

RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE LA SERIE DE RADIACIÓN SOLAR DE GIRONA (1990-2013)

Javier MUÑOZ¹, Josep CALBÓ¹, Josep-Abel GONZÁLEZ¹,
Arturo SANCHEZ-LORENZO¹, Alejandro SANCHEZ-ROMERO¹
¹*Grupo de Física Ambiental, Universitat de Girona*

javi_jmm@hotmail.com, josep.calbo@udg.edu, jose.gonzalez@udg.edu, arturo.sanchez@udg.edu,
alejandro.sanchez@udg.edu

RESUMEN

En la Universitat de Girona se iniciaron las medidas de radiación solar a finales de los años 80 del siglo pasado. Se disponía en aquel momento de dos piranómetros Kipp & Zonen CM11 propiedad del Institut Català d'Energia, uno de ellos provisto de banda parasol para la medida de la componente difusa. La estación se ha ido mejorando, de manera que en la actualidad se dispone de otros dos piranómetros, ambos ventilados y uno de ellos dispuesto sobre un seguidor solar y provisto de una esfera sombreadora. Además, también se realiza la medida de la irradiancia directa, mediante un pirheliómetro Kipp & Zonen CH1. Todos los instrumentos se calibran periódicamente. La estación es sometida a una inspección diaria, y los datos se guardan a resolución minutal, de acuerdo todo ello con las indicaciones de la Baseline Surface Radiation Network (BSRN). El presente trabajo explica el proceso de reconstrucción de toda la serie, obteniendo a partir de los datos originales los valores horarios, diarios y mensuales. Se aplican las oportunas correcciones a la componente difusa cuando ha sido medida con banda parasol, así como controles de calidad y consistencia entre las distintas componentes de la radiación solar. Se analiza después la evolución de la radiación solar global en Girona desde principios de los 90 a la actualidad, enmarcando los resultados en el incremento de radiación solar observado en España durante este periodo. Se ha encontrado que en los últimos 20 años (1994-2013), la radiación solar global media anual ha aumentado a un ritmo de 3.6 Wm^{-2} por década; buena parte de este aumento se debe a lo que ocurre en verano, con una tendencia de 9.1 Wm^{-2} por década. Estos valores son consistentes con lo que se ha observado en el entorno regional (Península Ibérica y sur de Francia).

Palabras clave: Radiación solar, Radiación global, directa, difusa, Series temporales, Tendencias.

ABSTRACT

At the Universitat de Girona, solar radiation measurements started by the late 1980s. Initially, two Kipp & Zonen CM11 pyranometers owned by the Institut Català d'Energia were installed, one of them equipped with a shadow band for the measurement of the diffuse component. The station has been improved, so currently there are two other pyranometers, both ventilated and one of them arranged on a sun tracker with a shadow sphere. Moreover, direct radiation measurements are also carried out, by using a Kipp & Zonen CH1 pirheliometer. All instruments are periodically calibrated. The station is subject to daily inspection, and the data is saved at 1-minute resolution, all in accordance with the directions of the Baseline Surface Radiation Network (BSRN). This paper explains the process of reconstruction of an entire series of hourly, daily, and monthly data, obtained from the original data. Appropriate

corrections to the diffuse component have been applied when measured with shadow band; quality controls and consistency tests between the various components of solar radiation have been performed as well. The evolution of the global solar radiation in Girona is then analysed from the early 1990s up to today, in the framework of the observed increase of solar radiation in Spain during this period. It is found that in the last 20 years (1994-2013), the annual average global solar radiation has increased at a rate of 3.6 Wm^{-2} per decade; much of this increase is due to what happens in summer, with a trend of 9.1 Wm^{-2} per decade. These values are consistent with what has been observed in the regional environment (Iberian Peninsula and southern France).

Key words: Solar Radiation, Global, Diffuse, Direct Radiation, Time Series, Trends.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar incidente en la cima de la atmosfera se extiende desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano ($0.2\text{-}4 \mu\text{m}$). Es afectada por los gases, partículas, y nubes, de manera que una fracción es absorbida, mientras que otra parte del haz de luz es dispersado. En consecuencia, la radiación solar llega a la superficie de la tierra con una componente directa (la que proviene de la dirección donde se encuentra el sol) y una componente difusa (la que proviene del resto de la bóveda celeste como resultado de los procesos de dispersión). La combinación de ambas componentes se denomina radiación global. En general, la radiación solar es un fenómeno de gran importancia para la meteorología y la climatología, así como para otros muchos aspectos de la vida diaria, como los ecosistemas naturales, la agricultura, la producción de energía eléctrica, o el turismo, ya que se trata de la única fuente relevante de energía para la Tierra. En particular en relación con el cambio climático reciente, el estudio de la radiación solar ha redoblado su interés, ya que se trata de la componente clave del balance energético planetario que los forzamientos radiativos de carácter antropogénico pueden estar modificando.

A pesar la importancia de este fenómeno, las medidas de la radiación solar son más bien escasas desde un punto de vista histórico. De hecho, a escala global hay escasísimas series de radiación solar desde antes del año geofísico internacional (1957-58), y muchas de ellas empiezan bastante más tarde (Wild, 2009). En España, un trabajo reciente (Sanchez-Lorenzo et al., 2013a) sólo ha podido contar con unas pocas series continuas desde mediados de los años 1980. Existen algunas medidas anteriores, pero discontinuas o de calidad no contrastada (Antón et al., 2014). La escasez de datos de radiación solar se ha compensado en parte por la existencia de muchas series largas de insolación (horas de sol al día), que han permitido estudiar su evolución decadal, en algunos casos desde finales del siglo XIX, en varias zonas del planeta (Stanhill y Cohen, 2005; Sanchez-Lorenzo y Wild, 2012). Insolación y radiación global (y directa) están altamente correlacionadas, pero aun así es preferible analizar directamente datos de radiación si se desea determinar con mayor fiabilidad su evolución pasada.

En lo que se refiere a estudios del comportamiento de la radiación solar en áreas cercanas a la estación analizada, se tiene que destacar ante todo que la evolución temporal de la radiación, en las últimas décadas, viene marcada por el fenómeno conocido como *dimming/brightening*. Se trata de un decrecimiento de la radiación solar detectado en amplias zonas del mundo, entre los años 1950-1985 aproximadamente (Stanhill and Cohen, 2001), seguido de un aumento de la misma variable desde 1985 hasta nuestros días (Wild et al., 2005). En Europa

se ha descrito también este fenómeno (Sanchez-Lorenzo et al., 2013b), así como en la Península Ibérica, a partir de datos de insolación (Sanchez-Lorenzo et al., 2007). Recientemente, Sanchez-Lorenzo et al. (2013a) han analizado datos de radiación solar en 13 estaciones de España, para el período 1980-2010, y han detectado una tendencia significativa de 3.9 Wm^{-2} por década para la media de todas las estaciones. Hay que destacar que entre éstas no había ninguna estación en Cataluña, ni tampoco en otras zonas del este peninsular (ni Aragón ni Comunidad Valenciana).

El presente trabajo tiene como objetivo final el estudio del comportamiento de la radiación solar en Girona, durante las últimas tres décadas aproximadamente. Como primer paso, se deberá reconstruir una serie de datos de radiación global y difusa, lo más larga y completa posible, y con calidad comprobada. Después se analizará dicha serie para evaluar la variabilidad temporal de la radiación y, más concretamente, las posibles tendencias en escala anual o estacional.

2. INSTRUMENTACIÓN Y DATOS ORIGINALES

En la Escuela Politécnica Superior de la Universitat de Girona (UdG), y formando parte de los equipos del Grupo de Física Ambiental (GFA), existe desde mediados de los años 1980 una estación meteorológica y radiométrica. La ubicación actual es en la azotea de uno de los edificios ($41^{\circ}58'N$, $2^{\circ}50'E$, 110 m sobre el nivel del mar), que tiene un buen horizonte (solo en los sectores S y SE hay obstáculos por encima de 5° , pero que nunca alcanzan los 10°). La estación se ha trasladado una vez hasta su localización actual, pero fue un movimiento de menos de 100 m de distancia. La estación inició sus observaciones con los típicos sensores meteorológicos y con dos piranómetros termoeléctricos (uno de ellos provisto de banda sombreadora) para la medida de la irradiancia global y difusa en banda ancha respectivamente, que eran propiedad del Institut Català d'Energia (ICAEN). Más tarde se incorporaron otros dos piranómetros, también termoeléctricos, ya propiedad del grupo, y sucesivamente, la estación se fue ampliando: piranómetros fotovoltaicos, sensor de radiación fotosintéticamente activa (PAR), sensor de radiación eritemática (UV), pirgeómetro (para medir radiación infrarroja atmosférica), cámara de observación del cielo, seguidor solar y pirheliómetro, heliógrafo Campbell-Stokes, cielómetro, radiómetro multifiltro con banda rotatoria.

Los instrumentos utilizados para la medida de radiación solar en banda ancha han sido, a lo largo de todo el período analizado, modelos de tipo termoeléctrico de la marca Kipp & Zonen. Los piranómetros son del modelo CM11, considerado un estándar secundario (ISO 9060). A lo largo de los años, alguno de los piranómetros ha sido substituido por otro ejemplar idéntico. Inicialmente, la configuración de los instrumentos ICAEN y los instrumentos UdG era casi exactamente la misma: el sombreado de los dos piranómetros destinados a medir la radiación difusa se hacía mediante sendas bandas parasol. En un caso era una banda similar (pero de dimensiones inferiores) al modelo Kipp & Zonen CM11/121 y la segunda era una banda casi exactamente igual al modelo Eppley Shadowband. También en ambos casos, la señal eléctrica generada por los sensores se recogía en *dataloggers* Campbell CR10 (aunque en los primeros años de la estación ICAEN, ésta estaba dotada de un *datalogger hp*). El valor se medía cada segundo y se promediaba y guardaba cada cinco minutos. La estación ICAEN se ha mantenido casi sin variación desde los años 1990, con el único cambio de la banda sombreadora por otra Kipp & Zonen CM11/121. La estación UdG, en cambio, se ha ido mejorando. Actualmente, y desde 2004, los piranómetros están instalados sobre ventiladores

para evitar el depósito de suciedad, y sobre todo, de rocío. El piranómetro de difusa, también desde 2004, se instaló sobre el seguidor solar y cuenta con una esfera sombreadora. Por último, en el año 2005 se instaló también un pirheliómetro Kipp & Zonen CH1, con lo que se dispone también de la medida de irradiancia directa. Todas estas últimas medidas se registran con un *datalogger* Campbell CR1000, cada segundo, y se promedian y guardan cada minuto. La estación se supervisa diariamente. Con todo ello, la estación UdG se aproxima a los estándares de la Baseline Surface Radiation Network (BSRN).

Todos los instrumentos se han ido calibrando periódicamente, tal y como se resume en la Tabla 1. Nótese que por lo general las constantes de calibración han cambiado relativamente poco, lo que es una primera garantía de la estabilidad de los instrumentos y la calidad de los datos.

Fecha inicio/ calibración	Instrumentos ICAEN		Instrumentos UdG		
	Irradiancia global	Irradiancia difusa	Irradiancia global	Irradiancia difusa	Irradiancia directa
01/01/1986	KZ CM11	KZ CM11 + banda ~KZ ($V=0.210$)			
01/01/1993			KZ CM11	KZ CM11 + banda Eppley ($V=0.230$)	
01/01/1994			4.67	4.7	
22/01/1994	4.61	4.78			
23/06/1995			4.67	4.72	
13/01/1999			4.60	4.65	
16/12/2000	5.02	4.55			
25/09/2001	4.98	4.52			
25/09/2001		banda KZ ($V=0.185$)			
06/05/2004				Esfera en seguidor solar KZ	
01/01/2005					KZ CH1
14/06/2005			4.62	4.64	9.95
13/07/2007	(nuevo inst.) 4.86	(nuevo inst.) 5.00			
21/06/2007			4.65	4.67	9.89
27/07/2009			4.65	4.67	9.95
05/10/2012			4.62	4.65	10.00

Tabla 1: SECUENCIA TEMPORAL DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE RADIACIÓN SOLAR EN GIRONA, CON LAS CONSTANTES DE CALIBRACIÓN CORRESPONDIENTES, EN $mV/(W m^{-2})$. “V” INDICA LA RAZÓN ANCHO/RADIO DE LA BANDA SOMBRADORA.

3. CONTROLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS

3.1. Corrección de la irradiancia difusa

Las medidas de irradiancia difusa realizadas mediante el uso de una banda sombreadora deben corregirse, ya que la banda no oculta sólo el disco solar sino que también oculta una parte del cielo de donde proviene radiación difusa. Los fabricantes de bandas ya proporcionan información sobre cómo realizar la corrección, pero también existe amplia literatura científica sobre la mejor manera de hacerla (Sánchez et al., 2012). Lo más sencillo es asumir una radiancia isótropa, con lo que la corrección a aplicar depende sólo de la geometría de la banda y del día del año, que determinan conjuntamente el ángulo sólido subtendido por la banda desde el sensor (Drummond, 1956). Otros autores (Lebaron et al., 1990; Batlles et al., 1995) modifican esta corrección intentando parametrizar el efecto de un cielo no isótropo.

En el presente trabajo se ha aplicado solamente la corrección isótropa, que se expresa:

$$C = \frac{1}{1-X}; \text{ donde } X = \frac{2}{\pi} V [\cos \delta]^n \{ \Psi_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \Psi_0 \}$$

donde V es la razón ancho/radio de la banda, δ la declinación, φ la latitud del lugar, y Ψ_0 el ángulo horario a la salida/puesta del sol. El exponente n depende del perfil de la banda, y es igual a 1 para las bandas Kipp & Zonen e igual a 3 para bandas planas como la Eppley. Los valores de V para las tres bandas utilizadas se dan en la Tabla 1. Lógicamente, no se ha corregido la medida de la irradiancia difusa realizada mediante esfera sombreadora.

3.2. Intercomparación entre instrumentos

Puesto que para cada variable (irradiancia global y difusa) se dispone de dos instrumentos que están midiendo simultáneamente, es relativamente sencillo proceder a la intercomparación de las medidas. Para ello, en primer lugar se ha pasado de la alta resolución original de los datos a valores de irradiación horaria. Ello disminuye notablemente el efecto del posible desajuste del reloj que pueda sufrir alguno de los *dataloggers*. En segundo lugar, se han corregido los valores de la irradiación difusa tal y como se explica en el apartado anterior. A continuación, se han representado, año a año, los valores de un instrumento (ICAEN) respecto a los del otro (UdG), y se ha determinado la recta de ajuste (forzando a que pase por el origen de coordenadas). En este último paso, se han filtrado los valores claramente defectuosos (básicamente, cuando alguno de los instrumentos estuvo desconectado, o, sobre todo, cuando la banda o esfera sombreadora se desajustó por algún motivo).

La figura 1 muestra un ejemplo del resultado de este proceso para el año 2002. Resumiendo para todos los años analizados, los coeficientes de determinación siempre son superiores a 0.99; la razón entre los valores de irradiación global (pendiente de la recta ajustada) está entre 0.984 (en 1999) y 1.002 (2012); la razón entre los de difusa presenta valores entre 0.992 y 1.015 en el período 1995-2003 (cuando se usaba banda sombreadora en ambos instrumentos) y entre 0.933 y 0.972 a partir de 2004 (cuando la medida de la difusa por el instrumento UdG se realiza ya con esfera sombreadora). Estos resultados indican que los piranómetros estuvieron bien calibrados durante todo el período. En particular para la medida de radiación global, las diferencias medias han sido siempre menores al 1.6%. En cuanto a la radiación difusa, las diferencias encontradas, en particular en el segundo período, indican que será necesario profundizar más en la corrección de la medida efectuada con banda; además, debido a que la medida de difusa depende del buen posicionamiento de la banda o la esfera sombreadora, requiere un control de calidad más detallado, cosa que se ha dejado para investigaciones futuras.

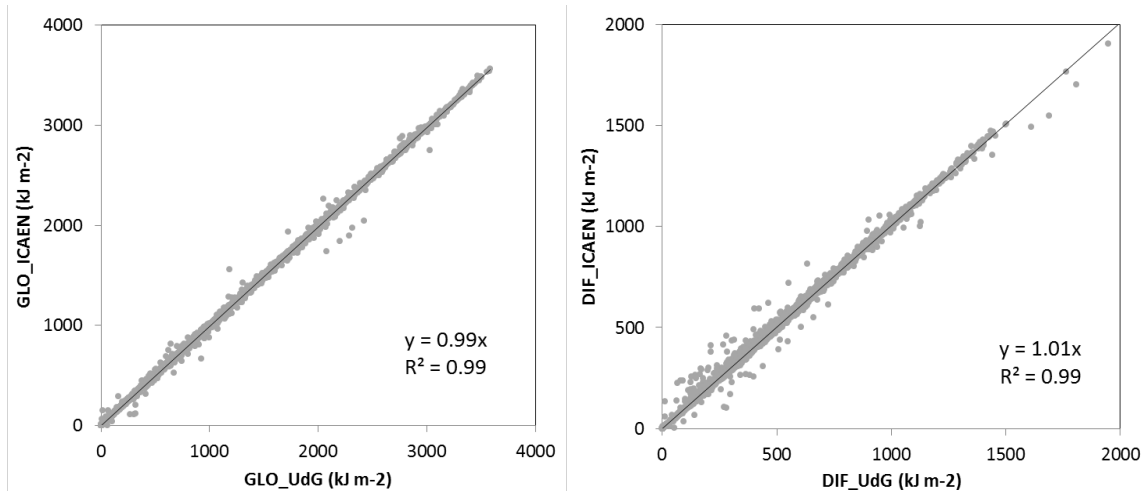


Fig. 1: Ejemplo de la relación entre las medidas de irradiación horaria global (izquierda) y difusa (derecha) tomadas con los instrumentos del ICAEN y de la UdG, para el año 2002. Se muestran las respectivas rectas ajustadas y los coeficientes de determinación.

3.3. Consistencia entre componentes global, directa y difusa

De acuerdo con las indicaciones de las redes de referencia en medidas radiativas (BSRN, ARM) la mejor medida de radiación solar global es la que se obtiene combinando la irradiancia directa normal (proyectada sobre la horizontal) con la irradiancia difusa medida con esfera sombreadora (Ohmura et al. 1998). En la estación de Girona, estas últimas variables sólo se miden desde el 2005, con lo que para el estudio de la serie completa desde el inicio de las medidas se ha optado por utilizar la irradiancia global medida directamente con el piranómetro sin sombreador. No obstante, se presenta aquí un primer análisis de las diferencias entre los dos métodos de medida de la irradiancia global. En concreto, se han analizado los datos del año 2013, a resolución minucial, y filtrando sólo para ángulos cenitales mayores que 80° . La representación gráfica de los valores se muestra en la Figura 2, donde es evidente el gran acuerdo que hay entre ambos métodos para medir la irradiancia global, aunque también se observa que esporádicamente existen desacuerdos, probablemente debidos a un mal posicionamiento del seguidor solar, lo que afecta a las medidas de irradiancia directa y difusa. No obstante, el 93% de los casos muestran una diferencia relativa inferior al 5%. Tanto de la pendiente de la recta ajustada, como del análisis de las diferencias entre ambos datos se concluye que la medida de irradiancia global con piranómetro sobreestima en un 2% aproximadamente la medida obtenida con pirheliómetro y piranómetro sombreado. En un trabajo reciente, Wang et al. (2013) encuentran diferencias medias menores, pero en este caso analizando los valores medios mensuales de unas 50 estaciones repartidas por el planeta y con registros entre 1995 y el 2011.

3.4. Agregación de datos a baja resolución temporal. Relleno de series

Finalmente, antes de analizar la evolución temporal de la radiación global en Girona, se ha procedido a la construcción de una serie a resolución mensual (pasando también por la resolución diaria), que se extiende de enero de 1994 a diciembre de 2013. Este es el período para el cual se dispone de datos medidos por el piranómetro de la UdG. Los datos anteriores a 1994, medidos sólo por el piranómetro ICAEN, se añadirán a la serie en el futuro, ya que habrá que aplicar un control de calidad algo más exhaustivo. De los 240 meses del período, en 55 meses (23%) no se tiene el dato del instrumento UdG. Mayoritariamente, son pérdidas de datos debido a los períodos de calibración, pero también se han descartado todos los meses

para los cuales, por cualquier motivo, se hayan perdido más del 2% (es decir, menos de un día) de los datos originales posibles (de 5 minutos o 1 minuto). La mayoría de los huecos dejados por los datos UdG pueden rellenarse directamente con el dato mensual obtenido de las medidas ICAEN. Para ello, este último valor se corrige con una constante igual a la inversa de la razón entre las medidas de ambos instrumentos correspondiente al año en cuestión (ver apartado 3.2). En unos pocos casos tampoco están disponibles todos los datos para el instrumento ICAEN; entonces se ha optado por calcular el valor mensual con los días disponibles y corregirlo en función de la relación entre días disponibles y días perdidos (es decir, asumiendo que los días perdidos habrían medido una radiación igual a la media del resto de días del mismo mes). Este último paso se ha hecho sólo si el número de días perdidos era inferior al 30%. Con todo este procedimiento, se ha obtenido la serie completa, con la sola excepción del mes de Agosto de 2006, para el cual fue imposible recuperar suficientes datos que garantizaran un valor mensual de calidad.

A la serie mensual completa de radiación global se le ha aplicado el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT, Alenxandersson y Moberg, 1997) para evaluar su homogeneidad temporal. En concreto, la serie se ha evaluado respecto a una serie de referencia construida a partir de 16 series de radiación global disponibles para España y el sureste de Francia (Sanchez-Lorenzo et al., 2013a; Sanchez-Lorenzo et al., 2013b; Nabat et al., 2014). Esta serie de referencia está calculada ponderando cada serie inicial en función de su correlación con la de Girona. El SNHT confirma que ninguno de los meses (ni las series estacionales ni la anual) en Girona presentan diferencias significativas al 95% respecto a la serie de referencia. En resumen, todo lleva a pensar que la serie obtenida es de alta calidad y puede ser usada para derivar valores medios climáticos y para analizar la variabilidad temporal de la radiación solar global en Girona.

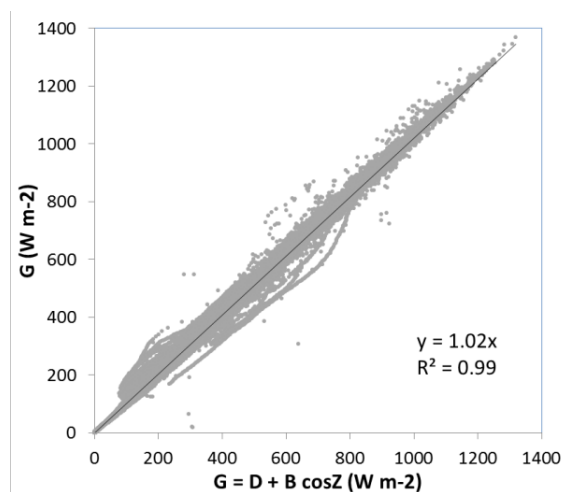


Fig. 2: Comparación entre la medida directa de la irradiancia global (G) y la medida mediante la composición de la difusa tomada con esfera sombreadora (D) y la directa normal (B) proyectada según el ángulo cenital (Z). Datos minutales del año 2013, para $Z < 80^\circ$.

4. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA RADIACIÓN SOLAR EN GIRONA

La Figura 3 muestra la evolución temporal de la irradiancia mensual para los 20 años analizados, es decir la serie reconstruida según lo explicado anteriormente. Es evidente el

gran ciclo anual que existe, con un máximo muy claro en verano (habitualmente en el mes de julio, aunque algún año se produce en junio o incluso en agosto) y un mínimo marcado en invierno (habitualmente en diciembre, pero algún año en enero). El valor medio de irradiación diaria para toda la serie es de $14.8 \text{ MJ m}^{-2}/\text{día}$, que es ligeramente superior a lo que encontraron Santabárbara et al. (1996) con tan solo 8 años de datos (1986-1993) para el mismo lugar ($14.1 \text{ MJ m}^{-2}/\text{día}$). La irradiación media diaria del mes de diciembre es tan solo de $6.1 \text{ MJ m}^{-2}/\text{día}$ y la del mes de julio alcanza los $23.5 \text{ MJ m}^{-2}/\text{día}$ ($23.4 \text{ MJ m}^{-2}/\text{día}$ en junio). Todos estos valores son también ligeramente superiores a los que aparecen en ICAEN (2001), calculados con datos de 1986 a 1997 (14.3 , 5.9 , $22.6 \text{ MJ m}^{-2}/\text{día}$ respectivamente).

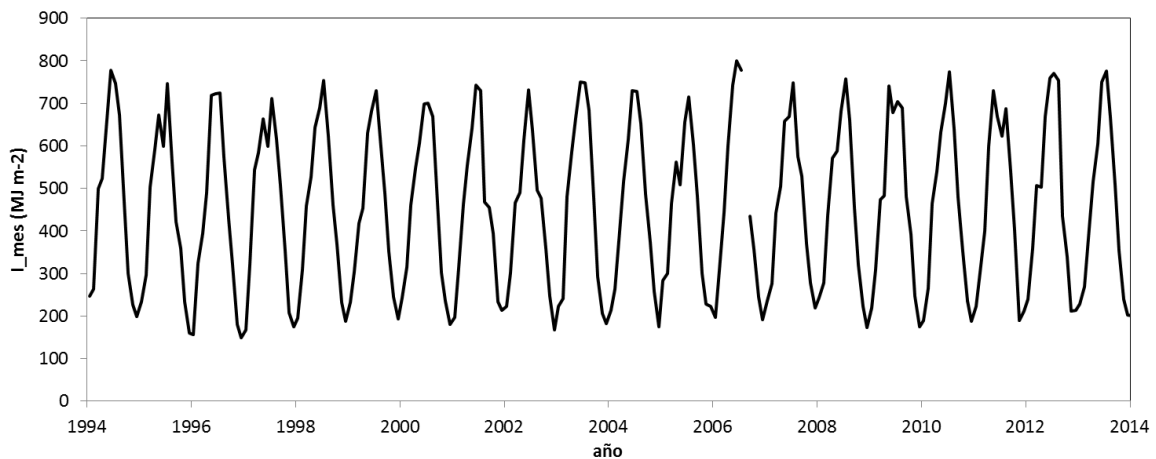


Fig. 3: Evolución de la irradiación global solar mensual en Girona durante los 20 años analizados.

Para determinar la existencia de tendencias en estos datos, primero se han convertido los valores de las irradiaciones mensuales ($\text{MJ m}^{-2}/\text{mes}$) en irradiancias medias (W m^{-2}), haciéndolos así más comparables entre ellos y con otros trabajos publicados (dado que hay meses con más días que otros meses, el factor de conversión no es el mismo para todos ellos). Segundo, estas irradiancias medias se han desestacionalizado, calculando las anomalías mensuales (resultado de restar la media de cada mes para todo el período a cada uno de los valores mensuales). A continuación se han calculado las series de anomalías para cada estación del año (agregando los datos de los tres meses correspondientes) y para el año completo. Finalmente se ha determinado la tendencia lineal y su significación estadística. Los resultados se muestran en la Tabla 2. La tendencia más destacable es la de la media anual, de $3.6 \text{ W m}^{-2}/\text{década}$, significativa al 95%, así como la del verano ($9.1 \text{ W m}^{-2}/\text{década}$, significativa al 90%), valores que confirman el importante *brightening* existente en la región, que ya ha sido descrito por otros autores. Así, estos valores están en consonancia con valores publicados correspondientes al entorno (Tabla 2). Por ejemplo, según Sanchez-Lorenzo et al. (2013), con datos de 13 estaciones españolas para el período 1985-2010 se obtiene una tendencia para la media anual de $3.9 \text{ W m}^{-2}/\text{década}$, valor que se convierte en $4.8 \text{ W m}^{-2}/\text{década}$ si se calcula para el período 1994-2012. Igualmente, con los datos publicados por Nabat et al. (2014), para tres estaciones del sureste de Francia, se han calculado las tendencias para el período 1994-2012 y los valores muestran un gran acuerdo, con tendencia positiva en todas las estaciones y el máximo en verano.

	<i>Período</i>	<i>Series</i>	<i>Invierno</i>	<i>Primav.</i>	<i>Verano</i>	<i>Otoño</i>	<i>Anual</i>
Presente trabajo	1994-2013	Girona	2.7	-2.5	9.1	4.8	3.6
Sanchez-Lorenzo et al. (2013a, actualizado)	1994-2012	13 en España	2.2	1.1	8.9	6.7	4.8
Nabat et al. (2014)	1994-2012	3 en Sureste Francia	5.0	1.0	5.2	3.8	3.7

Tabla 2: TENDENCIAS LINEALES PARA LAS SERIES DE ANOMALÍAS DE LA IRRADIANCIA MEDIA ESTACIONAL Y ANUAL. LAS UNIDADES SON $W m^{-2}/d\acute{e}cada$. LETRA NEGRITA INDICA TENDENCIA SIGNIFICATIVA AL 95%; LETRA CURSIVA INDICA TENDENCIA SIGNIFICATIVA AL 90%.

5. CONCLUSIONES

A partir de datos de dos piranómetros para la medida de radiación solar global se ha reconstruido una serie de 20 años (1994-2013) de valores mensuales para la localidad de Girona. Esta serie puede considerarse de alta calidad, ya que los instrumentos han estado correctamente instalados y mantenidos durante el período, y han sido calibrados periódicamente. Además, la intercomparación entre los datos de ambos instrumentos da un acuerdo excelente. Por último, el test de homogeneidad relativa SNHT, aplicado usando como referencia otras estaciones radiométricas del entorno, confirma la homogeneidad temporal de los registros durante el periodo de estudio, aspecto fundamental a la hora de evaluar las tendencias de las series climáticas.

El análisis de dicha serie confirma valores medios de irradiación diaria de $14.8 MJ m^{-2}$, con una importante variación estacional ($6.1 MJ m^{-2}/d\acute{a}a$ en diciembre y $23.5 MJ m^{-2}/d\acute{a}a$ en julio). Más interesante es la tendencia al aumento de la radiación global detectada con estos datos: la irradiancia media anual ha aumentado de manera significativa a un ritmo de $3.6 W m^{-2}/d\acute{e}cada$ (en total para los 20 años significa más de $7 W m^{-2}$, es decir más del 4% sobre el valor medio de la irradiancia). Este aumento se debe especialmente al ocurrido en verano ($9.1 W m^{-2}$ por década). Las tendencias detectadas muestran un gran acuerdo con valores ya encontrados anteriormente tanto en España como en el sureste de Francia.

En futuros trabajos se pretende extender la serie hacia el pasado (hasta el año 1986, cuando se iniciaron las medidas). Además, se analizará con mayor detalle la relación entre la irradiancia medida con un único piranómetro y la que se obtiene de combinar las componentes difusa y directa medidas independientemente. También se pretende completar una serie de datos de radiación difusa, variable que tiene gran interés dado que es indicadora, por ejemplo, de variaciones en la carga de aerosol atmosférico.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio Economía y Competitividad, a través del proyecto NUCLERSOL (CGL2010-18546). El cuarto autor está financiado por una beca postdoctoral Beatriu de Pinós de la Generalitat de Catalunya (2011 BP-B 00078). El quinto autor disfruta de una beca predoctoral del Ministerio de Educación y Cultura (FPU AP2010-

0917). Los datos de la estación ICAEN han sido suministrados por el Dr. José M. Baldasano (Barcelona Supercomputing Center), responsable del mantenimiento de la base de datos de dicha institución.

7. REFERENCIAS

- Alexandersson, H. y Moberg, A. (1997). “Homogenization of Swedish temperature data. Part I: homogeneity test for linear trends”. *Int. J. Climatol.*, 13, 191-201.
- Antón, M., Vaquero, J.M. y Aparicio, A.J.P. (2014). “The controversial early brightening in the first half of 20th century: A contribution from pyrliometer measurements in Madrid (Spain). *Glob. Planet. Change*, 115, 71–75.
- Batlles, F.J., Olmo, F.J. y Alados-Arboledas, L. (1995). “On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements”. *Sol. Energy*, 54(2), 105-114.
- Drummond, A.J. (1956). “On the measurement of sky radiation”. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim.*, 7, 413-436.
- ICAEN (2001). “Atlas de radiació solar a Catalunya, edició 2000”. Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Le Baron, B.A., Michalsky, J.J. y Perez, R. (1990). “A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions”. *Sol. Energy*, 44(5), 249-256.
- Nabat, P., Somot, S., Mallet, M., Sanchez-Lorenzo, A. y Wild, M. (2014). “Contribution of anthropogenic sulfate aerosols to the changing Euro-Mediterranean climate since 1980”. *Geophys. Res. Lett.*, in press, doi: 10.1002/2014GL060798.
- Ohmura, A., and Coauthors (1998). “Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research”. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2115–2136.
- Sánchez, G., Serrano, A., Cancillo, M.L., García, J.A. (2012). “Comparison of shadow-ring correction models for diffuse solar irradiance”. *J. Geophys. Res.*, 117, D09206.
- Sanchez-Lorenzo, A., Brunetti, M., Calbó, J., Martin-Vide, J. (2007). “Recent spatial and temporal variability and trends of sunshine duration over the Iberian Peninsula from a homogenized data set”. *J. Geophys. Res.*, 112, D20115.
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M. (2012). “Decadal variations in estimated surface solar radiation over Switzerland since the late 19th century”. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 8635–8644.
- Sanchez-Lorenzo A., Calbó, J. y Wild, M. (2013a). “Global and diffuse solar radiation in Spain: Building a homogeneous dataset and assessing their trends”. *Glob. Planet. Change*, 100, 343–352.
- Sanchez-Lorenzo, A.; Wild, M. and Trentmann (2013b). “Validation and stability assessment of the monthly mean CM SAF surface solar radiation data set over Europe against a homogenized surface dataset (1983-2005)”. *Rem. Sens. Environ.*, 134, 355–366.
- Santabàrbara, J.M., Calbó, J., Baldasano, J.M., Esteve, J. y Mitjà A. (1996). “Month-to-month variation of solar global radiation in Catalonia (Spain)”. *Int. J. Climatol.*, 16, 711-721.
- Stanhill, G., Cohen, S. (2001). “Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation”. *Agric. Forest Meteorol.* 107, 255–278.
- Stanhill, G., Cohen, S. (2005). “Solar radiation changes in the United States during the twentieth century: evidence from sunshine duration measurements. *J. Climate*, 18, 1503-1512.
- Wang, K., Dickinson, R. E., Ma, Q., Augustine, J. A. and Wild, M. (2013). “Measurement Methods Affect the Observed Global Dimming and Brightening”. *J. Climate*, 26, 4112-4120.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C.N., Dutton, E.G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A. (2005). “From dimming to brightening: decadal changes in surface solar radiation”. *Science*, 308, 847–850.
- Wild, M., 2009. Global dimming and brightening: a review. *J. Geophys. Res.*, 114, D00D16.