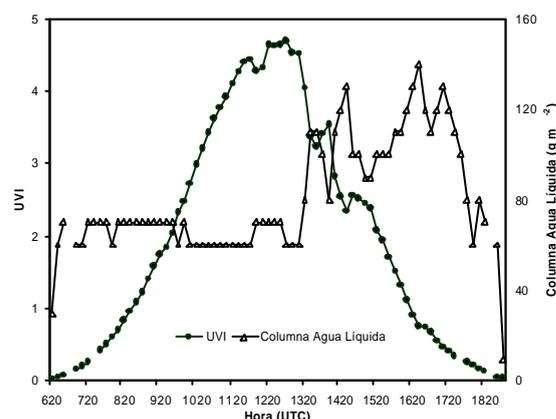


Fig. 12.- Evaluación del efecto de la cubierta nubosa sobre el UVI en Santiago. Evaluación realizada el día 13 de Abril 2005

El efecto de la cubierta nubosa sobre el Índice UV se puede observar en la Fig. 12, que representa el caso de un día inicialmente despejado en el que fue progresivamente aumentando la cubierta nubosa. La disminución del UVI es acompañada por el aumento de la columna de agua líquida.

## 6. CONCLUSIONES

Basándose en los métodos de Stamnes et al. (1991) y de Dahlback (1996), se ha elaborado un procedimiento operativo para la recogida de datos de un sensor GUV2511 y estimación en tiempo real de columna total de ozono, columna de agua líquida e Índice Ultravioleta.

Los primeros resultados expuestos en este trabajo validan dichos métodos en Santiago de Compostela, lo que permite estimar de forma rápida parámetros de notable importancia a nivel meteorológico y de gran utilidad para la población. Además, como sugiere Dahlback (1996), los valores de ozono y de cubierta nubosa derivados se pueden usar como parámetros de entrada en los modelos de transferencia radiativa para obtener con buena precisión el espectro completo de irradiancias UV.

Los primeros resultados evidenciaron la importancia de una calibración precisa del radiómetro GUV2511 para garantizar medidas derivadas lo más correctas posible. Una calibración más precisa permitiría también extender las estimaciones de ozono, cubierta nubosa y UVI a alturas solares menores. De esta manera, se podrían obtener medidas de estos parámetros también en los meses invernales, cuando el SZA es mayor de 60 grados durante todo el día en la península ibérica.

En todo caso, los valores de ozono ya pueden ser utilizados como datos de entrada en modelos de transferencia radiativa para la predicción del UVI, pues las pequeñas diferencias (inferiores al 8%) con respecto al TOMS no suelen producir efectos significativos sobre el índice UV (Schmalwieser et al., 2004).

A partir de las medidas de irradiancia espectral, resultaría útil también el cálculo del espesor óptico de las nubes. Sin conocimiento de las dimensiones de las partículas de agua en atmósfera, la columna de agua líquida deducida es una mera aproximación al espesor óptico (Mayer, comunicación personal, 2005). Si se conoce el espesor óptico de las nubes, a través de la parametrización del radio eficaz de las gotas de agua presentes en atmósfera, es posible calcular la columna de agua líquida (Hu y Stamnes, 1993). El conocimiento del espesor óptico de las nubes permitiría también validar en el campo el método de Long et al. (2000) para derivar dicho parámetro a partir de medidas de irradiancia global y difusa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de Ola Engelsen (Norwegian Institute for Air Research, NILU), Bernhard Mayer (Instituto Aeroespacial

Alemán, DLR), Gernar Bernhard y Michael Holas (Biospherical Instruments, Inc.), por compartir su experiencia y conocimientos durante el desarrollo de este trabajo.

Esta investigación ha sido desarrollada dentro del Convenio de Colaboración "MeteoGalicia", financiado por la Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible de la Xunta de Galicia con la colaboración de la Universidad de Santiago de Compostela.

## REFERENCIAS

Berger D. S. 1976: *The sunburning ultraviolet meter: design and performance*. Photochemistry and Photobiology, 24, 587-593.

Bernhard G., Booth C. R., Ebrahimian J. C., 2005: *Real-time ultraviolet and column ozone from multichannel UV radiometers deployed in the National Science Foundation's ultraviolet monitoring network*. Optical Engineering 44, 04101 (1-11)

Bernhard G., 2006: *Spectral Response*. Comunicación Personal

Biospherical Instruments Inc., 1998: GUV "Diffey Dose" Calculations. Application Note

Biospherical Instruments Inc., 1998: *GUV data processing and quality control procedures*.

Dahlback A., 1996: *Measurements of biologically effective UV doses, total ozone abundances, and cloud effects with multichannel, moderate bandwidth filter instruments*. Applied Optics 35, 6514-6521

Engelsen O., Kylling A., 2005: *Fast simulation tool for ultraviolet radiation at the earth's surface*. Optical Engineering 44, 041012 (1-7)

GUV 2511 High speed ground-based Ultraviolet radiometer User's manual. Biospherical instruments Inc., San Diego, California

Página web de Bernhard Mayer (Instituto Aeroespacial Alemán, DLR): <http://www.bmayer.de/thceff.html>

Página web de la facultad de Física de Oslo relacionada con la monitorización de los niveles de ozono y de UVI: <http://www.fys.uio.no/plasma/ozone/>

Página web del Instituto Nacional de Meteorología, que contiene valores de ozono y UVI medidos en las principales ciudades españolas: <http://www.inm.es/web/infmet/tobsr/ulvio/estaciones.html>

Página web del proyecto TOMS: <http://toms.gsfc.nasa.gov/>

Página web oficial del modelo de transferencia radiativa FastRT <http://zardozi.ni.lu.no/~olaeng/fastrt/fastrt.html>

Hu, Y.-X., Stamnes K., 1993: *An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models*. J. Climate, 6(4), 728-742

Iqbal M., 1983: *An introduction to solar radiation*. Academic Press, San Diego.

Jacobson M. Z., 2002: *Atmospheric Pollution*. Cambridge University Press, Cambridge

Logger, Data acquisition software, software manual. Biospherical instruments Inc., San Diego, California

Long C. N., Ackerman T. P., 2000: *Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects*. Journal of Geophysical Research, 105 (D12), 15609-15626

Mayer B., Seckmeyer G., Kylling A., 1997: *Systematic long-term comparison of spectral UV measurements and UVSPEC modeling results*. Journal of Geophysical Research, 102, D7, 8755-8767

Mayer B., Kylling A., Madronich S., Seckmeyer G., 1998: *Enhanced absorption of UV radiation due to multiple scattering in clouds: experimental evidence and theoretical explanation*. Journal of Geophysical Research, 103, D23, 31241-31254

Mayer B., 2005: *A question on ozone retrieval method (by Stamnes, 1991)*. Comunicación personal

Mc Kinlay A. F., Diffey B. L., 1987: *A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin*. CIE Journal, 6: 17-22

Pettazzi A., Montero P., Balseiro C., Souto J. A., Pérez Muñuzuri V., 2004. *Evaluation of a radiative transfer model for UVI operational forecast in Galicia (Spain)*. Proceeding of European Geosciences Union 1st Assembly. Nice (France), 24-29 April 2004

Pettazzi A., Souto J. A., Salsón S., 2006: *EOAS, a shared joint atmospheric observation site of MeteoGalicia*. Proceedings of 4th ICEAWS - International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, Lisboa, Portugal.

Schmalwieser A. W., Schauburger G., Janouch M., Ebertseder T., Coetzee G. J. R., Weihs P., 2004.: *Differences in the calculated erythemally effective UV radiation due to the use of total ozone values derived from different instruments*. Proceedings of the 1st European Geosciences Union General Assembly, Nice, France, 25-30 April.

Solar Light, 1991: User's manual for UV-B Biometer model 501.

Stamnes K., Slusser J., Bowen M., 1991: *Derivation of total ozone abundances and cloud effects from spectral irradiance measurements*. Applied Optics 30, 4418-4426

Urback F., 1989: *Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer*. Photochemistry and Photobiology, 50, 507-513.