

ANÁLISIS DE MEDIDAS ACTINOMÉTRICAS REGISTRADAS EN EL PERIODO 1913-1923 EN CÁCERES (ESPAÑA)

Nieves BRAVO-PAREDES¹, María Cruz GALLEGO¹, Manuel ANTÓN¹,
Marcelino NÚÑEZ^{1,2}, José Manuel VAQUERO³

¹*Departamento de Física, Universidad de Extremadura, Badajoz (Spain).*

²*Agencia Estatal de Meteorología, Badajoz (Spain).*

³*Departamento de Física, Centro Universitario de Mérida, Universidad de Extremadura, Avda. Santa Teresa de Jornet 38, 06800 Mérida, Badajoz (Spain).*

nibravop@alumnos.unex.es

RESUMEN

El análisis de las tendencias de los datos actinométricos registrados en Cáceres en el periodo 1913-1920 muestra un decrecimiento significativo con pendiente (-0.16 ± 0.03) °C/año. Además, se ha realizado el análisis de las tendencias eliminando los factores externos que pueden alterarlo (erupción del volcán Katmai en 1912) mostrando un decrecimiento significativo también, pero con pendiente mayor (-0.28 ± 0.04) °C/año. También, se han analizado las tendencias en ambos periodos (1913-1920 y 1915-1920) para las distintas estaciones del año y, además, separando las medidas actinométricas por categorías de nubes al disponer de datos de cubierta nubosa. Estos resultados sugieren un decrecimiento de la radiación solar en Cáceres durante la segunda década del siglo XX en concordancia con el descenso radiativo en superficie observado en Europa entre finales del siglo XIX y principios del XX (“*early dimming*”).

Palabras clave: medidas actinométricas, actinómetro, *early dimming*, nubosidad.

ABSTRACT

The analysis of the trends of the actinometric data recorded in Cáceres in the period 1913-1920 shows a significant decrease with slope (-0.16 ± 0.03) °C/year. In addition, the analysis of the trends has been done without the external factors that can modify it (the Katmai eruption in 1912) showing a significant decrease as well, but with a greater slope of (-0.28 ± 0.04) °C/year. Also, trends have been analyzed in both periods (1913-1920 and 1915-1920) for the different seasons of the year and, in addition, separating the actinometric measurements by cloud categories because cloud cover data were recorded as well in the same period. These results suggest a decrease in solar radiation in Cáceres during the second decade of the 20th century in accordance with the radiative decrease at surface observed in Europe between the end of the 19th century and the beginning of the 20th (“*early dimming*”).

Key words: actinometric measurements, actinometer, *early dimming*, cloud cover.

1. INTRODUCCIÓN

La recuperación de datos del pasado es una tarea muy importante en las ciencias de la Tierra puesto que hay una gran cantidad de información de interés que se desconoce en libros y documentos preservados en archivos y bibliotecas. Por ello, se están realizando muchos esfuerzos para digitalizar estos datos y que la comunidad científica pueda tenerlos disponibles.

Esto se ve agravado cuando se trata de medidas de la radiación solar. La razón es que esta variable es relativamente reciente; en el caso de las medidas actinométricas, no se empezó a medir de manera sistemática hasta mediados del siglo XX (Matuszko, 2014). Y antes de esta fecha, los datos de radiación solar son muy escasos (Antón et al., 2014; Stanhill & Achiman, 2017; Wild, 2005). Por tanto, recuperar datos de esta variable correspondientes a las primeras décadas del siglo pasado es muy importante. Afortunadamente, se han preservado datos actinométricos registrados en Cáceres en el periodo 1913-1923 y, con ello, se puede contribuir a la reconstrucción de la radiación solar en la primera mitad del siglo XX.

Puesto que la radiación solar es la fuente de energía primaria para los procesos y fenómenos físicos que ocurren en la atmósfera, su estudio es crucial, especialmente la evaluación de las tendencias a largo plazo (ver, por ejemplo, Russak, 2009). En los estudios llevados a cabo hasta ahora, desde el inicio de la segunda mitad del siglo XX hasta el presente, se ha constatado que la radiación solar que llega a la superficie sufre variaciones. Desde el 1950 hasta el 1980 hay un decrecimiento, que es el llamado “*global dimming*”. Y desde 1980 hasta el presente, hay un aumento (“*brightening*”) (e.g. Stanhill & Cohen, 2001; Hatzianastassiou et al., 2005; Wild, 2005; Ohmura, 2009; Sanchez-Lorenzo et al., 2013; Wild, 2009; Russak, 2009).

En los pocos estudios llevados a cabo con medidas tomadas en la primera mitad del siglo XX, se sugiere un temprano aumento de la radiación solar, denominado “*early brightening*” (e.g. Stanhill & Cohen, 2005, 2008; Lachat & Wehrli, 2013). No obstante también hay autores que sugieren un temprano oscurecimiento, llamado “*early dimming*” (e.g. Hoyt, 1979; Ohvri et al., 2009; Antón et al., 2017; Kazadzis et al., 2018).

Por tanto, hay una cierta controversia en la comunidad científica sobre las tendencias de la radiación solar en la primera mitad del siglo XX. El análisis de las medidas actinométricas registradas en Cáceres en el periodo 1913-1923 permitirá complementar los escasos estudios publicados hasta la fecha.

2. DATOS Y MÉTODO

2.1. Datos

Los datos actinométricos fueron registrados en Cáceres en el periodo 1913-1923 usando un actinómetro de Arago (ver Fig. 1). Este actinómetro se componía de dos termómetros con depósitos esféricos en cada uno de ellos. Uno de los depósitos estaba ennegrecido con humo (termómetro de esfera ennegrecida). El otro termómetro no se ennegrecía (termómetro de esfera brillante). Ambos estaban encerrados en tubos de vidrio a los que se les realizaba completamente el vacío.

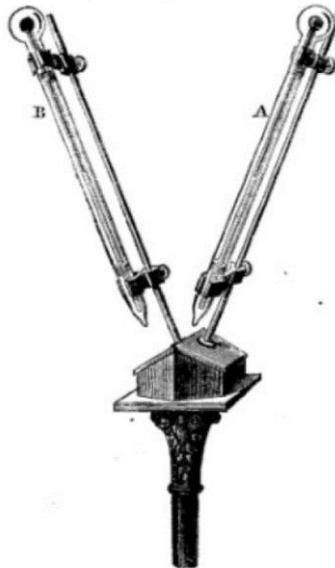


Fig. 1: Actinómetro de Arago (Ganot, 1881, p.869).

El funcionamiento de este actinómetro es el siguiente: cuando se expone a la luz del sol el termómetro de esfera ennegrecida, toma un valor mayor de temperatura que el de esfera brillante. La diferencia de lectura de ambos termómetros es una medida indirecta de la radiación solar que llega a la superficie. Con esta diferencia de temperaturas es con la que se ha trabajado en nuestro análisis.

Los datos originales están preservados en la biblioteca de la Delegación Territorial en Extremadura de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en un cuaderno de observación que cubre el periodo 1906-1923 (ver Fig. 2).

Los datos actinométricos fueron registrados a las 16h durante el periodo 1913-1920 y a las 13h para el año 1923. Desafortunadamente, no se registraron medidas actinométricas en los años 1921 y 1922.

Además, en este mismo libro se encontraron datos de nubosidad de Cáceres en el mismo periodo y se han usado de apoyo para el análisis. Los datos de nubosidad fueron registrados en fracción de cielo cubierto: en cuartos durante el periodo 1913-1920 (se registraron a las 8h y 16h) y en décimas para 1921-1923 (registrados a las 8h, 13h y 18h para 1921-1922 y a las 8h y 16h para el año 1923).

Con el fin de que la serie de datos a analizar tenga las mismas características, se ha decidido trabajar con el periodo 1913-1920 tanto para los datos actinométricos como para los datos de nubosidad.

Observaciones meteorológicas (Voluntarias).

DÍAS	TEMPERATURAS				ACTINOMETRO		Barborafo	NUBES A 12'		OBSERVACIONES
	18.10 m. del suelo (t)	en el suelo	EN EL SUBSUELO A		T	I		Núm. m.	Clase Dir. Velocidad	
		6.30 m.	1.00 m.	1.30 m.	seg. d'	Índice. Horas				
1	24				17.8	18.5	2.0			
2	24				18.0	19.0	1.0			Las observaciones en el actinómetro se realizaron a las 11 horas.
3	24				23.6	22.5	4.2			
4	22				22.3	22.5	4.0			
5	21				22.1	22.5	4.0			
6	21				22.6	22.2	2.4			
7	21				23.2	20.5	2.5			
8	23				22.8	20.6	3.6			
9	24				25.2	23.4	3.4			
10	25				20.7	23.6	4.2			
Suma	195				214.0	215.2	28.2			
11	20				22.2	22.0	4.4			
12	21				22.0	22.0	6.2			
13	21				22.2	22.2	6.6			
14	20				22.2	22.2	6.2			
15	22				23.4	23.2	5.2			
16	22				16.4	16.0	16.0			Escasas
17	24				14.0	13.0	16.0			Escasas
18	20				20.2	19.2	16.0			Escasas
19	20				11.6	9.6	1.6			Escasas
20	20				22.8	22.4	1.6			
Suma	365				233.6	212.4	21.2			
21	32				25.2	20.8	3.6			Escasas
22	24				26.6	26.8	4.2			Escasas
23	26				16.8	14.6	1.6			
24	26				28.0	25.8	3.2			
25	26				22.2	22.4	3.4			
26	26				20.2	20.4	3.8			
27	26				22.2	22.2	3.6			
28	26				22.2	22.0	3.2			
29	26				16.2	16.2	1.6			Escasas
30	26				20.8	18.4	3.4			
31	26				20.8	22.2	3.0			
Suma	291				222.2	222.8	21.4			
Media del mes	29.1				22.6	22.4	2.0			

INSTRUCCIONES

Fig. 2: Ejemplo de hoja del libro de observaciones para las medidas actinométricas del mes de enero de 1916.

2.2. Método

El estudio de la tendencia a largo plazo se ha llevado a cabo mediante un análisis de regresión lineal aplicado a la serie temporal diaria. Puesto que las medidas actinométricas presentan un comportamiento estacional (Fig. 3), se ha decidido evaluar este comportamiento y, posteriormente, desestacionalizar la serie temporal diaria.

Para hallar el comportamiento estacional de la diferencia de temperaturas del actinómetro de Arago, se ha calculado el año tipo diario seleccionando, por ejemplo, el 1 de enero de todos los años de la serie actinométrica y realizando su promedio. Así se tendrá el 1 de enero tipo. Si se realiza esto para cada día del año, se obtendrá el año tipo diario. Para obtener los valores desestacionalizados diarios se sustrae el comportamiento estacional a los valores diarios actinométricos.

Además, con el fin de analizar los datos actinométricos teniendo en cuenta los diferentes estados del cielo, según la nubosidad, se han clasificado los datos actinométricos desestacionalizados por categorías de cielo cubierto.

Por último, se han analizado las tendencias de la serie de datos actinométricos desestacionalizados para cada estación del año.

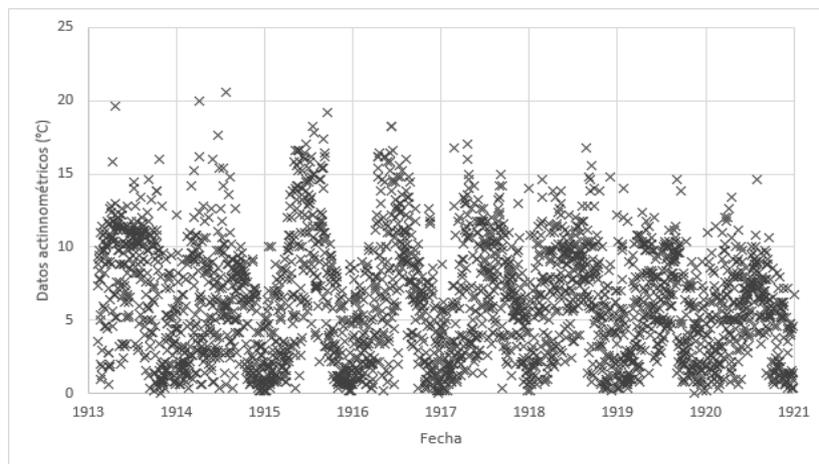


Fig. 3: Comportamiento estacional de la serie actinométrica diaria desde enero de 1913 hasta diciembre de 1920 en Cáceres.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra la evolución de la serie temporal diaria desestacionalizada de los datos actinométricos desde enero de 1913 hasta diciembre de 1920 en Cáceres. Además, se ha incluido la serie mensual para conseguir un suavizado de los datos diarios.

Se ha analizado la tendencia de la serie actinométrica para todo el periodo (1913-1920) y se ha obtenido una pendiente ligeramente negativa, estadísticamente significativa al 95% de nivel de confianza, con un valor de $(-0.16 \pm 0.03) \text{ }^\circ\text{C/año}$.

Sin embargo, se observan valores más bajos respecto de todo el periodo al inicio de la serie (años 1913 y 1914). Esto puede estar relacionado con la influencia de la erupción del volcán Katmai en junio de 1912 en Alaska. Esta erupción fue la más importante del siglo XX (Hildreth & Fierstein, 2012). En los datos que estamos considerando, se aprecian sus efectos incluso un año después de su erupción.

Puesto que los efectos de esta erupción alteran el análisis de la tendencia de la serie actinométrica, se han eliminado los dos primeros años y se ha vuelto a calcular la tendencia para el periodo 1915-1920. Se obtiene, entonces, una pendiente negativa, aunque ligeramente mayor que la anterior, con un valor estadísticamente significativo de $(-0.28 \pm 0.04) \text{ }^\circ\text{C/año}$.

El estudio de las tendencias de los datos actinométricos desestacionalizados se ha llevado a cabo mediante la evaluación de las pendientes obtenidas del análisis de regresión lineal. La Tabla 1 muestra dichas pendientes separados por cada categoría de cielo cubierto (variando de 0/4-cielo despejado a 4/4-cielo cubierto), para ambos periodos estudiados (1913-1920 y 1915-1920). Las pendientes estadísticamente significativas se muestran en negrita.

Se puede comprobar que todas las pendientes son negativas, variando desde $-0.26 \text{ }^\circ\text{C/año}$ para 0/4 (cielos despejados) hasta $-0.04 \text{ }^\circ\text{C/año}$ para 4/4 (cielos cubiertos) para el periodo 1913-1920, y variando desde $-0.47 \text{ }^\circ\text{C/año}$ para cielos despejados hasta -

0.06 °C/año para cielos cubiertos para el periodo 1915-1920. También, se observa que las pendientes son menores para el periodo 1913-1920 que para el periodo 1915-1920.

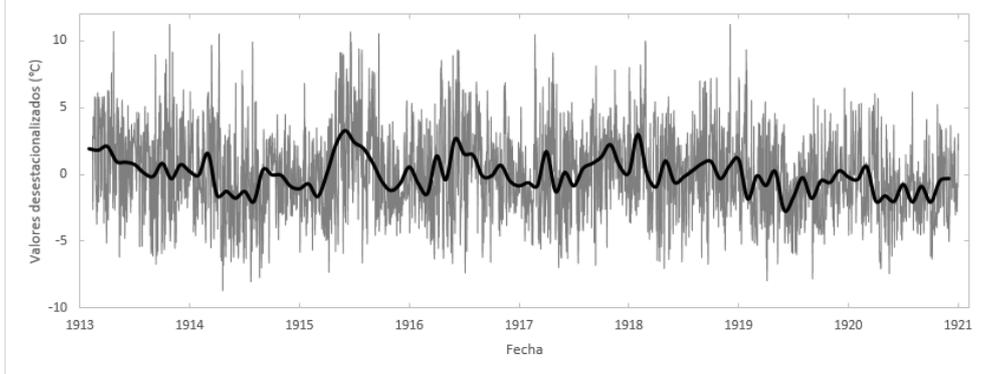


Fig. 4: Evolución de la serie temporal diaria desestacionalizada de los datos actinométricos desde enero de 1913 hasta diciembre de 1920 en Cáceres.

Tendencias lineales para cada categoría de nubosidad (°C/año)		
	1913-1920	1915-1920
0/4	-0.26 ± 0.04	-0.47 ± 0.05
1/4	-0.19 ± 0.07	-0.31 ± 0.10
2/4	-0.19 ± 0.07	-0.30 ± 0.12
3/4	-0.11 ± 0.07	-0.27 ± 0.11
4/4	-0.04 ± 0.03	-0.06 ± 0.05

Tabla 1: Tendencias lineales de los valores diarios desestacionalizados para cada categoría de nubosidad en °C/año (\pm error estándar) en Cáceres para ambos periodos. Las tendencias estadísticamente significativas están escritas en negrita.

Además, la categoría de cielos cubiertos en ambos periodos y la categoría 3/4 para el periodo 1913-1920 no muestran pendientes significativas.

La Tabla 2 muestra las pendientes obtenidas sin separar los valores diarios actinométricos por categoría de nubosidad y para la categoría de cielos despejados, para ambos periodos estudiados (1913-1920 y 1915-1920) en Cáceres. Las pendientes estadísticamente significativas se muestran en negrita.

Todas las pendientes son negativas excepto para la estación de invierno. Y, además, solo son significativas las tendencias en la estación de verano para ambos periodos y para ambos estudios.

Todos estos resultados están de acuerdo con el decrecimiento del índice de transparencia en Madrid durante el periodo 1915-1922 mostrado por Antón et al. (2017). Estos autores mostraron un descenso significativo de la radiación solar entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, fenómeno al que llamaron “*early dimming*”, y que, además, ha sido observado en otras áreas europeas (e.g. Brazdil et al., 1994; Brunetti et al., 2009; Sanchez-Lorenzo & Wild, 2012; Founda et al., 2014; Matuszko, 2014; Stanhill & Achiman, 2017).

Por tanto, las pendientes negativas observadas para los datos actinométricos de Cáceres pueden ser asociados con la etapa final de este “*early dimming*”.

Tendencias lineales para cada estación (°C/año)	Tendencias lineales para cada estación para cielos despejados (0/4) (°C/año)			
	1913-1920	1915-1920	1913-1920	1915-1920
Invierno	0.012 ± 0.049	0.13 ± 0.07	0.06 ± 0.08	0.21 ± 0.12
Primavera	-0.21 ± 0.06	-0.16 ± 0.09	-0.45 ± 0.08	-0.51 ± 0.13
Verano	-0.29 ± 0.05	-0.88 ± 0.07	-0.33 ± 0.06	-0.88 ± 0.07
Otoño	-0.13 ± 0.05	-0.25 ± 0.07	-0.16 ± 0.08	-0.03 ± 0.12

Tabla 2: Tendencias lineales de los valores diarios desestacionalizados para cada categoría estación en °C/año (\pm error estándar) en Cáceres para ambos periodos. Las tendencias estadísticamente significativas están escritas en negrita.

4. CONCLUSIONES

La tendencia lineal de los datos actinométricos diarios desestacionalizados para el periodo 1913-1920 muestra una pendiente negativa (-0.16 ± 0.03) °C/año, estadísticamente significativa. La tendencia de los datos actinométricos sin los efectos de la erupción del volcán Katmai (periodo 1915-1920) muestra una pendiente mayor (-0.28 ± 0.03) °C/año, también significativa.

Las tendencias lineales de los datos actinométricos separados por categoría de nubosidad muestran pendientes negativas. Para el periodo 1913-1920 solo las categorías 1/4 (cielos completamente despejados) y 2/4 son estadísticamente significativas. Para el periodo 1915-1920 todas las categorías son significativas excepto la de cielos cubiertos (4/4).

El análisis de las tendencias de los datos actinométricos separados por estación del año muestra que solo la estación de verano es significativa tanto para el estudio de los datos actinométricos registrados en días completamente despejados (0/4) como para los datos sin separar por categorías de nubosidad. Además, es significativo en los periodos estudiados (1913-1920 y 1915-1920).

Las tendencias negativas de los datos actinométricos encontradas en este trabajo durante la segunda década del siglo XX está en correspondencia con el periodo final del fenómeno “*early dimming*” observado en varias estaciones europeas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Delegación Territorial de AEMET en Extremadura el acceso a los datos usados en este estudio. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por FEDER-Junta de Extremadura (GR15137 y IB16127) y por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (AYA2014-57556-P y CGL2017-87917-P).

REFERENCIAS

Antón, M., Román, R., Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J., & Vaquero, J. M. (2017). Variability analysis of the reconstructed daily global solar radiation under

- all-sky and cloud-free conditions in Madrid during the period 1887–1950. *Atmospheric Research*, *191*, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.013>
- Antón, M., Vaquero, J. M., & Aparicio, A. J. P. (2014). The controversial early brightening in the first half of 20th century: A contribution from pyrliometer measurements in Madrid (Spain). *Global and Planetary Change*, *115*, 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.013>
- Brazdil, A., Flocas, A. A., & Sahsamanoglou, H. S. (1994). Fluctuation of sunshine duration in central and South-Eastern Europe. *International Journal of Climatology*, *14*, 1017–1034. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140907>
- Brunetti, M., Lentini, G., Maugeri, M., Nanni, T., Auer, I., Böhm, R., & Schöner, W. (2009). Climate variability and change in the Greater Alpine Region over the last two centuries based on multi-variable analysis. *International Journal of Climatology*, *29*, 2197–2225. <https://doi.org/10.1002/joc.1857>
- Founda, D., Kalimeris, A., & Pierros, F. (2014). Multi annual variability and climatic signal analysis of sunshine duration at a large urban area of Mediterranean (Athens). *Urban Climate*, *10*(1), 815–830. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.09.008>
- Ganot, A. (1881). *Tratado elemental de Física Experimental y Aplicada y de Meteorología* (Octava Edición). Madrid: Carlos Bailly-Baillière.
- Hatzianastassiou, N., Matsoukas, C., Fotiadi, A., Pavlakis, K. G., Drakakis, E., Hatzidimitriou, D., & Vardavas, I. (2005). Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *5*, 2847–2867. <https://doi.org/10.5194/acp-5-2847-2005>
- Hildreth, W., & Fierstein, J. (2012). The Novarupta-Katmai Eruption of 1912 — Largest Eruption of the Twentieth Century: Centennial Perspectives. *US Geological Survey Professional Paper*, *259*.
- Hoyt, D. V. (1979). Atmospheric transmission from the Smithsonian Astrophysical Observatory Pyrliometric measurements from 1923 to 1957. *Journal of Geophysical Research*, *84*(C8), 5018–5028. <https://doi.org/10.1029/JC084iC08p05018>
- Kazadzis, S., Founda, D., Psiloglou, B. E., Kambezidis, H., & Mihalopoulos, N. (2018). Long-term series and trends in surface solar radiation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*, 2395–2411.
- Lachat, D., & Wehrli, C. (2013). Dimming and brightening trends in direct solar irradiance from 1909 to 2010 over Davos, Switzerland: Proportions of aerosol and gaseous transmission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *118*(8), 3285–3291. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50344>
- Matuszko, D. (2014). Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration. *International Journal of Climatology*, *34*(1), 228–234. <https://doi.org/10.1002/joc.3681>
- Ohmura, A. (2009). Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *Journal of Geophysical Research*, *114*(January), D00D05. <https://doi.org/10.1029/2008JD011290>
- Ohvri, H., Teral, H., Neiman, L., Kannel, M., Unstare, M., Tee, M., Laulainen, N. (2009). Global dimming and brightening versus atmospheric column

- transparency, Europe, 1906-2007. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(9), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2008JD010644>
- Russak, V. (2009). Changes in solar radiation and their influence on temperature trend in Estonia (1955-2007). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(1), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2008JD010613>
- Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2012). Decadal variations in estimated surface solar radiation over Switzerland since the late 19th century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(18), 8635–8644. <https://doi.org/10.5194/acp-12-8635-2012>
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., Brunetti, M., Guijarro, J. A., Hakuba, M. Z., Calbó, J., Bartok, B. (2015). Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012). *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 120, 9555–9569. <https://doi.org/10.1002/2015JD023321>
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., & Trentmann, J. (2013). Validation and stability assessment of the monthly mean CM SAF surface solar radiation dataset over Europe against a homogenized surface dataset (1983-2005). *Remote Sensing of Environment*, 134, 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.012>
- Stanhill, G., & Achiman, O. (2017). Early global radiation measurements: a review. *International Journal of Climatology*, 37, 1665–1671. <https://doi.org/10.1002/joc.4826>
- Stanhill, G., & Cohen, S. (2001). *Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences*. (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, P.M. Midgley, Eds.), *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 107). [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0)
- Stanhill, G., & Cohen, S. (2005). Solar radiation changes in the United States during the twentieth century: Evidence from sunshine duration measurements. *Journal of Climate*, 18(10), 1503–1512. <https://doi.org/10.1175/JCLI3354.1>
- Stanhill, G., & Cohen, S. (2008). Solar radiation changes in Japan during the 20th century: Evidence from sunshine duration measurements. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 86(1), 57–67. <https://doi.org/10.1175/JCLI3354.1>
- Wild, M. (2005). From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. *Science*, 308(5723), 847–850. <https://doi.org/10.1126/science.1103215>
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening. *Global Environmental Change*, 114(November 2008), 39–47. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_27