

Validación y evaluación de la radiación solar global aplicando modelos empíricos en base a la amplitud térmica diaria 2014-2021

Lelia Quispe Huamán ¹, Matías Huilca Arbieto ², Vilma Sarmiento Mamani ¹, Guina Sotomayor Alzamora ²

¹ Universidad Nacional de Juliaca, Puno, Perú

² Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

Corresponding author: Lelia Quispe Huamán l.quispe@unaj.edu.pe

(Recibido: 27-04-2024. Publicado: 05-10-2024.)

DOI: 10.59427/rcli/2024/v24.54-63

Resumen

Medir la radiación solar global es una tarea desafiante debido a que es difícil obtener datos diarios debido a limitaciones técnicas y financieras, lo que ha generado el desarrollo de modelos empíricos para su estimación. El objetivo de esta investigación es encontrar el modelo empírico con mejor desempeño utilizando la amplitud térmica para Puno. Se realizó la validación de tres modelos empíricos, Bristow-Campbell, Chen y Hargreaves-Samani, usando datos medidos de la estación meteorológica Puno del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología entre 2014 y 2021. Como resultado, se obtuvo los coeficientes de correlación de 0.922, 0.862 y 0.882, el porcentaje del error medio de la raíz cuadrática fue de 6.494%; 8.278% y 7.694% entre los valores medidos y estimados respectivamente. La conclusión es que el modelo Bristow-Campbell se ajusta mejor a la zona evaluada. De esta manera, la determinación de la radiación solar global diaria en la zona permitirá realizar estudios sobre cambio climático, aplicaciones de energía solar y entre otros. Finalmente, se sugiere que los modelos empíricos validados sirvan como predictores para diseñar aplicaciones por parte de los científicos, gobernantes y demás interesados.

Palabras Claves: Amplitud térmica, índices estadísticos, modelos empíricos, Puno, radiación solar global, validación de modelos.

Abstract

Measuring global solar radiation is a challenging task due to the difficulty in obtaining daily data, primarily due to technical and financial constraints. This has led to the development of empirical models for estimation. The objective of this research is to find the empirical model with the best performance using thermal amplitude for Puno. Three empirical models, namely Bristow-Campbell, Chen, and Hargreaves-Samani, were validated using measured data from the Puno meteorological station of the National Meteorology and Hydrology Service between 2014 and 2021. As a result, correlation coefficients of 0.922, 0.862, and 0.882 were obtained for Bristow-Campbell, Chen, and Hargreaves-Samani models, respectively. The percentage of the root mean square error was 6.494%, 8.278%, and 7.694% between measured and estimated values, respectively. The conclusion is that the Bristow-Campbell model fits better in the evaluated area. Thus, determining daily global solar radiation in the area will facilitate studies on climate change, solar energy applications, among other research areas. Finally, it is suggested that validated empirical models serve as predictors for designing applications by scientists, policymakers, and other stakeholders.

Keywords: Thermal range, statistical indices, empirical models, Puno, global solar radiation, models validation.

1 Introducción

El sol es la principal fuente de energía renovable y emite una intensidad constante de radiación fuera de la atmósfera terrestre (Madhlopa, 2022) y la radiación solar es la principal fuente de energía sostenible que puede ser transformada en energía térmica o eléctrica (Alsamamra, 2019). La demanda creciente en el sector de energías renovables requiere una evaluación exhaustiva de las condiciones del cielo, que pueden ser favorables para el uso eficiente de recursos de energía solar (Tanu et al., 2021). Así, el acceso a datos fiables sobre radiación solar es esencial para el desarrollo sostenible de la humanidad (Prieto & García, 2022), sin embargo, existen pocos datos continuos para periodos largos, especialmente en países emergentes, causados principalmente por limitaciones del tipo técnico y financiero (Woli & Paz, 2012; Chen et al., 2019).

En este escenario, es importante utilizar modelos matemáticos, estadísticos y de inteligencia artificial, que permitan predecir radiación solar a partir de datos meteorológicos disponibles (Ordoñez-Palacios et al., 2020; Chen et al., 2019) tales como la temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, horas de sol, días del año, presión atmosférica, radiación solar, entre otros (Samadianfard et al., 2019; Jimenez et al., 2017; Li et al., 2013; Saffaripour et al., 2013). Modelos como los de Campbell-Donatelli, Hargreaves-Samani y Bristow-Campbell usan estos datos. El primero relaciona las temperaturas máximas y mínimas del aire con la radiación solar (Saffaripour et al., 2013); el segundo y tercero también utilizan el rango de temperatura del aire (Chen et al., 2019).

Para encontrar los niveles de radiación se requieren datos precisos, esto para calcular el dimensionamiento, la planificación y la operación de transductores de energía solar, como las células fotovoltaicas y los colectores solares térmicos, que son importantes en proyectos eficaces de energía solar, los cuales pueden ser integrados en la red eléctrica para la reducción de costos (Aljanad et al., 2021; Karaman et al., 2021; Benamrou et al., 2020; Alsamamra, 2019; Salisu, 2017; Alvanitopoulos et al., 2014); también, representa un recurso de conservación de la energía, necesario para desarrollar dispositivos de secado en la agricultura mecanizada (Adelakun & Adelakun, 2020). Existen también otras aplicaciones en diferentes áreas como las construcciones solares, energía solar, bombas de calor, aire acondicionado, agricultura, medio ambiente, investigaciones en hidrología, física atmosférica y otros (Djaman, 2020; Benkaciali et al., 2016).

En este trabajo, se ha evaluado el desempeño de los tres modelos empíricos, para predecir la radiación solar global en la estación de Puno, Perú. La principal contribución de este trabajo es el uso de tales modelos, con data recolectada en series de tiempo diarias durante el periodo 2014-2021, con instrumentos básicos y datos sumamente esenciales, a 3827 m.s.n.m. y con ello determinar si es posible aplicar diseños para el uso de energía solar en la región, como los colectores solares.

2 Metodología

2.1 Recopilación diaria de datos

Para la validación de los tres modelos empíricos propuestos, Bristow-Campbell, Chen, y Hargreaves-Samani, los datos considerados fueron la medida de la radiación solar global diaria entre los años 2014 – 2021 del piranómetro Kipp-Zonen de la estación meteorológica Puno, perteneciente al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, el cual se muestra en la Figura 1.



Figure 1: Estación meteorológica Puno.

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 μV . W-1.m-2.

2.2 Descripción de los modelos empíricos

Feng et al. (2019) aplicaron modelos empíricos basados en la temperatura del aire, tales como los modelos Hargreaves-Samani, Bristow-Campbell, Jahani, y Fan, para predecir la radiación solar global en el futuro. Este último trabajo es de gran importancia para la gestión y operación de energía solar y sistemas energéticos, por tal motivo es un antecedente básico en la investigación realizada. Los modelos empíricos usados contienen diversas variables como el R_g como radiación solar global (kWm^{-2}); R_e como radiación solar extraterrestre (kWm^{-2}); $T_{max} - T_{min}$ 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.

2.2.1 Modelo Chen

Chen et al. (2004) propusieron un modelo para la radiación solar global, con una relación logarítmica entre la radiación solar y la amplitud térmica, como se muestra en la ecuación (1).

$$R_g = R_e \times a \times \ln(T_{max} - T_{min}) \quad (1)$$

2.2.2 Modelo Hargreaves-Samani

(Hargreaves & Samani, 1985) sugirieron un modelo para radiación solar global estimado a partir de la amplitud térmica y la radiación extraterrestre, como se muestra en la Ecuación (2).

$$R_g = R_e \times k \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (2)$$

2.2.3 Modelo Bristow-Campbell

Bristow & Campbell (1984) construyeron un modelo para estimar la radiación solar global usando la radiación solar extraterrestre, la amplitud térmica y los parámetros A , B y C , como se muestra en la ecuación (3).

$$R_g = R_e \times A \times \left[1 - e^{-B(T_{max} - T_{min})^C} \right] \quad (3)$$

2.3 Evaluación de desempeño estadístico

Para evaluar el desempeño de los modelos utilizados en este trabajo, los índices estadísticos usados fueron el error relativo porcentual, el coeficiente de correlación, el error medio absoluto, el error medio de la raíz cuadrática, el porcentaje del error medio de la raíz cuadrática, como sugeridos por diversos autores (Prieto & García, 2022; Liu et al., 2017; Li et al., 2013). Usando variables y parámetros como Y_c como el valor calculado, Y_m como valor medido, Y_c como promedio calculado, Y_m como valor promedio medido, y N como cantidad de datos.

2.3.1 Error relativo porcentual (ER %)

El error relativo porcentual es el valor de la relación entre los valores medidos y calculados, definidos en la ecuación (4) indicado por (Freund, 2000). Los valores del error relativo porcentual que varían entre -10% y +10% son considerados como aceptables en muchos cálculos de ingeniería.

$$\text{ER}\% = \frac{Y_m - Y_c}{Y_m} \times 100\% \quad (4)$$

2.3.2 El coeficiente de correlación (r)

Esta medida representa la relación lineal entre los valores calculados por el modelo y los valores medidos, como se define en la ecuación (5).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_c - \bar{Y}_c) (Y_m - \bar{Y}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_c - \bar{Y}_c)^2 \sum_{i=1}^N (Y_m - \bar{Y}_m)^2}} \quad (5)$$

2.3.3 El error medio absoluto (Mean Absolute Error, MABE)

El error medio absoluto es un indicador de la desviación media absoluta entre los valores medidos y los valores calculados, aquí se considera el número de datos y está definido en la ecuación (6).

$$MABE = \sum_{i=1}^N \frac{|Y_m - Y_c|}{N} \quad (6)$$

2.3.4 El error medio de la raíz cuadrática (Root Mean Square Error, RMSE)

El error medio de la raíz cuadrática es un indicador de las variaciones de los valores calculados alrededor de los valores medidos. Las variaciones más pequeñas son un indicador del mejor desempeño del modelo, se define en la ecuación (7).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_m - Y_c)^2}{N}} \quad (7)$$

2.3.5 Porcentaje del error medio de la raíz cuadrática (Root Mean Square Error percentage, %RMSE)

Es el índice concluyente del desempeño de los modelos estudiados, y considera al valor promedio medido, como se muestra en la ecuación (8).

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{Y}_m} \times 100\% \quad (8)$$

En este estudio, la escala para la precisión de modelos considerada se muestra en la Tabla 1, en la cual el RMSE se categoriza por intervalos, que van desde Pobre hasta Excelente, de manera similar a (Jamieson et al., 1991).

Table 1: Escala de porcentaje de error medio de la raíz cuadrática (RMSE).

Escala	Intervalo
Excelente	%RMSE < 10%
Bueno	10% < %RMSE < 20%
Regular	20% < %RMSE < 30%
Malo	30% < %RMSE

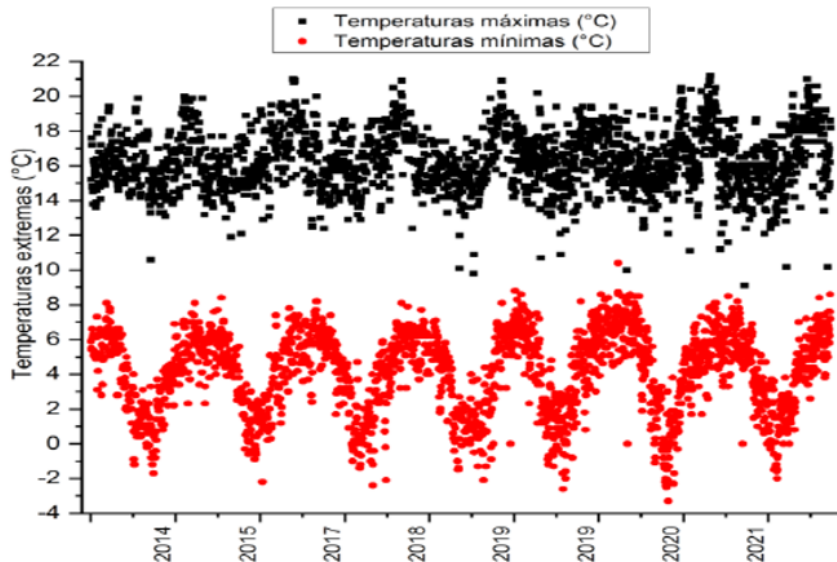
3 Resultados y discusión

Los resultados presentados en este trabajo se obtuvieron a partir de la data medidos en la estación meteorológica de Puno, a través de datos de diferentes días y tiempos climatológicos desde 2014 hasta 2021, exceptuando el 2016, pues los datos no fueron registrados en ese año. Las condiciones de cielo para estos días fueron: muy soleado, soleado, parcialmente nublado y nublado. En la Tabla 2 se muestran los datos día a día, durante el mes de diciembre de 2021 por la estación climatológica Puno de propiedad del SENAMHI, en la cual se puede observar el comportamiento diario que corresponde a los datos estimados sobre la radiación solar global diaria para los modelos utilizados en el presente trabajo.

Table 2: Radiación solar global diaria durante diciembre de 2021 en la estación climatológica Puno.

Fecha	Día Juliano d_n [·]	$T_{máx}$ [°C]	$T_{mín}$ [°C]	Factor de Corrección E_0 [·]	Declinación δ [Rad.]	Angulo horario ω [Rad.]	Radiación Solar Extraterrestre R_0 (kWhm ⁻²)	Modelo Chen R_p (kWhm ⁻²)	Modelo Hargreaves-Samani R_p (kWhm ⁻²)	Modelo Bristow-Campbell R_p (kWhm ⁻²)	Radiación solar global medida R_g (kWhm ⁻²)
01-dic	335	18.6	6.0	1.029	-0.386	1.686	11.369	7.383		7.432	8.211
02-dic	336	18.2	5.0	1.029	-0.388	1.687	11.371	7.537		7.574	7.283
03-dic	337	17.8	7.4	1.029	-0.391	1.688	11.378	6.009		5.901	5.543
04-dic	338	16.6	6.0	1.029	-0.393	1.688	11.382	6.810		6.708	6.963
05-dic	339	14.2	6.4	1.030	-0.395	1.689	11.386	5.358		5.240	4.433
06-dic	340	15.2	6.8	1.030	-0.396	1.690	11.390	6.228		6.131	5.436
07-dic	341	17.4	5.8	1.030	-0.398	1.690	11.394	7.040		7.067	8.540
08-dic	342	17.8	7.0	1.030	-0.400	1.691	11.397	7.004		6.940	6.699
09-dic	343	13.4	5.2	1.031	-0.401	1.691	11.400	5.595		5.465	5.146
10-dic	344	15.2	7.4	1.031	-0.402	1.692	11.403	6.433		6.276	5.853
11-dic	345	18.8	5.6	1.031	-0.404	1.692	11.406	7.613		7.605	7.077
12-dic	346	15.8	3.8	1.031	-0.405	1.693	11.409	7.780		7.780	7.841
13-dic	347	16.8	4.8	1.031	-0.406	1.693	11.411	7.936		7.916	7.891
14-dic	348	19.2	4.0	1.032	-0.406	1.693	11.413	8.891		8.110	7.998
15-dic	349	15.4	6.6	1.032	-0.407	1.693	11.415	7.735		6.905	7.189
16-dic	350	16.0	7.0	1.032	-0.408	1.694	11.417	6.280		6.199	6.357
17-dic	351	15.6	5.8	1.032	-0.408	1.694	11.419	5.906		5.843	5.822
18-dic	352	15.8	5.2	1.032	-0.409	1.694	11.421	6.118		6.111	7.127
19-dic	353	16.4	6.8	1.032	-0.409	1.694	11.422	6.930		6.337	6.785
20-dic	354	14.6	6.0	1.032	-0.409	1.694	11.424	5.433		5.345	5.112
21-dic	355	15.8	7.0	1.033	-0.409	1.694	11.425	5.103		5.002	5.415
22-dic	356	10.2	5.0	1.033	-0.409	1.694	11.426	3.803		3.803	3.124
23-dic	357	17.2	6.8	1.033	-0.409	1.694	11.426	6.925		6.875	7.195
24-dic	358	16.6	7.6	1.033	-0.408	1.694	11.427	5.756		5.679	5.526
25-dic	359	16.8	6.4	1.033	-0.408	1.694	11.428	6.280		6.214	6.282
26-dic	360	14.8	6.6	1.033	-0.407	1.693	11.428	5.361		4.767	5.698
27-dic	361	17.0	5.8	1.033	-0.406	1.693	11.428	6.473		6.490	7.107
28-dic	362	15.0	6.2	1.033	-0.406	1.693	11.428	7.022		6.952	6.803
29-dic	363	16.2	8.6	1.033	-0.405	1.693	11.428	5.113		5.047	4.891
30-dic	364	18.6	7.6	1.033	-0.404	1.692	11.427	7.265		6.443	7.011
31-dic	365	18.2	7.2	1.033	-0.402	1.692	11.427	7.564		7.517	7.904
							Promedio	6.538		6.376	6.376

Los modelos de radiación solar basados en temperatura son altamente recomendados en áreas donde sólo se dispone de datos como la temperatura del aire (El Mghouchi, 2022). Por lo que en la Figura 2 se muestra el comportamiento diario de las temperaturas máxima y mínima, desde el 2014 hasta el 2021 en la estación meteorológica de Puno, registrando una temperatura máxima de 22.3°C y una temperatura mínima de -3.3°C, con una amplitud térmica de 25.6°C. La región evaluada corresponde a una zona altoandina, sobre los 3200 m.s.n.m. en regiones como estas no hay mucho frío en temporadas de lluvias, debido a que las nubes permiten que el calor se mantenga, pero en temporadas de heladas, la ausencia de nubes ocasiona que el calor se pierda hacia el espacio, provocando la disminución rápida de temperatura, que alcanza a temperaturas menores o iguales a 0°C (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2023). Basado en esto, temperaturas máximas y mínimas fueron obtenidas con valores de 20, 22.3, 20.9, 20.9, 20.2, 21.2 y 21 °C; y temperaturas mínimas de -1.7, -2.2, -2.4, -2.1, -2.6, -3.3 y -2.0 °C en los años 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 respectivamente.

**Figure 2:** Temperaturas máxima y mínima registradas diariamente de 2014 a 2021.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la radiación solar global y la amplitud térmica diaria, medida entre el 2014 a 2021 en la estación meteorológica Puno. Tal amplitud representa el rango de temperatura durante un día, se observó que la temperatura máxima ocurre entre las 11h a 15h, y la temperatura mínima se ocurre al amanecer, entre las 4h y 5h. Vale indicar que la radiación solar global y la amplitud térmica se comportan de forma oscilatoria entre los años de estudio. Los valores promedio anuales de radiación solar global registrados por el Piranómetro Kipp-Zonen fue de 6.850, 6.622, 6.572, 6.503, 6.384, 6.403 y 6.467 kWhm⁻² durante los años 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 and 2021 respectivamente. Estos resultados son alentadores para poder realizar diferentes proyectos de inversión, ya que, como indica (Villicaña-Ortiz et al., 2015), los valores mayores a 4.000

kWhm⁻² por día, son económicamente rentables para aplicaciones de energías renovables, específicamente energía solar, como la implementación de plantas solares fotovoltaicas, las cuales preservan el medio ambiente, mitigando el cambio climático, y alejándonos lentamente de una economía basada en combustibles fósiles.

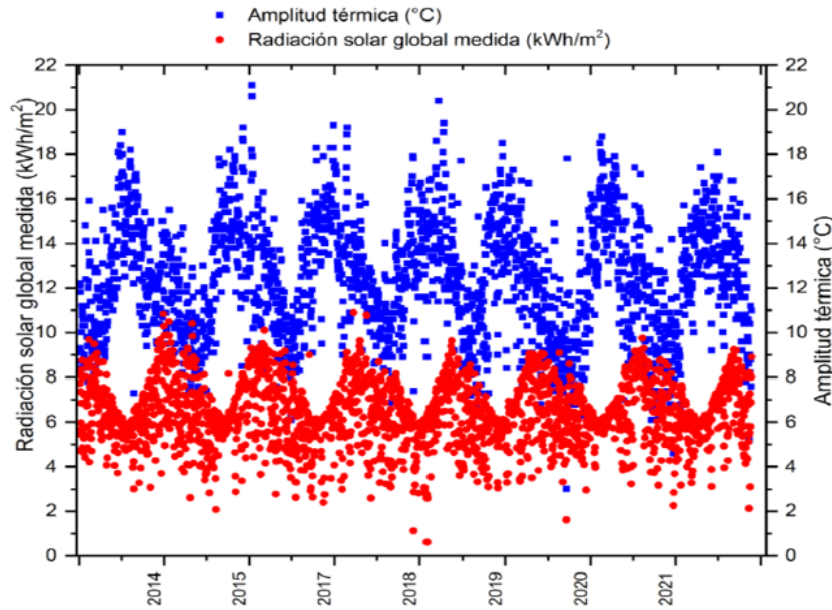


Figure 3: Radiación solar global y amplitud térmica diaria entre el 2014 y 2021.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la radiación solar global diaria medida por el piranómetro Kipp-Zonen y estimada aplicando el modelo Chen. Se obtuvieron valores promedios de 6.506 y 6.546 kWhm⁻² respectivamente. El coeficiente de correlación Pearson tuvo un valor de 0.862 con una confianza del 86%, y una regresión lineal de $Y=1.079+0.840X$ del 2014 al 2021. Con este modelo de Chen, se encontraron los valores promedios anuales de radiación solar global de 6.633, 6.691, 6.630, 6.522, 6.369, 6.457 y 6.512 kWhm⁻² en los años 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 respectivamente. Finalmente, el valor del parámetro a tuvo un valor promedio de 0.274, siendo su valor máximo 0.330 y mínimo 0.0202.

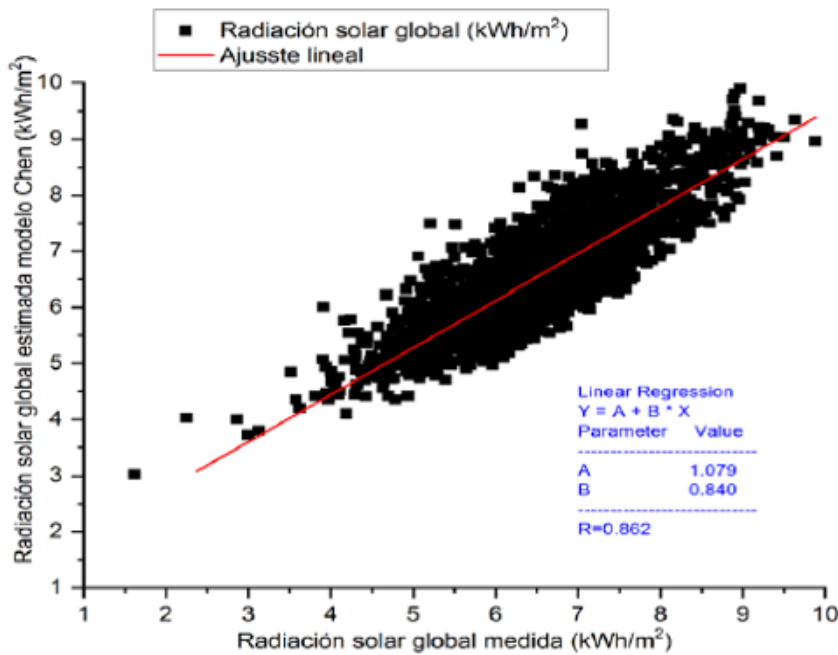


Figure 4: Correlación de la radiación solar global diaria medida y estimada, aplicando el modelo Chen.

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la radiación solar global diaria medida por el piranómetro Kipp-Zonen y estimada aplicando el modelo Hargreaves-Samani. Se obtuvieron los valores promedio de 6.506 y 6.397 kWh/m² respectivamente. El coeficiente de correlación Pearson tuvo un valor de 0.882, con una confianza del 88%, y una regresión lineal de $Y=1.208+0.798X$ del 2014 al 2021. Con este modelo de Hargreaves-Samani se encontraron los valores promedios anuales de radiación solar global de 6.455, 6.516, 6.475, 6.479, 6.265, 6.270 y 6.323 kWh/m² en los años 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 respectivamente. Finalmente, el valor del parámetro k tuvo un valor promedio de 0.192, siendo su valor máximo 0.217 y mínimo 0.143.

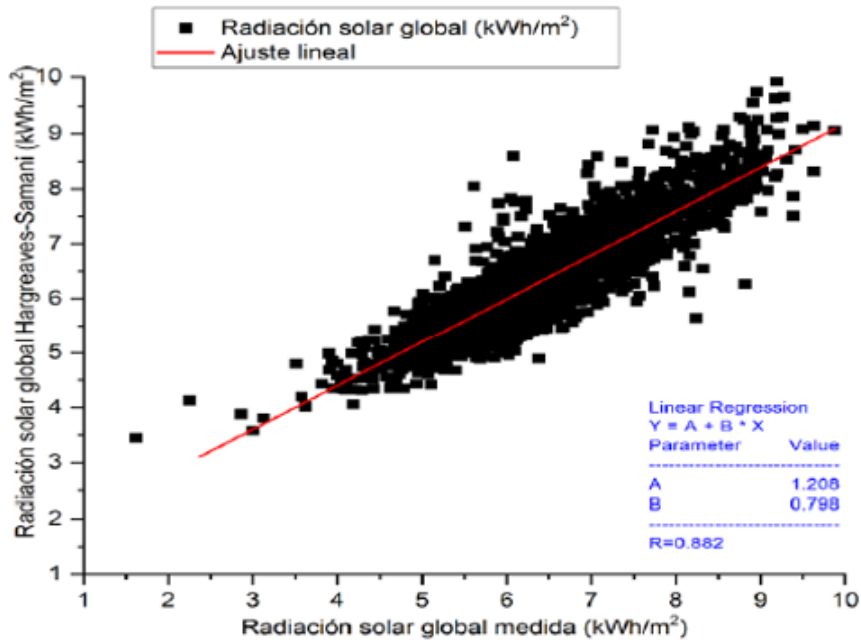


Figure 5: Correlación de la radiación solar global diaria medida y estimada aplicando el modelo Hargreaves-Samani.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento de la radiación solar global diaria medida por el piranómetro Kipp&Zonen y estimada aplicando el modelo Bristow-Campbell. Se obtuvieron los valores promedio de 6.506 y 6.374 kWh/m² respectivamente.

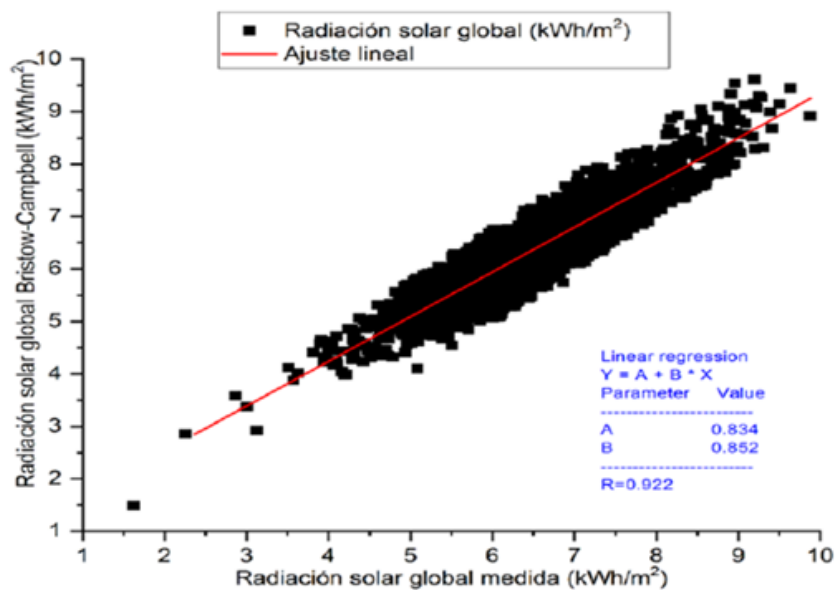


Figure 6: Correlación de la radiación solar global medida y estimada aplicando el modelo Bristow-Campbell.

El coeficiente de correlación Pearson tuvo un valor de 0.922, con una confianza del 92%, y una regresión lineal de $Y=0.834+0.852X$ del 2014 al 2021. Con este modelo de Bristow-Campbell se encontraron los valores promedios anuales de radiación solar global de 6.492, 6.508, 6.478, 6.415, 6.225, 6.217 y 6.302 kWhm⁻² en los años 2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 respectivamente. Finalmente, el valor del parámetro A, que representa la transmitancia atmosférica máxima tuvo un valor promedio de 0.913, siendo su valor máximo 1.033 y mínimo 0.684.

La Figura 7 muestra la radiación solar global diaria estimada con los modelos empíricos Bristow-Campbell, Chen y Hargreaves-Samani, y los medidos por el piranómetro Kipp-Zonen de la estación meteorológica de Puno del 2014 al 2021, exceptuando los valores del año 2016, pues, como se indicó anteriormente, no existen datos registrados durante ese año. En la imagen se observa que los datos estimados y los medidos son similares, como se mostró en las correlaciones lineales en las Figuras 4, 5, y 6. Además se identifica que el modelo más adecuado para estimar la radiación solar global diaria en la región evaluada es el modelo Bristow-Campbell.

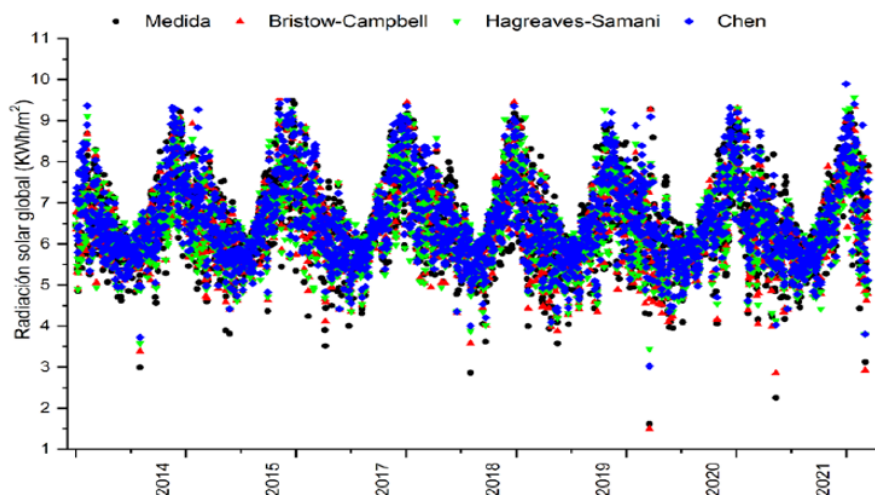


Figure 7: Radiación solar global diaria estimada con los modelos empíricos y medidos, del 2014 al 2021.

El rendimiento de los modelos fue evaluado en base a los índices estadísticos usados por (Prieto & García, 2022; Liu et al., 2017; Li et al., 2013). Para esto fueron utilizadas las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8) definidas en la sección 3, para cada modelo, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3. Como se aprecia en la Tabla 3, los valores del error relativo porcentual (ER%) se encuentran entre -10% y +10%, por lo que se consideran aceptables en muchos cálculos de ingeniería.

Table 3: Parámetros estadísticos de datos medidos y promedios estimados de radiación solar global del 2014 al 2021.

Parámetros Estadísticos	Modelo Bristow-Campbell	Modelo Chen	Modelo Hargreaves-Samani
ER% (4)	2.023%	0.624%	1.669%
r (5)	0.922	0.862	0.882
MABE (6)	0.343	0.425	0.391
RMSE (7)	0.422	0.539	0.501
%RMSE (8)	6.494%	8.278%	7.694%

Además, los valores del porcentaje de error medio de la raíz cuadrática (%RMSE) fueron 6.494% para el modelo Bristow-Campbell, 8.278% para el modelo Chen y 7.694% para el modelo Hargreaves-Samani, todos menores a 10%, lo que indica una relación de Excelente, según la escala mostrada en la Tabla 1, entre los datos medidos y estimados de radiación solar global diaria, con respecto a la validación de data en la estación meteorológica de Puno.

Aoun & Bouchouicha (2017) estimaron la radiación solar global aplicando seis modelos empíricos en Argelia, localizados en cuatro zonas climáticas: la árida, semiárida, altiplano y mediterráneo, en el cual el quinto modelo, correspondiente al modelo Bristow-Campbell, obtuvo los estadísticos R con 0.9475-0.9956 kWhm⁻², MABE con 0.1171-0.3490, RMSE con 0.1497-0.4079 kWhm⁻², %RSME con 2.5497-6.6665% y MAPE 2.1211-6.1420%. En el estudio realizado, los valores correspondientes al modelo Bristow-Campbell, que es el modelo que más se adecua a la zona evaluada, son ER% con 2.023%, R con 0.922 kWhm⁻², MABE con 0.343, RMSE con 0.422 kWhm⁻² y %RMSE con 6.494%.

También, Kariuki & Sato (2018) determinaron el potencial energético sobre Kenia, encontrando el potencial anual de radiación solar diario entre 5.000-7.000 kWhm⁻²; además, establece un valor de 6.000 kWhm⁻² para el funcionamiento óptimo de concentradores fotovoltaicos. En el estudio realizado, para la zona evaluada, se encontró promedios diarios registrados entre 6.384 y 6.622 kWhm⁻².

4 Conclusiones

Los modelos Bristow-Campbell, Chen y Hargreaves-Samani fueron aplicados, considerando las temperaturas extremas registradas 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 desempeño fue el modelo de Bristow-Campbell, con una correlación de Pearson de 0.922. Esto permite estimar la radiación solar global diaria de Puno de forma fidedigna. Este modelo permite cuantificar la radiación solar diaria debido a la escasez de registros largos y continuos. Finalmente, el trabajo realizado ayudará a usuarios, ingenieros, proyectistas e inversores, a determinar el rendimiento óptimo de los colectores solares en la región evaluada, ya que existe una seria limitación de data, debido a restricciones técnicas y financieras.

5 Referencias bibliográficas

- Adelakun, A., & Adelakun, F. (2020). Chaotic Signatures and Global Solar Radiation model estimate over Nigeria, a Tropical region. *Nonlinear Processes in Geophysics Discussions*, September, 1–21.
- Aljanad, A., Tan, N. M. L., Agelidis, V. G., & Shareef, H. (2021). Neural network approach for global solar irradiance prediction at extremely short-time-intervals using particle swarm optimization algorithm. *Energies*, 14(4), 4–20.
- 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.
- Alvanitopoulos, P. F., Andreadis, I., Georgoulas, N., Zervakis, M., & Nikolaidis, N. (2014). Solar radiation time-series prediction based on empirical mode decomposition and artificial neural networks. *Advances in Information and Communication Technology*, 436, 447–455.
- 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.
- Benamrou, B., Ouardouz, M., Allaouzi, I., & Ahmed, M. Ben. (2020). A proposed model to forecast hourly global solar irradiation based on satellite derived data, deep learning and machine learning approaches. *Journal of Ecological Engineering*, 21(4), 26–38.
- Benkacali, S., Haddadi, M., Khellaf, A., Gairaa, K., & Guermoui, M. (2016). Evaluation of the global solar irradiation from the artificial neural network technique. *Revue Des Energies Renouvelables*, 19(4), 617–631.
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(0427), 159–166.
- 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.
- 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.
- Djaman, K. (2020). Evaluation of temperature-based solar radiation models and their impact on penman-monteith reference evapotranspiration in a semiarid climate. *International Journal of Hydrology*, 4(2), 84–90.
- El Mghouchi, Y. (2022). On the prediction of daily global solar radiation using temperature as input. An application of hybrid machine learners to the six climatic Moroccan zones. *Energy Conversion and Management*: X, 13, 100157.
- Feng, Y., Cui, N., Chen, Y., Gong, D., & Hu, X. (2019). Development of data-driven models for prediction of daily global horizontal irradiance in Northwest China. *Journal of Cleaner Production*, 223, 136–146.
- Freund, J. E. (2000). *Mathematical Statistics* (Sixth edit). 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.
- 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.

- Karaman, Ö. A., Tanyıldızı Ağır, T., & Arsel, İ. (2021). Estimation of solar radiation using modern methods. *Alexandria Engineering Journal*, 60(2), 2447–2455.
- 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.
- 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.
- Liu, Y., Zhou, Y., Wang, D., Wang, Y., Li, Y., & Zhu, Y. (2017). Classification of solar radiation zones and general models for estimating the daily global solar radiation on horizontal surfaces in China. *Energy Conversion and Management*, 154(July), 168–179.
- Madhlopa, A. (2022). *Solar receivers for thermal power generation* (Vol. 4, Issue 1). Charlotte Cackle.
- 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.
- 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.
- 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.
- Salisu, S. (2017). New Model for Solar Radiation Estimation From Measured Air Temperature and Relative Humidity in Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 36(3), 917–922.
- 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.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2023). No Title.
- Tanu, M., Amponsah, W., Yahaya, B., Bessah, E., Ansah, S. O., Wemegah, C. S., & Agyare, W. A. (2021). Evaluation of global solar radiation, cloudiness index and sky view factor as potential indicators of Ghana's solar energy resource. *Scientific African*, 14, e01061.
- Villicaña-Ortiz, E., Gutiérrez-Trashorras, A. J., Paredes-Sánchez, J. P., & Xiberta-Bernat, J. (2015). Solar energy potential in the coastal zone of the gulf of Mexico. *Renewable Energy*, 81, 534–542.
- Woli, P., & Paz, J. O. (2012). Evaluation of various methods for estimating global solar radiation in the south-eastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 972–985.