



Análisis de la variabilidad de la radiación solar global diaria a largo plazo reconstruida en la zona circunlacustre del Titicaca

Analysis of the variability of long-term daily global solar radiation reconstructed in the circumlacustrine area of Titicaca

Lelia Quispe Huamán^{1,*} 

¹Universidad Nacional de Juliaca, Perú.

Resumen

La radiación solar global tiene efectos beneficios y perjudiciales, por lo que es esencial conocer su comportamiento; además, medirla se considera una tarea difícil porque existe dificultad para disponer de datos diarios. Esto ha generado el desarrollo de modelos empíricos para su estimación en países emergentes. El objetivo de esta investigación fue analizar la reconstrucción de la radiación solar global en la zona circunlacustre entre 1956 y 2021. Para ello se realizó la validación de tres modelos empíricos, Bristow-Campbell, Chen y Hargreaves-Samani, usando datos medidos del piranómetro Kipp&Zonen de la estación meteorológica Puno entre 2014 y 2021, ya que no existen registros en el resto de la Región. Como resultado se obtuvo el coeficiente de variabilidad temporal porcentual de 0,690 %; 0,472 %; 0,434 %; 0,394 % y 0,400 % en las estaciones de Capachica, Moho, Yunguyo, Juli y Puno respectivamente. También se obtuvo los coeficientes de correlación de 0,922; 0,862 y 0,882, y el porcentaje de error media de la raíz cuadrática fue de 6,494 %; 8,278 % y 7,694 % respectivamente. En conclusión, el coeficiente de variabilidad temporal porcentual se encuentra por debajo del 30 %, esto indica que los valores promedios anuales son relativamente homogéneos; así mismo, el modelo Bristow-Campbell se ajusta mejor a la zona evaluada y resulta beneficioso para reconstruir una base de datos completa de radiación solar global. Finalmente, la base de datos constituye un recurso clave para investigaciones en cambio climático, energía solar y aplicaciones afines de interés científico y regional.

Palabras clave: Amplitud térmica, modelos empíricos, radiación solar global, reconstrucción, variabilidad, zona circunlacustre.

Abstract

Global solar radiation has beneficial and harmful effects, so it is essential to know its behavior; Furthermore, measuring it is considered a difficult task because there is difficulty in having daily data. This has generated the development of empirical models for its estimation in emerging countries. The objective of this research was to analyze the reconstruction of global solar radiation in the circumlacustrine area between 1956 and 2021. For this, the validation of three empirical models, Bristow-Campbell, Chen and Hargreaves-Samani, was carried out using data measured from the Kipp&Zonen pyranometer from the Puno meteorological station between 2014 and 2021, since there are no records in the rest of the Region. As a result, the percentage temporal variability coefficient of 0.690 % was obtained; 0.472 %; 0.434 %; 0.394 % and 0.400 % at the Capachica, Moho, Yunguyo, Juli and Puno stations respectively. Correlation coefficients of 0.922 were also obtained; 0.862 and 0.882, and the root mean square error percentage was 6.494 %; 8.278 % and 7.694 % respectively. In conclusion, the percentage temporal variability coefficient is below 30 %, this indicates that the annual average values are relatively homogeneous; Likewise, the Bristow-Campbell model fits better to the evaluated area and is beneficial for reconstructing a complete database of global solar radiation. Finally, with this database, it is expected to carry out studies on climate change, solar energy applications and, among others, by the scientific community, governors of the region and other interested parties.

Keywords: Thermal Amplitude, Empirical Models, Global Solar Radiation, Reconstruction, Variability, Circumlacustrine Zone.

Recibido: 14/10/2024

Aceptado: 15/01/2025

Publicado: 30/06/2025

***Autor para correspondencia:** Lquispe@unaj.edu.pe

Cómo citar: Quispe Huamán, L. (2025). Análisis de la variabilidad de la Radiación Solar Global Diaria a largo plazo reconstruida en la zona Circunlacustre del Titicaca. *Revista De Investigaciones*, 14(2), 56-68. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i2.6446>

Introducción

El sol es la principal fuente de energía renovable y emite radiación de forma constante fuera de la atmósfera terrestre (Madhlopa, 2022), filosóficamente se considera que da origen a la vida (Viswanathan, 2016). A medida que la radiación solar penetra en la atmósfera es atenuada por la atmósfera a través de la absorción, dispersión y reflexión (Roelandts, 2020). Además, es reflejada y dispersada por nubes y aerosoles (Trenberth et al., 2009) y estos contribuyen en la variación de la radiación solar especialmente en verano y otoño (Manara et al., 2016). La radiación solar es la principal fuente de energía sostenible más importante, que puede ser transformada en energía térmica y eléctrica (Alsamamra, 2019), y es influenciado por factores astronómicos, climatológicos, geográficos, geométricos, meteorológicos y físicos (Saffaripour et al., 2013). La escasez de registros largos y continuos es una seria limitación en muchos países (Woli & Paz, 2012), debido a restricciones técnicas y financieras (J. L. Chen et al., 2019). Es importante utilizar modelos matemáticos, estadísticos y de inteligencia artificial, que permitan predecir la radiación solar a partir de los datos meteorológicos disponibles (Ordoñez-Palacios et al., 2020); Chen *et al.*, 2019; (Feng et al., 2020), tales como la amplitud térmica, humedad relativa, horas de sol, horas máximas de sol, día del año, presión atmosférica y radiación extraterrestre (Samadianfard et al., 2019); (Jimenez et al., 2017); (Li et al., 2013); (Saffaripour et al., 2013). El acceso a datos fiables es de suma importancia para el desarrollo sostenible (Prieto & García, 2022) y son esenciales para diseñar (Feng et al., 2019), dimensionar (Adhikari et al., 2013); (Fan et al., 2019), y son requisitos para la instalación de sistemas como plantas y concentradores solares en cualquier parte del mundo para una energía futura sostenible (Gueymard & Wilcox, 2011); (Kariuki & Sato, 2018), además de gestionar sistemas de energía solar (Feng et al., 2020). La radiación solar y la temperatura de ambiente son los recursos básicos para los programas de implementación a gran escala de tecnologías de energía solar (Dhimish & Mather, 2019). A corto plazo es un parámetro clave para comprender el recurso solar y describir las características dinámicas (Castillejo-Cuberos & Escobar, 2020). La variabilidad de la radiación solar a largo plazo es desconocida en

muchas áreas del mundo (Feng et al., 2018) ya que las mediciones son poco frecuentes o no existen (Pfeifroth et al., 2018) y es preciso para diversos temas como el calentamiento global, disminución de los glaciares, los recursos hídricos, aplicaciones de energía solar fotovoltaica y térmica (Antón et al., 2017), cambios de evaporación, evaluación de la radiación solar directa y difusa de onda corta para el crecimiento de la biosfera, producción agrícola, arquitectura climática, turismo (Wild et al., 2017), también en el sector energético, así como en la meteorología y estudios climáticos para comprender la génesis y evolución del clima en la tierra (Babar et al., 2019); así mismo, en la próxima década tendrá impacto en el nivel de temperatura global de la superficie al aumentar en un 4,7 %, aumentará el nivel del mar en un 0,67 %, mientras tanto disminuirá en un 5,3 % los glaciares marinos (Bhargawa & Singh, 2019). La previsión de la radiación solar permite la generación fotovoltaica segura y fiable para un sistema de generación híbrida aislado o conectado a la red (Peñalva et al., 2022). Las soluciones de mitigación para la variabilidad de los recursos solares representan un prerrequisito para maximizar la efectividad de los costos de plantas fotovoltaicos en una red eléctrica (Perez et al., 2016).

Camayo Lapa et al. (2019) y el (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) 2003) en Junín y Puno, concluyeron que por su ubicación son áreas de alto potencial de Radiación solar global con valores promedios de 5,300 kWh/m² y 6,360 kWh/m² durante el periodo de estudios, respectivamente. La base de datos de radiación solar global diaria reconstruida en la presente investigación puede utilizarse para la generación de energía solar ya que los paneles solares fotovoltaicos convierten la luz solar en electricidad, lo que puede ser una fuente sostenible y limpia de energía para la región, esto debido a que los resultados que son superiores a 4,000 kWh/m² son rentables en su aplicación según la Organización Latinoamérica de Energía Solar. Así mismo, en la climatología ya que es un factor importante que influye en el clima y temperatura, y entre otros en la zona circunlacustre.

El objetivo es analizar la reconstrucción de la radiación solar global a largo plazo en la zona circunlacustre. La problemática de esta

investigación radica en la falta de datos precisos y a largo plazo esto debido a las restricciones de técnicas y financieras, lo que limita realizar estudios. La justificación radica en que, al abordar estos aspectos, se fomenta el desarrollo sostenible y la gestión adecuada de los recursos naturales. De la metodología de los tres modelos aplicados en este estudio, el modelo de Bristow-Campbell es el que mejor se desempeña en la zona de Puno y puede ser aplicada para reconstruir la radiación solar global diaria en otras zonas altoandinas.

Métodos

Ámbito o lugar de estudio

Figura 1
 Área circunlacustre



Nota: Tomado de SENAMHI (2022)

Descripción de métodos

Periodo de estudio o frecuencia de muestreo

El tamaño de la muestra para el análisis de la variabilidad de la radiación solar global dependió de la disponibilidad de datos. Para el análisis se utilizaron datos históricos de estaciones

La investigación se efectuó en la zona circunlacustre de la región de Puno, que corresponde al área que bordea al lago Titicaca, comprende las estaciones de Puno, Juli, Capachica, Moho y Yunguyo (Dejollx & Iltis, 1991).

El lago Titicaca está ubicado a más de 3810 m.s.n.m. (Martínez, 2007), en el altiplano andino peruano-boliviano, tiene un área de 8000 km², es cálido y mionomíctico (Lazzaro, 1985). En esta zona ocurre un efecto termorregulador, que consiste en que el lago absorbe el calor del sol durante el día y lo pierde de forma lenta durante la noche, debido a este efecto, disminuye fuertemente la amplitud térmica.

meteorológicas, por lo que el tamaño de la muestra estuvo influenciado por la cantidad y calidad de estos datos.

Se muestra las estaciones meteorológicas de la zona circunlacustre pertenecientes al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Zonal Puno (Tabla 1).

Tabla 1
 Estaciones meteorológicas SENAMHI Zonal Puno

Estación	Provincia	Distrito	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud M.S.N.M.	Año De Función
CAPACHICA	Puno	Capachica	15° 36' 56"	69° 50' 38.4"	3822	1956
YUNGUYO	Yunguyo	Yunguyo	16° 18' 28,2"	69° 04' 29,0"	3890	1964
MOHO	Moho	Moho	15° 23' 17,8"	69° 29' 03,4"	3836	1961
PUNO	Puno	Puno	15° 49' 34,5"	70° 00' 43,5"	3825	1964
JULI	Chucuito	Juli	16° 12' 13,6"	69° 27' 35,7"	3830	1956

Fuente: SENAMHI (2022).

Descripción detallada de los materiales, insumos e instrumentos

Piranómetro Kipp&Zonen

Es un instrumento que mide la radiación solar global desde todas las direcciones confiablemente (Fröhlich, 2006), (Maleki et al., 2017). Y está basada sobre una superficie recubierta de negro que se recalienta por la radiación solar. La

energía térmica se convierte en voltaje medible, que permite registrar la radiación solar global. El rango espectral que cubre es el intervalo de $0,3 \mu\text{m}$ - $2.8 \mu\text{m}$ (Manara et al., 2016). El equipo mencionado cuenta con el mantenimiento y calibración certificado por el fabricante, es de clase CMP11, tiene un piranómetro estándar secundario ISO cuyo nivel de sensibilidad varía de 7.000 a 14.000 $\mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

Figura 2

Piranómetro Kipp&Zonen



Nota: Tomado de SENAMHI (2022).

Modelos empíricos

Se aplican modelos empíricos en áreas donde no existen estaciones meteorológicas y los datos de radiación solar global no pueden ser medidos (Saffaripour et al., 2013); el rendimiento de los modelos empíricos pueden variar bajo diferentes condiciones climáticas de las zonas de estudio ((Aoun & Bouchouicha, 2017) dependiendo de temperaturas, horas sol, humedad, presión atmosférica (Saffaripour et al., 2013). La radiación solar global puede ser evaluada en términos de temperatura ambiente (Blal et al., 2020). Ya que es la variable climática esencial que da origen a la temperatura en la superficie de la tierra, el ciclo energético y el clima (Pfeifroth et al., 2018).

Se muestra los modelos empíricos utilizados que contienen diversas variables como el R_g como radiación solar global (kWm^{-2}); R_e como radiación solar extraterrestre (kWm^{-2}); $T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$ como amplitud térmica, que representa a la diferencia entre temperatura máxima y mínima; A_t como transmitancia atmosférica; A como transmitancia atmosférica máxima; y parámetros como B que representa a la región específica y depende de C ; C como parámetro específico de la región, dependiente de la amplitud térmica y la latitud; y parámetros para modelos específicos, como el k como parámetro del modelo Hargreaves-Samani y a como parámetro del modelo Chen (Tabla 2).

Tabla 2

Resumen de los modelos empíricos

Modelo	Ecuación	Fuente
Modelo de Chen	$R_g = R_e \cdot a \cdot \ln(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})$	(R. Chen et al., 2004)
Modelo Hargreaves-Samani	$R_g = R_e \cdot k (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0.5}$	(Hargreaves & Samani, 1985)
Modelo de Bristow-Campbell	$R_g = R_e \cdot A \left[1 - e^{-B(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^C} \right]$	(Bristow & Campbell, 1984)

Variables analizadas

El enfoque es experimental puesto que se utilizó el piranómetro Kipp&Zonen para medir la

radiación solar global y estación meteorológica Vaisala para medir las temperaturas máximas y mínimos (Tabla 3).

Tabla 3
Operacionalización de variables

Variable	Indicador	Índice	Instrumento de medición
Variable independiente	X_2 =Temperatura máxima.	- 4 °C a 22 °C	Sensor de temperatura.
Amplitud Térmica	X_1 =Temperatura mínima.		
Variable dependiente	Y	4 KWh/m ²	Piranómetro
Radiación solar global		a 8 KWh/m ²	Kipp&Zonen

Análisis estadístico

Métodos de estimación estadísticos

La variable dependiente Y es la radiación solar global y las variables independientes X son la

amplitud térmica, todos varían día a día desde el 1 de enero de 1956 hasta el 30 de diciembre del 2021. Para comprobar la calidad y la aplicabilidad de los modelos, se utilizaron los indicadores estadísticos sugeridos por (Kariuki & Sato, 2018); (Kumar, 2019) (Tabla 4).

Tabla 4
Resumen de los modelos empíricos

Métodos de estimación estadísticos	Ecuación
Error relativo porcentual (ER)	$ER\% = \frac{y_m - y_c}{y_m} \cdot 100\%$
El coeficiente de correlación (R)	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_c - \bar{y}_c)(y_m - \bar{y}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_c - \bar{y}_c)^2 \sum_{i=1}^n (y_m - \bar{y}_m)^2}}$
El error medio absoluto (MABE)	$MABE = \sum_{i=1}^n \frac{Abs(y_m - y_c)}{n}$
El error medio de la raíz cuadrática (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_m - y_c)^2}{n}}$
Porcentaje del error medio de la raíz cuadrática (%RMSE)	$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}_m} \cdot 100\%$

Dónde: y_c es el valor calculado y y_m valor medido, $\bar{y}_c$ valor promedio calculado y $\bar{y}_m$ valor promedio medido, n cantidad de datos.

En este estudio, para la precisión de los modelos se considera indicado por (Jamieson et al., 1991) (Tabla 5).

Tabla 5
Escala de porcentaje del error medio de la raíz cuadrática

Escala	Intervalos
Excelente	% RMSE < 10 %
Bueno	10 % < % RMSE < 20 %
Regular	20 % < % RMSE < 30 %
Pobre	30 % < % RMSE

Coeficiente de variabilidad temporal (COV_t)

El coeficiente de la variabilidad temporal discute los cambios acumulados con el tiempo transcurrido que se puede denotar con una variación vertical y horizontal, y explica la variabilidad en varias escalas temporales.

Se pueden usar los cálculos de variabilidad entre el lapso de tiempo consecutivo con un coeficiente de variación temporal (COV) que incluye la desviación estándar (Rodríguez Benítez et al., 2018); (Kumar, 2019), expresada en la ecuación (1).

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Además,

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (2)$$

Dónde:

σ_t : Es la desviación estándar para la variación temporal.

$\bar{x}$: Es el promedio de la media anual.

x_i : Es la media anual para cada año.

n : Es el número total de años.

El coeficiente de variabilidad temporal (COV_t) se define como la desviación estándar en relación al promedio de número de datos, se puede expresar con la ecuación (3)(Tabla 6).

$$COV_t = \frac{\sigma_t}{\bar{x}} \quad (3)$$

Tabla 6

Escala de coeficiente de variabilidad temporal

Escala	Intervalos
Variabilidad muy baja	$0 \leq COV \leq 0,1$
Baja variabilidad	$0,1 < COV \leq 0,25$
Variabilidad moderada	$0,25 < COV \leq 0,4$
Alta variabilidad	$0,4 < COV \leq 0,5$
Variabilidad muy alta	$COV > 0,5$

Nota: Adaptado a (Martínez, 2012)

El coeficiente de variabilidad porcentual COV_{%t}:

se define como:

$$COV \%_t = \frac{\sigma_t}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Resultados y discusión

Se muestra los resultados estadísticos de la radiación solar global diaria medida y calculada desde enero de 2014 hasta diciembre el 2021 en la estación de Puno, aplicando los modelos empíricos Bristow-Campbell, Hargreaves-Samani y Chen (Tabla 7). Obteniéndose valores de error relativo porcentual (ER %) de 2,023 %; 0,624 % y 1,669 % respectivamente. Los valores de errores porcentuales relativos obtenidos se encuentran entre -10 % y +10 % que se consideran aceptables en muchos cálculos de ingeniería. Así mismo, se obtuvo el porcentaje del error medio de la raíz cuadrática (% RMSE) con valores de 6,494 %; 8,278 %; 7,694 % y estos son menores del 10 %, lo cual indica una relación excelente según escala mostrada en la entre los datos medidos y calculados de radiación solar global diaria con respecto a la validación de data en la estación meteorológica de Puno (Tabla 7).

Tabla 7

Parámetros estadísticos de datos medidos y estimados promedios de radiación solar global del 2014 al 2021

Parámetros Estadísticos	Bristow-Campbell	Chen	Hargreaves-Samani
ER %	2,023 %	0,624 %	1,669 %
R	0,922	0,862	0,882
MABE	0,343	0,425	0,391
RMSE	0,422	0,539	0,501
% RMSE	6,494 %	8,278 %	7,694 %

De los tres modelos aplicados en este estudio, el modelo de Bristow-Campbell es el que mejor se desempeña en la zona de Puno y puede ser aplicada para reconstruir la radiación solar global diaria en otras zonas altoandinas de similar régimen térmico como Arequipa, Cajamarca, Cusco, Huancayo, Huaraz, Tacna y entre otros, donde no existen estaciones meteorológicas, especialmente Piranómetros.

Coefficiente de variabilidad temporal (COV_t)

Se observa los resultados del coeficiente de variabilidad temporal de la radiación solar global con valores de 0,007; 0,005; 0,004; 0,005 y 0,004 en las estaciones de Capachica, Moho, Yunguyo, Juli y Puno respectivamente. La radiación solar global diaria reconstruida presenta una variabilidad temporal muy baja (Tabla 8).

Tabla 8

Resultados de coeficiente de variabilidad temporal

Estación meteorológica	Periodo de estudio	Desviación estándar (σ)	COV_t	COV_t %
Capachica	1957-2020	0,448	0,007	0,690 %
Moho	1956-2020	0,302	0,005	0,472 %
Yunguyo	1964-2020	0,243	0,004	0,434 %
Juli	1956-2020	0,302	0,005	0,472 %
Puno	1964-2021	0,224	0,004	0,394 %

Además, el coeficiente de variabilidad temporal porcentual (COV_t %) se encuentra por debajo del 30 %, esto indica que los valores promedios anuales son relativamente homogéneos según indica (Martínez Bencardino, 2012).

La radiación solar global desde 1956 hasta el 2021, obteniéndose valores promedios de 6,155 kWh/m²; 6,237 kWh/m²; 6,481 kWh/m²; 5,935 kWh/m² y 6,317 kWh/m² para las estaciones de Capachica, Moho, Yunguyo, Juli y Puno respectivamente (Tabla 9).

Tabla 9

Resultados de radiación solar global anual desde 1956 hasta el 2021

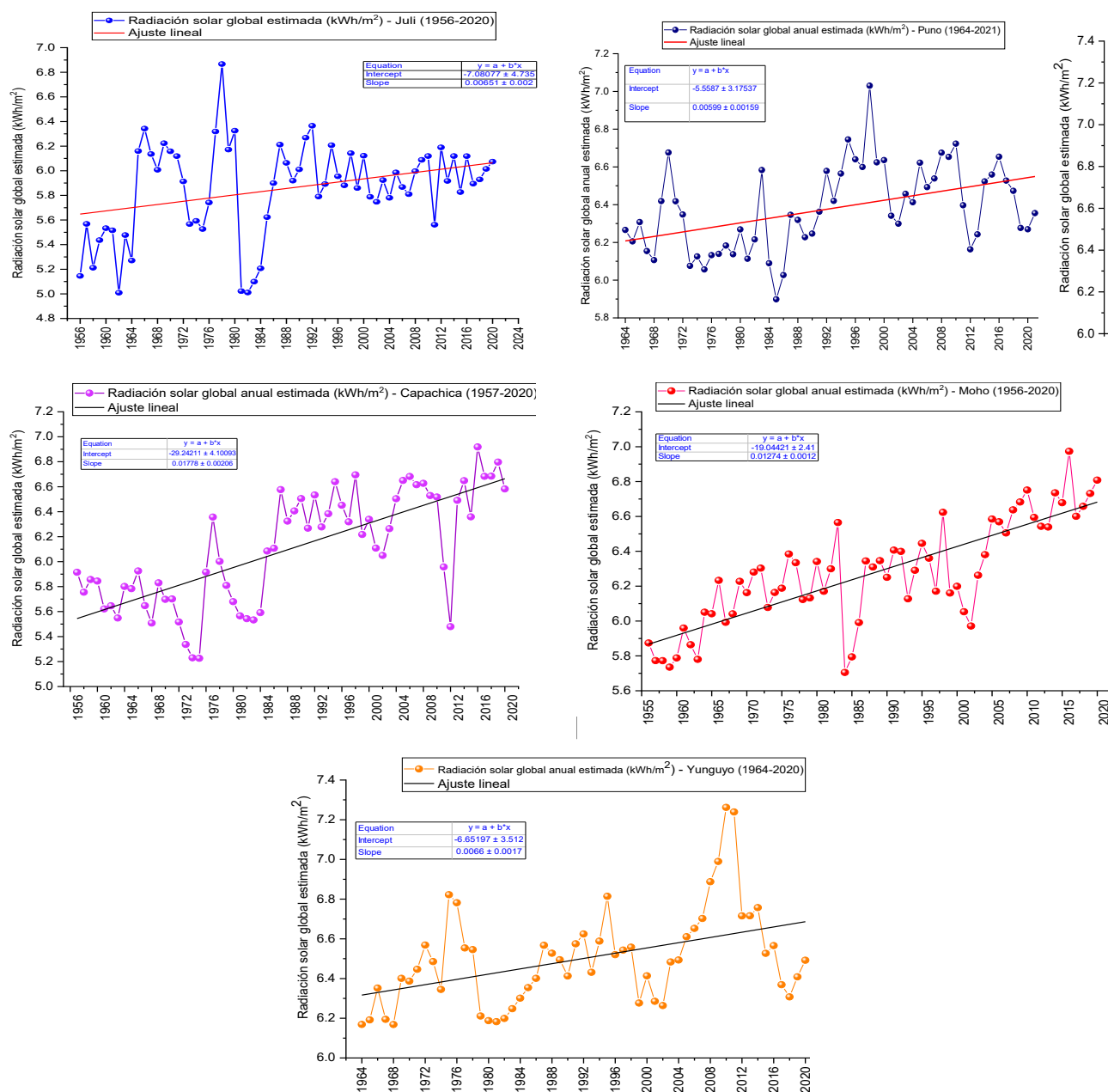
Estación meteorológica	Altitud m.s.n.m.	Periodo de estudio	Radiación solar global promedio (kWh/m ²)	Radiación solar global máximo (kWh/m ²)	Radiación solar global mínimo (kWh/m ²)
Capachica	3933	1957-2020	6,155	7,064	5,109
Moho	3890	1956-2020	6,237	6,963	5,454
Yunguyo	3890	1964-2020	6,481	7,198	6,110
Juli	3812	1956-2020	5,935	6,867	5,009
Puno	3812	1964-2021	6,317	6,970	5,848

Así mismo, se obtuvo valores máximos de 7,064 kWh/m² en el año 2020; 6,963 kWh/m² en el año 2020; 7,198 kWh/m² en el año 2010; 6,867 kWh/m² en el año 1978 y 6,970 kWh/m² en el año 1970 en la estación de Capachica, Moho, Yunguyo, Juli y Puno respectivamente; también se obtuvo valores mínimos de 5,109 kWh/m² en año 1968; 5,454 kWh/m² en el año 1956; 6,110 kWh/m² en el año 1964; 5,009 kWh/m² en el año 1962, 5,848 kWh/

m² en el año de 1985 en la estación de Capachica, Moho, Yunguyo, Juli y Puno respectivamente. Se ilustra la variabilidad de la radiación solar global diaria promedio de las estaciones de Capachica, Moho, Yunguyo, Juli y Puno reconstruida a partir de la estimación con el modelo Bristow-Campbell que mejor se desempeña en la zona circunlacustre (Figura 3).

Figura 3

Resultados de radiación solar global anual desde 1956 hasta el 2021 Radiación solar global promedio en las estaciones de la zona circunlacustre



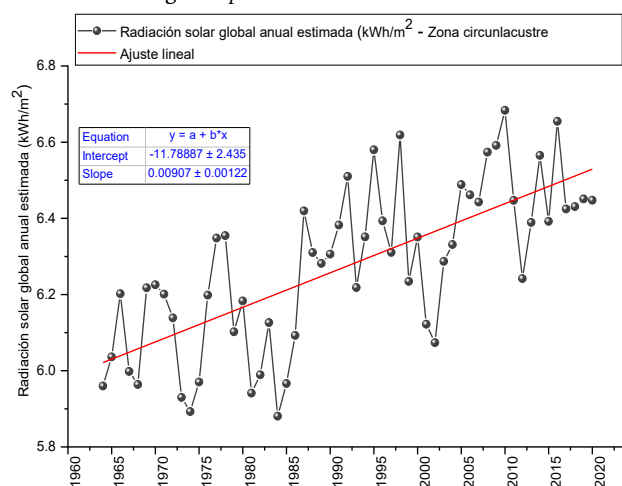
En la investigación se obtuvo incrementos de radiación solar global de 0,006; 0,018; 0,013; 0,006 y 0,007 kWh/m² por año para las estaciones meteorológicas de Puno, Capachica, Moho, Juli y Yunguyo respectivamente. Se pretende que estos resultados puedan servir como base para estudios de cambio climático, como las relacionadas al calentamiento global, reducción de los glaciares, recursos hídricos y especialmente aplicaciones de energía solar.

Según estudios realizados por Lima et al. (2019), encontraron incrementos de radiación solar global de 0,040 kWh/m² por año en el sureste de Brasil entre los años 2005 y 2015. Además, Yang et al. (2018), obtuvieron un incremento de 0,4 W/m² y una disminución de -0,08 W/m² por año en Qinghai. China entre los años 2006 y 2015. De la misma manera (Lohmann et al., 2006) indican haber encontrado un incremento de 4 W/m² por año en Alemania. En la presente investigación se

obtuvo incrementos de radiación solar global de 0,006; 0,018; 0,013; 0,006 y 0,007 kWh/m² por año para las estaciones meteorológicas de Puno, Capachica, Moho, Juli y Yunguyo respectivamente. Se pretende que estos resultados puedan servir como base para estudios de cambio climático, como las relacionadas al calentamiento global, reducción de los glaciares, recursos hídricos y especialmente aplicaciones de energía solar. Se ilustra la variabilidad de la radiación solar global promedio en la zona circunlacustre. El ajuste lineal en rojo indica la tendencia general de los datos. Además, la regresión lineal es $Y=0,009X-11,789$. La pendiente es un valor positivo indica una tendencia de aumento de 0,009 kWh/m² en la radiación solar global estimada a lo largo del tiempo (Figura 4).

Figura 4

Radiación solar global promedio en la zona circunlacustre



Los picos más altos de las radiaciones solares globales estimadas en la zona circunlacustre de la Región Puno desde 1964 hasta 2021 se dieron 1966, 1969, 1970, 1977, 1978, 1980, 1983, 1987, 1992, 1995, 1998, 2010 y 2016 con valores de 6,202; 6,218; 6,226; 6,348; 6,355; 6,183; 6,136; 6,419; 6,510; 6,580; 6,619; 6,684 y 6,655 kWh/m² respectivamente. Y los valores bajos se dieron en los años 1964, 1968, 1974, 1981, 1984 y 2002 con valores de 5,960; 5,964; 5,893; 5,941; 5,881 y 6,074 kWh/m².

Los resultados obtenidos en el presente estudio en la zona circunlacustre confirman cambios a largo plazo de la radiación solar global con valores favorables que oscilan entre 5,009 kWh/m² y

7,198 kWh/m². Investigaciones realizadas por (Kariuki & Sato, 2018) determinaron el potencial energético sobre Kenia con un potencial anual de radiación solar entre 5,000 y 7,000 kWh/m² por día; además, establecen un valor de 6,000 kWh/m² para el funcionamiento óptimo de concentradores fotovoltaicos. De igual manera, Eladawy et al. (2022) obtuvieron radiación solar global que oscilan entre 5,400 y 6,400 kWh/m² en Egipto entre 1985 hasta 2018. Estos valores son beneficiosos en las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica y térmica.

Además, Jerez et al. (2015), indica que los planes de reducción del cambio climático exigen un incremento sustancial en las aplicaciones de energías renovables, por lo que se evalúan los impactos y cambios en sistemas fotovoltaicos en un rango de -14 % a 2 %. Así mismo, estudios realizados por Calbó et al. (2017), indican la disminución continua de las cantidades y tipos de nubes desde los años 1960, provocaran un incremento de la radiación solar en los próximos años.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran la ausencia de un análisis de incertidumbre, por ejemplo, sensibilidad a la amplitud térmica, la posible presencia de sesgos en los registros históricos del SENAMHI previos a 2014 y la no consideración del efecto termorregulador del lago en los modelos. Estos aspectos deberán ser abordados en investigaciones futuras para fortalecer la validez de los resultados.

Conclusiones

La radiación solar global en la zona circunlacustre desde 1956 hasta 2021 muestra valores de coeficiente de variación temporal de 0,004; 0,007; 0,005; 0,005 y 0,004 para las estaciones de Puno, Capachica, Moho, Juli y Yunguyo respectivamente. Estos resultados representan una variabilidad muy baja durante el periodo de estudio. También se obtuvo incrementos de radiación solar global de 0,018; 0,006; 0,013; 0,006 y 0,007 kWh/m² por año. Esta información es fundamental para entender las dinámicas climáticas de la zona y contribuye al desarrollo de estrategias de adaptación para sectores como la agricultura y la gestión de recursos energéticos renovables.

Se ha logrado determinar el modelo empírico más adecuado para estimar la radiación solar global diaria histórica en la zona circunlacustre al validar los modelos empíricos de Bristow-Campbell, Chen y Hargreaves-Samani en la estación meteorológica de Puno del 2014 al 2021. De acuerdo a los índices estadísticos utilizados, que fueron ER %, R, MABE, RMSE y % RMSE, el modelo que mejor se desempeñó fue el de Bristow-Campbell, con una correlación de Pearson de 0,922 y ofrece estimaciones fiables en ausencia de datos.

El modelo adaptable permite estimar la radiación solar global diaria en la zona circunlacustre, considerando los parámetros meteorológicos que más influyen. Obteniéndose valores promedios de 6,155; 6,237; 6,481; 5,935 y 6,317 kWh/m² en Capachica, Moho, Yunguyo, Juli y Puno respectivamente. También se obtuvo un valor máximo de 7,198 kWh/m² en Yunguyo en el año 2010 y un valor mínimo de 5,009 kWh/m² en Juli en el año 1962, resultados favorables para la instalación de paneles fotovoltaicos para contrarrestar el cambio climático.

Agradecimientos

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) Zonal Puno por los datos cedidos para la realización de esta investigación.

Conflicto de interés

El (los) autor(es) afirman que, durante la investigación, no ha habido ningún interés personal, profesional ni económico que haya podido influir en su juicio o en las acciones tomadas al desarrollar y publicar este artículo.

Referencias

- Adhikari, K. R., Bhattarai, B. K., & Gurung, S. (2013). Estimation of Global Solar Radiation for Four Selected Sites in Nepal Using Sunshine Hours, Temperature and Relative Humidity. *Journal of Power and Energy Engineering*, 01(03), 1–9. <https://doi.org/10.4236/jpee.2013.13003>
- Alsamamra, H. (2019). Estimation of Global Solar Radiation from Temperature Extremes: A Case Study of Hebron City, Palestine. *Journal of Energy and Natural Resources*, 8(1), 1–5. <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20190801.11>
- 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>
- Aoun, N., & Bouchouicha, K. (2017). Estimating daily global solar radiation by day of the year in Algeria. *European Physical Journal Plus*, 132(5), 2–12. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11495-7>
- Babar, B., Graversen, R., & Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. *Solar Energy*, 182, 397–411. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.058>
- Bhargawa, A., & Singh, A. K. (2019). Solar irradiance, climatic indicators and climate change – An empirical analysis. *Advances in Space Research*, 64(1), 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.018>
- Blal, M., Khelifi, S., Dabou, R., Sahouane, N., Slimani, A., Rouabhia, A., Ziane, A., Neçaibia, A., Bouraiou, A., & Tidjar, B. (2020). A prediction models for estimating global solar radiation and evaluation meteorological effect on solar radiation potential under several weather conditions at the surface of Adrar environment. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 152, 107348. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107348>
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 13(3), 576.
- Calbó, J., González, J. A., & Sanchez-Lorenzo, A. (2017). Building global and diffuse solar radiation series and assessing decadal trends in Girona (NE Iberian Peninsula). *Theoretical*

- and *Applied Climatology*, 129(3–4), 1003–1015. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1829-3>
- Camayo Lapa, B. F., Condezo Hurtado, D. E., Ramos Cadillo, A. Y., Massipe Hernández, J. R., & Camayo Vivas, A. B. (2019). Estimation of global solar radiation, using extreme temperatures, applying the bristow-campbell model in the junín region. *Ingeniare*, 27(4), 643–651. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000400643>
- Castillejo-Cuberos, A., & Escobar, R. (2020). Understanding solar resource variability: An in-depth analysis, using Chile as a case of study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109664>
- Chen, J. L., He, L., Yang, H., Ma, M., Chen, Q., Wu, S. J., & Xiao, Z. lin. (2019). Empirical models for estimating monthly global solar radiation: A most comprehensive review and comparative case study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108(February), 91–111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.033>
- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., & Zhao, W. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, 45(11–12), 1759–1769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.019>
- Dejollx, C., & Iltis, A. (1991). El lago Titicaca: Síntesis del conocimiento limnológico actual. In *ORSTOM. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Cooperation*.
- Dhimish, M., & Mather, P. (2019). Exploratory evaluation of solar radiation and ambient temperature in twenty locations distributed in United Kingdom. *Urban Climate*, 27, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.001>
- Eladawy, M. L., Morsy, M., Korany, M. H., Abdel Basset, H., & El-Adawy, M. (2022). Spatiotemporal variations of global solar radiation: Case Study Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 61(11), 8625–8639. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.066>
- Fan, J., Wang, X., Cai, H., Wu, L., Zhang, F., Zeng, W., & Zou, H. (2019). Empirical and machine learning models for predicting daily global solar radiation from sunshine duration: A review and case study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100(August 2018), 186–212. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.018>
- Feng, Y., Chen, D., & Zhao, X. (2018). Estimated long-term variability of direct and diffuse solar radiation in North China during 1959–2016. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1–2), 153–163. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2579-1>
- Feng, Y., Gong, D., Jiang, S., Zhao, L., & Cui, N. (2020). National-scale development and calibration of empirical models for predicting daily global solar radiation in China. *Energy Conversion and Management*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112236>
- Feng, Y., Gong, D., Zhang, Q., Jiang, S., Zhao, L., & Cui, N. (2019). Evaluation of temperature-based machine learning and empirical models for predicting daily global solar radiation. *Energy Conversion and Management*, 198, 111780. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111780>
- Fröhlich, C. (2006). Solar irradiance variability since 1978. *Space Science Reviews*, 125(1–4), 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9046-5>
- Gueymard, C. A., & Wilcox, S. M. (2011). Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data. *Solar Energy*, 85(5), 1068–1084. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.030>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature. *American Society of Agricultural Engineers*, 1, 96–99.

- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), 337–350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J. P., López-Romero, J. M., Thais, F., Bartok, B., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Nikulin, G., Kotlarski, S., Van Meijgaard, E., Teichmann, C., & Wild, M. (2015). The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>
- Jimenez, V. A., Will, A., & Rodríguez, S. (2017). Estimación De Radiación Solar Horaria Utilizando Modelos Empíricos y Redes Neuronales Artificiales. *Ciencia y Tecnología*, 1(17), 29–43. <https://doi.org/10.18682/cyt.v1i17.608>
- Kariuki, B. W., & Sato, T. (2018). Interannual and spatial variability of solar radiation energy potential in Kenya using Meteosat satellite. *Renewable Energy*, 116, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.069>
- Kumar, D. (2019). Hyper-temporal variability analysis of solar insolation with respect to local seasons. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100241>
- Li, M. F., Tang, X. P., Wu, W., & Liu, H. Bin. (2013). General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy Conversion and Management*, 70, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.004>
- Lima, F. J. L. de, Martins, F. R., Costa, R. S., Gonçalves, A. R., dos Santos, A. P. P., & Pereira, E. B. (2019). The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.08.006>
- Lohmann, S., Schillings, C., Mayer, B., & Meyer, R. (2006). Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. *Solar Energy*, 80(11), 1390–1401. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.03.004>
- Madhlopa, A. (2022). *Solar receivers for thermal power generation* (Vol. 4, Issue 1). Charlotte Cockle.
- Maleki, S. A. M., Hizam, H., & Gomes, C. (2017). Estimation of hourly, daily and monthly global solar radiation on inclined surfaces: Models re-visited. *Energies*, 10(1), 1–28. <https://doi.org/10.3390/en10010134>
- Manara, V., Brunetti, M., Celozzi, A., Maugeri, M., Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2016). Detection of dimming/brightening in Italy from homogenized all-sky and clear-sky surface solar radiation records and underlying causes (1959–2013). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(17), 11145–11161. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11145-2016>
- Martínez Bencardino, C. (2012). *Estadística y Muestreo* (ECOEdiciones, Ed.; 3° ed.).
- Ordoñez-Palacios, L. E., León-Vargas, D. A., Bucheli-Guerrero, V. A., & Ordoñez-Eraso, H. A. (2020). Solar Radiation Prediction on Photovoltaic Systems Using Machine Learning Techniques. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54), 11751. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11751>
- Peñalva, J. J., Lozano, D. A., Murillo, J. C., & Ortega, F. M. (2022). Global solar radiation time series forecasting using different architectures of the multilayer perceptron model. *Journal of Physics: Conference Series*, 2180(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2180/1/012017>
- Perez, R., David, M., Hoff, T. E., Kleissl, J., & Perez, M. (2016). Spatial and Temporal Variability of Solar Energy. *Renewable Energy*, 1(1), 1–44. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0179-2>
- Pfeifroth, U., Sanchez-Lorenzo, A., Manara, V., Trentmann, J., & Hollmann, R. (2018). Trends and Variability of Surface Solar Radiation in

- Europe Based On Surface- and Satellite-Based Data Records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(3), 1735–1754. <https://doi.org/10.1002/2017JD027418>
- Prieto, J. I., & García, D. (2022). Global solar radiation models: A critical review from the point of view of homogeneity and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111856. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111856>
- Rodríguez Benítez, F. J., Arbizu Barrena, C., Santos Alamillos, F. J., Tovar Pescador, J., & Pozo Vázquez, D. (2018). Analysis of the intra-day solar resource variability in the Iberian Peninsula. *Solar Energy*, 171, 374–387. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.060>
- Roelandts, R. (2020). Solar radiation. In *Advanced Remote Sensing*, (Second Edi, Vol. 134, Issue 5 C2, pp. 157–191). [https://doi.org/10.1016/S0151-9638\(07\)89237-4](https://doi.org/10.1016/S0151-9638(07)89237-4)
- Saffaripour, M. H., Mehrabian, M. A., & Bazargan, H. (2013). Predicting solar radiation fluxes for solar energy system applications. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(4), 761–768. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0179-2>
- Samadianfard, S., Majnooni-Heris, A., Qasem, S. N., Kisi, O., Shamshirband, S., & Chau, K. wing. (2019). Daily global solar radiation modeling using data-driven techniques and empirical equations in a semi-arid climate. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 142–157. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1560364>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2003). *Atlas de Energia Solar del Perú* (p. 72).
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311–323. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>
- Viswanathan, B. (Balasubramanian). (2016). Solar Energy: Fundamentals. In *Energy Sources* (p. 502). Elsevier.
- Wild, M., Ohmura, A., Schär, C., Müller, G., Folini, D., Schwarz, M., Hakuba, M. Z., & Sanchez-Lorenzo, A. (2017). The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: A database for worldwide measured surface energy fluxes. *Earth System Science Data Discussions*, 1–24. <https://doi.org/10.5194/essd-2017-28>
- Woli, P., & Paz, J. O. (2012). Evaluation of various methods for estimating global solar radiation in the southeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 972–985. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0141.1>
- Yang, L., Jiang, J., Liu, T., Li, Y., Zhou, Y., & Gao, X. (2018). Projections of future changes in solar radiation in China based on CMIP5 climate models. *Global Energy Interconnection*, 1(4), 452–459. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.005>

