

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 7. MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN.....	239
7.1 Generalidades	239
7.1.1 Definiciones	239
7.1.2 Unidades y escalas	240
7.1.2.1 Unidades	240
7.1.2.2 Normalización	240
7.1.3 Requisitos meteorológicos	242
7.1.3.1 Datos que se deben comunicar	242
7.1.3.2 Incertidumbre	242
7.1.3.3 Muestreo y registro	242
7.1.3.4 Tiempos de observación	242
7.1.4 Métodos de medición	243
7.2 Medición de la radiación solar directa	244
7.2.1 Radiación solar directa	245
7.2.1.1 Pirheliómetros patrón primarios	245
7.2.1.2 Pirheliómetros patrón secundarios	247
7.2.1.3 Pirheliómetros de campo y de red	248
7.2.1.4 Calibración de los pirheliómetros	249
7.2.2 Exposición	249
7.3 Medición de la radiación celeste global y difusa	250
7.3.1 Calibración de los piranómetros	250
7.3.1.1 Comparación con un pirheliómetro patrón y con un piranómetro de referencia en sombra	253
7.3.1.2 Comparación con un pirheliómetro patrón	253
7.3.1.3 Calibración alternada utilizando un pirheliómetro	254
7.3.1.4 Comparación con un piranómetro de referencia	255
7.3.1.5 Comparación en laboratorio	255
7.3.1.6 Comprobaciones de rutina de los factores de calibración	256
7.3.2 Funcionamiento de los piranómetros	256
7.3.2.1 Nivelación del sensor	257
7.3.2.2 Cambio de la sensibilidad debido a variaciones de la temperatura ambiente	257
7.3.2.3 Variación de la respuesta con la orientación	257
7.3.2.4 Variación de la respuesta en función del ángulo de incidencia	257
7.3.2.5 Incertidumbres en los totales horarios y diarios	258
7.3.3 Instalación y mantenimiento de los piranómetros	258
7.3.3.1 Corrección para obstáculos en un horizonte libre	259
7.3.3.2 Instalación de piranómetros para medir la radiación global	259
7.3.3.3 Instalación de piranómetros para medir la radiación celeste difusa ..	260
7.3.3.4 Instalación de piranómetros para medir la radiación reflejada	261
7.3.3.5 Mantenimiento de los piranómetros	261
7.3.3.6 Instalación y mantenimiento de piranómetros sobre plataformas especiales	261
7.4 Medición de la radiación total y de onda larga	262
7.4.1 Instrumentos para medir la radiación de onda larga	262
7.4.2 Instrumentos para medir la radiación total	263
7.4.3 Calibración de los pirgeómetros	266
7.4.4 Instalación de pirradiómetros y de pirgeómetros	267
7.4.5 Registro y reducción de datos	267
7.5 Medición de magnitudes de radiación especiales	268
7.5.1 Medición de la luz diurna	268
7.5.1.1 Instrumentos	268
7.5.1.2 Calibración	269
7.5.1.3 Registro y reducción de datos	270
7.6 Medición de la radiación ultravioleta	270
7.6.1 Instrumentos	272
7.6.1.1 Sensores de banda ancha	272
7.6.1.2 Sensores de banda estrecha	274

	<i>Página</i>
7.6.1.3 Espectrorradiómetros	275
7.6.2 Calibración.....	276
ANEXO 7.A. NOMENCLATURA DE LAS MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS Y FOTOMÉTRICAS	279
ANEXO 7.B. MAGNITUDES METEOROLÓGICAS, SÍMBOLOS Y DEFINICIONES DE RADIACIÓN.....	281
ANEXO 7.C. REQUISITOS QUE DEBEN REUNIR LOS CENTROS RADIOMÉTRICOS MUNDIALES, REGIONALES Y NACIONALES	283
ANEXO 7.D. FÓRMULAS ÚTILES	287
ANEXO 7.E. RADIACIÓN CELESTE DIFUSA: CORRECCIÓN DEL EFECTO DEL ANILLO DE SOMBRA	290
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	292

CAPÍTULO 7. MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN

7.1 GENERALIDADES

Los diversos flujos de radiación recibidos y emitidos por la superficie terrestre son algunas de las variables más importantes de la economía térmica de la Tierra en su totalidad, y de cualquier punto de su superficie o de la atmósfera. Las mediciones de la radiación se emplean para:

- a) estudiar las transformaciones de la energía en el sistema Tierra-atmósfera, así como sus variaciones en el tiempo y en el espacio;
- b) analizar las propiedades y distribución de los componentes de la atmósfera, como los aerosoles, el vapor de agua, el ozono, etc.;
- e) estudiar la distribución y variaciones de la radiación incidente, saliente y neta;
- d) responder a las necesidades de la biología, la medicina, la agricultura, la arquitectura y la industria en materia de radiación;
- e) verificar las mediciones de la radiación efectuadas por satélite, así como los algoritmos utilizados.

Para estas aplicaciones se requieren series periódicas de datos de los componentes de la radiación solar y terrestre en la superficie, recopilados por una vasta red de observación, así como la obtención de mediciones representativas de la radiación neta. Además de la publicación de las series de valores recopiladas por las diversas estaciones de observación, es esencial establecer climatologías de la radiación completas para evaluar de manera más precisa las variaciones diarias y estacionales de los distintos componentes radiativos del balance térmico general y, en consecuencia, para comprender mejor su relación con otros elementos meteorológicos.

En OMM (1986) se encontrará una descripción muy útil del funcionamiento y diseño de las redes de estaciones radiométricas. En la parte VI de esta Guía se describen los principios científicos en que se basan las mediciones, acompañados de orientaciones sobre la garantía de la calidad, que es el elemento más importante en las mediciones de radiación. La publicación *Baseline Surface Radiation Network - Operations Manual* (Red de referencia para las mediciones de radiación en superficie — Manual de funcionamiento) (OMM, 1998) ofrece una exposición general de la situación actual en materia de mediciones de radiación.

Conforme a la práctica habitual en este campo, los errores y las incertidumbres están expresados en el presente capítulo como intervalos de confianza del 66% de la diferencia respecto de la cantidad verdadera, que es similar a una desviación típica de la población de valores. En caso necesario, se indican los intervalos de confianza e incertidumbre, y las incertidumbres se estiman mediante el método de la Organización Internacional de Normalización (ISO/ Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), 2008/Comité Conjunto para las Guías en Metrología (JCGM), 2008). Por ejemplo, un 95% de incertidumbre implica que la incertidumbre indicada corresponde a un intervalo de confianza del 95%.

7.1.1 Definiciones

El anexo 7.A contiene una nomenclatura de las magnitudes radiométricas y fotométricas, basada en las definiciones recomendadas por la Comisión Internacional de las Radiaciones de la Asociación Internacional de Meteorología y Ciencias de la Atmósfera y por la Comisión Internacional de Iluminación (CII). En el anexo 7.B figuran las magnitudes, las definiciones y los símbolos relativos a la radiación utilizados en aplicaciones meteorológicas.

Según su origen, las magnitudes radiativas se clasifican en dos grupos: radiación solar y radiación terrestre. En el contexto de este capítulo, el término “radiación” puede implicar un proceso o bien designar múltiples magnitudes. Por ejemplo, “radiación solar” puede significar energía solar, exposición solar o irradiancia solar (véase el anexo 7.B).

La energía solar es la energía electromagnética emitida por el Sol. La radiación solar que incide en el límite superior de la atmósfera terrestre se denomina radiación solar extraterrestre; el 97% de ella se encuentra confinado en el intervalo espectral comprendido entre 290 y 3 000 nm y se denomina radiación solar (en ocasiones, radiación de onda corta). Una parte de la radiación solar extraterrestre penetra a través de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, mientras que otra parte se dispersa y/o es absorbida en la atmósfera por las moléculas gaseosas, las partículas de aerosoles, y las gotas de agua y cristales de hielo presentes en ella.

La radiación terrestre es la energía electromagnética de onda larga emitida por la superficie de la Tierra y por los gases, aerosoles y nubes de la atmósfera; es también absorbida parcialmente en la atmósfera. Para una temperatura de 300 K, un 99,99% de la energía de la radiación terrestre tiene una longitud de onda superior a 3 000 nm, y en torno a un 99%, superior a 5 000 nm. A temperaturas inferiores, el espectro se desplaza hacia longitudes de onda mayores.

Dado que las distribuciones espectrales de la radiación solar y terrestre apenas se superponen, con frecuencia se las trata por separado en mediciones y cálculos. En meteorología, la suma de estos dos tipos de radiación se denomina radiación total.

La luz es la radiación visible para el ojo humano. El intervalo espectral de la radiación visible se define en términos de la eficiencia luminosa espectral para un observador de referencia. El límite inferior está situado entre 360 y 400 nm y el límite superior, entre 760 y 830 nm (CII, 1987). La radiación cuya longitud de onda es inferior a 400 nm se denomina ultravioleta (UV), y la de longitud de onda superior a 800 nm, radiación infrarroja. La horquilla de radiaciones UV se divide frecuentemente en tres intervalos (IEC, 1987):

UV-A: 315 a 400 nm

UV-B: 280 a 315 nm

UV-C: 100 a 280 nm

7.1.2 **Unidades y escalas**

7.1.2.1 **Unidades**

Para representar las variables meteorológicas de la radiación se utilizará preferentemente el Sistema Internacional de Unidades (SI). En los anexos 7.A y 7.B figura una lista general de las unidades correspondientes.

7.1.2.2 **Normalización**

Los Centros radiométricos mundiales, regionales y nacionales, cuyos requisitos figuran en el anexo 7.C, tienen la responsabilidad de calibrar los instrumentos radiométricos. Además, el Centro radiométrico mundial de Davos está encargado del mantenimiento de la referencia básica: el Grupo de Normalización Mundial (GNM) de instrumentos, que se utiliza para establecer la Referencia Radiométrica Mundial (RRM). Durante las comparaciones internacionales, que se organizan cada cinco años, se comparan con el GNM los instrumentos patrón de los centros regionales, y se ajustan a la RRM sus factores de calibración. Estos, a su vez, se utilizan para transferir la RRM periódicamente a los centros nacionales, que calibran sus instrumentos de red utilizando los propios instrumentos patrón nacionales.

Definición de la Referencia Radiométrica Mundial

En el pasado se han utilizado en meteorología diversas referencias o escalas radiométricas, a saber: la escala de Ångström de 1905, la escala smithsoniana de 1913 y la escala pirheliométrica

internacional de 1956 (IPS 1956). Gracias a los progresos en radiometría absoluta alcanzados en los últimos años, se ha reducido mucho la incertidumbre de las mediciones de radiación. Los resultados de numerosas comparaciones efectuadas entre 15 pirheliómetros absolutos de 10 tipos diferentes han servido de base para definir una RRM. Es posible transformar las antiguas escalas en la RRM utilizando los factores de conversión siguientes:

$$\frac{\text{RRM}}{\text{Escala de \AA ngstr\u00f6m de 1905}} = 1,026$$

$$\frac{\text{RRM}}{\text{Escala smithsoniana de 1913}} = 0,977$$

$$\frac{\text{RRM}}{\text{IPS 1956}} = 1,022$$

Se acepta que la RRM representa las unidades f\u00edsicas de irradiancia total, con un margen de incertidumbre del 0,3% (99% respecto del valor medido).

Realizaci\u00f3n de la Referencia Radiom\u00e9trica Mundial: Grupo de Normalizaci\u00f3n Mundial

Para garantizar a largo plazo la estabilidad de la nueva referencia se utiliza un GNM integrado por un m\u00ednimo de cuatro pirheli\u00f3metros absolutos de dise\u00f1o diferente. Al incorporar los instrumentos a ese grupo, se les asigna un factor de reducci\u00f3n con el fin de corregir sus lecturas para referirlas a la RRM. Para formar parte del grupo, un radi\u00f3metro debe cumplir los siguientes requisitos:

- La estabilidad debe superar el 0,2% del valor medido en escalas temporales de decenios.
- La incertidumbre, para un nivel de confianza del 95%, de la serie de mediciones efectuadas con el instrumento debe estar situada dentro de los l\u00edmites de incertidumbre de la RRM.
- El instrumento ha de tener un dise\u00f1o distinto al de los dem\u00e1s instrumentos del GNM.

Para verificar los criterios de estabilidad, los instrumentos del GNM se comparan entre s\u00ed al menos una vez al a\u00f1o, raz\u00f3n por la cual estos se encuentran en el Centro radiom\u00e9trico mundial de Davos.

C\u00e1lculo de los valores de la Referencia Radiom\u00e9trica Mundial

Para calibrar un instrumento radiom\u00e9trico deber\u00edan utilizarse como referencia las lecturas de uno de los instrumentos del GNM, o las de otro que haya sido calibrado directamente con uno de los instrumentos del Grupo. En las comparaciones internacionales de pirheli\u00f3metros, el valor de la RRM se obtiene calculando la media de al menos tres instrumentos del GNM. Los valores de la RRM se establecen siempre corrigiendo las lecturas de cada instrumento del GNM con el factor de correcci\u00f3n individual, determinado en el momento de incorporarlo al Grupo. Dado que el c\u00e1lculo del valor medio del GNM, utilizado como referencia, puede peligrar si fallan uno o m\u00e1s radi\u00f3metros del GNM, la Comisi\u00f3n de Instrumentos y M\u00e9todos de Observaci\u00f3n resolvi\u00f3¹ que en cada comparaci\u00f3n internacional de pirheli\u00f3metros deber\u00eda establecerse un grupo ad hoc, integrado por el ponente sobre instrumentos meteorol\u00f3gicos para medir la radiaci\u00f3n (o la persona designada) y no menos de cinco miembros, entre ellos el presidente. El director de la comparaci\u00f3n debe participar en las reuniones del grupo en calidad de experto. El grupo deber\u00eda discutir los resultados preliminares de la comparaci\u00f3n, bas\u00e1ndose en criterios definidos por el Centro radiom\u00e9trico mundial, evaluar la referencia, y recomendar la actualizaci\u00f3n de los factores de calibraci\u00f3n.

¹ Recomendado por la Comisi\u00f3n de Instrumentos y M\u00e9todos de Observaci\u00f3n en su und\u00e9cima reuni\u00f3n (1994).

7.1.3 **Requisitos meteorológicos**

7.1.3.1 ***Datos que se deben comunicar***

La irradiancia y la exposición radiante son las magnitudes más habitualmente registradas y archivadas, junto con sus promedios y totales a lo largo de una hora. Se utilizan también datos de períodos más cortos, hasta de 1 minuto, e incluso decenas de segundos (para ciertas aplicaciones energéticas). Los totales diarios de exposición radiante son valores frecuentemente utilizados, pero expresados en términos de irradiancia diaria media. Las mediciones de la extinción atmosférica deben hacerse con tiempos de respuesta muy cortos para reducir las incertidumbres derivadas de las variaciones de la masa de aire.

Para las mediciones de radiación, es particularmente importante registrar y facilitar información sobre las circunstancias en que se realizaron las observaciones. Por ejemplo, el tipo y la trazabilidad del instrumento, su historial de calibración, su ubicación en el espacio y en el tiempo, su exposición espacial y su registro de mantenimiento.

7.1.3.2 ***Incertidumbre***

No existen unas instrucciones formalmente acordadas acerca de la incertidumbre que se requiere para la mayor parte de magnitudes relacionadas con la radiación, aunque este asunto se aborda en las secciones de este capítulo referidas a los diversos tipos de medición a la vez que se señalan las mejores prácticas con respecto a las incertidumbres aplicables a la Red de referencia para las mediciones de radiación en superficie del Sistema Mundial de Observación del Clima (véase OMM, 1998). Cabe señalar que, en realidad, suele ser difícil obtener mediciones de buena calidad y, para las operaciones de rutina, estas solo son posibles utilizando equipos modernos y mediciones redundantes. Algunos de los sistemas que aún se siguen utilizando distan mucho de los mejores resultados, pero su modesto desempeño ha sido aceptable para numerosas aplicaciones. Sin embargo, cada vez hay una mayor demanda de datos de la máxima calidad.

En el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.E), se indican los valores de incertidumbre de la radiación neta y de la exposición radiante. En relación con esta última, el valor requerido de incertidumbre al 95% a lo largo de un día, establecido por la OMM para los intercambios internacionales, es de $0,4 \text{ MJ m}^{-2}$ para valores menores o iguales a 8 MJ m^{-2} , y del 5% para valores superiores a 8 MJ m^{-2} .

7.1.3.3 ***Muestreo y registro***

La mejor manera de satisfacer las necesidades de incertidumbre es realizar observaciones con un período de muestreo inferior a $1/e$ veces la constante de tiempo del instrumento, incluso cuando los datos que finalmente se registrarán sean totales integrados para períodos de hasta 1 hora o más. Los puntos de datos pueden ser valores totales integrados, o bien un flujo medio calculado a partir de distintas muestras. Se preferirán los sistemas de datos digitales. Son mucho menos convenientes los registradores gráficos y otros tipos de integradores, y sus valores resultantes son difíciles de mantener a un nivel de incertidumbre adecuado.

7.1.3.4 ***Tiempos de observación***

En una red mundial de mediciones de radiación es importante que los datos sean homogéneos no solo en cuanto a la calibración sino también con respecto a los momentos en que se efectúa la observación. Por consiguiente, todas las mediciones de radiación deberían estar referidas a lo que se conoce en algunos países como tiempo local aparente y, en otros, como tiempo solar verdadero. Sin embargo, en los sistemas automáticos puede ser interesante el tiempo estándar o tiempo universal, debido a su mayor facilidad de uso, aunque solo será aceptable si al reducir los datos al tiempo solar verdadero no se introduce una pérdida de información importante (es decir, si la frecuencia de muestreo y la tasa de almacenamiento son suficientemente altas, como se indica en la sección 7.1.3.3 anterior). Para la conversión de tiempo estándar a tiempo solar son útiles las fórmulas que figuran en el anexo 7.D.

7.1.4 Métodos de medición

Los instrumentos meteorológicos para medir la radiación se clasifican atendiendo a diversos criterios: el tipo de variable que se desea medir, el campo visual, la respuesta espectral, el uso principal a que se destinen, etc. La clasificación más aceptada es la que figura en el cuadro 7.1. La calidad de los instrumentos se caracteriza por lo señalado en los apartados a) a h) que figuran más adelante. Los instrumentos y su funcionamiento se describen en las secciones 7.2 a 7.4. En OMM (1986) se indican detalladamente las características de los instrumentos y los principios según los cuales funcionan.

Cuadro 7.1. Instrumentos meteorológicos para medir la radiación

<i>Clasificación del instrumento</i>	<i>Parámetro que se desea medir</i>	<i>Uso principal</i>	<i>Ángulo de visión (estereorradianes) (véase la figura 7.1)</i>
Pirheliómetro absoluto	Radiación solar directa	Patrón primario	5×10^{-3} (aprox. $2,5^\circ$ de semiángulo)
Pirheliómetro	Radiación solar directa	a) Patrón secundario para calibraciones b) Red	5×10^{-3} a $2,5 \times 10^{-2}$
Pirheliómetro espectral	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas (p. ej. con filtros OG 530, RG 630, etc.)	Red	5×10^{-3} a $2,5 \times 10^{-2}$
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas (p. ej. a $500 \pm 2,5$ nm, $368 \pm 2,5$ nm)	a) Patrón b) Red	1×10^{-3} a 1×10^{-2} (aprox. $2,3^\circ$ de ángulo total)
Piranómetro	a) Radiación (solar) global b) Radiación (solar) celeste difusa c) Radiación solar reflejada	a) Patrón de trabajo b) Red	2π
Piranómetro espectral	Radiación (solar) global en intervalos espectrales de banda ancha (p. ej. con filtros OG 530, RG 630, etc.)	Red	2π
Piranómetro diferencial	Radiación (solar) global neta	a) Patrón de trabajo b) Red	4π
Pirgeómetro	a) Radiación de onda larga ascendente (sensor hacia abajo) b) Radiación de onda larga descendente (sensor hacia arriba)	Red	2π
Pirradiómetro	Radiación total	Patrón de trabajo	2π
Pirradiómetro diferencial	Radiación total neta	Red	4π

Los radiómetros absolutos se calibran a sí mismos; es decir, la irradiancia recibida por el sensor es reemplazada por una corriente eléctrica que puede medirse con exactitud. Sin embargo, como la sustitución no puede ser perfecta, la desviación respecto del caso ideal determina la incertidumbre de la medición de radiación.

Pero la mayoría de los sensores de radiación no son absolutos y deben calibrarse tomando como referencia un instrumento absoluto. La incertidumbre del valor medido depende, pues, de los factores siguientes, que deberían ser conocidos para un instrumento cuyas características técnicas estén bien establecidas:

- a) la resolución, es decir, la variación más pequeña de la magnitud de radiación que pueda detectar el instrumento;
- b) las desviaciones de la sensibilidad a lo largo del tiempo (el cociente entre la señal eléctrica de salida y la irradiancia aplicada);
- c) las variaciones de la sensibilidad debidas a alteraciones de variables medioambientales, como la temperatura, la humedad, la presión o el viento;
- d) la falta de linealidad de la respuesta, es decir, las variaciones de la sensibilidad relacionadas con las variaciones de la irradiancia;
- e) la desviación de la respuesta espectral respecto del valor supuesto, por ejemplo el ennegrecimiento de la superficie receptora, el efecto de la ventana de apertura, etc.;
- f) la desviación de la respuesta direccional respecto a un valor esperado, es decir, respuesta cosenoidal y respuesta acimutal;
- g) la constante de tiempo del instrumento o del sistema de medición;
- h) las incertidumbres del equipo auxiliar.

Los instrumentos deberían seleccionarse en función de su uso final y de la incertidumbre requerida para la magnitud obtenida. Algunos instrumentos funcionan mejor en determinados climas, y para determinadas irradiancias y posiciones del Sol.

7.2 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DIRECTA

Para medir la radiación solar directa se utilizan pirheliómetros, cuyas superficies receptoras están dispuestas de modo que sean perpendiculares a la dirección del Sol. Haciendo uso de las aperturas, se mide solo la radiación procedente del Sol y de un estrecho anillo celeste; este último componente se denomina en ocasiones radiación circunsolar o radiación de la aureola. Los instrumentos modernos interceptan esta región en un semiángulo de unos $2,5^\circ$ en ciertos modelos, y de aproximadamente 5° a partir del centro del disco solar (que se corresponden, respectivamente, con $6 \cdot 10^{-3}$ y $2,4 \cdot 10^{-2}$ sr). El pirheliómetro deberá estar instalado de modo que permita un ajuste rápido y gradual de los ángulos acimutal y de elevación. Generalmente, el instrumento está dotado de un visor en el que un pequeño punto de luz o una imagen del Sol coincide con una marca que indica el centro del objetivo cuando la superficie receptora es exactamente perpendicular al haz solar directo. Para realizar registros continuos, se aconseja utilizar un equipo de seguimiento automático del Sol (seguidor solar).

Para los nuevos diseños de instrumentos que miden la radiación solar directa, se recomienda que el semiángulo de apertura sea de $2,5^\circ$ ($6 \cdot 10^{-3}$ sr) y el ángulo de inclinación, de 1° . Para la definición de estos ángulos, consúltese la figura 7.1.

Al comparar instrumentos diseñados con diferentes geometrías de campo visual, debe tenerse en cuenta que la radiación de la aureola influirá en las lecturas tanto más cuanto mayores sean las pendientes y los ángulos de apertura. La diferencia puede llegar a ser del 2% entre las dos aperturas anteriormente mencionadas, para una masa de aire de 1,0. Para efectuar comparaciones climatológicas de los datos de radiación solar directa en diferentes estaciones del año puede ser necesario reducir todos ellos a una distancia Sol-Tierra media:

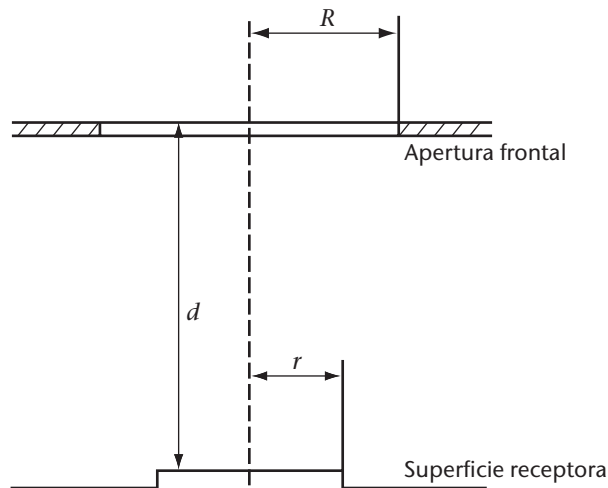


Figura 7.1. Geometría del campo visual. El semiángulo de apertura es $\arctan R/d$; el ángulo de inclinación es $\arctan (R - r)/d$

$$E_N = E / R^2 \quad (7.1)$$

donde E_N es la radiación solar, normalizada a la distancia media entre el Sol y la Tierra, definida como una unidad astronómica (UA) (véase el anexo 7.D); E es la radiación solar directa medida; y R es la distancia Sol-Tierra, expresada en unidades astronómicas.

7.2.1 Radiación solar directa

En el cuadro 7.2 (adaptado de ISO, 1990a) se indican algunas de las características de los pirheliómetros operativos (excepto cuando son patrones primarios), junto con estimaciones indicativas de las incertidumbres de las mediciones efectuadas con esos instrumentos, siempre y cuando aquellos sean utilizados por expertos y sometidos a un control de la calidad adecuado. Aunque se dispone de pirheliómetros más económicos (véase ISO, 1990a), si no se llevan a cabo esfuerzos por caracterizar su respuesta, las incertidumbres resultantes reducen la calidad de los datos y, dado que además se necesita un seguidor solar, en la mayoría de los casos compensa utilizar un pirheliómetro de buena calidad pues el costo adicional que implica es menor. Las incertidumbres estimadas se basan en los supuestos siguientes:

- los instrumentos están adecuadamente mantenidos, correctamente alineados y limpios;
- los datos de 1 minuto y de 1 hora son para irradiancias con cielo despejado al mediodía solar;
- los valores de exposición diarios son para días despejados en latitudes medias.

7.2.1.1 Pirheliómetros patrón primarios

Un pirheliómetro absoluto permite definir la escala de irradiancia total sin recurrir a fuentes o radiadores de referencia. Es necesario conocer los límites de la incertidumbre asociada a la definición pues la calidad de este dato determinará la fiabilidad del pirheliómetro absoluto. Los patrones primarios deberían utilizarse y mantenerse solo en laboratorios especializados. En OMM (1986) se encontrarán detalles acerca de su construcción y funcionamiento; sin embargo, para completar esa información, a continuación se ofrece una reseña al respecto.

Todos los pirheliómetros absolutos de diseño moderno utilizan cavidades como receptores y medidores diferenciales del flujo calorífico, calibrados eléctricamente, como sensores.

Cuadro 7.2. Características de los pirheliómetros operativos

<i>Características</i>	<i>Calidad alta^a</i>	<i>Calidad buena^b</i>
Tiempo de respuesta (95% de la señal)	< 15 s	< 30 s
Desplazamiento del cero (respuesta a un cambio de 5 K h ⁻¹ en la temperatura ambiente)	2 W m ⁻²	4 W m ⁻²
Resolución (variación mínima detectable en W m ⁻²)	0,51	1
Estabilidad (variación anual, porcentaje de totalidad de escala)	0,1	0,5
Respuesta en temperatura (porcentaje de error máximo debido a la variación de la temperatura ambiente dentro de un intervalo de 50 K)	1	2
No linealidad (porcentaje de desviación de la capacidad de respuesta a 500 W m ⁻² debido a un cambio producido en la irradiancia entre 100 W m ⁻² y 1 100 W m ⁻²)	0,2	0,5
Sensibilidad espectral (porcentaje de desviación del producto del coeficiente de absorción espectral por el factor de transmitancia espectral con relación a la media dentro del intervalo de 300 a 3 000 nm)	0,5	1,0
Respuesta en inclinación (porcentaje de desviación en relación con la capacidad de respuesta a 0° de inclinación (horizontal) debido a un cambio en la inclinación de 0° a 90° a 1 000 W m ⁻² de irradiancia)	0,2	0,5
Incertidumbre alcanzable con un nivel de confianza del 95% (véase más arriba)		
Totales en 1 minuto	%	0,9
	kJ m ⁻²	1,8
		0,56
		1
Totales en 1 hora	%	0,7
	kJ m ⁻²	1,5
		21
		54
Totales diarios	%	0,5
	kJ m ⁻²	1,0
		200
		400

Notas:

- a Instrumentos casi al nivel de los últimos adelantos de la técnica; pueden utilizarse como patrón de trabajo; el mantenimiento solo puede realizarse en estaciones con instalaciones y personal especializados.
- b Puede utilizarse en operaciones de red.

En la actualidad, se ha comprobado que esta combinación es la que proporciona la menor incertidumbre posible para los niveles de radiación habituales en las mediciones de la radiación solar (es decir, hasta 1,5 kW m⁻²).

Por lo general, la calibración eléctrica se realiza sustituyendo la energía radiativa por energía eléctrica, que se disipa en un serpentín calefactor situado lo más cerca posible del lugar en que se produce la absorción de la radiación solar.

Para determinar la incertidumbre de las mediciones efectuadas con tales instrumentos, se examinan detenidamente las propiedades físicas del instrumento y se realizan mediciones en laboratorio y/o cálculos mediante modelos para determinar las desviaciones respecto del comportamiento ideal, es decir, en qué medida será posible conseguir la sustitución por energía eléctrica. Este procedimiento se denomina caracterización del instrumento.

Los pirheliómetros absolutos deberían cumplir las especificaciones siguientes (en referencia a los instrumentos, y no a los tipos de instrumento), cuando se desee utilizarlos como patrón primario:

- a) Deberá caracterizarse completamente como mínimo un instrumento de una serie de radiómetros de fábrica. La incertidumbre de la caracterización, para un nivel de confianza

del 95%, debería ser inferior a 2 W m^{-2} en condiciones de cielo despejado apropiadas para la calibración (véase ISO, 1990a). La incertidumbre al 95% (para todos los componentes de la misma) de una serie de mediciones no debería exceder de 4 W m^{-2} para ninguno de los valores medidos.

- b) Cada instrumento de la serie debe compararse con el que haya sido caracterizado, y ninguno de ellos debería desviarse de él en más de la incertidumbre de caracterización, conforme se haya determinado en el apartado a) anterior.
- c) Previa solicitud, debería facilitarse una descripción detallada de los resultados de las comparaciones y de la caracterización del instrumento.
- d) Para tener la seguridad de que el diseño responde a las tecnologías más recientes, deberá incorporarse su trazabilidad respecto de la RRM mediante comparación con el GNM o con otra referencia cuidadosamente determinada que sea trazable respecto al GNM. Este último requisito se cumplirá cuando una serie de mediciones presente una incertidumbre trazable al 95% de menos de 1 W m^{-2} de la RRM.

7.2.1.2 Pirheliómetros patrón secundarios

Será posible utilizar como patrón secundario un pirheliómetro absoluto que no cumpla las especificaciones de patrón primario o que no esté completamente caracterizado, siempre que haya sido calibrado mediante comparación con el GNM con una incertidumbre al 95% inferior a 1 W m^{-2} para una serie de mediciones.

Podrán utilizarse como patrones secundarios otros tipos de instrumentos con incertidumbres de medición similares o cercanas a las de los patrones primarios.

El pirheliómetro de compensación de Ångström ha sido y sigue siendo utilizado como patrón secundario conveniente para la calibración de piranómetros y de otros pirheliómetros. Fue diseñado por K. Ångström como instrumento absoluto, y en él estaba basada la escala de Ångström de 1905; en la actualidad se utiliza como patrón secundario, y debe calibrarse tomando como referencia un instrumento patrón.

El sensor consta de dos láminas de manganina platinadas, de aproximadamente 18 mm de longitud, 2 mm de anchura y unos 0,02 mm de grosor cada una, que se oscurecen con una capa de hollín de vela o con pintura óptica negra mate. En el reverso de cada lámina se acopla un termopar de cobre/constantán, de modo que la diferencia de temperatura entre las dos láminas pueda indicarse en un galvanómetro sensible o en un microvoltímetro eléctrico. En el cuadro 7.3 se indican los semiángulos de apertura y los ángulos de inclinación que resultan de las dimensiones de las láminas y el diafragma frontal.

Cuadro 7.3. Geometría del campo visual de los pirheliómetros de Ångström

Ángulo	Vertical	Horizontal
Semiángulo de apertura	5°-8°	~2°
Ángulo de inclinación	0,7°-1,0°	1,2°-1,6°

La medición consta de tres o más ciclos, durante los cuales se ensombrece o se irradia, alternadamente, la lámina izquierda o derecha. La lámina ensombrecida se calienta con una corriente eléctrica, ajustada de modo que la fuerza termoeléctrica del termopar y, por consiguiente, la diferencia de temperatura entre las dos láminas, sea aproximadamente igual a cero. Antes y después de cada secuencia de medición se comprobará el cero colocando a la sombra o al sol ambas láminas simultáneamente. Según el método utilizado y las instrucciones de funcionamiento del fabricante, el cálculo de la irradiancia diferirá ligeramente. El método adoptado para las comparaciones internacionales de pirheliómetros está basado en la fórmula siguiente:

$$E = K \cdot i_L \cdot i_R \quad (7.2)$$

donde E es la irradiancia (en vatios por metro cuadrado); K es la constante de calibración determinada mediante comparación con un patrón primario (en vatios por metro cuadrado y amperio cuadrado); e i_L i_R son las intensidades de corriente (en amperios), medidas con la lámina izquierda o derecha, respectivamente, expuesta a la luz solar directa.

Antes y después de cada serie de mediciones, se ajusta eléctricamente el cero del sistema utilizando uno de los métodos anteriores, denominándose por ello los ceros "frío" (a la sombra) o "caliente" (al sol), según el caso. Para calcular la irradiancia, por lo general, se excluye la primera lectura, por ejemplo i_R , y se utilizan solo los pares $i_L - i_R$ siguientes. Cuando se compara un pirheliómetro de esas características con otros instrumentos, la irradiancia obtenida de los valores de intensidad de corriente corresponde a la media geométrica de las irradiancias solares en los instantes de las lecturas de i_L e i_R .

La instrumentación auxiliar consta de una fuente de alimentación, un dispositivo de regulación de la corriente, un indicador del cero y un monitor de corriente.

La sensibilidad del indicador del cero debería ser de aproximadamente $0,05 \cdot 10^{-6}$ A por cada división de la escala para una impedancia de baja entrada ($< 10 \Omega$), o de aproximadamente $0,5 \mu\text{V}$ para una impedancia de alto nivel de entrada ($> 10 \text{ k}\Omega$). En tales condiciones, una diferencia de temperatura de unos $0,05$ K entre la unión del termopar de cobre-constantán causa una deflexión igual a una división de la escala, que es indicativa de que una de las láminas recibe un aporte de calor excesivo de aproximadamente un $0,3\%$.

La incertidumbre de la irradiancia solar directa obtenida depende en gran medida de la destreza del operador y de la calidad del sistema utilizado para medir la corriente, tanto si se trata de un miliamperímetro de bobina móvil como de un voltímetro digital que mida la diferencia de potencial entre los extremos de una resistencia patrón. El error parcial del valor de salida de la irradiancia es el doble que el correspondiente a la lectura de la intensidad de la corriente eléctrica. La corriente calefactora se envía a cada lámina mediante un conmutador y normalmente se controla por medio de reóstatos diferentes para cada circuito. El conmutador puede utilizarse también para cortar la corriente y, de ese modo, poder determinar el cero. La resolución de los reóstatos debería ser suficiente para ajustar el indicador del cero con un margen de media división de escala.

7.2.1.3 **Pirheliómetros de campo y de red**

Este tipo de pirheliómetros suelen utilizar una termopila como detector y presentan una geometría del campo visual similar a la de los pirheliómetros patrón. Los modelos más antiguos suelen tener campos de visión y ángulos de inclinación mayores. Estas características de diseño tenían básicamente por objeto reducir la necesidad de un seguimiento solar exacto. Sin embargo, cuanto mayor sea el ángulo de inclinación (y de apertura), mayor será la magnitud de la radiación de la aureola detectada por el sensor, y dicha magnitud puede llegar a ser de varias unidades porcentuales cuando la profundidad óptica tiene un valor elevado y los ángulos de limitación son grandes. En los nuevos diseños de los seguidores solares, en particular los informatizados, que funcionan en modo pasivo o activo (de búsqueda del sol), ya no es necesario que los ángulos de inclinación sean mayores. Sin embargo, sigue siendo necesario un ángulo de inclinación de 1° para asegurarse de que la energía procedente del haz solar directo se distribuya uniformemente sobre el detector, admitiendo unos errores de puntería en el seguimiento solar de escasa magnitud, del orden de $0,1^\circ$.

Los usos a que se destine el pirheliómetro determinarán posiblemente el tipo de instrumento que se seleccione. Algunos modelos de tipo manual, como el actinómetro de Linke Fuessner, se utilizan principalmente para mediciones puntuales, mientras que otros, como los tipos denominados EKO, Eppley, Kipp y Zonen, y Middleton, están específicamente diseñados para la vigilancia a largo plazo de la irradiancia directa. Antes de instalar un instrumento, el usuario debe tener en cuenta las diferencias importantes que existen entre los pirheliómetros operativos, a saber:

- a) el campo visual del instrumento;
- b) si el instrumento mide tanto la parte del espectro de onda larga como la de onda corta (es decir, si la apertura no tiene ninguna protección o si está protegida con una ventana de cristal o una ventana de cuarzo);
- c) los métodos de compensación o de corrección en la temperatura;
- d) la magnitud y la variación de la señal de irradiancia nula;
- e) la posibilidad de instalar el instrumento en un sistema de seguimiento automático para la vigilancia a largo plazo;
- f) hasta qué punto son iguales, para la calibración de otros pirheliómetros operativos, las diferencias a) a c) anteriores, y hasta qué punto tiene el pirheliómetro la calidad necesaria para calibrar otros instrumentos de la red.

7.2.1.4 **Calibración de los pirheliómetros**

Todos los pirheliómetros, salvo los absolutos, deben calibrarse mediante comparación, utilizando el Sol como fuente, con un pirheliómetro que sea trazable respecto al GNM y cuya incertidumbre de calibración probable sea igual o superior a la del pirheliómetro que se calibra.

Como todos los datos de radiación solar deben tener como referencia la RRM, los pirheliómetros absolutos hacen uso también de un factor determinado mediante comparación con el GNM, en lugar del suyo determinado individualmente. Después de la comparación (por ejemplo, durante las comparaciones internacionales de pirheliómetros organizadas periódicamente), un pirheliómetro de este tipo puede usarse como patrón para calibrar, también en este caso mediante comparación y utilizando el Sol como fuente, patrones secundarios y pirheliómetros de campo. Para calibrar instrumentos de campo pueden utilizarse también patrones secundarios, aunque se obtendrá una mayor incertidumbre.

La calidad de las calibraciones que utilizan el Sol como fuente puede depender de la influencia de la aureola si se comparan instrumentos con diferentes geometrías del campo visual. Asimismo, la calidad de los resultados dependerá de la variabilidad de la irradiancia solar cuando las constantes de tiempo y las señales de irradiancia nula de los pirheliómetros sean apreciablemente diferentes. Por último, pueden influir también en los resultados las condiciones ambientales, por ejemplo la temperatura, la presión o la irradiancia neta de onda larga. Si se necesita una calibración de muy alta calidad, deberían utilizarse solo datos obtenidos en días de cielo muy despejado y estables.

Los procedimientos de calibración de los pirheliómetros de campo están recogidos en una norma ISO (ISO, 1990b).

La experiencia reciente en comparaciones internacionales de pirheliómetros pone de manifiesto que un período de cinco años entre calibraciones trazables respecto al GNM debería ser suficiente para los patrones primarios y secundarios. Los pirheliómetros de campo deberían calibrarse cada uno o dos años; cuanto más prolongado sea su uso y más rigurosas las condiciones de trabajo, más frecuentemente deberían calibrarse.

7.2.2 **Exposición**

Para obtener registros continuos con un menor grado de incertidumbre, será esencial disponer de un seguidor solar exacto que no resulte influido por las condiciones medioambientales. El seguimiento deberá efectuarse dentro de un margen de $0,2^\circ$, y los instrumentos deberían inspeccionarse como mínimo una vez al día, y con mayor frecuencia si las condiciones meteorológicas así lo requirieran (protegiéndolos contra las condiciones adversas).

El principal requisito de exposición para controlar la radiación solar directa es la ausencia de obstrucciones para el haz solar en todo momento y en cualquier época del año. Además, la selección del emplazamiento debería efectuarse de modo que la influencia de la niebla, el humo y la contaminación atmosférica sea lo más representativa posible del área circundante.

Para las observaciones continuas se utiliza normalmente una ventana que proteja el sensor y los elementos ópticos de la lluvia, la nieve, etc. Debe procurarse que la ventana se mantenga limpia, sin que se forme condensación en su parte interior.

7.3 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN CELESTE GLOBAL Y DIFUSA

La radiación global se define como la radiación solar recibida desde un ángulo sólido de 2π sr sobre una superficie horizontal e incluye la radiación recibida directamente del ángulo sólido del disco solar, así como la radiación celeste difusa dispersada al atravesar la atmósfera.

El instrumento necesario para medir la radiación solar procedente de un ángulo sólido de 2π sr sobre una superficie plana y en el intervalo espectral de 300 a 3 000 nm es el piranómetro. El piranómetro se utiliza a veces para medir la radiación solar en superficies inclinadas con respecto a la horizontal, y en posición invertida para medir la radiación global reflejada. Al medir el componente celeste difuso de la radiación solar, el componente solar directo es filtrado en el piranómetro mediante un dispositivo de sombra (véase la sección 7.3.3.3).

Los piranómetros utilizan normalmente como sensores elementos termoeléctricos, fotoeléctricos, piroeléctricos o bimetálicos. Como los piranómetros están siempre expuestos a todo tipo de condiciones meteorológicas, deben tener un diseño robusto y resistir los efectos corrosivos del aire húmedo (especialmente en las proximidades del mar). El receptor debería estar herméticamente sellado en el interior de su caja, o bien esta debe ser fácilmente desmontable para eliminar la humedad condensada. Cuando el receptor no está permanentemente sellado, con frecuencia se utiliza un desecante situado en la base del instrumento. Las propiedades de los piranómetros que interesan a la hora de evaluar la incertidumbre y la calidad de la medición de la radiación son: sensibilidad, estabilidad, tiempo de respuesta, respuesta cosenoidal, respuesta acimutal, carácter lineal, respuesta en temperatura, desplazamiento térmico, señal de irradiancia nula y respuesta espectral. En ISO (1990c) y OMM (1998) se encontrará más información sobre la utilización de los piranómetros.

En el cuadro 7.4 (adaptado de ISO, 1990a) se describen las características de los piranómetros para varios niveles de rendimiento, junto con las incertidumbres que es posible conseguir utilizando unas instalaciones apropiadas, un personal adecuadamente formado y un control de la calidad satisfactorio en las condiciones celestes descritas en la sección 7.2.1.

7.3.1 Calibración de los piranómetros

La calibración de un piranómetro consiste en determinar uno o más factores de calibración, y la dependencia de los mismos con respecto a las condiciones ambientales; por ejemplo:

- a) la distribución angular de la irradiancia;
- b) los métodos de calibración;
- c) la respuesta direccional del instrumento;
- d) la inclinación del instrumento;
- e) el nivel de irradiancia;
- f) la irradiancia neta en onda larga para la corrección del desplazamiento térmico;

Cuadro 7.4. Características de los piranómetros operativos

<i>Características</i>	<i>Calidad alta^a</i>	<i>Calidad buena^b</i>	<i>Calidad moderada^c</i>
Tiempo de respuesta (95% de la señal)	< 15 s	< 30 s	< 60 s
Desplazamiento del cero:			
(a) respuesta a 200 W m ⁻² de radiación térmica neta (ventilada)	7 W m ⁻²	15 W m ⁻²	30 W m ⁻²
(b) respuesta a un cambio de 5 K h ⁻¹ en la temperatura ambiente	2 W m ⁻²	4 W m ⁻²	8 W m ⁻²
Resolución (variación mínima detectable en W m ⁻²)	1 W m ⁻²	5 W m ⁻²	10 W m ⁻²
Estabilidad (variación anual, porcentaje de totalidad de escala)	0,8	1,5	3,0
Respuesta direccional para la radiación directa (margen de errores que puede producirse suponiendo que la incidencia normal de respuesta es igual para todas las direcciones, a partir de cualquier dirección, a una radiación cuya incidencia normal de irradiancia es de 1 000 W m ⁻²)	10 W m ⁻²	20 W m ⁻²	30 W m ⁻²
Respuesta en temperatura (porcentaje de error máximo debido a cualquier variación de la temperatura ambiente dentro de un intervalo de 50 K)	2	4	8
No linealidad (porcentaje de desviación de la capacidad de respuesta a 500 W m ⁻² debido a un cambio producido en la irradiancia entre 100 W m ⁻² y 1 000 W m ⁻²)	0,5	1	3
Sensibilidad espectral (porcentaje de desviación del producto del coeficiente de absorptancia espectral por el factor de transmitancia espectral con relación a la media dentro del intervalo de 300 a 3 000 nm)	2	5	10
Respuesta en inclinación (porcentaje de desviación en relación con la capacidad de respuesta a 0° de inclinación (horizontal) debido a un cambio en la inclinación de 0° a 90° a 1 000 W m ⁻² de irradiancia)	0,5	2	5
Incertidumbre alcanzable (con un nivel de confianza del 95%):			
Totales horarios	3%	8%	20%
Totales diarios	2%	5%	10%

Notas:

- a Instrumentos casi al nivel de los últimos adelantos de la técnica; pueden utilizarse como patrón de trabajo; el mantenimiento solo puede realizarse en estaciones con instalaciones y personal especializados.
- b Puede utilizarse en operaciones de red.
- c Adaptado para redes de bajo costo en donde se acepta un rendimiento bajo.

g) la distribución espectral de la irradiancia;

h) la temperatura;

i) la variación temporal.

Los usuarios de un piranómetro deben tener presente que la incertidumbre de las observaciones aumentará cuando las condiciones de exposición del sensor se desvíen de las condiciones en que el piranómetro haya sido calibrado.

Por lo general, será necesario especificar las condiciones ambientales de la prueba, que pueden diferir considerablemente según la aplicación. Tanto el método como las condiciones deben figurar también con detalle en el certificado de calibración.

Para calibrar los piranómetros existen diversos métodos que utilizan el Sol o fuentes de laboratorio, por ejemplo:

- a) comparación con un pirheliómetro patrón para la irradiancia solar directa, y con un piranómetro en sombra y calibrado para la irradiancia celeste difusa;
- b) comparación con un pirheliómetro patrón, utilizando el Sol como fuente de radiación, con un disco de sombra extraíble para el piranómetro;
- c) utilización de un pirheliómetro patrón, con el Sol como fuente, y dos piranómetros que se calibrarán midiendo alternativamente las irradiancias global y difusa;
- d) comparación con un piranómetro patrón, utilizando el Sol como fuente de radiación, en otras condiciones naturales de exposición (por ejemplo, cielo de nubosidad uniforme o irradiancia solar directa que estadísticamente no difiera de cero);
- e) comparación en laboratorio, en un banco de pruebas ópticas con una fuente artificial de luz, con incidencia normal o con un acimut y elevación especificados, con un piranómetro similar previamente calibrado en el exterior;
- f) comparación en laboratorio, con ayuda de una cámara de integración que simule la radiación celeste difusa, con un tipo similar de piranómetro previamente calibrado en el exterior.

Estos no son los únicos métodos que existen, pero generalmente se utilizan los que se indican en los apartados a), b), c) y d). Sin embargo, es esencial que, excepto en el caso de b), o bien las señales de irradiancia nula para todos los instrumentos sean conocidas, o bien se utilicen pares de piranómetros de modelos idénticos y con configuraciones idénticas. Si se hace caso omiso de estos desplazamientos y diferencias, los resultados pueden acusar un error sistemático apreciable.

Se considera que el método c) da unos resultados muy satisfactorios sin necesidad de un piranómetro calibrado.

Es difícil determinar un número concreto de mediciones necesarias para calcular el factor de calibración del piranómetro. Sin embargo, se puede calcular el error típico de la media, que debería ser inferior al límite deseado cuando se ha efectuado un número de lecturas suficiente en las condiciones deseadas. Las principales variaciones del factor de calibración obtenido (exceptuando las fluctuaciones debidas a las condiciones atmosféricas y a las limitaciones de la observación) se deben a:

- a) las desviaciones respecto de la respuesta cosenoidal, particularmente para elevaciones solares inferiores a 10° (por esa razón, es mejor efectuar la calibración solo cuando la elevación solar sea superior a 30°);
- b) la temperatura ambiente;
- c) una nivelación imperfecta de la superficie receptora;
- d) la respuesta no lineal del instrumento;
- e) la irradiancia neta de onda larga entre el detector y el cielo.

El piranómetro debería calibrarse únicamente en la posición de utilización.

Cuando se utilice el Sol como fuente, debería medirse o calcularse la elevación del Sol aparente (redondeada a la centésima de grado más próxima) para ese período a partir de la hora solar (véase el anexo 7.D). Habría que anotar también la temperatura media del instrumento o del ambiente circundante.

7.3.1.1 **Comparación con un pirheliómetro patrón y con un piranómetro de referencia en sombra**

Este método, descrito en ISO (1993), consiste en calibrar la respuesta del piranómetro a la irradiancia global frente a la suma de las mediciones separadas de los componentes directo y difuso. Las comparaciones se deberían realizar en momentos de cielo despejado y de radiación estable (constatada mediante los registros). El componente vertical de la irradiancia solar directa se determina a partir de la señal de salida del pirheliómetro, y la irradiancia celeste difusa se mide con un segundo piranómetro mantenido constantemente a la sombra. El componente directo se elimina del piranómetro celeste difuso sombreando en su totalidad la cúpula exterior del instrumento con un disco de tamaño suficiente, instalado sobre una varilla delgada y mantenido a cierta distancia. El diámetro del disco y su distancia a la superficie del receptor deberían ser tales que el ángulo apantallado sea aproximadamente igual a los ángulos de apertura del pirheliómetro. Para calcular el ángulo de inclinación de la combinación del disco de sombra y el piranómetro debería utilizarse el radio de la cúpula exterior, en lugar del radio del sensor del piranómetro. La configuración utilizada para obtener sombra crea un efecto de ocultación respecto a una aproximación muy cercana tanto del haz solar directo como de la irradiancia celeste circunsolar percibidos por el pirheliómetro.

En días despejados, la irradiancia celeste difusa es inferior al 15% de la irradiancia global; por consiguiente, no es necesario conocer con gran exactitud el factor de calibración del piranómetro de referencia. Sin embargo, hay que procurar tener en cuenta las señales de irradiancia nula de ambos piranómetros, dado que para algunos piranómetros, en condiciones de cielo despejado, la señal de irradiancia nula puede llegar a ser un 15% de la irradiancia celeste difusa.

El factor de calibración se calcula entonces de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E \cdot \sin h + V_s k_s = V \cdot k \quad (7.3)$$

o bien:

$$k = (E \sin h + V_s k_s) / V \quad (7.4)$$

donde E es la irradiancia solar directa medida con el pirheliómetro (en vatios por metro cuadrado); V es la señal de salida de la irradiancia global del piranómetro que se desea calibrar (en microvoltios); V_s es la señal de salida de la irradiancia celeste difusa del piranómetro de referencia en sombra (en microvoltios); h es la elevación del Sol aparente en el momento de la lectura; k es el factor de calibración del piranómetro que se desea calibrar (en vatios por metro cuadrado por microvoltio); y k_s es el factor de calibración del piranómetro de referencia en sombra (en vatios por metro cuadrado y microvoltio); todas las mediciones de señal se efectúan simultáneamente.

Los componentes directo, difuso y global variarán durante la comparación, y deberá procurarse que el muestreo y el promediado sean apropiados, para tener la seguridad de que los valores utilizados son representativos.

7.3.1.2 **Comparación con un pirheliómetro patrón**

Este método, descrito en ISO (1993), es similar al descrito anteriormente, con la excepción de que la señal de irradiancia celeste difusa se mide con el mismo piranómetro. El componente directo se elimina temporalmente del piranómetro poniendo a la sombra en su totalidad la cúpula exterior del instrumento, conforme se indica en la sección 7.3.1.1. El período de ocultamiento depende de la estabilidad del flujo de radiación y del tiempo de respuesta del piranómetro, y en particular del

intervalo de tiempo necesario para que la temperatura y la emisión en onda larga de la cúpula de vidrio alcancen el equilibrio; por lo general, un valor igual a 10 veces el producto de $1/e$ por la constante de tiempo de la pila termoeléctrica del piranómetro debería ser suficiente.

La diferencia entre la señal de salida representativa del piranómetro en sombra y la del que está al Sol se debe a la componente vertical de la irradiancia solar directa E medida por el pirheliómetro. Así:

$$E \cdot \sin h = (V_{\text{un}} - V_{\text{s}}) \cdot k \quad (7.5)$$

o bien:

$$k = (E \cdot \sin h) / (V_{\text{un}} - V_{\text{s}}) \quad (7.6)$$

donde E es la irradiancia solar directa representativa para un ángulo de incidencia normal medido por el pirheliómetro (en vatios por metro cuadrado); V_{un} es la señal de salida representativa del piranómetro (en microvoltios) en modo de irradiancia no sombreada (o global); V_{s} es la señal de salida representativa del piranómetro (en microvoltio) en modo de irradiancia sombreada (o celeste difusa); h es la elevación del Sol aparente; y k es el factor de calibración (en vatios por metro cuadrado por microvoltio), que es el valor inverso de la sensibilidad (en microvoltios por vatio y metro cuadrado).

Tanto el componente directo como el difuso variarán durante la comparación, y debe procurarse que el muestreo y el promediado sean apropiados, con el fin de que en el cálculo se utilicen los valores representativos de las salidas correspondientes al instrumento en sombra y al sol. A fin de reducir las incertidumbres vinculadas a las señales representativas, debería efectuarse una serie continua de ciclos con y sin sombra, con valores interpolados en el tiempo para reducir las variaciones temporales de la irradiancia celeste global y difusa. Puesto que se utiliza el mismo piranómetro en modo diferencial, y que la diferencia entre las señales de irradiancia nula para la irradiancia celeste global y difusa es despreciable, no es necesario tener en cuenta las irradiancias nulas en la ecuación 7.6.

7.3.1.3 **Calibración alternada utilizando un pirheliómetro**

Este método hace uso del mismo equipo instrumental que el descrito en la sección 7.3.1.1, aunque solo se necesita el pirheliómetro para proporcionar datos de irradiancia calibrados (E) y se supondrá que los dos piranómetros están sin calibrar (Forgan, 1996). El método permite calibrar ambos piranómetros resolviendo dos ecuaciones simultáneas análogas a la ecuación 7.3. Se empieza reuniendo datos de la señal de irradiancia con el pirheliómetro y midiendo con un piranómetro (piranómetro A) las señales de irradiancia global (V_{gA}), mientras que el otro piranómetro (piranómetro B) mide las señales de irradiancia difusa (V_{dB}) para una horquilla de ángulos cenitales solares con cielo despejado. Una vez reunidos los datos suficientes con la configuración inicial, se intercambian los piranómetros de modo que el piranómetro A, que inicialmente medía la señal de irradiancia global, mida esta vez la señal de irradiancia difusa (V_{dA}), y viceversa con respecto al piranómetro B. Se presupone que para cada piranómetro los coeficientes de calibración difuso (k_{d}) y global (k_{g}) son iguales, y que el coeficiente de calibración del piranómetro A viene dado por:

$$k_{\text{A}} = k_{\text{gA}} = k_{\text{dA}} \quad (7.7)$$

adoptando el mismo supuesto con respecto a los coeficientes del piranómetro B. Para un instante t_0 del período inicial, una versión modificada de la ecuación 7.3 será:

$$E(t_0) \sin(h(t_0)) = k_{\text{A}} V_{\text{gA}}(t_0) - k_{\text{B}} V_{\text{dB}}(t_0) \quad (7.8)$$

Para el instante t_1 del período alterno, una vez intercambiados los piranómetros:

$$E(t_1) \sin(h(t_1)) = k_{\text{B}} V_{\text{gB}}(t_1) - k_{\text{A}} V_{\text{dA}}(t_1) \quad (7.9)$$

Dado que las únicas incógnitas en las ecuaciones 7.8 y 7.9 son k_{A} y k_{B} , es posible resolver ambas para dos instantes cualesquiera (t_0 , t_1). Los pares de dispositivos, que abarcan un intervalo de elevaciones solares, proporcionan una indicación de la respuesta direccional. La información

de calibración resultante obtenida de ambos piranómetros será representativa de los coeficientes de calibración global, y reportará prácticamente la misma información que el método descrito en la sección 7.3.1.1, aunque sin necesidad de un piranómetro calibrado.

Al igual que con el método descrito en la sección 7.3.1.1, si se desea obtener los coeficientes con una incertidumbre mínima, este método alternante obliga a ajustar las señales de irradiancia de los piranómetros, con el fin de eliminar todo desplazamiento de la irradiancia nula estimada. Con el fin de reducir las incertidumbres resultantes de una variación de la respuesta direccional, se recomienda utilizar un par de piranómetros del mismo modelo, y efectuar los pares de observaciones cuando $\sin h(t_0) \sim \sin h(t_1)$.

El método es ideal en situaciones de vigilancia automática *in situ*, en que los tres componentes de la irradiancia solar (directa, difusa y global) son controlados de manera continua. La experiencia parece indicar que los datos necesarios para aplicar este método pueden ser obtenidos en tan solo un día, intercambiando los instrumentos en torno al mediodía solar. Sin embargo, sobre el terreno podrán prorrogarse los períodos y los días antes y después del cambio de instrumentos para la selección de los datos, siempre y cuando la calibración del pirheliómetro sea válida.

7.3.1.4 **Comparación con un piranómetro de referencia**

Como se describe en ISO (1992), este método consiste en utilizar simultáneamente dos piranómetros instalados horizontalmente, uno junto al otro, en el exterior y durante un período de tiempo suficiente para obtener unos resultados representativos. Si los instrumentos son del mismo modelo y tienen una misma configuración de control, uno o dos días deberían ser suficientes. Cuanto más acentuada sea la diferencia entre los tipos de configuración de los piranómetros, mayor deberá ser el período de comparación. Sin embargo, podría sustituirse un período largo por varios períodos cortos que abarquen condiciones típicas (cielo despejado, nuboso, cubierto, lluvia, nieve, etc.). El factor de calibración del instrumento se obtiene inmediatamente, pero en el caso de que los modelos de piranómetro sean diferentes, la incertidumbre resultante reflejará más probablemente la diferencia de modelos que la estabilidad del instrumento que se desea calibrar. La selección de los datos debería efectuarse cuando las irradiancias sean relativamente elevadas y varíen lentamente. Para calcular $k = R \cdot k_r$, podrá utilizarse cada uno de los valores medios del cociente R entre la respuesta del instrumento de prueba y la del instrumento de referencia, siendo k_r el factor de calibración de la referencia y k el factor de calibración que se desea obtener. Durante un período de muestreo, suponiendo que el tiempo transcurrido entre mediciones sea inferior a $1/e$ veces la constante de tiempo de los piranómetros, la recopilación de datos podrá tener lugar en condiciones de irradiancia fluctuantes.

La temperatura media de los instrumentos o la temperatura ambiente deberían registrarse durante todo el tiempo que dure la calibración en el exterior, para tener en cuenta los efectos de la temperatura.

7.3.1.5 **Comparación en laboratorio**

Para obtener la irradiancia directa o difusa existen dos métodos basados en la utilización de fuentes de luz artificial en laboratorio. En ambos casos, tanto el piranómetro de prueba como el piranómetro patrón de referencia están expuestos a las mismas condiciones.

Uno de los métodos consiste en exponer los piranómetros a una lámpara de filamento de tungsteno estabilizada, instalada en el extremo de un banco óptico. Para esta comparación es apropiado utilizar una lámpara halógena de 0,5 a 1,0 kW montada en una caja refrigerada por agua y con ventilación forzada, cuya emisión se limita al espectro solar por medio de una ventana de cuarzo. Es posible utilizar este tipo de lámpara siempre que el patrón y el instrumento que se desea calibrar tengan la misma respuesta espectral. Para las calibraciones en general debería utilizarse una lámpara de xenón a alta presión con filtros que reproduzcan lo mejor posible el espectro solar. Al calibrar los piranómetros de esta manera, los instrumentos deberían protegerse de los efectos de la reflexión con pantallas negras. El procedimiento habitual consiste

en instalar el instrumento de referencia y medir el flujo radiante. Se retira luego el instrumento de referencia y se repite la medición utilizando el instrumento de prueba. Posteriormente, se vuelve a colocar el instrumento de referencia y se realiza otra prueba. Alternando repetidamente este procedimiento debería obtenerse una serie de datos de medición con un buen nivel de precisión (de aproximadamente un 0,5%).

El otro método consiste en utilizar un sistema lumínico de integración, como una esfera o una semiesfera iluminada por lámparas de tungsteno, y con la superficie interna de la esfera recubierta de pintura blanca difusa altamente reflectora. La ventaja estriba en la exposición simultánea del piranómetro de referencia y del instrumento que se desea calibrar. Como la esfera o la semiesfera simulan un cielo de radiancia aproximadamente uniforme, predominan los errores angulares del instrumento a 45°. Puesto que el error cosenoidal suele ser bajo para esos ángulos, la repetibilidad de las mediciones con una esfera de integración suele estar situada en torno al 0,5%. Por lo que se refiere a la fuente utilizada para iluminar la esfera, se aplican las mismas consideraciones que para el primer método.

7.3.1.6 **Comprobaciones de rutina de los factores de calibración**

Para comprobar la constancia de la calibración de un piranómetro existen varios métodos, en función del equipo disponible en cada estación. Debe aprovecharse toda oportunidad de comprobar el buen funcionamiento de los piranómetros sobre el terreno.

En las estaciones de campo en que se disponga de patrones adecuadamente conservados (pirheliómetros o piranómetros), podrán utilizarse los procedimientos de calibración básicos anteriormente descritos. Cuando no se disponga de patrones podrán utilizarse otras técnicas. Si se registra simultáneamente la radiación solar directa, pueden cotejarse ambos registros utilizando el método de calibración directa, como se explica en la sección 7.3.1.2. Se trata de una comprobación sencilla que debería efectuarse con frecuencia.

Cuando haya registros simultáneos de las radiaciones celestes global y difusa, ambos deberían cotejarse frecuentemente. En períodos de nubosidad total, las radiaciones celestes global y difusa deberían ser idénticas, de modo que podrán utilizarse esos períodos para controlar la radiación celeste difusa mediante un disco pantalla. Cuando se utilicen bandas de sombra, se recomienda retirar la banda, de modo que el piranómetro de luz celeste difusa mida la radiación global y sus datos puedan compararse con los datos simultáneos obtenidos del piranómetro global.

El registro podrá verificarse con ayuda de un patrón de trabajo itinerante enviado por la estación central de la red o por una estación cercana. Por último, si las calibraciones no se efectúan en el emplazamiento, será posible intercambiar el piranómetro con otro similar enviado por las instalaciones de calibración. Debería aplicarse uno de estos dos métodos por lo menos una vez al año. Los piranómetros utilizados para medir la radiación solar reflejada se deberían colocar en posición vertical y verificar mediante los métodos anteriormente descritos.

7.3.2 **Funcionamiento de los piranómetros**

Para alcanzar los niveles de incertidumbre deseables será necesario dedicar considerable atención a los detalles. Deberían evaluarse algunas propiedades de los piranómetros y de los sistemas de medición, con el fin de estimar la incertidumbre de los datos resultantes. Por ejemplo, se ha puesto de relieve que, para un registro continuo de radiación global y en ausencia de mediciones auxiliares de radiación celeste difusa y de radiación directa, una incertidumbre inferior al 5% en los totales diarios representará el resultado de un trabajo bien hecho y meticuloso. Análogamente, cuando se utilice un protocolo similar al propuesto en OMM (1998), las incertidumbres de los totales diarios podrán llegar a ser del orden del 2%.

7.3.2.1 ***Nivelación del sensor***

Para realizar una medición exacta de la radiación global con un piranómetro es fundamental que el nivel de burbuja del instrumento indique cuándo el plano de la termopila se halla en posición horizontal. Las pruebas pueden realizarse en laboratorio sobre una mesa de nivelación óptica, utilizando el haz colimado de una lámpara cuyo ángulo de elevación sea de unos 20°. Los tornillos de nivelación del instrumento se ajustarán hasta que la respuesta sea lo más constante posible durante la rotación del sensor en sentido acimutal. Se reajustará a continuación el nivel de burbuja, en caso necesario, para señalar la posición horizontal del plano. Esta técnica se denomina nivelación radiométrica y debería coincidir con la nivelación física de la termopila. Sin embargo, ello no siempre es así si la superficie de la termopila no es de calidad uniforme.

7.3.2.2 ***Cambio de la sensibilidad debido a variaciones de la temperatura ambiente***

La sensibilidad de los instrumentos de termopila cambia en función de las variaciones de su temperatura interna. Algunos instrumentos están equipados con circuitos integrados compensados térmicamente, con el propósito de mantener una respuesta constante para un amplio intervalo de temperaturas. El coeficiente térmico de la sensibilidad se puede medir en una cámara de temperatura controlada. Para ello, se va variando la temperatura de la cámara a lo largo de un rango de valores apropiado, a intervalos de 10 °C, manteniéndola constante en cada intervalo hasta que se establezca la respuesta de los piranómetros. Seguidamente, se ajustan los datos mediante una curva de suavizado. Si la diferencia porcentual máxima por efecto de la respuesta de temperatura es igual o superior al 2% considerando todas las posibles condiciones ambientales, debería introducirse una corrección basada en el ajuste de los datos.

Si no se dispusiera de cámara de temperatura, podrá utilizarse el método de calibración con pirheliómetros (véanse las secciones 7.3.1.1, 7.3.1.2 o 7.3.1.3) a diferentes temperaturas ambiente. Convendría tener presente que no solo la temperatura puede modificar la sensibilidad, sino también, entre otros, la respuesta cosenoidal (o sea, el efecto de la elevación solar) y la no linealidad (o sea, las variaciones de la irradiancia solar).

7.3.2.3 ***Variación de la respuesta con la orientación***

El factor de calibración de un piranómetro puede diferir en gran medida cuando el instrumento se utiliza en una orientación distinta de aquella a la que fue calibrado. La comprobación de la inclinación de los piranómetros puede efectuarse en laboratorio, o con alguno de los métodos de calibración descritos en las secciones 7.3.1.1 o 7.3.1.2. Se recomienda calibrar el piranómetro en la misma orientación en la que se utilizará. No se recomienda corregir la inclinación de ladeo a menos que la respuesta del instrumento haya sido caracterizada para una diversidad de condiciones.

7.3.2.4 ***Variación de la respuesta en función del ángulo de incidencia***

La dependencia de la respuesta direccional del sensor respecto de la elevación y del acimut solares recibe por lo general el nombre de respuesta cosenoidal de Lambert y respuesta acimutal, respectivamente. En teoría, la respuesta en irradiancia solar del receptor debería ser proporcional al coseno del ángulo cenital del haz solar, y constante para todos los ángulos acimutales. En el caso de los piranómetros, se recomienda especificar el error cosenoidal (o la diferencia porcentual respecto de la respuesta cosenoidal teórica) para al menos dos ángulos de elevación solar, preferiblemente 30° y 10°. En el cuadro 7.4 se indica una mejor manera de determinar la respuesta direccional, así como los posibles errores para todos los ángulos.

Para determinar la variación de la respuesta en función del ángulo de incidencia deberían utilizarse solo lámparas como fuente, ya que la distribución espectral del Sol varía con el ángulo de elevación. Si se utiliza el Sol como fuente, podría observarse una variación aparente de la respuesta con el ángulo de elevación solar que, en realidad, se trataría de una variación debida a la respuesta espectral no homogénea.

7.3.2.5 ***Incertidumbres en los totales horarios y diarios***

Como la mayoría de los piranómetros de una red se utilizan para determinar exposiciones horarias o diarias (o expresadas como irradiancias medias), resulta evidente que las incertidumbres de esos valores revisten importancia.

En el cuadro 7.4 se enumeran las desviaciones máximas esperadas respecto del valor verdadero, excluyendo los errores de calibración. Los tipos de piranómetros de la tercera columna del cuadro 7.4 (o sea, los de calidad moderada) no son apropiados para calcular los totales horarios o diarios, aunque podrían serlo para los totales mensuales y anuales.

7.3.3 **Instalación y mantenimiento de los piranómetros**

El emplazamiento elegido para colocar un piranómetro debería estar libre de obstáculos por encima del plano del sensor y, al mismo tiempo, ser fácilmente accesible. Si no es posible reunir esas condiciones, el emplazamiento debería estar lo más libre posible de obstáculos que pudieran arrojar sombra en algún momento del año. El piranómetro no debería estar situado cerca de paredes de color claro o de otros objetos que pudieran reflejar sobre él la energía solar; tampoco se debería exponer a fuentes de radiación artificial.

En la mayoría de los lugares, una azotea plana constituye un buen lugar para instalar el soporte del radiómetro. Si ello no fuera posible, se debería utilizar un soporte instalado a cierta distancia de los edificios o de otros obstáculos. Cuando resulte posible, el emplazamiento debería estar libre de obstáculos cuya elevación sobrepase los 5° , particularmente en la horquilla de valores acimutales del amanecer y del ocaso a lo largo del año. Los demás obstáculos no deberían reducir el ángulo solar total en más de $0,5$ sr. En los casos en que ello no sea posible, deberían incluirse en la descripción de la estación datos pormenorizados sobre el horizonte y el ángulo sólido subtendido.

Antes de empezar a instalar un piranómetro debería efectuarse un reconocimiento del lugar cada vez que se modifique la ubicación de aquel o se produzca algún cambio apreciable en relación con los obstáculos de los alrededores. Un excelente método para efectuar este estudio consiste en utilizar una cámara topográfica que expone sobre el negativo un entramado de líneas del acimut y la elevación. Debería tomarse una serie de instantáneas para representar en su totalidad la distribución angular (360°), tanto de altura como de acimut, de los obstáculos que sobrepasen el plano de la superficie receptora alrededor del piranómetro. Si no se dispone de una cámara de este tipo, se pueden representar en un mapa los objetos que arrojan sombra, utilizando un teodolito o una combinación de brújula y clinómetro.

En la descripción de la estación debería figurar la altitud del piranómetro sobre el nivel del mar (es decir, la altitud de la estación más la altura del piranómetro sobre el suelo), así como su longitud y latitud geográficas. Es también muy útil disponer de un plano del lugar, dibujado a escala, en el que figure la posición del registrador, del piranómetro y de todos los cables de conexión.

La posibilidad de acceder a los instrumentos para inspeccionarlos con frecuencia es probablemente la consideración más importante a la hora de seleccionar un emplazamiento. Se recomienda encarecidamente inspeccionar los piranómetros y los registradores como mínimo una vez al día y, preferiblemente, con mayor frecuencia.

Las consideraciones anteriores son igualmente válidas para la exposición de los piranómetros instalados en buques, torres y boyas. La instalación de los piranómetros en esas plataformas es muy difícil y, en ocasiones, peligrosa. Es raro que, en esas condiciones, el funcionamiento del instrumento no esté afectado por un obstáculo importante (por ejemplo, una torre). Debido al movimiento de la plataforma, los piranómetros están sometidos a vibraciones y al oleaje. Por ello, deberían adoptarse precauciones para asegurarse de que el plano del sensor se mantiene horizontal y de que las vibraciones intensas se reducen al mínimo. Esto exige, por lo general, que el piranómetro se monte sobre unas suspensiones cardán especialmente diseñadas.

7.3.3.1 **Corrección para obstáculos en un horizonte libre**

Si existe alguna obstrucción al haz solar directo (fácilmente detectada en días despejados), debería corregirse el registro, siempre que sea posible, con el fin de reducir la incertidumbre.

Solo cuando haya registros independientes de las radiaciones celestes global y difusa será posible corregir el componente celeste difuso del registro de los efectos de los obstáculos. El procedimiento exige en primer lugar que se corrija el registro de radiación difusa y, luego, que se ajuste el registro de la radiación global. No debería calcularse la fracción de cielo oscurecida, sino la fracción de la irradiancia proveniente de la parte del cielo que ha sido oscurecida. Dado que la radiación celeste difusa de menos de 5° de elevación contribuye en menos de un 1% a la radiación celeste global, su magnitud podrá despreciarse. Habría que prestar atención a los objetos que subtendan ángulos iguales o superiores a 10°, así como a los que intercepten el haz solar en algún momento. Además, debe recordarse que los objetos de color claro pueden reflejar la radiación solar sobre el receptor.

Siendo rigurosos, la varianza de la radiancia celeste en el conjunto del hemisferio debería tenerse en cuenta cuando se determinen las correcciones para compensar la pérdida de radiación celeste difusa debida a los obstáculos. Sin embargo, el único procedimiento práctico consiste en suponer que la radiancia es isotrópica, es decir, idéntica en cualquier parte del cielo. Para determinar la reducción relativa de la irradiancia celeste difusa asociada a objetos obstaculizadores de tamaño finito podrá utilizarse la expresión siguiente:

$$\Delta E_{\text{celeste}} = \pi^{-1} \int_{\phi} \int_{\theta} \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (7.10)$$

donde θ es el ángulo de elevación; ϕ es el ángulo acimutal, Θ es la amplitud angular de elevación del objeto, y φ es la amplitud acimutal del objeto.

Esta expresión es válida solo para obstáculos que tienen una superficie oscura y están dispuestos de cara al piranómetro. Para otros objetos, la corrección deberá multiplicarse por un factor de reducción que dependerá de la reflectividad del objeto. El resplandor de la nieve cuando el Sol está bajo podría incluso cambiar el signo de la corrección.

7.3.3.2 **Instalación de piranómetros para medir la radiación global**

El piranómetro debería estar sujeto firmemente al soporte que se utilice, valiéndose para ello de los orificios practicados en las patas del trípode o en la placa de sustentación. Se deberían adoptar siempre las precauciones necesarias para evitar que el instrumento esté sometido a golpes o vibraciones mecánicas durante la instalación. Esta operación ha de efectuarse como se indica a continuación. En primer lugar, debería orientarse el piranómetro de manera que los cables que emergen o el conector estén situados al norte de la superficie receptora en el hemisferio norte (y al sur de la misma en el hemisferio austral). Con esto se reducirá al mínimo el calentamiento de las conexiones eléctricas por el Sol. Los instrumentos con termopilas Moll-Gorcynski deberían orientarse de modo que la línea de los termopares (el lado mayor de la termopila rectangular) apunte en dirección este-oeste. Según el tipo de instrumento, esta exigencia resulta a veces incompatible con la primera, pero debería ser prioritaria, ya que permitirá sombrear el conector en caso necesario. Si hay torres en las inmediaciones, el instrumento debería situarse en el lado de la torre que mira al ecuador, y lo más lejos posible de ella.

No debería permitirse que la radiación reflejada del suelo o de la base irradie el cuerpo del instrumento desde abajo. Puede utilizarse un dispositivo cilíndrico que proporcione sombra, pero hay que tener cuidado de no perturbar la ventilación natural, que deberá ser suficiente para mantener el cuerpo del instrumento a la temperatura ambiente.

A continuación debería asegurarse ligeramente el piranómetro con tornillos o clavijas de sujeción, y nivelarlo con ayuda de los tornillos niveladores y del nivel de burbuja proporcionados con el instrumento. Después habría que apretar los tornillos de sujeción, procurando no alterar el montaje para que, conforme a las indicaciones del nivel de burbuja, la superficie receptora se mantenga en posición horizontal.

El soporte o plataforma debería ser suficientemente rígido para que el instrumento esté protegido de los golpes fuertes y para que no se altere la posición horizontal de la superficie receptora, especialmente en períodos de viento fuerte y de energía solar intensa.

El cable de conexión del piranómetro con su registrador debería disponer de un conductor doble y ser impermeable. El cable tendría que estar fijado firmemente al soporte con el fin de reducir al mínimo las roturas o las desconexiones intermitentes en caso de viento. Siempre que sea posible, el cable debería estar adecuadamente soterrado y protegido bajo el suelo cuando el registrador esté situado a cierta distancia del instrumento. Se recomienda utilizar cables apantallados, conectando a tierra el piranómetro, el cable y el registrador con un conductor de baja resistencia. Al igual que en otros tipos de dispositivos termoeléctricos, conviene obtener una unión permanente cobre-cobre entre todas las conexiones antes de soldarlas. Todas las uniones expuestas deberán ser impermeables y estar protegidas de cualquier daño físico. Una vez identificada la polaridad del circuito, podrá conectarse la otra extremidad del cable al sistema de recopilación de datos, con arreglo a las instrucciones pertinentes.

7.3.3.3 **Instalación de piranómetros para medir la radiación celeste difusa**

Para medir o registrar por separado la radiación celeste difusa, el sensor se debe proteger de la radiación solar directa con una pantalla. Cuando se requieren registros continuos, el piranómetro se ensombrece generalmente o bien con un pequeño disco metálico que oculta el haz de luz solar con la ayuda de un seguidor solar, o bien con una banda que proporciona sombra y está montada sobre un eje polar.

El primer método implica la rotación de una varilla delgada sincronizada con el movimiento aparente del Sol. Si el seguimiento se efectúa mediante motores síncronos o almanaques solares, será esencial efectuar inspecciones frecuentes para garantizar un funcionamiento y un ajuste adecuados, ya que, de otra manera, los registros espurios son difíciles de detectar. El seguimiento solar mediante sistemas de búsqueda reducirá al mínimo la probabilidad de que ocurran esos problemas. El segundo método implica una presencia más frecuente del personal en el emplazamiento y la introducción de importantes correcciones en el registro para tener en cuenta la magnitud apreciable de la radiación celeste difusa interceptada por el dispositivo de sombra. Para corregir las bandas de sombra y mejorar la incertidumbre de la radiación celeste difusa obtenida en comparación con la que se obtendría utilizando un disco de seguimiento solar, será necesario partir de ciertos supuestos acerca de la distribución de la radiación celeste y de las dimensiones de las bandas. En el anexo 7.E se describe con detalle la construcción de un anillo de sombra y las correcciones que será necesario introducir.

Una fuente de error considerable en los datos de radiación celeste difusa es la señal de irradiancia nula. Con cielo despejado, la señal de irradiancia nula es el equivalente de 5 a 10 W m⁻², en función del modelo de piranómetro, pudiendo llegar hasta un 15% de la irradiancia celeste difusa. En la publicación *Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual* (OMM, 1998) se indican varios métodos que permiten minimizar la influencia de la señal de irradiancia nula.

La instalación de un piranómetro para medir la radiación celeste difusa es similar a la de un piranómetro que mida la radiación global. Sin embargo, se plantea la complicación de una montura ecuatorial o de un soporte de banda de sombra. La distancia a otro piranómetro cercano debería ser lo suficientemente grande para tener la seguridad de que el anillo de sombra o el disco pantalla no le quitará luz solar a este último piranómetro. Esta consideración reviste más importancia en latitudes altas, donde el ángulo solar puede llegar a ser muy bajo.

Dado que la radiación celeste difusa con cielo despejado puede ser inferior a la décima parte de la radiación global, debería tenerse muy presente la sensibilidad del sistema de registro.

7.3.3.4 **Instalación de piranómetros para medir la radiación reflejada**

La altura sobre la superficie debería estar comprendida entre 1 y 2 m. En verano, el suelo debería estar cubierto de hierba segada regularmente. En regiones donde nieva durante el invierno, sería preciso disponer de un mecanismo que ajuste la altura del piranómetro con el fin de mantener una separación constante entre la nieve y el instrumento. Aunque la montura se encuentra en el campo visual del instrumento, debería estar diseñada de modo que arroje un error inferior al 2% en la medición. Habría que proporcionar un acceso fácil al piranómetro a fin de nivelarlo sin necesidad de mover la superficie situada bajo él, especialmente si es de nieve.

7.3.3.5 **Mantenimiento de los piranómetros**

Los piranómetros de funcionamiento continuo deberían inspeccionarse como mínimo una vez al día, y posiblemente con mayor frecuencia, por ejemplo cuando se efectúen observaciones meteorológicas. Durante esas inspecciones, debería limpiarse y secarse la cúpula de vidrio del instrumento (teniendo cuidado para no alterar las mediciones de rutina durante el período diurno). Si se aprecia la presencia de nieve helada, hielo liso, escarcha o cencellada blanca, se deberían eliminar con mucho cuidado del depósito (al menos con carácter temporal), utilizando también con moderación un fluido anticongelante, y secar luego el vidrio. Una comprobación diaria debería permitir asegurarse de que el instrumento esté nivelado, de que no se haya formado condensación en el interior de la cúpula, y de que las superficies del detector se mantengan negras.

En ciertas redes, la cúpula expuesta del piranómetro se ventila continuamente por medio de un ventilador para evitar o reducir al mínimo los depósitos en épocas de frío, y para minimizar la diferencia de temperatura entre la cúpula y la caja. La diferencia de temperatura entre el aire del ventilador y el aire ambiente no debería superar 1 K aproximadamente. Si sobre la cúpula se forma un depósito de arena o de suciedad debido a la contaminación local, la limpieza debería efectuarse con mucha suavidad, preferiblemente después de haber soplado la mayor parte del material menos adherido o tras humedecerlo un poco, para evitar que se raye la superficie, ya que esta acción abrasiva puede alterar apreciablemente las propiedades originales de transmisión del material. Los desecantes deberían estar cargados de material activo (por lo general, un gel de sílice que cambia de color) en todo momento.

7.3.3.6 **Instalación y mantenimiento de piranómetros sobre plataformas especiales**

Deberían adoptarse medidas especiales siempre que se instalen equipos en plataformas tan diversas como buques, boyas, torres o aeronaves. Los radiómetros instalados a bordo de buques deberían montarse sobre suspensiones cardán para compensar el movimiento de la plataforma.

Si se emplea una torre para la instalación exclusiva del equipo radiométrico, esta podrá cubrirse con una plataforma rígida, sobre la que se montarán los sensores. Los obstáculos con relación al horizonte deberían quedar del lado de la plataforma más alejado del ecuador, y los brazos de sujeción de los albedómetros deberían extenderse hacia el ecuador.

En buques, boyas y torres los radiómetros deberían instalarse a la mayor altura posible sobre la superficie del agua con el fin de minimizar los efectos de las salpicaduras de agua.

Las mediciones de la radiación desde aeronaves se han realizado con buenos resultados durante años. Sin embargo, deberá seleccionarse con cuidado el piranómetro correcto y la exposición adecuada.

Habrà de prestarse especial atención al proceso de instalación, especialmente cuando los sistemas sean de difícil acceso, a fin de asegurar la fiabilidad de las observaciones. Por ello, convendría aplicar un cierto grado de redundancia instalando sistemas de medición duplicados en determinados lugares críticos.

7.4 MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN TOTAL Y DE ONDA LARGA

La medición de la radiación total abarca tanto las longitudes de onda cortas de origen solar (entre 300 y 3 000 nm) como las longitudes de onda más largas de origen terrestre y atmosférico (entre 3 000 y 100 000 nm). Los instrumentos utilizados para este fin son los pirradiómetros, que sirven para medir las componentes ascendente o descendente del flujo de la radiación y que, utilizados en parejas, permiten medir las diferencias entre ambas componentes, que representan la radiación neta. Los pirradiómetros de un solo sensor, con una superficie activa en cada cara, se utilizan también para medir la radiación neta. Los sensores de los pirradiómetros deben tener una sensibilidad constante en todo el rango de longitudes de onda comprendidas entre 300 y 100 000 nm.

La radiación de onda larga puede medirse directamente, utilizando un pirgeómetro (también llamado pirogeómetro), o indirectamente restando el valor medido de la radiación global del valor medido de la radiación total. La mayoría de los pirgeómetros eliminan las longitudes de onda cortas mediante filtros que presentan una transparencia aproximadamente constante para longitudes de onda largas, y son casi opacos para longitudes de onda más cortas (de 300 a 3 000 nm). Ciertos pirgeómetros, con o sin filtro, que no eliminan la radiación por debajo de los 3 000 nm, solo pueden utilizarse durante la noche.

El flujo de onda larga L^- medido por un pirgeómetro o por un pirradiómetro presenta dos componentes: el flujo de cuerpo negro debido a la temperatura superficial del elemento sensor y el flujo radiativo neto medido por el receptor:

$$L^- = L^* + \sigma T_s^4 \quad (7.11)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,670\,4 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$); T_s es la temperatura superficial subyacente (en kelvines); L^- es la irradiancia medida mediante un pirgeómetro de referencia o calculada a partir de la temperatura de la cavidad de cuerpo negro situada en la parte superior del receptor (en vatios por metro cuadrado); y L^* es el flujo radiativo neto en el receptor (en vatios por metro cuadrado por microvoltio). La medición del componente de onda corta mediante un pirradiómetro se ajusta a lo descrito en la sección 7.3.

7.4.1 Instrumentos para medir la radiación de onda larga

Durante el último decenio se ha avanzado considerablemente en la medición de la radiación terrestre mediante pirgeómetros, y particularmente con la aparición de los pirgeómetros de cúpula de silicio, que son, en consecuencia, los que con mayor exactitud miden la radiación terrestre. Pese a todo, la medición de la radiación terrestre es todavía más difícil y conceptualmente menos clara que la de la irradiancia solar. En el cuadro 7.5 se encontrará un análisis de las fuentes de error.

Los pirgeómetros han evolucionado en dos direcciones. En la primera variante, la superficie receptora de la termopila está cubierta por una cúpula hemisférica en cuyo interior se deposita un filtro de interferencia. En la segunda variante, la termopila está cubierta con una lámina plana sobre la que se deposita el filtro de interferencia. En ambos casos, la superficie sobre la que se deposita el filtro de interferencia es de silicio. La primera variante proporciona un campo visual hemisférico completo, mientras que la segunda tiene, por lo general, un campo visual de 150° y la modelización del flujo hemisférico se realiza según las instrucciones del fabricante. La razón argüida a favor del último método es que las imprecisiones son mayores cuando los filtros están dentro de la cúpula hemisférica que al modelizar los flujos con menos de 30° de elevación. Ambos tipos de instrumentos funcionan según el principio de que la señal de salida medida representa la diferencia entre la irradiancia emitida por la fuente y la temperatura de radiación del instrumento como un cuerpo negro. Por lo general, la radiación terrestre obtenida mediante un pirgeómetro puede aproximarse modificando la ecuación 7.11:

$$L^- = L^* + k_2 \sigma T_s^4 + k_3 \sigma (T_d^4 - T_s^4) \quad (7.12)$$

donde k_2 tiene en cuenta las propiedades de emisión de la termopila y la incertidumbre de la medición de la temperatura de la superficie fría de la termopila; k_3 es la sensibilidad de la cúpula del instrumento a la irradiancia infrarroja ($\mu\text{V}/(\text{W m}^{-2})$), y T_d es la temperatura del detector (K).

El flujo radiactivo neto medido por el receptor, L^* , se define de la siguiente forma:

$$L^* = U/C \left(1 + k_1 \sigma T_s^4 \right) \quad (7.13)$$

donde C es la sensibilidad del receptor ($\mu\text{V}/(\text{W m}^{-2})$), y k_1 es un coeficiente de temperatura residual del receptor. Aunque los pirgeómetros con los últimos adelantos de la técnica están equipados con circuitos integrados compensados térmicamente en el receptor para que k_1 sea muy próximo a cero (como se describe en la sección 7.3.2.2), se recomienda determinar k_1 mediante una calibración en laboratorio como se describe en la sección 7.4.3.

En varias comparaciones realizadas recientemente se han utilizado instrumentos de fabricación similar para una variedad de configuraciones de medición. Estos estudios han puesto de manifiesto que, tras efectuar una cuidadosa calibración, los flujos medidos por la noche concuerdan dentro de un margen de $\pm 1 \text{ W m}^{-2}$, pero en períodos de radiación solar elevada la diferencia entre los instrumentos al sol puede ser considerable. La razón de esas diferencias estriba en que la cúpula de silicio y el correspondiente filtro de interferencia pueden transmitir radiación solar y no son reflectores perfectos de la energía solar. Así pues, el sensor puede recibir una contribución de la radiación solar, calentando en consecuencia la cúpula. Esta discrepancia puede reducirse hasta $\pm 2 \text{ W m}^{-2}$ sombreando el instrumento del mismo modo que para las mediciones de la radiación solar difusa, ventilándolo como recomienda la ISO (1990a), y midiendo la temperatura de la cúpula y de la caja del instrumento. Basándose en los resultados de estas y otras comparaciones, deberían seguirse las recomendaciones siguientes para efectuar la medición de la radiación de onda larga:

- a) Cuando se utilicen pirgeómetros con circuito de batería integrado para emular las condiciones de cuerpo negro del instrumento se procurará mantener la batería en perfectas condiciones, pues el más mínimo cambio de tensión en esta incrementará apreciablemente el error de medición. Siempre que fuera posible, debería sustituirse la batería del instrumento y medir las temperaturas de la caja y de la cúpula con arreglo a las instrucciones del fabricante.
- b) Cuando sea posible, deberían medirse las temperaturas tanto de la caja como de la cúpula del instrumento, y utilizarse esos valores para determinar la irradiancia.
- c) El instrumento debería estar ventilado.
- d) Para obtener los mejores resultados debería colocarse el instrumento en sombra frente a la irradiancia solar directa mediante un disco pequeño de seguimiento solar, del mismo modo que para medir la radiación celeste difusa.

Estos instrumentos deberían calibrarse en los centros nacionales o regionales de calibración utilizando pirgeómetros de referencia que puedan ser trazables respecto al Grupo Mundial de Patrones de Radiación Infrarroja de Pirgeómetros del Centro radiométrico mundial de Davos.

7.4.2 Instrumentos para medir la radiación total

Uno de los problemas planteados por los instrumentos que miden la radiación total radica en que no existen absorbentes con una sensibilidad absolutamente constante para todas las longitudes de onda de interés. También resulta difícil encontrar unos filtros adecuados con una transmisión constante entre 300 y 100 000 nm. Por ello, se recomienda medir la radiación total realizando mediciones separadas simultáneas de la radiación de onda corta y de onda larga con un piranómetro y un pirgeómetro, respectivamente.

Para utilizar sensores térmicamente sensibles es necesario conocer a fondo el balance térmico del sensor. De lo contrario, será necesario reducir prácticamente a cero las pérdidas de calor del sensor debidas a la convección protegiéndolo de la influencia directa del viento. Las dificultades

técnicas que conllevan tales pérdidas de calor explican, en gran medida, el que la determinación de los flujos radiativos netos sea menos precisa que la de los flujos de radiación global. De hecho, diversos laboratorios han desarrollado sus propios pirradiómetros basándose en unos principios técnicos que, según el parecer de sus expertos, son los más eficaces para reducir la transferencia de calor convectivo en el sensor. En los últimos decenios se han construido pirradiómetros que, aun sin ser perfectos, responden a unos principios de medición satisfactorios. Así pues, existe una gran variedad de pirradiómetros, que utilizan diferentes métodos para eliminar o incorporar los efectos del viento, a saber:

- a) ausencia de protección, en cuyo caso se utilizan fórmulas empíricas para corregir los efectos del viento;
- b) determinación de los efectos del viento mediante calefacción eléctrica;
- c) estabilización de los efectos del viento por medio de ventilación artificial;
- d) eliminación de los efectos del viento protegiendo el sensor.

El componente de onda larga de un pirradiómetro se describe en la ecuación 7.11.

En el cuadro 7.5 figuran las fuentes de error que pueden afectar las mediciones mediante pirradiómetros, así como los métodos propuestos para determinar esos errores.

Cuadro 7.5. Fuentes de error en las mediciones pirradiométricas

<i>Efectos que influyen en las mediciones</i>	<i>Tipo de influencia en los pirradiómetros</i>		<i>Efectos en la exactitud de las mediciones</i>	<i>Métodos para determinar esas características</i>
	<i>Con cúpula</i>	<i>Sin cúpula</i>		
Propiedades de la pantalla	Características espectrales de transmisión	Ninguna	a) Variaciones espectrales en el coeficiente de calibración b) Efecto de la radiación incidente reducida en el detector debido a la difusión de radiación de longitud de onda corta en las cúpulas (según el espesor) c) Envejecimiento y otras variaciones en los sensores	a) Determinación espectral de la extinción en la pantalla b) Medición del efecto de radiación celeste difusa o medición del efecto con ángulo de incidencia variable c) Análisis espectral: comparación con una nueva cúpula; determinación de la extinción de la cúpula
Efectos de convección	Cambios debidos a intercambios de energía no radiativa entre el sensor y el entorno de la cúpula (resistencia térmica)	Cambios por intercambios de energía no radiativa entre el sensor y el aire (variación del coeficiente de intercambio superficial)	Cambios incontrolados debidos a ráfagas de viento, importantes para calcular la divergencia del flujo radiativo en la capa inferior de la atmósfera	Estudio del comportamiento dinámico del instrumento en función de la temperatura y de la velocidad en un túnel de viento

<i>Efectos que influyen en las mediciones</i>	<i>Tipo de influencia en los pirradiómetros</i>		<i>Efectos en la exactitud de las mediciones</i>	<i>Métodos para determinar esas características</i>
	<i>Con cúpula</i>	<i>Sin cúpula</i>		
Efectos de hidrometeoros (lluvia, nieve, niebla, rocío, escarcha) y del polvo	Variación de la transmisión espectral más el intercambio de calor no radiativo por conducción y cambio	Variación de las características espectrales del sensor y de la disipación del calor por evaporación	Variaciones debidas a cambios de las características espectrales del sensor y a transferencias de energía no radiativas	Estudio de la influencia de la ventilación forzada sobre estos efectos
Propiedades de la superficie del sensor (emisividad)	Depende de la absorción espectral de la sustancia del sensor	absorción espectral de ennegrecimiento	Cambios en el coeficiente de calibración: a) en función de la respuesta espectral b) en función de la intensidad y el acimut de la radiación incidente c) en función de los efectos de la temperatura	a) Análisis espectrofotométrico de la calibración de las superficies absorbentes b) Medición de la variabilidad de la sensibilidad del sensor con el ángulo de incidencia
Efectos de la temperatura	El sensor no presenta un comportamiento lineal en función de la temperatura		Se necesita un coeficiente de temperatura	Estudio de la influencia de la ventilación forzada sobre estos efectos
Efectos de asimetría	a) Diferencias entre las capacidades y la resistencia térmicas de los sensores dispuestos hacia arriba y hacia abajo b) Diferencias en la ventilación de los sensores dispuestos hacia arriba y hacia abajo c) Control y regulación de la nivelación del sensor		a) Influencia sobre la constante de tiempo del instrumento b) Error en la determinación de los factores de calibración para los dos sensores	a) Control de la capacidad térmica de las dos superficies del sensor b) Control de la constante de tiempo en un estrecho intervalo de temperatura

Resulta difícil establecer la incertidumbre que se puede obtener en la práctica. Las comparaciones *in situ* efectuadas en diferentes emplazamientos y entre diferentes modelos de pirradiómetros arrojan unos resultados que difieren entre un 5% y un 10% en las condiciones más idóneas. Para mejorar esos resultados, la comparación *in situ* debería ir precedida de un estudio exhaustivo en laboratorio, con el fin de determinar por separado los diferentes efectos.

El mayor grado de exactitud se alcanza obteniendo el valor de la radiación total mediante una medición por separado de los componentes de onda corta y de onda larga, por lo que este método se considera más recomendable que la medición con pirradiómetros. Los métodos descritos en las secciones 7.2 y 7.3 permiten medir la radiación de onda corta, mientras que los pirgeómetros permiten medir la radiación de onda larga.

En el cuadro 7.6 se enumeran las características de diversos pirradiómetros con distintos niveles de rendimiento, junto con las incertidumbres que cabrá esperar en las mediciones obtenidas utilizando esos instrumentos.

Cuadro 7.6. Características de los pirradiómetros operativos

Características	Calidad alta ^a	Calidad buena ^b	Calidad moderada ^c
Resolución ($W m^{-2}$)	1	5	10
Estabilidad (variación anual, porcentaje de totalidad de escala)	2%	5%	10%
Error de respuesta cosenoidal a 10° de elevación	3%	7%	15%
Error acimutal a 10° de elevación (adicional al error cosenoidal) (desviación de la media)	3%	5%	10%
Dependencia de la temperatura (-20 °C a 40 °C) (desviación de la media)	1%	2%	5%
No linealidad (desviación de la media)	0,5%	2%	5%
Variación de la sensibilidad espectral integrada sobre intervalos de 200 nm desde 300 hasta 75 000 nm	2%	5%	10%

Notas:

- a Instrumentos casi al nivel de los últimos adelantos de la técnica; el mantenimiento solo puede realizarse en estaciones con instalaciones y personal especializados.
- b Puede utilizarse en operaciones de red.
- c Adaptado para redes de bajo costo en donde se acepta un rendimiento bajo.

7.4.3 Calibración de los pirgeómetros

Los pirradiómetros y los pirradiómetros diferenciales (para medir la radiación total neta) se pueden calibrar para la radiación de onda corta con los mismos métodos empleados para los piranómetros (véase la sección 7.3.1), utilizando el Sol y el cielo como fuente. En el caso de los pirradiómetros de radiación total neta de un solo sensor, la cara orientada hacia abajo se debe cubrir con una cavidad de temperatura conocida y constante.

La calibración de los radiómetros de referencia para la radiación de onda larga se realiza mejor en un laboratorio con cavidades de cuerpo negro, aunque para las mediciones de red se prefiere la comparación de instrumentos de referencia durante períodos nocturnos. En el caso de la calibración del sensor, el flujo descendente L^- se mide por separado utilizando un pirgeómetro o una cavidad de cuerpo negro. En tales casos, la señal V del flujo radiativo neto recibido por el instrumento (con arreglo a la ecuación 7.11) vendrá dada por:

$$V = L^* \cdot K \text{ o bien } K = V/L^* \quad (7.14)$$

donde V es la señal de salida del instrumento (en microvoltios); y K es su sensibilidad (en microvoltios por vatio y metro cuadrado).

Debería comprobarse periódicamente *in situ* la sensibilidad de los instrumentos seleccionando cuidadosamente las condiciones ambientales y utilizando flujos lentamente variables. Sería preciso comprobar también periódicamente los pirgeómetros para asegurarse de que la transmisión de la radiación de onda corta no ha variado.

Es necesario comprobar periódicamente la simetría de los pirradiómetros de radiación total neta. Para ello se invertirá *in situ* el instrumento, o el par de instrumentos, y se anotará cualquier diferencia en la señal de salida. Si las diferencias entre las dos direcciones son superiores al 2% de la escala completa previsible será necesario recalibrar el instrumento, pues eso significa que las velocidades de ventilación o los factores de absorción han alcanzado valores considerablemente diferentes para los dos sensores. Debería efectuarse igualmente este tipo de pruebas durante la calibración o la instalación.

7.4.4 Instalación de pirradiómetros y de pirgeómetros

Los pirradiómetros y los pirgeómetros se instalan generalmente en un lugar libre de obstáculos, o al menos que no presente obstrucciones de magnitudes angulares superiores a 5° en cualquier dirección que tenga un ángulo solar bajo durante todo el año.

Diariamente, debería comprobarse que:

- a) el instrumento está nivelado;
- b) cada uno de los sensores y sus dispositivos de protección están limpios y desprovistos de rocío, escarcha, nieve y lluvia;
- c) las cúpulas no retienen agua (habría que secar cualquier condensación interna);
- d) las superficies receptoras negras presentan emisividades muy próximas a la unidad.

Dado que, por lo general, no es posible medir directamente la radiación solar reflejada y la radiación de onda larga ascendente exactamente a nivel de la superficie, será necesario colocar los pirradiómetros, o bien los piranómetros y los pirgeómetros, a una distancia adecuada del suelo para medir esos componentes ascendentes. Tales mediciones integran la radiación emitida por la superficie que se encuentra debajo del sensor. En el caso de los instrumentos que tienen un ángulo de apertura de 2π sr y están instalados a 2 m por encima de la superficie, el 90% de la radiación total medida es emitida por una superficie circular situada en la parte inferior con un diámetro de 12 m (ese porcentaje es de un 95% si el diámetro tiene 17,5 m, y de un 99% si el diámetro tiene 39,8 m), en el supuesto de que el sensor utilice un detector cosenoidal.

Esta característica de integrar la señal de entrada sobre una superficie circular relativamente grande resulta ventajosa cuando se trata de un terreno que presenta variaciones locales importantes de la emitancia, siempre que el pirradiómetro de radiación total neta se pueda instalar lo suficientemente lejos de la superficie para obtener un campo visual representativo del terreno local. Si el sensor se encuentra demasiado cerca de la superficie, la sombra del instrumento podrá afectar la observación, además de mostrar una parte que no es representativa del terreno. Si, en cambio, el pirradiómetro de radiación total neta está demasiado lejos de la superficie, sus lecturas pueden no ser representativas de los flujos en las proximidades de la superficie, debido a la existencia de divergencias de flujo radiativo no detectadas. Se adopta por lo general una altura de 2 m respecto de una vegetación homogénea y de baja altura; cuando la vegetación sea de mayor altura, como sucede en los bosques, la altura debería ser suficiente para eliminar adecuadamente las heterogeneidades de la superficie local.

7.4.5 Registro y reducción de datos

En general, el texto de la sección 7.1.3 es aplicable tanto a los pirradiómetros como a los pirgeómetros. Además, en las lecturas de esos radiómetros pueden influir específicamente los efectos siguientes, que deberían registrarse:

- a) el efecto de los hidrometeoros (lluvia, nieve, rocío, escarcha) en instrumentos sin protección ni ventilación;
- b) el efecto del viento y de la temperatura del aire;
- c) la deriva del cero del sistema de datos. Este efecto es mucho más importante en el caso de los pirradiómetros, que pueden arrojar valores negativos, mientras que en los piranómetros la señal de irradiancia neta es en sí misma una propiedad de la irradiancia neta en la superficie del sensor.

Debería prestarse especial atención a la posición de los instrumentos cuando, para deducir la radiación de onda larga, sea necesario restar un término del componente de irradiancia solar medido con un piranómetro; el pirradiómetro y el piranómetro deberían estar situados a 5 m el uno del otro, de tal modo que la influencia del entorno sobre ellos sea esencialmente la misma.

7.5 MEDICIÓN DE MAGNITUDES DE RADIACIÓN ESPECIALES

7.5.1 Medición de la luz diurna

La iluminancia es el flujo incidente de energía radiante que emana de una fuente con longitudes de onda comprendidas entre 380 y 780 nm y se evalúa por la respuesta del ojo humano a la energía en esta región del espectro de longitudes de onda. La CII ha definido la respuesta del ojo humano a los fotones con un máximo en la capacidad de respuesta para una longitud de onda de 555 nm. La figura 7.2 y el cuadro 7.7 muestran la respuesta relativa del ojo humano normalizada a esta frecuencia. La eficacia luminosa se define como la relación entre la emitancia radiante (en vatios por metro cuadrado) y la emitancia luminosa (en lúmenes). Es una función de la sensibilidad luminosa relativa $V(\lambda)$ del ojo humano y de un factor de normalización K_m (683) que describe el número de lúmenes emitidos por vatio de radiación electromagnética a partir de una fuente monocromática de 555,19 nm (el punto de congelación del platino), con arreglo a la expresión siguiente:

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (7.15)$$

donde Φ_v es el flujo luminoso (en lúmenes por metro cuadrado o luxes); $\Phi(\lambda)$ es el flujo radiante espectral (en vatios por metro cuadrado por nanómetro); $V(\lambda)$ es la sensibilidad del ojo humano; y K_m es una constante de normalización que relaciona las magnitudes luminosas con las de radiación. Así pues, un 99% de la radiación visible está comprendida entre 400 y 730 nm.

En el anexo 7.A se indican las magnitudes y unidades utilizadas para las variables luminosas.

7.5.1.1 Instrumentos

Los instrumentos utilizados para medir la iluminancia, o luxómetros, constan de un detector fotovoltaico, uno o más filtros para obtener una sensibilidad de acuerdo con la curva $V(\lambda)$ y, a menudo, un circuito de control de la temperatura para mantener la estabilidad de la señal. La CII ha elaborado una guía detallada para medir la luz diurna (CII, 1994), que describe los métodos que deben aplicarse para instalar los equipos, las características de los instrumentos, los procedimientos para adquirir los datos y el control inicial de la calidad.

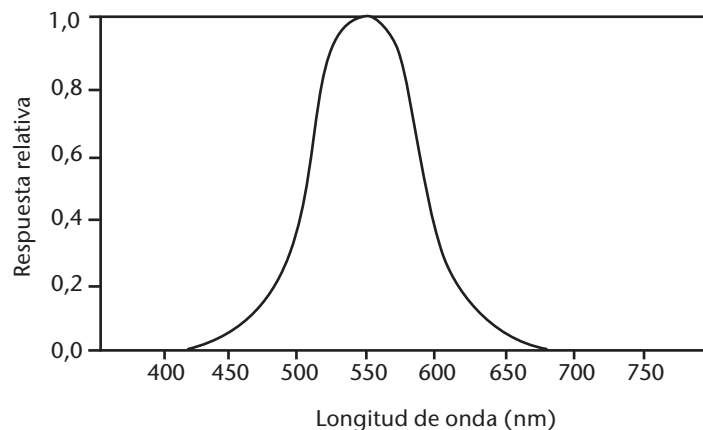


Figura 7.2. Sensibilidad luminosa relativa $V(\lambda)$ del ojo humano a la visión fotópica

Cuadro 7.7. Valores de la eficacia luminosa espectral en la visión fotópica (unidad correspondiente a la longitud de onda de máxima eficacia)

<i>Longitud de onda (nm)</i>	<i>Visión fotópica $V(\lambda)$</i>	<i>Longitud de onda (nm)</i>	<i>Visión fotópica $V(\lambda)$</i>
380	0,00004	590	0,757
390	0,00012	600	0,631
400	0,0004	610	0,503
410	0,0012	620	0,381
420	0,0040	630	0,265
430	0,0116	640	0,175
440	0,023	650	0,107
450	0,038	660	0,061
460	0,060	670	0,032
470	0,091	680	0,017
480	0,139	690	0,0082
490	0,208	700	0,0041
500	0,323	710	0,0021
510	0,503	720	0,00105
520	0,710	730	0,00052
530	0,862	740	0,00025
540	0,954	750	0,00012
550	0,995	760	0,00006
560	0,995	770	0,00003
570	0,952	780	0,000015
580	0,870		

La medición de la iluminancia global es similar a la de la irradiancia global. Sin embargo, el luxómetro patrón deberá controlarse o corregirse en función de la temperatura para un intervalo de temperaturas de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ como mínimo. Además, será preciso ventilar el instrumento para evitar la condensación y/o la escarcha cubriendo la superficie exterior del elemento sensor. Normalmente, los luxómetros deberían servir para medir flujos en un rango de 1 a 20 000 lx. En esa horquilla de valores, las incertidumbres deberían mantenerse dentro de los límites que figuran en el cuadro 7.8. Estos valores se basan en las recomendaciones de la CII (CII, 1987), aunque solo para incertidumbres asociadas a medidores de iluminancia de alta calidad, destinados específicamente a medir la luz diurna externa.

Para medir la iluminancia celeste difusa pueden utilizarse los mismos principios que para la irradiancia celeste difusa. Las mediciones de la iluminancia directa deberían efectuarse con instrumentos cuyo campo visual tenga un semiángulo de apertura que no sea superior a $2,85^{\circ}$ y un ángulo de inclinación inferior a $1,76^{\circ}$.

7.5.1.2 **Calibración**

Las calibraciones deberían tener como referencia una fuente luminosa patrón de tipo A con arreglo a los procedimientos descritos en CII (1987). Este equipo solo se encuentra, en general,

Cuadro 7.8. Características de los luxómetros

<i>Característica</i>	<i>Porcentaje de incertidumbre</i>
Correlación $V(\lambda)$	2,5
Respuesta-UV	0,2
Respuesta-IR	0,2
Respuesta cosenoidal	1,5
Fatiga a 10 klx	0,1
Coefficiente de temperatura	0,1 K ⁻¹
Linealidad	0,2
Tiempo de corrección	0,1 s

en laboratorios nacionales de calibración. Una vez al año deberían llevarse a cabo la calibración y las pruebas relativas a las características del instrumento, que tendrían que incluir pruebas para determinar el envejecimiento, la desviación del cero, la estabilidad mecánica y la estabilidad climática. Se recomienda asimismo que, entre las calibraciones efectuadas en laboratorio, se emplee un instrumento patrón sobre el terreno para comprobar las calibraciones en cada lugar de medición.

7.5.1.3 **Registro y reducción de datos**

La CII recomienda que se registren las variables climatológicas siguientes:

- a) iluminancia diurna celeste global y difusa sobre superficies horizontales y verticales;
- b) iluminancia del haz solar directo;
- c) luminancia celeste para intervalos de 0,08 sr (aproximadamente $10^\circ \cdot 10^\circ$) en todo el hemisferio;
- d) albedo fotópico de superficies típicas como la hierba, la tierra o la nieve.

Normalmente se necesitan valores integrados horarios o diarios. Los primeros deberían referirse al tiempo solar verdadero. Para la presentación de los datos de luminancia celeste, resultan muy útiles los mapas estereográficos con isóneas de igual luminancia.

7.6 **MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA**

Las mediciones de radiación UV solar se realizan para conocer cuáles son sus efectos sobre el medio ambiente y la salud del ser humano, así como para saber cuánto aumenta la radiación en la superficie terrestre como consecuencia del agotamiento de la capa de ozono (Kerr y McElroy, 1993) y de las variaciones de otros parámetros, como las nubes y los aerosoles. El espectro UV se divide convencionalmente en tres partes, a saber:

- a) La radiación UV-A, que corresponde a la banda de longitudes de onda comprendidas entre 315 y 400 nm, justo fuera del espectro visible. Por lo general², biológicamente no es muy activa y su intensidad en la superficie terrestre no varía de manera significativa con el contenido de ozono atmosférico.
- b) La radiación UV-B, que corresponde a la banda de longitudes de onda comprendidas entre 280 y 315 nm. Es biológicamente activa y su intensidad en la superficie terrestre depende de la columna de ozono atmosférico, en función de la longitud de onda. Una de las manifestaciones de su actividad biológica es el efecto "eritémico", o sea, el grado de inflamación o enrojecimiento de la piel del ser humano.
- c) La radiación UV-C, que corresponde a la banda de longitudes de onda comprendidas entre 100 y 280 nm, es completamente absorbida por la atmósfera y no se produce de manera natural en la superficie terrestre.

La banda UV-B es la que mayor interés reviste para las mediciones de la radiación UV. Una definición alternativa, aunque todavía no generalizada, consiste en utilizar la frecuencia de 320 nm, en lugar de la de 315 nm, para definir la frontera entre UV-A y UV-B.

Medir la radiación UV es difícil debido a la pequeña cantidad de energía que llega a la superficie terrestre, a la variabilidad que inducen las variaciones del nivel de ozono estratosférico, y al rápido incremento de la magnitud del flujo a medida que aumenta la longitud de onda. En la figura 7.3 se ilustran las variaciones de la irradiancia espectral entre 290 y 325 nm que ocurren en la atmósfera superior y en la superficie, expresadas en vatios por metro cuadrado por nanómetro. La irradiancia UV global resulta muy afectada por fenómenos atmosféricos como, por ejemplo, las nubes, y en menor medida por los aerosoles de la atmósfera.

La superficie del entorno tiene también un efecto importante por la dispersión múltiple, como sucede especialmente en zonas cubiertas de nieve.

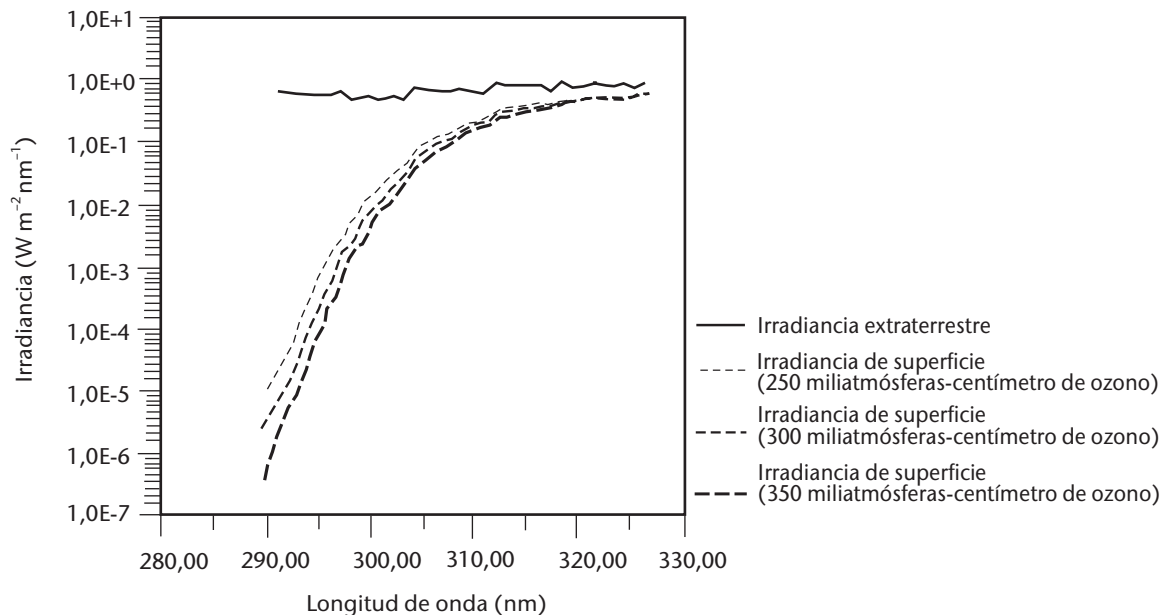


Figura 7.3. Los resultados del modelo muestran el efecto de los crecientes niveles de ozono en la transmisión de la radiación UV-B a través de la atmósfera

² El espectro de acción de la fotosíntesis del fitoplancton, por ejemplo, tiene un componente importante de radiación UV-A.

Las dificultades para normalizar las mediciones de radiación UV se deben a la diversidad de aplicaciones a que están destinadas (OMM, 2003 y 2011). A diferencia de la mayoría de las mediciones meteorológicas, no se han establecido todavía unas normas basadas en las necesidades mundiales. En muchos países, las mediciones de la radiación UV no son encomendadas a los Servicios Meteorológicos, sino a las autoridades sanitarias o de protección del medio ambiente. Esta circunstancia, a su vez, dificulta la normalización de los instrumentos y métodos de observación. Las normas son necesarias para la compatibilidad de las observaciones, la garantía de calidad y el control de calidad de las mediciones, y el archivado de los datos, así como para el intercambio de las mediciones con las comunidades de usuarios (OMM, 2003).

Se han desarrollado directrices y procedimientos normalizados sobre la manera de caracterizar y calibrar los instrumentos de banda ancha, los espectrorradiómetros UV y los radiómetros de filtro UV con el fin de medir la irradiancia UV solar (véanse OMM, 1996, 1999a, 1999b, 2001, 2008 y 2010a). También se han elaborado directrices y procedimientos normalizados para los espectrorradiómetros de serie, aunque todavía no están disponibles en el mercado (OMM, 2010b). Aplicando los procedimientos recomendados para garantizar la calidad de los datos en emplazamientos que utilizan instrumentos de medición de la radiación UV solar será posible recopilar una valiosa base de datos sobre la radiación UV. Estos datos son necesarios para elaborar una climatología de la irradiancia UV solar en el espacio y en el tiempo, con el fin de estudiar el clima terrestre. En los documentos mencionados se ofrecen también recomendaciones acerca de los emplazamientos de medición y sobre las especificaciones de los instrumentos. El programa de la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la OMM ha establecido los requisitos relativos a las mediciones UV-B (OMM, 1993, 2001, 2003, 2010a, 2010b y 2011). Para la irradiancia espectral global UV-B, los requisitos dependen del objetivo. Las especificaciones para objetivos menos exigentes se reproducen en el cuadro 7.9 (OMM, 2001).

A continuación se describen algunos instrumentos con fines de información general y para ayudar a seleccionar la instrumentación apropiada.

7.6.1 Instrumentos

En el mercado existen tres tipos generales de instrumentos para medir la radiación UV. Los de la primera clase utilizan filtros de banda ancha y sirven para medir el espectro de la UV-B o la UV-A, o de toda la región UV de banda ancha que afecta la salud del ser humano. En los de la segunda clase hay uno o más filtros de interferencia que miden partes discretas del espectro UV-A y/o UV-B. Los instrumentos de la tercera clase son los espectrorradiómetros que miden secuencial o simultáneamente una parte definida del espectro mediante un filtro de banda de paso fijo.

7.6.1.1 Sensores de banda ancha

La mayoría de los sensores de banda ancha están diseñados para medir un espectro UV ponderado mediante la función eritémica propuesta por McKinlay y Diffey (1987), que se muestra en la figura 7.4. Otro espectro de acción de algunos instrumentos es el de Parrish y otros (1982). En la elaboración de las curvas (y sus variaciones) se utilizan dos métodos para efectuar la ponderación con equipos informáticos.

Uno de los métodos utilizados para obtener la ponderación eritémica consiste en filtrar primero casi toda la luz visible de la longitud de onda con filtros de vidrio ennegrecido, para interceptar la transmisión de radiación ultravioleta. La radiación restante activa una sustancia luminiscente (fósforo) sensible a la radiación ultravioleta. A su vez, la luz verde emitida por la sustancia luminiscente se vuelve a filtrar con un vidrio de color para eliminar cualquier luz visible que no sea verde antes de golpear contra un fotodiodo de arseniuro de galio o de fosfuro de arseniuro de galio. La calidad del instrumento depende de factores tales como la calidad de la cúpula de cuarzo de protección externa, la respuesta cosenoidal del instrumento, la estabilidad de la temperatura y la capacidad del fabricante para ajustarse a la curva eritémica mediante una combinación apropiada de características del vidrio y del diodo. La estabilidad de la temperatura del instrumento es fundamental, tanto con respecto a los componentes electrónicos como a la respuesta de la sustancia luminiscente ante la radiación UV incidente. La eficacia de la sustancia

luminiscente disminuye en aproximadamente un 0,5% K⁻¹, y su curva de respuesta en longitudes de onda se desvía en casi 1 nm más cada 10 K. Este último efecto es particularmente importante debido a la pendiente de la curva de radiación a esas longitudes de onda.

Cuadro 7.9. Requisitos para medir la irradiancia espectral global UV-B del programa VAG

<i>Característica</i>	<i>Requisitos</i>
Error cosenoidal ^a	a) < ±10% para ángulos de incidencia < 60° b) < ±10% para radiancia isotrópica integrada
Intervalo espectral mínimo	290- 325 nm ^b
Anchura de banda (FWHM)	< 1 nm
Precisión de longitud de onda	< ±0,05 nm
Exactitud de longitud de onda	< ±0,1 nm
Función de rendija	< 10 ⁻³ de máxima a 2,5 de FWHM del centro
Intervalo de longitud de onda de muestreo	< FWHM
Irradiancia máxima	> 1 W m ⁻² nm ⁻¹ a 325 nm y, si procede, 2 W m ⁻² nm ⁻¹ a 400 nm (máximo a mediodía)
Umbral de detección	< 5 · 10 ⁻⁵ W m ⁻² nm ⁻¹ (para relación señal-ruido = 1 a 1 nm de FWHM)
Luz difusa	< 5 · 10 ⁻⁴ W m ⁻² nm ⁻¹ cuando el instrumento está expuesto al sol al ángulo cenital solar mínimo
Temperatura del instrumento	Vigilada y lo bastante estable como para mantener la estabilidad general del instrumento
Duración del barrido	< 10 min por espectro, por ejemplo, para facilitar la comparación con modelos
Incertidumbre general de calibración ^c	< ±10% (a menos que esté limitada por el umbral de detección)
Fecha y hora del barrido	Se registra con cada espectro para indicar la hora con una diferencia menor a 10 s en cada longitud de onda
Mediciones auxiliares necesarias	Irradiancia espectral normal directa o irradiancia espectral difusa Columna de ozono total, p. ej., derivada de mediciones de la irradiancia espectral normal directa Irradiancia con ponderación eritémica, medida con un radiómetro de banda ancha Presión atmosférica Nubosidad Iluminancia, medida con luxómetro Irradiancia directa a incidencia normal medida con pirheliómetro Visibilidad
Frecuencia de los datos	Al menos un barrido por hora, además de un barrido al mediodía solar local

Notas:

- a Sería deseable un error cosenoidal menor, pero no es realista para la mayoría de los instrumentos actualmente en uso.
- b La incertidumbre general de calibración se expresa con un nivel de confianza del 95% e incluye todas las incertidumbres asociadas con la calibración de la irradiancia (por ejemplo, la incertidumbre de las lámparas patrón, la incertidumbre de transferencia, los errores de alineación durante la calibración, y la deriva del instrumento entre calibraciones). Pueden consultarse más detalles en Bernhard y Seckmeyer (1999), Cordero y otros (2008), y Cordero y otros (2013).
- c Es deseable una ampliación a longitudes de onda mayores para el establecimiento de una climatología UV respecto a las aplicaciones biológicas (véase OMM, 2001 y 2010b).

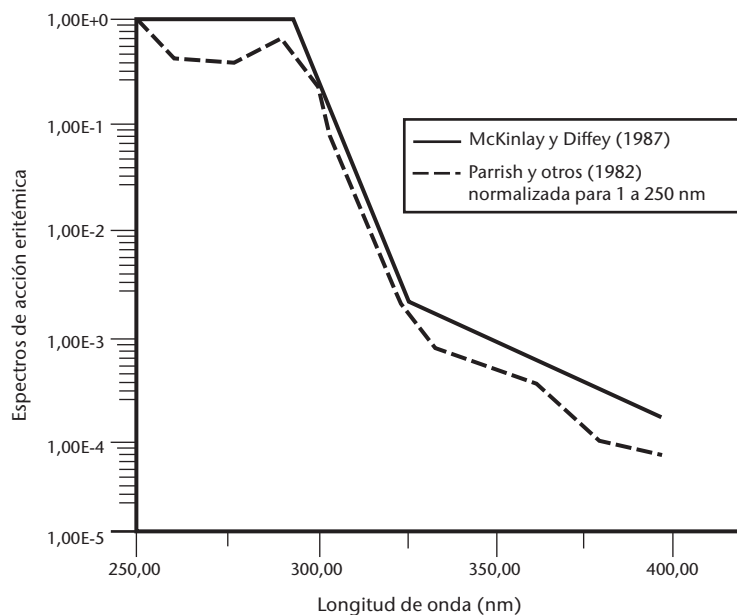


Figura 7.4. Curvas eritémicas

Fuente: Parrish y otros (1982) y McKinlay y Diffey (1987)

Más recientemente, se han desarrollado instrumentos que miden la irradiancia UV con ponderación eritémica utilizando un filtro de interferencia hecho de una delgada lámina de metal y unos fotodiodos de silicio fabricados especialmente con este fin. Con estos instrumentos se resuelven numerosos problemas asociados a la utilización de la sustancia luminiscente, pero solo con niveles muy bajos de respuesta del fotodiodo y de estabilidad del filtro.

Otros instrumentos de banda ancha hacen uso de una u otra técnica de medición para obtener los espectros completos mediante una combinación de filtros de vidrio o de filtros de interferencia. En los instrumentos utilizados para medir la combinación de la radiación UV-A y UV-B, la parte más estrecha del filtro de paso de banda es de tan solo 20 nm de anchura a media altura del máximo (FWHM) y la más ancha es de 80 nm de FWHM. Algunos fabricantes de estos instrumentos proporcionan algoritmos simples para aproximar la dosis eritémica a partir de las mediciones no ponderadas.

El mantenimiento básico de estos instrumentos consiste en asegurarse de que: la cúpula esté limpia, el instrumento esté nivelado, el desecante (si va incluido) esté activo, y el sistema de calefacción/refrigeración, si lo hubiere, funcione correctamente. El control de calidad y la garantía de calidad, así como el mantenimiento detallado, deberían ser realizados por personal experimentado.

7.6.1.2 **Sensores de banda estrecha**

La definición de banda estrecha para esta clasificación de instrumentos no es exacta. La mayor anchura de banda para los instrumentos de esta categoría es de 10 nm de FWHM mientras que la más estrecha para los instrumentos comercializados es en la actualidad del orden de 2 nm de FWHM (OMM, 2010a).

Estos sensores utilizan uno o más filtros de interferencia para obtener información sobre una región del espectro ultravioleta. Los instrumentos más sencillos constan de un solo filtro, por lo general a una longitud de onda que puede medirse mediante un fotodiodo UV mejorado y de buena calidad, aunque es deseable contar con más de un filtro. Las especificaciones necesarias para este tipo de instrumentos (OMM, 2010a) figuran en el cuadro 7.10. Estos instrumentos utilizan, en general, longitudes de onda cercanas a los 305 nm. El rechazo fuera de banda de dichos filtros debería ser igual o superior a 10^{-6} en toda la región sensible del detector. Los

instrumentos de este tipo, de mayor calidad, utilizan un dispositivo Peltier de enfriamiento para mantener la temperatura constante en el entorno de 20 °C, o bien calentadores que eleven las temperaturas del filtro y el diodo del instrumento por encima de la temperatura ambiente normal, por lo general a 40 °C. Sin embargo, esta última alternativa reduce considerablemente la vida útil de los filtros de interferencia. Una variante de este tipo de instrumento emplea un tubo fotomultiplicador en lugar de un fotodiodo, permitiendo así medir con exactitud la energía de las longitudes de onda más cortas y las intensidades más bajas para todas las longitudes de onda medidas.

Los fabricantes de instrumentos que utilizan más de un solo filtro suelen proporcionar algún medio para reconstruir el espectro completo de la radiación ultravioleta y determinar dosis eficaces desde la perspectiva biológica para una variedad de espectros de acción, el valor total de la columna de ozono y la atenuación por las nubes, mediante relaciones modelizadas desarrolladas en torno a las longitudes de onda medidas (OMM, 2010a). Los instrumentos que sirven para una sola longitud de onda se emplean también para completar la resolución temporal y espacial de redes de espectrómetros más complejos, o para controlar con exactitud a largo plazo las bandas determinadas, a fin de detectar las tendencias de la radiación en el medio ambiente.

Los instrumentos deben construirse de modo que la radiación atraviese el filtro con una incidencia prácticamente normal, de modo que se evite el desplazamiento de longitud de onda hacia longitudes de onda más cortas. Así, por ejemplo, una desviación de 10° respecto de la incidencia normal puede inducir un desplazamiento de la longitud de onda de 1,5 nm, en función del índice de refracción del filtro. El efecto de la temperatura puede ser también importante, ya que modifica en 0,012 nm K⁻¹ aproximadamente la longitud de onda central en filtros muy estrechos (< 1 nm).

El mantenimiento de los instrumentos de un solo filtro es similar al de los instrumentos de banda ancha. Para los instrumentos que tienen varios filtros en un sistema de rueda móvil, el mantenimiento obligará a verificar la alineación de la rueda. Se recomienda también probar periódicamente el suministro eléctrico de alta tensión para los instrumentos equipados con un fotomultiplicador y controlar la calidad de los filtros.

7.6.1.3 ***Espectrorradiómetros***

Los instrumentos más sofisticados del mercado son los que utilizan rejillas cuadrículadas u holográficas para dispersar la energía incidente en un espectro. La baja energía de la radiación UV en comparación con la del espectro visible requiere un fuerte rechazo fuera de banda, y esto se consigue utilizando un monocromador doble o filtros de obstrucción, que solo transmiten la radiación UV, junto con un monocromador simple. Generalmente se utiliza un tubo fotomultiplicador para medir la señal de salida del monocromador (OMM, 2001). Algunos instrumentos más económicos utilizan un fotodiodo o series de detectores acoplados por carga (OMM, 2010b), que permiten medir simultáneamente toda una región espectral de interés, pero no pueden medir la energía en las longitudes de onda más cortas del espectro UV-B y, en general, presentan más problemas asociados con la luz difusa.

Para comprobar el funcionamiento de los instrumentos se dispone actualmente de varios sistemas de autocontrol. Las pruebas electrónicas incluyen la verificación del funcionamiento del fotomultiplicador y del sistema de conversión de analógico a digital. Para comprobar si sus elementos ópticos funcionan adecuadamente es preciso probar el instrumento empleando lámparas internas de mercurio y lámparas halógenas de cuarzo normalizadas. Aunque estos procedimientos no proporcionan unos datos de calibración absolutos, el operador puede obtener información sobre la estabilidad del instrumento, tanto con respecto a la alineación espectral como a la intensidad.

Los instrumentos disponibles en el mercado permiten medir desde longitudes de onda de unos 290 nm hasta la media visible, en función del tipo de construcción y de configuración. La anchura de banda de las mediciones suele estar comprendida entre 0,5 y 2,0 nm. El tiempo necesario para completar un barrido completo de la rejilla dependerá tanto de la resolución

de la longitud de onda como del espectro total que ha de medirse. Los tiempos de barrido espectral en la región UV y parte de la región visible (de 290 a 450 nm) con pequeños pasos de longitud de onda van desde los menos de 1 minuto por barrido en el caso de los rápidos espectrorradiómetros modernos hasta los 10 minutos aproximadamente con ciertos tipos de espectrorradiómetros convencionales de alta calidad.

Para llevar a cabo la medición rutinaria de la radiación UV se recomienda que el instrumento esté protegido de los efectos del medio ambiente o que haya sido fabricado de manera que la energía que incide sobre un receptor se transmita a un espectrómetro situado en un recinto climatizado. En ambos casos, será necesario desarrollar nuevas ópticas para que la respuesta uniforme sea inferior para las elevaciones solares bajas.

Para mantener los espectrorradiómetros de medición de la radiación UV-B se necesitan operadores *in situ* bien preparados capaces de ocuparse de los instrumentos. La complejidad de este instrumento exige que se sigan cuidadosamente las instrucciones de mantenimiento del fabricante.

7.6.2 Calibración

La calibración de todos los sensores de la banda UV-B es muy importante y, al mismo tiempo, muy difícil. Se encontrarán directrices sobre la calibración de los espectrorradiómetros UV y los radiómetros de filtro UV en OMM (1996, 1999a, 1999b, 2001, 2008, 2010a y 2010b) y en las publicaciones científicas sobre el particular. Los espectrorradiómetros se deben calibrar con lámparas patrón, que deben ser calibradas con instrumentos de los laboratorios nacionales de referencia. Muchos países no disponen de laboratorios capaces de calibrar lámparas en la región ultravioleta, de modo que estas se calibran tomando como referencia instrumentos del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST) de Estados Unidos de América o del Instituto Federal de Física y Tecnología (PTB) de Alemania.

Cuadro 7.10. Requisitos para medir la irradiancia UV-B global de banda estrecha

<i>Característica</i>	<i>Requisitos</i>
Luz difusa incluida la sensibilidad a radiación visible e infrarroja	Contribución < 1% a la señal de longitudes de onda fuera de 2,5 de FWHM para un ángulo cenital solar menor de 70°
Estabilidad en escalas temporales de hasta un año	Cambio de señal: En uso: mejor que 5% Deseada: 2%
Número mínimo de canales	Al menos un canal con longitud de onda central < 310 nm y al menos uno con longitud de onda central > 330 nm
Irradiancia máxima	La señal de los instrumentos no debe saturarse a los niveles de radiación de la superficie de la Tierra
Umbral de detección	Relación señal-ruido = 3 para irradiancia a un ángulo cenital solar de 80° y una columna de ozono total de 300 unidades Dobson
Temperatura del instrumento	Vigilada y lo bastante estable como para mantener la estabilidad general del instrumento
Tiempo de respuesta	< 1 s
Tiempo de multiplexación	< 1 s
Exactitud temporal	Mejor que ±10 s
Frecuencia de muestreo	≤ 1 min
Nivelación	< 0,2°
Incertidumbre de calibración	< 10% (a menos que esté limitada por el umbral de detección)

Se estima que, en las mediciones puntuales a 300 nm y en las condiciones más rigurosas, actualmente solo es posible conseguir una incertidumbre del 5%. La incertidumbre de medición de los totales diarios es aproximadamente la misma, en el mejor de los casos. Las variaciones rápidas de la nubosidad y/o de las profundidades ópticas de las nubes en el lugar de medición hacen necesarios barridos espectrales rápidos y pequeños saltos en el tiempo de muestreo entre barridos espectrales consecutivos, con el fin de obtener unos totales diarios representativos de la irradiancia espectral UV. Las mediciones de la irradiancia eritémica podrían presentar incertidumbres comprendidas entre el 5% y el 20%, dependiendo de varios factores, como la calidad de los procedimientos o del equipo. En los párrafos siguientes se examinan las fuentes de error, que abarcan:

- a) las incertidumbres asociadas a las lámparas patrón;
- b) la estabilidad de los instrumentos, incluida la del filtro espectral y, en los instrumentos más antiguos, de los coeficientes de temperatura;
- c) los efectos del error cosenoidal;
- d) el hecho de que la calibración de un instrumento varía con la longitud de onda y de que:
 - i) el espectro de una lámpara patrón no es igual al espectro que se mide;
 - ii) el espectro de la irradiancia UV-B que se mide varía considerablemente con el ángulo cenital solar.

La utilización de lámparas patrón como fuentes de calibración arroja grandes incertidumbres en las longitudes de onda más cortas, incluso aunque la transferencia de la calibración sea perfecta. Así, por ejemplo, a 350 nm la incertidumbre asociada a la irradiancia normalizada es del orden del 1,3%; para transferirla a una lámpara patrón se añadirá otro 0,7% de incertidumbre adicional. Las incertidumbres de la calibración disminuyen a medida que aumenta la longitud de onda. Debe tenerse también en cuenta la instalación y el manejo de las lámparas patrón, pues incluso variaciones tan pequeñas como un 1% de la corriente, por ejemplo, pueden generar errores del flujo UV de hasta un 10% o más en las longitudes de onda más cortas. Las mediciones incorrectas de la distancia entre la lámpara y el instrumento que se desea calibrar pueden dar lugar también a errores del orden del 1%, ya que la ley de la inversa del cuadrado se aplica a la calibración. En Webb y otros (1994) se analizan varios aspectos de la incertidumbre vinculada al uso de lámparas patrón en la calibración de espectrorradiómetros utilizados para medir la región ultravioleta o la región visible.

Los problemas relacionados con los instrumentos de banda ancha se deben a la compleja serie de filtros utilizada para medir la radiación que entra en la señal eritémica, y a la circunstancia de que la naturaleza espectral de la atmósfera varía con la masa de aire y con la cantidad de ozono. Incluso cuando la calibración del instrumento es perfecta, gracias a la utilización de lámparas calibradas como fuente, la diferencia entre el espectro solar medido y el espectro de la lámpara influye en la incertidumbre de las mediciones finales. El empleo de lámparas de deuterio de alta señal de salida y de un monocromador doble, así como una cuidadosa selección de los filtros, facilitará la calibración de estos instrumentos, pero son muy pocos los laboratorios que pueden hacerlo. Los distintos métodos de calibración de los instrumentos de banda ancha se describen en OMM (2008).

Los detectores de trampa (o de interrupción) se podrían utilizar de manera efectiva para sensores de banda estrecha, pero hasta el momento solo se han empleado en proyectos de investigación. Al recalibrar estos instrumentos, ya tengan uno o varios filtros, debe procurarse que las características espectrales de los filtros no hayan cambiado con el tiempo. Los distintos métodos de calibración de los sensores de banda estrecha, junto con sus ventajas e inconvenientes, se describen en OMM (2010a).

Los espectrorradiómetros deberían calibrarse en la misma posición en que se efectuarán las mediciones, ya que muchos se ven afectados negativamente por los cambios de orientación. Al calibrar un espectrorradiómetro se debería comprobar también la exactitud del posicionamiento

de la longitud de onda del monocromador, verificar cualquier cambio que pueda producirse en la alineación del elemento óptico interno y su limpieza y efectuar una prueba general de los elementos electrónicos. Es necesario calibrar el rechazo fuera de banda, posiblemente mediante el barrido de un rayo láser de helio cadmio ($\lambda = 325 \text{ nm}$) solamente una vez, ya que no es habitual que cambie con el tiempo.

La mayoría de los fabricantes de instrumentos con filtro aconsejan realizar una calibración al año como mínimo. Los espectrorradiómetros deberían calibrarse como mínimo dos veces al año y con mayor frecuencia si no disponen de sistemas de autocontrol para las señales de salida del fotomultiplicador o de la selección de la longitud de onda. En todo caso, las calibraciones absolutas de los instrumentos deberían efectuarlas técnicos cualificados en sus emplazamientos con arreglo a un calendario predeterminado. Las fuentes utilizadas para la calibración deberán garantizar que esta tendrá como referencia los patrones de radiación absolutos que se conservan en los institutos meteorológicos nacionales. Si los resultados de las rutinas de garantía de la calidad aplicadas en los emplazamientos mostraran una variación apreciable del rendimiento de un instrumento o modificaciones de su nivel de calibración con el paso del tiempo, podría necesitarse una calibración adicional entre dos calibraciones programadas. Todas las calibraciones deberían basarse en la experiencia y en la documentación de que se disponga en el emplazamiento, así como en directrices y procedimientos como los publicados en OMM (1996, 1999*a*, 1999*b*, 2001, 2008, 2010*a* y 2010*b*). Además de las calibraciones absolutas de los instrumentos, las intercomparaciones entre las fuentes utilizadas para la calibración (por ejemplo, lámparas de calibración) y los instrumentos de medición son útiles para detectar y eliminar las incoherencias o las diferencias sistemáticas entre los instrumentos de la estación en diferentes emplazamientos.

ANEXO 7.A. NOMENCLATURA DE LAS MAGNITUDES RADIOMÉTRICAS Y FOTOMÉTRICAS

1) Magnitudes radiométricas

Nombre	Símbolo	Unidad	Relación	Comentarios
Energía radiante	$Q, (W)$	$J = W \cdot s$	-	-
Flujo radiante	$\Phi, (P)$	W	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Potencia
Densidad del flujo radiante	$(M), (E)$	$W \cdot m^{-2}$	$\frac{d\Phi}{dA} = \frac{d^2Q}{dA \cdot dt}$	Flujo radiante de cualquier origen que atraviesa un elemento de superficie
Exitancia radiante	M	$W \cdot m^{-2}$	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	Flujo radiante de cualquier origen que emerge de un elemento de superficie
Irradiancia	E	$W \cdot m^{-2}$	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Flujo radiante de cualquier origen que incide sobre un elemento de superficie
Radiancia	L	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$	La radiancia es una magnitud conservativa en un sistema óptico
Exposición radiante	H	$J \cdot m^{-2}$	$H = \frac{dQ}{dA} = \int_{t_1}^{t_2} E dt$	Puede utilizarse para sumas diarias de radiación global, etc.
Intensidad radiante	I	$W \cdot sr^{-1}$	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Puede utilizarse solo para radiación saliente de "fuentes puntuales"

2) Magnitudes fotométricas

Nombre	Símbolo	Unidad
Cantidad de luz	Q_v	$lm \cdot s$
Flujo luminoso	Φ_v	lm
Exitancia luminosa	M_v	$lm \cdot m^{-2}$
Iluminancia	E_v	$lm \cdot m^{-2} = lx$
Exposición luminosa	H_v	$lm \cdot m^{-2} \cdot s = lx \cdot s$
Intensidad luminosa	I_v	$lm \cdot sr^{-1} = cd$
Luminancia	L_v	$lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} = cdm^{-2}$
Densidad del flujo luminoso	$(M_v; E_v)$	$lm \cdot m^{-2}$

3) Características ópticas

Característica	Símbolo	Definición	Comentarios
Emisividad	ε	$\varepsilon = \frac{M_\varepsilon}{M_{\varepsilon=1}}$	$\varepsilon=1$ para un cuerpo negro
Absortancia	α	$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$	Φ_a y Φ_i son los flujos radiantes absorbido e incidente, respectivamente
Reflectancia	ρ	$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$	Φ_r es el flujo radiante reflejado
Transmitancia	τ	$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$	Φ_t es el flujo radiante transmitido a través de una capa o una superficie
Profundidad óptica	δ	$\tau = e^{-\delta}$	En la atmósfera, δ se define en la vertical. El espesor óptico oblicuo es igual a $\delta/\cos \theta$, donde θ es el ángulo cenital aparente

ANEXO 7.B. MAGNITUDES METEOROLÓGICAS, SÍMBOLOS Y DEFINICIONES DE RADIACIÓN

Magnitud	Símbolo	Relación	Definiciones y comentarios	Unidades
Radiación descendente	Φ_{\downarrow}^a	$\Phi_{\downarrow} = \Phi_{g\downarrow} + \Phi_{r\downarrow}$	Flujo radiante descendente	W
	Q_{\downarrow}	$Q_{\downarrow} = Q_{g\downarrow} + Q_{r\downarrow}$	" Energía radiante descendente	J (W s)
	M_{\downarrow}	$M_{\downarrow} = M_{g\downarrow} + M_{r\downarrow}$	" Exitancia radiante descendente ^b	W m ⁻²
	E_{\downarrow}	$E_{\downarrow} = E_{g\downarrow} + E_{r\downarrow}$	" Irradiancia descendente	W m ⁻²
	L_{\downarrow}	$L_{\downarrow} = L_{g\downarrow} + L_{r\downarrow}$	" Radiancia descendente	W m ⁻² sr ⁻¹
	H_{\downarrow}	$H_{\downarrow} = H_{g\downarrow} + H_{r\downarrow}$ (<i>g</i> = global) (<i>l</i> = long wave)	" Exposición radiante descendente para un intervalo de tiempo determinado	J m ⁻² por intervalo de tiempo
Radiación ascendente	Φ_{\uparrow}^a	$\Phi_{\uparrow} = \Phi_{r\uparrow} + \Phi_{l\uparrow}$	Flujo radiante ascendente	W
	Q_{\uparrow}	$Q_{\uparrow} = Q_{r\uparrow} + Q_{l\uparrow}$	" Energía radiante ascendente	J (W s)
	M_{\uparrow}	$M_{\uparrow} = M_{r\uparrow} + M_{l\uparrow}$	" Exitancia radiante ascendente	W m ⁻²
	E_{\uparrow}	$E_{\uparrow} = E_{r\uparrow} + E_{l\uparrow}$	" Irradiancia ascendente	W m ⁻²
	L_{\uparrow}	$L_{\uparrow} = L_{r\uparrow} + L_{l\uparrow}$	" Radiancia ascendente	W m ⁻² sr ⁻¹
	H_{\uparrow}	$H_{\uparrow} = H_{r\uparrow} + H_{l\uparrow}$	" Energía radiante ascendente por unidad de área para un intervalo de tiempo determinado	J m ⁻² por intervalo de tiempo
Radiación global	$E_{g\downarrow}$	$E_{g\downarrow} = E \cos \theta_{\odot} + E_{d\downarrow}$	Irradiancia hemisférica sobre una superficie horizontal (θ_{\odot} = ángulo cenital solar aparente) ^c	W m ⁻²
Radiación celeste: radiación solar difusa descendente	$\Phi_{d\downarrow}$		Subíndice <i>d</i> = difusa	Iguales a las de radiación descendente
	$Q_{d\downarrow}$			
	$M_{d\downarrow}$			
	$E_{d\downarrow}$			
	$L_{d\downarrow}$			
	$H_{d\downarrow}$			

Magnitud	Símbolo	Relación	Definiciones y comentarios	Unidades
Radiación de onda larga ascendente/descendente	$\Phi_l\uparrow, \Phi_l\downarrow$ $Q_l\uparrow, Q_l\downarrow$ $M_l\uparrow, M_l\downarrow$ $E_l\uparrow, E_l\downarrow$ $H_l\uparrow, H_l\downarrow$		Subíndice l = onda larga. Si solo se considera la radiación atmosférica, puede añadirse el subíndice a ; por ejemplo, $\Phi_{l,a}\uparrow\sigma\sigma$	Igual a las de radiación descendente
Radiación solar reflejada	$\Phi_r\uparrow$ $Q_r\uparrow$ $M_r\uparrow$ $E_r\uparrow$ $L_r\uparrow$ $H_r\uparrow$		Subíndice r = reflejada (pueden utilizarse los subíndices s (especular) y d (difusa) si se distingue entre ambos componentes)	Igual a las de radiación descendente
Radiación neta	Φ^* Q^* M^* E^* L^* H^*	$\Phi^* = \Phi\downarrow - \Phi\uparrow$ $Q^* = Q\downarrow - Q\uparrow$ $M^* = M\downarrow - M\uparrow$ $E^* = E\downarrow - E\uparrow$ $L^* = L\downarrow - L\uparrow$ $H^* = H\downarrow - H\uparrow$	Los subíndices g o l han de añadirse a cada uno de los símbolos cuando solo se consideren magnitudes de radiación neta de onda corta o de onda larga	Igual a las de radiación descendente
Radiación solar directa	E	$E = E_0\tau$ $\tau = e^{-\delta/\cos\theta_\odot}$	τ = transmitancia atmosférica δ = profundidad óptica (vertical)	$W\ m^{-2}$
Constante solar	E_0		Irradiancia solar, normalizada a la distancia media Sol-Tierra	$W\ m^{-2}$

Notas:

- Pueden utilizarse los símbolos $-$ o $+$ en lugar de \downarrow o \uparrow (por ejemplo $\Phi^* = \Phi\uparrow$).
- La exitancia es el flujo radiante que emerge de la unidad de superficie; la irradiancia es el flujo radiante recibido por unidad de superficie. Para la densidad de flujo en general puede utilizarse el símbolo M o E . Aunque no se recomienda específicamente, puede introducirse también el símbolo F , definido como Φ /superficie.
- En el caso de superficies inclinadas, θ_\odot es el ángulo comprendido entre la normal a la superficie y la dirección hacia el Sol.

ANEXO 7.C. REQUISITOS QUE DEBEN REUNIR LOS CENTROS RADIOMÉTRICOS MUNDIALES, REGIONALES Y NACIONALES

Centros radiométricos mundiales

Los Centros radiométricos mundiales fueron designados por el Comité Ejecutivo en su 30ª reunión (Resolución 11 (EC-XXX)), celebrada en 1978, para servir de centros de calibración internacional de radiómetros meteorológicos utilizados como patrón en las estaciones de la red mundial y para mantener los instrumentos patrón necesarios para ese fin.

Cada Centro radiométrico mundial deberá cumplir los siguientes requisitos:

- a) Poseerá y mantendrá un grupo de al menos tres pirheliómetros absolutos estables, con una incertidumbre trazable al 95% de menos de 1 W m^{-2} de la Referencia Radiométrica Mundial (RRM) y, en condiciones estables de cielo despejado y soleado con irradiancias directas superiores a 700 W m^{-2} , es previsible que el 95% de las mediciones individuales de irradiancia solar directa esté dentro de un margen de 4 W m^{-2} de la irradiancia. El Centro radiométrico mundial de Davos será el encargado de mantener el Grupo de Normalización Mundial (GNM) utilizado para establecer la RRM.
- b) Impartirá formación para especialistas en radiación.
- c) El personal del centro debería velar por la continuidad de las operaciones y contar con científicos competentes con amplia experiencia en radiometría.
- d) Adoptará todas las medidas necesarias para asegurar en todo momento la calidad más alta posible de sus instrumentos patrón y de sus equipos de prueba.
- e) Ejercerá como centro de transferencia de la RRM a los centros regionales.
- f) Contará con los equipos de laboratorio y las instalaciones externas necesarios para poder comparar simultáneamente gran número de instrumentos y para efectuar la reducción de los datos.
- g) Seguirá muy de cerca o emprenderá iniciativas que conduzcan a mejorar los instrumentos patrón y/o los métodos utilizados en radiometría meteorológica;
- h) Será evaluado por un organismo internacional o por expertos de la Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO) al menos cada cinco años, para verificar la trazabilidad de las mediciones de radiación solar directa.

O bien:

- a) Creará y mantendrá un archivo de datos de radiación solar de todos los Estados Miembros de la OMM.
- b) El personal del centro debería velar por la continuidad de las operaciones y contar con científicos competentes con amplia experiencia en radiometría.
- c) Adoptará todas las medidas necesarias para asegurar en todo momento la calidad más alta posible de su base de datos así como del acceso a la misma.
- d) Será evaluado por un organismo internacional o por expertos de la CIMO al menos cada cinco años.

Centros radiométricos regionales

Un Centro radiométrico regional es un centro designado por una asociación regional para servir de centro de comparaciones intrarregionales de instrumentos radiométricos en la Región y para mantener los instrumentos patrón necesarios para ese fin.

Un Centro radiométrico regional cumplirá las condiciones siguientes antes de ser designado como tal y continuará cumpliéndolas una vez que haya sido designado:

- a) Poseerá y mantendrá un grupo normalizado de al menos tres pirheliómetros estables, con una incertidumbre trazable al 95% de menos de 1 W m^{-2} del GNM y, en condiciones estables de cielo despejado y soleado con irradiancias directas superiores a 700 W m^{-2} , es previsible que el 95% de las mediciones individuales de irradiancia solar directa esté dentro de un margen de 6 W m^{-2} de la irradiancia.
- b) Uno de los radiómetros deberá ser comparado mediante una comparación aprobada por la CIMO de la OMM o calibrado, al menos cada cinco años, tomando como referencia el GNM.
- c) Los radiómetros patrón se compararán entre sí al menos una vez al año para comprobar la estabilidad de cada uno de los instrumentos. Si la proporción media, basada en un mínimo de 100 mediciones y con una incertidumbre inferior al 0,1% al 95%, hubiera cambiado más de un 0,2%, y si no fuera posible identificar el instrumento defectuoso, se efectuará una recalibración en uno de los Centros radiométricos mundiales antes de que se vuelva a utilizar el patrón en cuestión.
- d) Dispondrá de las instalaciones y el equipo de laboratorio necesarios para comprobar y mantener la exactitud del equipo de medición auxiliar o tener acceso a los mismos.
- e) Proporcionará las instalaciones externas necesarias para poder comparar simultáneamente los radiómetros patrón nacionales de la Región.
- f) El personal del centro debería velar por la continuidad de las operaciones y contar con un científico competente, con amplia experiencia en radiometría.
- g) Será evaluado por un organismo nacional o internacional, o por expertos de la CIMO, al menos cada cinco años, para verificar la trazabilidad de las mediciones de radiación solar directa.

Centros radiométricos nacionales

Un Centro radiométrico nacional es un centro designado a nivel nacional para servir de centro de calibración, normalización y comprobación de los instrumentos utilizados en la red nacional de estaciones radiométricas, y para mantener el instrumento patrón nacional necesario para ese fin.

Un Centro radiométrico nacional deberá satisfacer los requisitos siguientes:

- a) Poseerá y mantendrá al menos dos pirheliómetros como referencia nacional para la calibración de instrumentos de radiación de la red nacional de estaciones radiométricas, con una incertidumbre trazable al 95% de menos de 4 W m^{-2} de la representación regional de la RRM y, en condiciones estables de cielo despejado y soleado con irradiancias directas superiores a 700 W m^{-2} , es previsible que el 95% de las mediciones individuales de irradiancia solar directa esté dentro de un margen de 20 W m^{-2} de la irradiancia.
- b) Uno de los radiómetros patrón nacionales deberá ser comparado con un patrón regional, al menos cada cinco años.
- c) Los radiómetros patrón nacionales se compararán entre sí al menos una vez al año para comprobar la estabilidad de cada uno de los instrumentos; si la proporción media, basada

en un mínimo de 100 mediciones y con una incertidumbre inferior al 0,2% al 95%, hubiera cambiado más de un 0,6%, y si no fuera posible identificar el instrumento defectuoso, se efectuará una recalibración en uno de los Centros radiométricos regionales antes de que se vuelva a utilizar el patrón en cuestión.

- d) Dispondrá de las instalaciones y los equipos necesarios para comprobar el funcionamiento de los instrumentos utilizados en la red nacional o tener acceso a los mismos.
- e) El personal del centro debería velar por la continuidad de las operaciones, y contar con un científico competente, con experiencia en radiometría.

Los Centros radiométricos nacionales se encargarán de preparar y mantener al día toda la información técnica necesaria para el funcionamiento y el mantenimiento de la red nacional de estaciones radiométricas.

Deberían adoptarse disposiciones para la recopilación y el análisis periódico de los resultados de todas las mediciones de la radiación efectuadas en la red nacional de estaciones radiométricas, con el fin de asegurar su exactitud y fiabilidad. Si esa labor la realiza algún otro organismo, el Centro radiométrico nacional deberá mantener un estrecho contacto con él.

Lista de Centros radiométricos mundiales y regionales

Centros radiométricos regionales

Davos	(Suiza)
San Petersburgo (véase la nota)	(Federación de Rusia)

Regional Radiation Centres

Región I (África):

El Cairo	(Egipto)
Jartum	(Sudan)
Kinshasa	(República Democrática del Congo)
Lagos	(Nigeria)
Tamanrasset	(Argelia)
Túnez	(Túnez)

Región II (Asia):

Pune	(India)
Tokyo	(Japón)

Región III (América del Sur):

Buenos Aires	(Argentina)
Santiago	(Chile)
Huayao	(Perú)

Región IV (América del Norte, América Central y el Caribe):

Toronto	(Canadá)
Boulder	(Estados Unidos de América)
Ciudad de México/Colima	(México)

Región V (Suroeste del Pacífico):

Melbourne	(Australia)
-----------	-------------

Región VI (Europa):

Budapest	(Hungría)
Davos	(Suiza)
San Petersburgo	(Federación de Rusia)
Norrköping	(Suecia)
Toulouse/Carpentras	(Francia)
Uccle	(Bélgica)
Lindenberg	(Alemania)

Nota: Funciona principalmente como Centro mundial de datos de radiación con arreglo al Plan estratégico de la Vigilancia de la Atmósfera Global.

ANEXO 7.D. FÓRMULAS ÚTILES

Consideraciones generales

Todos los datos astronómicos pueden calcularse con ayuda de las tablas que figuran en los almanaques náuticos o de las tablas de efemérides. No obstante, a continuación se ofrecen algunas fórmulas aproximadas para uso práctico. En Michalsky (1988a y 1988b), tras haberse comparado varios grupos de fórmulas aproximadas, se concluye que las mejores son las ecuaciones señaladas como aproximaciones convenientes en el *Astronomical Almanac* (Almanaque Astronómico) (Observatorio Naval de Estados Unidos de América, 1993), que se reproducen a continuación para mayor comodidad.

Posición del Sol

Para determinar la ubicación real del Sol se necesitan los valores siguientes:

- el año;
- el día del año (por ejemplo, el 1 de febrero es el día 32);
- la hora fraccionada, expresada en tiempo universal (UT) (por ejemplo, horas + minutos/60 + número de horas respecto del meridiano de Greenwich);
- la latitud en grados (positiva en sentido norte);
- la longitud en grados (positiva en sentido este).

Para determinar la fecha juliana (JD), el *Astronomical Almanac* determina la JD presente a partir de un valor inicial fijado el mediodía del 1 de enero de 2000 UT. Su valor es 2 451 545,0. La JD que se ha de determinar puede obtenerse de:

$$JD = 2\,432\,917,5 + \text{delta} \cdot 365 + \text{ajuste} + \text{días} + \text{horas}/24$$

donde:

$$\text{delta} = \text{año} - 1949$$

$$\text{ajuste} = \text{parte entera de } (\text{delta}/4)$$

La constante 2 432 917,5 es la JD para las 0000 (medianoche) del 1 de enero de 1949, y se utiliza simplemente por razones prácticas.

Utilizando la fecha anterior pueden calcularse las coordenadas eclípticas mediante los pasos siguientes (L , g y l se expresan en grados):

- $n = JD - 2\,451\,545$;
- L (longitud media) = $280,460 + 0,985\,647\,4 \cdot n$ ($0 \leq L < 360^\circ$);
- g (anomalía media) = $357,528 + 0,985\,600\,3 \cdot n$ ($0 \leq g < 360^\circ$);
- l (longitud eclíptica) = $L + 1,915 \cdot \sin(g) + 0,020 \cdot \sin(2g)$ ($0 \leq l < 360^\circ$);
- ep (oblicuidad de la eclíptica) = $23,439 - 0,000\,000\,4 \cdot n$ (grados).

Conviene señalar que, según las instrucciones, deberían añadirse o restarse todos los múltiplos de 360° hasta que el valor final esté comprendido en el intervalo especificado.

A partir de las ecuaciones anteriores es posible calcular las coordenadas celestes, es decir, la ascensión recta (ra) y la declinación (dec), mediante las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}\tan(ra) &= \cos(ep) \cdot \sin(l) / \cos(l) \\ \sin(dec) &= \sin(ep) \cdot \sin(l)\end{aligned}$$

Para convertir las coordenadas celestes en coordenadas locales, es decir, para pasar de la ascensión recta y la declinación al acimut (A) y la altitud (a), conviene utilizar el ángulo horario local (h). Este se calcula determinando, en primer lugar, el tiempo sideral medio en Greenwich (GMST, en horas) y el tiempo sideral medio local (LMST, en horas):

$$\text{GMST} = 6,697\,375 + 0,065\,709\,824\,2 \cdot n + \text{hora (UT)}$$

donde: $0 \leq \text{GMST} < 24 \text{ h}$

$$\text{LMST} = \text{GMST} + (\text{longitud este}) / (15^\circ \text{ h}^{-1})$$

A partir del LMST se calcula el ángulo horario (ha) mediante la expresión siguiente (ha y ra se expresan en grados):

$$ha = 15 \cdot \text{LMST} - ra \quad (-12 \leq ha < 12\text{h})$$

Antes de que el Sol llegue al meridiano, el ángulo horario es negativo. Debería obrarse con cautela al utilizar este término porque algunos investigadores en materia solar emplean un término opuesto para designar lo mismo.

La elevación solar (el) y el acimut solar (az) se pueden calcular de la siguiente manera (az y el se expresan en grados):

$$\sin(el) = \sin(dec) \cdot \sin(lat) + \cos(dec) \cdot \cos(lat) \cdot \cos(ha)$$

y:

$$\begin{aligned}\sin(az) &= -\cos(dec) \cdot \sin(ha) / \cos(el) \\ \cos(az) &= (\sin(dec) - \sin(el) \cdot \sin(lat)) / (\cos(el) \cdot \cos(lat))\end{aligned}$$

donde el acimut es positivo a partir de 0° norte hacia el este.

Al objeto de considerar la refracción atmosférica y para obtener la elevación solar aparente (h) o el ángulo cenital solar aparente, el *Astronomical Almanac* propone utilizar las ecuaciones siguientes:

- a) Una expresión sencilla para la refracción r para ángulos cenitales inferiores a 75° :

$$r = 0^\circ,004\,52 P \tan z / (273 + T)$$

donde z es la distancia cenital en grados; P es la presión en hectopascales; y T es la temperatura en grados Celsius.

- b) Para ángulos cenitales superiores a 75° y altitudes inferiores a 15° se recomienda la fórmula aproximada siguiente:

$$r = \frac{P(0,159\,4 + 0,019\,6a + 0,000\,02a^2)}{[(273 + T)(1 + 0,505a + 0,084\,5a^2)]}$$

donde a es la elevación ($90^\circ - z$), siendo $h = el + r$, y el ángulo cenital solar aparente, $z_0 = z + r$.

Distancia Sol-Tierra

La excentricidad actual de la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol es pequeña pero apreciable, hasta el punto de que el cuadrado de la distancia Sol-Tierra, R , y por consiguiente la irradiancia solar en la superficie terrestre, varía en un 3,3% respecto de la media. En unidades astronómicas (UA), con una incertidumbre de 10^{-4} :

$$R = 1,000\,14 - 0,016\,71 \cdot \cos(g) - 0,000\,14 \cdot \cos(2g)$$

donde g es la anomalía media definida anteriormente. La excentricidad solar se define como el cuadrado del cociente entre la distancia media del Sol a la Tierra (1 UA, R_0) y la distancia real del Sol a la Tierra:

$$E_0 = (R_0/R)^2$$

Masa de aire

Para calcular la extinción es necesario conocer la longitud que recorre la radiación a través de la atmósfera, denominada "masa de aire óptica absoluta". La masa de aire relativa para un componente atmosférico arbitrario, m , es la relación que existe entre la masa de aire a lo largo del recorrido oblicuo y la masa de aire en la dirección vertical; es, pues, un factor de normalización. Considerando una atmósfera estratificada en planos paralelos sin refracción, m es igual a $1/\sin h_0$ o $1/\cos z_0$.

Hora local aparente

La hora solar media, en la que se basa nuestra hora civil, está vinculada al movimiento de un cuerpo imaginario denominado Sol medio, que se considera dotado de un movimiento en el ecuador celeste a una velocidad uniforme igual a la velocidad media del movimiento del Sol verdadero. La diferencia entre esta hora fija adoptada como referencia y la hora local aparente variable se denomina "ecuación del tiempo", Eq , y puede ser positiva o negativa en función de la posición relativa del Sol medio y del Sol verdadero. Así pues:

$$LAT = LMT + Eq = CT + LC + Eq$$

donde LAT es la hora local aparente (denominada también hora solar verdadera o TST), LMT es la hora local media; CT es la hora civil (referida a un meridiano estándar y, por consiguiente, denominada también hora estándar); y LC es la corrección de longitud (4 minutos por cada grado). LC es positiva cuando el meridiano local se encuentra al este del estándar, y viceversa.

Para calcular Eq en minutos puede utilizarse la aproximación siguiente:

$$Eq = 0,017\,2 + 0,428\,1 \cos \Theta_0 - 7,351\,5 \sin \Theta_0 - 3,349\,5 \cos 2\Theta_0 - 9,361\,9 \sin 2\Theta_0$$

donde $\Theta_0 = 2\pi d_n / 365$ en radianes, o $\Theta_0 = 360 d_n / 365$ en grados, y donde d_n es el número del día, que varía desde cero para el 1 de enero hasta 364 para el 31 de diciembre de un año normal, o hasta 365 de un año bisiesto. El error máximo de esta aproximación es de 35 segundos (que resulta excesivo para ciertos fines, como la determinación de la masa de aire).

ANEXO 7.E. RADIACIÓN CELESTE DIFUSA: CORRECCIÓN DEL EFECTO DEL ANILLO DE SOMBRA

El anillo de sombra se monta sobre dos carriles orientados paralelamente al eje de la Tierra, de tal modo que el centro del anillo coincida con el piranómetro durante el equinoccio. El diámetro del anillo varía entre 0,5 y 1,5 m, y la razón entre la anchura y el radio, b/r , entre 0,09 y 0,35. El ajuste del anillo en función de la declinación solar se realiza deslizándolo a lo largo de los carriles. La longitud de la banda de sombra y la altura del montaje de los carriles con respecto al piranómetro se determinan a partir de la posición del Sol en el solsticio de verano; cuanto mayor es la latitud, más larga será la banda de sombra y más bajos se encontrarán los carriles.

Varios autores como, por ejemplo, Drummond (1956), Dehne (1980) y Le Baron y otros (1980), han propuesto fórmulas para calcular las correcciones que deben efectuarse a las mediciones de la radiación celeste para tener en cuenta la parte no medida a causa de la banda de sombra. Para un anillo en el que $b/r < 0,2$, la radiación D_v perdida durante un día puede expresarse en la forma siguiente:

$$D_v \approx \frac{b}{r} \cos^3 \delta \int_{t_{\text{orto}}}^{t_{\text{ocaso}}} L(t) \cdot \sin h_{\odot}(t) dt$$

donde δ es la declinación del Sol; t es el ángulo horario del Sol; t_{orto} y t_{ocaso} son los ángulos horarios en el orto y en el ocaso, respectivamente, para un horizonte matemático (Φ es la latitud geográfica, $t_{\text{orto}} = -t_{\text{ocaso}}$ y $\cos t_{\text{orto}} = -\tan \Phi \cdot \tan \delta$); $L(t)$ es la radiancia celeste durante el día; y h_{\odot} es la elevación solar.

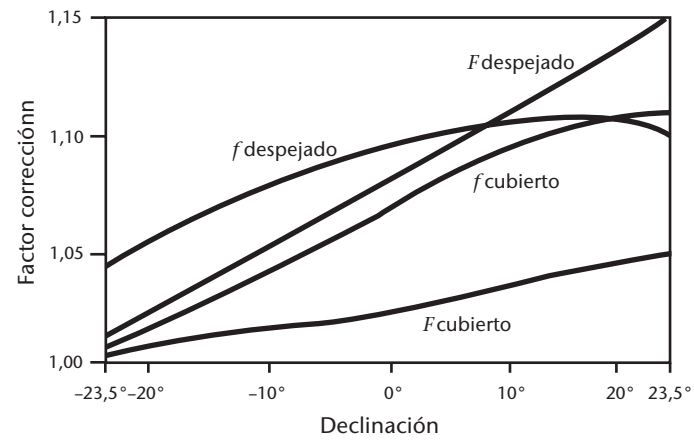
A partir de esta expresión, y adoptando ciertos supuestos sobre la radiancia celeste, es posible determinar un factor de corrección f :

$$f = \frac{1}{1 - \frac{D_v}{D}}$$

donde D es la radiación celeste no oscurecida. La figura del presente anexo muestra un ejemplo de los valores de este factor de corrección, para cielos despejados y cubiertos, comparados con las correspondientes curvas empíricas. Es evidente que las desviaciones respecto de las curvas teóricas dependen de los factores climatológicos de la estación y que deberían determinarse experimentalmente comparando el instrumento que está provisto de un anillo de sombra con otro cuya sombra provenga de un disco de desplazamiento automático. Si no se dispusiera de datos experimentales para la estación, deberían utilizarse datos calculados para cielos cubiertos con la relación b/r correspondiente. Así pues:

$$\frac{D_v}{D_{\text{cubierto}}} = \frac{b}{r} \cos^3 \delta (t_{\text{ocaso}} - t_{\text{orto}}) \cdot \sin \Phi \cdot \sin \delta + \cos \Phi \cdot \cos \delta \cdot (\sin t_{\text{ocaso}} - \sin t_{\text{orto}})$$

donde δ es la declinación del Sol; Φ es la latitud geográfica; y t_{orto} y t_{ocaso} son los ángulos horarios del Sol para el orto y el ocaso, respectivamente (véase más arriba una explicación detallada).



Comparación entre los factores de corrección calculados y determinados empíricamente para un anillo de sombra, con $b/r = 0,169$; f indica las curvas calculadas, F las empíricas

Fuente: Dehne (1980)

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Bass, A. M. y R. J. Paur, 1985: "The ultraviolet cross-sections of ozone: I, The Measurements", en *Atmospheric Ozone* (C. S. Zerefos y A. Ghazi, eds.), Reidel, Dordrecht, págs. 606 a 610.
- Bernhard, G. y G. Seckmeyer, 1999: "Uncertainty of measurements of spectral solar UV irradiance", en *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, núm. D12, págs. 14321 a 14345.
- Bodhaine, B. A., N. B. Wood, E. G. Dutton y J. R. Slusser, 1999: "On Rayleigh optical depth calculations", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 16, págs. 1854 a 1861.
- Comisión Electrotécnica Internacional, 1987: *International Electrotechnical Vocabulary*, cap. 845: "Lightning", IEC 60050-845. Ginebra.
- Comisión Internacional de Iluminación, 1987: *Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters*, CIE 69-1987. Viena.
- , 1994: *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*, CIE 108-1994. Viena.
- Cordero R. R., G. Seckmeyer, A. Damiani, F. Labbe y D. Laroze, 2013: "Monte Carlo-based uncertainties of surface UV estimates from models and from spectroradiometers", en *Metrologia*, vol. 50, núm. 5, págs. L1 a L5.
- Cordero R. R., G. Seckmeyer, D. Pissulla, L. DaSilva y F. Labbe, 2008: "Uncertainty evaluation of spectral UV irradiance measurements", en *Measurement Science and Technology*, vol. 19, núm. 4, págs. 1 a 15.
- Dehne, K., 1980: "Vorschlag zur standardisierten Reduktion der Daten verschiedener nationaler Himmelsstrahlungs-Messnetze", en *Annalen der Meteorologie* (Neue Folge), vol. 16, págs. 57 a 59.
- Drummond, A. J., 1956: "On the measurement of sky radiation", en *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, serie B, 7, págs. 413 a 436.
- Forgan, B. W., 1996: "A new method for calibrating reference and field pyranometers", en *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 13, págs. 638 a 645.
- Frouin, R., P.-Y. Deschamps y P. Lecomte, 1990: "Determination from space of atmospheric total water vapour amounts by differential absorption near 940 nm: Theory and airborne verification", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 29, págs. 448 a 460.
- Kerr, J. B. y T. C. McElroy, 1993: "Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion", en *Science*, vol. 262, págs. 1032 a 1034.
- Le Baron, B. A., W. A. Peterson e I. Dirmhirn, 1980: "Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands", en *Solar Energy*, vol. 25, págs. 1 a 13.
- McKinlay, A. F. y B. L. Diffey, 1987: "A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin", en *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (W. F. Passchier y B. F. M. Bosnjakovic, eds.), Elsevier, Ámsterdam, págs. 83 a 87.
- Michalsky, J. J., 1988a: "The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050)", en *Solar Energy*, vol. 40, núm. 3, págs. 227 a 235.
- , 1988b: "Errata. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050)", en *Solar Energy*, vol. 41, núm. 1, pág. 113.
- Organización Internacional de Normalización, 1990a: *Solar Energy – Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation*, ISO 9060:1990. Ginebra.
- , 1990b: *Solar Energy – Calibration of Field Pyrheliometers by Comparison to a Reference Pyrheliometer*, ISO 9059:1990. Ginebra.
- , 1990c: *Solar Energy – Field Pyranometers – Recommended Practice for Use*, ISO/TR 9901:1990. Ginebra.
- , 1992: *Solar Energy – Calibration of Field Pyranometers by Comparison to a Reference Pyranometer*, ISO 9847:1992. Ginebra.
- , 1993: *Solar Energy – Calibration of a Pyranometer Using a Pyrheliometer*, ISO 9846:1993. Ginebra.
- Organización Internacional de Normalización/Comisión Electrotécnica Internacional, 2008: *Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO/IEC Guide 98-3:2008, incl. Suppl. 1:2008/Cor 1:2009, Suppl. 1:2008, Suppl. 2:2011. Ginebra. (Equivalente a: Comité Conjunto para las Guías en Metrología, 2008: *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100:2008, corregido en 2010).
- Organización Meteorológica Mundial, 1986: *Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements*. World Climate Research Programme Publications Series No. 7 (WMO/TD-No. 149). Ginebra.
- , 1993: *Informe de la segunda reunión de los administradores de investigaciones sobre el ozono de las Partes en el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono* (Ginebra, 10 a 12 de marzo de 1993). Informe N° 32 del Proyecto Mundial sobre la Investigación y la Vigilancia del Ozono de la OMM. Ginebra.

- , 1996: *WMO/UMAP Workshop on Broad-band UV Radiometers* (Garmisch-Partenkirchen, Germany, 22–23 April 1996). Global Atmosphere Watch Report No. 120 (WMO/TD-No. 894). Ginebra.
- , 1998: *Baseline Surface Radiation Network (BSRN): Operations Manual* (WMO/TD-No. 879). Ginebra.
- , 1999a: *Guidelines for Site Quality Control of UV Monitoring*. Global Atmosphere Watch Report No. 126 (WMO/TD-No. 884). Ginebra.
- , 1999b: *Report of the LAP/COST/WMO Intercomparison of Erythral Radiometers* Thessaloniki, Greece, 13–23 September 1999). Global Atmosphere Watch Report No. 141 (WMO/TD-No. 1051). Ginebra.
- , 2001: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 1: Spectral Instruments*. Global Atmosphere Watch Report No. 125 (WMO/TD-No. 1066). Ginebra.
- , 2003: *Quality Assurance in Monitoring Solar Ultraviolet Radiation: the State of the Art*. Global Atmosphere Watch Report No. 146 (WMO/TD-No. 1180). Ginebra.
- , 2005: *WMO/GAW Experts Workshop on a Global Surface-based Network for Long Term Observations of Column Aerosol Optical Properties* (Davos, Switzerland, 8–10 March 2004). Global Atmosphere Watch Report No. 162 (WMO/TD-No. 1287). Ginebra.
- , 2008: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 2: Broadband Instruments Measuring Erythemally Weighted Solar Irradiance*. Global Atmosphere Watch Report No. 164 (WMO/TD-No. 1289). Ginebra.
- , 2010a: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 3: Multi-channel Filter Instruments*. Global Atmosphere Watch Report No. 190 (WMO/TD-No. 1537). Ginebra.
- , 2010b: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 4: Array Spectroradiometers*. Global Atmosphere Watch Report No. 191 (WMO/TD-No. 1538). Ginebra.
- , 2011: *Data Quality Objectives (DQO) for Solar Ultraviolet Radiation Measurements. Part I* (Adición a *Quality Assurance in Monitoring Solar Ultraviolet Radiation: the State of the Art*, informe N° 149 del Programa de la Vigilancia de la Atmósfera Global). Informe N° 198 del Programa de la Vigilancia de la Atmósfera Global. Ginebra.
- Parrish, J. A., K. F. Jaenicke y R. R. Anderson, 1982: "Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin", en *Photochemistry and Photobiology*, vol. 36, págs. 187 a 191.
- Rüedi, I., 2001: *International Pyrheliometer Comparison IPC-IX, Results and Symposium*. MeteoSwiss Working Report No. 197, Davos y Zúrich.
- Schneider, W., G. K. Moortgat, G. S. Tyndall y J. P. Burrows, 1987: "Absorption cross-sections of NO₂ in the UV and visible region (200-700 nm) at 298 K", en *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, vol. 40, págs. 195 a 217.
- Observatorio Naval de Estados Unidos, 1993: *The Astronomical Almanac*. Oficina del Almanaque Náutico, Washington D. C.
- Vigroux, E., 1953: "Contribution à l'étude expérimentale de l'absorption de l'ozone", en *Annales de Physique*, tomo 8, págs. 709 a 762.
- Webb, A.R., B.G. Gardiner, M. Blumthaler and P. Foster, 1994: "A laboratory investigation of two ultraviolet spectroradiometers", en *Photochemistry and Photobiology*, vol. 60, núm. 1, págs. 84 a 90.
-