

ARTÍCULO ORIGINAL

Estimación de la radiación solar en la ciudad de Jaén mediante el modelo matemático Bristow-Campbell

Estimation of solar radiation in the city of Jaén using the Bristow-Campbell mathematical model

Béker Pariacurí-Recalde¹ * y Jannier Montenegro-Juárez¹ 

RESUMEN

El objetivo de la investigación es estimar la radiación solar en la ciudad de Jaén mediante el modelo matemático Bristow-Campbell, se utilizó una metodología del tipo correlacional, porque nos permitió aplicar ciencia a un problema evidente que es la estimación de la radiación solar. Además; se obtuvo los siguientes resultados para datos “Senamhi”, MAD entre (0.317–0.409), MSD entre (0.141–0.259), MAPE entre (6.823%–8.934%), siendo aceptable cuando es menor a un 10%. También; RMSE entre (0.375–0.509), se desearía que fuera “0”; sin embargo, este se acerca y está por debajo de la unidad; el coeficiente de correlación obtenido está entre (0.150–0.462) demostrando que existe un nivel de correlación aceptable. Finalmente, utilizando ANOVA se concluyó que “no existen diferencias significativas entre los medios aritméticos de los grupos de la radiación solar real y estimada”, obteniendo una probabilidad de que las variables evaluadas sean similares con un “p” entre (86.937%–98.277%). Estos resultados se obtuvieron con un “a” entre (0.620 – 0.650), para los años 2018–2021, cumpliéndose lo mostrado en la “Tabla 1”. Concluyendo que, geográficamente nuestra ciudad se caracteriza por un clima “Soleado”; confirmando que el modelo matemático arroja valores significativos y es aceptable para la aplicación en esta zona geográfica.

Palabras clave: Radiación solar, Bristow-Campbell, Jaén, Temperatura, Clima.

ABSTRACT

The objective of the research is to estimate solar radiation in the city of Jaén using the Bristow-Campbell mathematical model. A correlational methodology was used, because it allowed us to apply science to an obvious problem, which is the estimation of solar radiation. Besides; The following results were obtained for “Senamhi” data: MAD between (0.317–0.409), MSD between (0.141–0.259), MAPE between (6.823%–8.934%), being acceptable when it is less than 10%. Also; RMSE between (0.375–0.509), we would like it to be “0”; However, this is close to and below unity; The correlation coefficient obtained is between (0.150–0.462), demonstrating that there is an acceptable level of correlation. Finally, using ANOVA it was concluded that “there are no significant differences between the arithmetic means of the groups of the real and estimated solar radiation”, obtaining a probability that the evaluated variables are similar with a “p” between (86.937%–98.277%). These results were obtained with an “a” between (0.620 – 0.650), for the years 2018–2021, complying with what is shown in “Table 1”. Concluding that, geographically, our city is characterized by a “Sunny” climate; confirming that the mathematical model yields significant values and is acceptable for application in this geographical area.

Keywords: Solar radiation, Bristow-Campbell, Jaén, Temperature, Climate.

* Autor para correspondencia

1 Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: bekerpariacuri@gmail.com, jannier_montenegro@unj.edu.pe

INTRODUCCIÓN

Estimar la radiación solar es vital porque nos ayuda a identificar el potencial energético solar con el que se puede contar, esto ayudará para múltiples estudios de aspecto multidisciplinario, validar este modelo servirá como antecedente en la provincia y su futura aplicación sin ningún sesgo de falta de confianza. También recordemos que nuestro país es un lugar ideal para empezar proyectos de energías renovables, principalmente por su abundante disponibilidad de recursos naturales: como el sol, agua, energía geotérmica, eólica entre otros, y explorar e implementar este potencial energético existente puede ayudar a nuestro país a satisfacer la creciente demanda energética (Acevedo, 2014). Esto ayudará a dar una mirada más objetiva a una de las fuentes inagotables de energía, el sol; en consecuencia, el estudio aporta conocimientos, métodos y técnicas esenciales de cómo aplicar este modelo matemático sin ningún problema.

El autor De La Casa et al. (2003) reconoce que estimar la radiación solar es un procedimiento necesario cuando no se cuenta con registros observados de este parámetro en un lugar de estudio y que exista la intención de estudiar la producción primaria, y manifiesta que los datos de radiación solar llegan a ser un parámetro vital para la agricultura, que se puede obtener a partir de las temperaturas extremas.

Y, según Gavilán (2010) menciona que la radiación solar se puede determinar a partir de otras variables, pero su precisión debe ser estudiada de manera cuidadosa, y en ese contexto evaluó 59 lugares de Andalucía y se utilizó el modelo de Hargreaves-Samani y Bristow-Campbell, destacando la importancia de hallar esta variable meteorológica de manera eficiente, debido a que es censado por un número limitado de estaciones meteorológicas en el mundo.

También, Camayo-Lapa et al. (2017) concluye que al efectuar la “*t*” de student se halló que no existen diferencias significativas entre lo registrado y calculado con el modelo Bristow-Campbell para la radiación solar, estos valores se obtuvieron para 19 estaciones meteorológicas en la región Junín, y se logró determinar la mayor radiación solar en la estación de Viques con $6,2 \text{ kWh/m}^2 / \text{día}$ y la menor radiación solar $3,8 \text{ kWh/m}^2 / \text{día}$ en Pichanaki, evidenciando que existe una mayor radiación solar en la sierra que en la selva.

Según Sulca y Paulino (2019) resalta que el modelo estimador de radiación solar Bristow-Campbell, se puede aplicar en la sierra o selva, además su estudio e implementación contribuirá a cambiar la matriz energética y se dará una mirada a equipos tecnológicos que no utilicen hidrocarburos que emitan gases de invernadero, de esta forma se garantiza una mejor calidad ambiental.

También; Farfán (2020) enfatiza que estimar la irradiancia solar en Lambayeque utilizando el modelo Bristow-Campbell, contando con datos de temperaturas extremas (máximas y mínimas) en estaciones meteorológicas permitirá diseñar sistemas fotovoltaicos de manera exacta, sin sobredimensionamiento,

económicos y necesarios para satisfacer la creciente demanda energética y queda evidente que la radiación solar es una variable muy importante para distintos usos y que puede ser aprovechada de manera exitosa en distintos lugares.

Otra mirada es de Jara (2018) que resalta la importancia de la energía solar como fuente de electricidad y hace énfasis en la condición actual de los diferentes tipos de industria que recurren a los hidrocarburos, sin embargo, estos son agentes contaminantes para el medio ambiente. También, explica de manera precisa dos métodos matemáticos de estimación de la radiación solar (“Angstrom–Prescott” y “Bristow–Campbell”) y del procedimiento de cálculo de las variables necesarias para la estimación. Y concluye que la radiación solar promedio anual del distrito Baños del Inca es de 4.854 kWh/m²/día y el mes crítico junio 4.118 kWh/m²/día, logrando su objetivo que era calcular la potencia máxima requerida.

Finalmente, Chávez (2019) resalta la utilización de herramientas digitales para el dimensionamiento y utilización de paneles fotovoltaicos (Software SOLARIUS PLUS), esta herramienta ayuda a conocer la radiación solar para un lugar específico y a partir de esos datos realiza cálculos para poder determinar qué tipo materiales se puede utilizar. Llegando a concluir que es viable una instalación de un sistema solar fotovoltaico porque se ha obtenido 4,85 kWh/m²/día de radiación solar.

Recordemos que el estudio realizado se encuentra en la ceja de Selva, Jaén, intuyendo su posible aplicación exitosa, en ese sentido la presente investigación su objetivo principal es estimar y describir la radiación solar en Jaén utilizando el modelo matemático Bristow–Campbell; además, determinar el potencial solar y emplear estadísticos como *MAD*, *MSD*, *MAPE*, *RMSE*, *CC* y *ANOVA* para analizar la relación entre la radiación real y la estimada.

En síntesis, la información analizada evidencia que la radiación solar es un parámetro primordial para poder hallar el potencial energético solar de un lugar específico. Además, si solo se tiene datos de temperaturas máximas y mínimas, ¿qué herramientas se puede utilizar?, una solución sería la utilización del modelo matemático Bristow–Campbell.

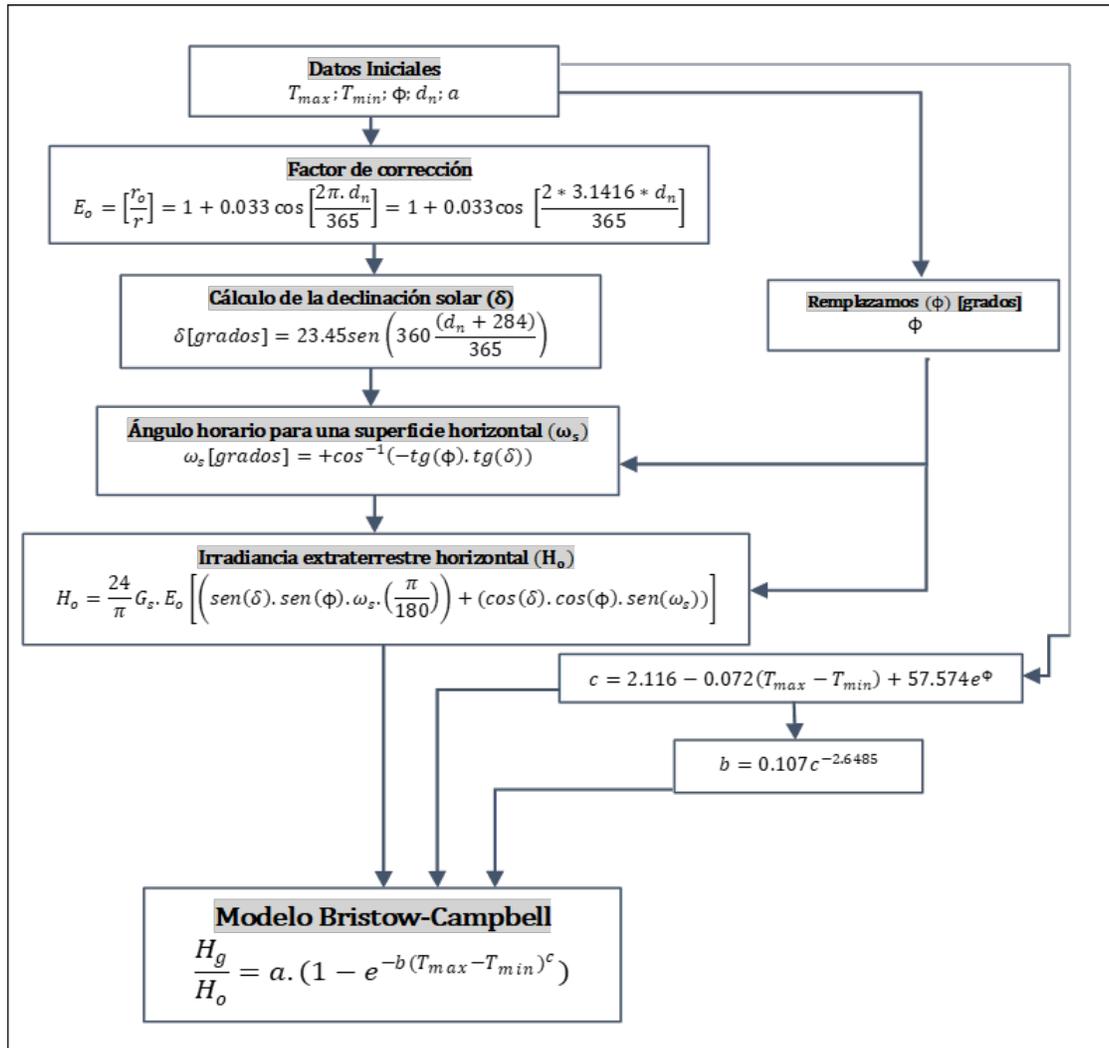
MATERIALES Y MÉTODOS

Esquema esencial de cálculo

La estructura siguiente ofrece una representación visual de los procedimientos a seguir de manera sistemática y organizada al emplear el modelo “Bristow–Campbell” (Acosta et al., 2023).

Figura 1

Esquema de cálculo



Donde:

- H_g : Radiación solar Global [kW.h/m²].
- H_o : Radiación solar extraterrestre [kW. h/m²].
- T_{max} : Temperatura máxima [°C].
- T_{min} : Temperatura mínima [°C].
- "a", "b" y "c": Constantes del Modelo Bristow-Campbell.
- E_o : Factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre
- G_s : Constante solar [Según Iqbal (1.367 kW/m²)].
- Φ : Latitud [grados].
- δ : Declinación solar [grados].
- ω_s : Ángulo horario para una superficie horizontal [grados].
- d_n : día del año a partir del 1 de enero o día Juliano.
- E_o : Es una Unidad Adimensional.

Constantes del Modelo Bristow-Campbell.

Los coeficientes A, B y C, aunque empíricos, tienen una relevancia física. A denota la radiación máxima esperada en un día despejado, mientras que B y C regulan cómo A se ajusta conforme aumenta la diferencia de temperatura. Los valores comunes para estos coeficientes son 0.7 para A, en el rango de 0.004 a 0.010 para B, y 2.4 para C (Meza y Varas, 2000).

Tabla 1

Valores aproximados para "a".

| <i>Característica geográfica</i> | <i>Intervalos ($K_t = a$)</i> |
|----------------------------------|--|
| Nublado | <0 – 0.2> |
| Parcialmente nublado | <0.2 – 0.6> |
| Soleado | <0.6 – 0.75> |
| Muy soleado | <0.75 – 1> |

Nota: Adaptado de “Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain”, por Yousif et al. (2013).

Metodología

La investigación adoptó un enfoque correlacional al aplicar métodos científicos para abordar el desafío evidente de estimar la radiación solar basada en temperaturas extremas. Se exploró la relación entre dos variables distintas, la Radiación Real y la Estimada, utilizando técnicas de análisis estadístico para discernir su grado de correlación.

Análisis de datos

El análisis estadístico requiere datos de radiación solar global real y estimada [Hg] en un tiempo específico. Estos datos son esenciales para evaluar la confiabilidad y el rendimiento de un modelo matemático. Un error mínimo en medidas como *MAD*, *MSD*, *MAPE*, *RMSE*, *CC(r)* y *ANOVA* indica un ajuste satisfactorio del modelo matemático.

- Desviación absoluta media (*MAD*).

El error absoluto es la diferencia entre el valor real y el estimado, dividido por el periodo. Se busca minimizar este valor (Bahel et al., 1987).

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |X_t - \hat{X}_t| \quad (1)$$

- Error cuadrático medio o desviación cuadrática media (*MSD*).

Es una medida de dispersión del error de predicción (Mejía, 2019).

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \hat{X}_t)^2 \quad (2)$$

- Error de porcentaje absoluto medio (MAPE).

Proporciona desviaciones en porcentaje y no en unidades. El modelo es aceptable si la desviación no supera el 10% (Alonso et al., 2002).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{X_t - \hat{X}_t}{X_t} \right| \quad (3)$$

- Error cuadrático medio (RMSE).

El RMSE es normalmente un número positivo. Un valor de "0" indica un ajuste perfecto, pero es poco común alcanzar tal precisión (Evrendilek y Ertekin, 2007, p. 142; Iqbal, 1983, p. 384).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \hat{X}_t)^2}{n}} \quad (4)$$

- Coeficiente de correlación (CC, r).

La correlación (CC) es una prueba de relación lineal entre valores calculados y medidos. Idealmente, debería ser 1 para una relación perfecta (Iqbal, 1983, p. 384; Muzathik et al., 2011, p. 78).

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{X}_t - \overline{\hat{X}_t})(X_t - \overline{X_t})}{\left\{ \left[\sum_{t=1}^n (\hat{X}_t - \overline{\hat{X}_t})^2 \right] \left[\sum_{t=1}^n (X_t - \overline{X_t})^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Donde:

- X_t : valor real para un periodo "t".
- $\overline{X_t}$: valor medio (promedio) real.
- \hat{X}_t : valor estimado para un periodo "t".
- $\overline{\hat{X}_t}$: valor medio (promedio) estimado.
- n : es el número total de periodos

- Análisis de Varianza de un Factor (ANOVA).

La *suma de cuadrados del total o global* es:

$$SCT = \sum_{i=1}^n y_i - n\bar{Y}^2 \quad (6)$$

La *suma de cuadrados explicada o de la regresión* es:

$$SCR = \beta_0 \sum_{i=1}^n y_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n y_i x_i - n\bar{Y}^2 \quad (7)$$

La *suma de cuadrados del error o residual* es:

$$SCE = \sum_{i=1}^n e_i^2 \tag{8}$$

Calculando " β_0 " y " β_1 "

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{n}}{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n}} \qquad \beta_0 = \bar{Y} + \beta_1 \bar{X}$$

Si se cumple que:

$$SCT = SCR + SCE \tag{9}$$

Con todo esto se completa la siguiente tabla ANOVA:

Tabla 2

Tabla ANOVA.

| Fuente | Grados de Libertad (GL) | Suma de Cuadrados (SC) | Cuadrado Medio (CM) | F |
|------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|---------|
| <i>Regresión</i> | 1 | SCR | CMR=SCR/1 | CMR/CME |
| <i>Error</i> | n-2 | SCE | CME=SCE/(n-2) | |
| Total | n-1 | SCT | | |

El estadístico "F" sirve para probar la hipótesis:

$$H_0 : \beta_1 = 0 \text{ vs}$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

De esta forma se rechaza la hipótesis nula si $CMR/CME > F_{(1, n-2, 1-\alpha)}$

Donde:

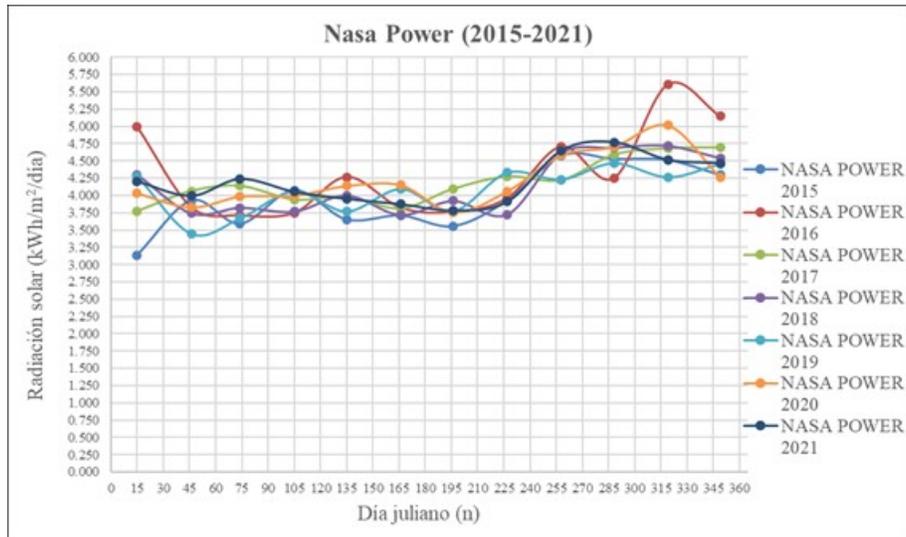
- y_i : Valor estimado
- x_i : Valor real
- \bar{Y} : Promedio de los valores estimados
- \bar{X} : Promedio de los valores reales
- F : Valores críticos de la distribución ($\alpha = 0.05$)

RESULTADOS

Comportamiento de la radiación solar en la ciudad de Jaén

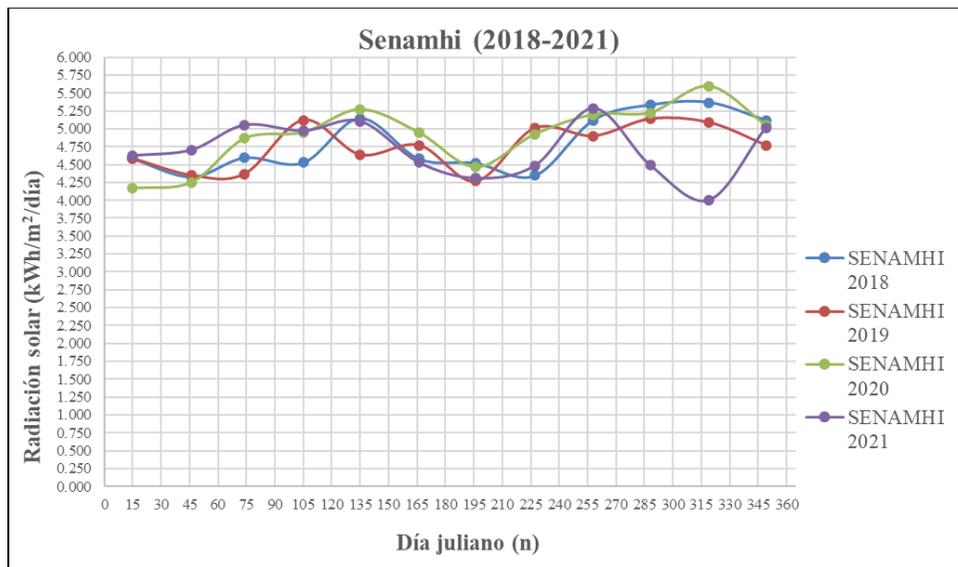
a. Para datos de la Nasa Power.

Figura 2
Radiación Solar (2015-2021)



b. Para datos del Senamhi.

Figura 3
Radiación solar (2018-2021).



Potencial solar en la ciudad de Jaén

a. Potencial solar para datos de la Nasa Power.

Con base en el esquema proporcionado, se procedió a calcular el potencial solar para cada año analizado, tanto en términos reales como estimados. Además, se calculó el promedio respectivo del potencial solar.

Figura 4

Esquema para la determinación del potencial solar utilizando datos de Nasa Power.

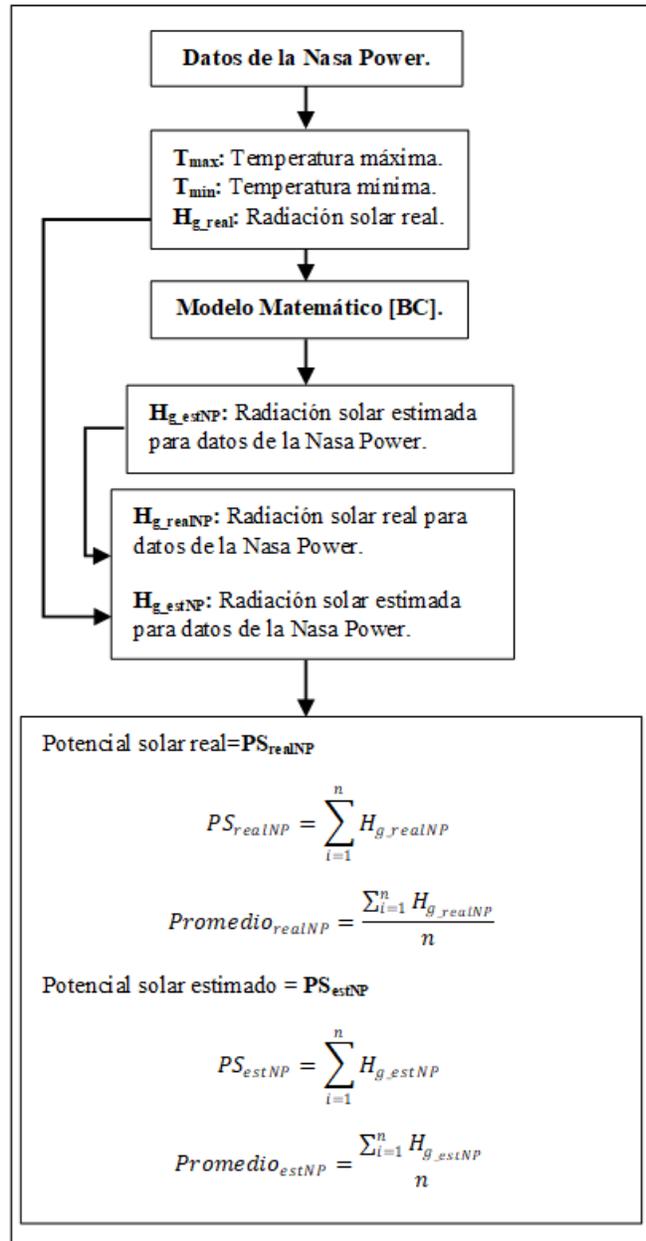


Tabla 3

Potencial solar real y estimado en Jaén, utilizando datos de Nasa Power.

| Potencial solar para datos de la Nasa Power (2015 - 2021) | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|---------------|----------------------------|--------------|---------------------------|
| Año | a | b | c | PS_{realNP} | Promedio _{realNP} | PS_{estNP} | Promedio _{estNP} |
| 2015 | 0.530 | 0.041 | 1.446 | 47.471 | 3.956 | 48.476 | 4.040 |
| 2016 | 0.550 | 0.043 | 1.421 | 51.798 | 4.317 | 50.948 | 4.246 |
| 2017 | 0.560 | 0.039 | 1.475 | 50.278 | 4.190 | 50.389 | 4.199 |
| 2018 | 0.560 | 0.039 | 1.475 | 49.576 | 4.131 | 50.366 | 4.197 |
| 2019 | 0.550 | 0.040 | 1.460 | 48.851 | 4.071 | 50.017 | 4.168 |
| 2020 | 0.550 | 0.040 | 1.460 | 50.530 | 4.211 | 49.744 | 4.145 |
| 2021 | 0.550 | 0.038 | 1.487 | 50.432 | 4.203 | 49.292 | 4.108 |
| Máximo | 0.560 | 0.043 | 1.487 | 51.798 | 4.317 | 50.948 | 4.246 |
| Mínimo | 0.530 | 0.038 | 1.421 | 47.471 | 3.956 | 48.476 | 4.040 |
| Promedio | 0.550 | 0.040 | 1.461 | 49.848 | | 49.890 | |

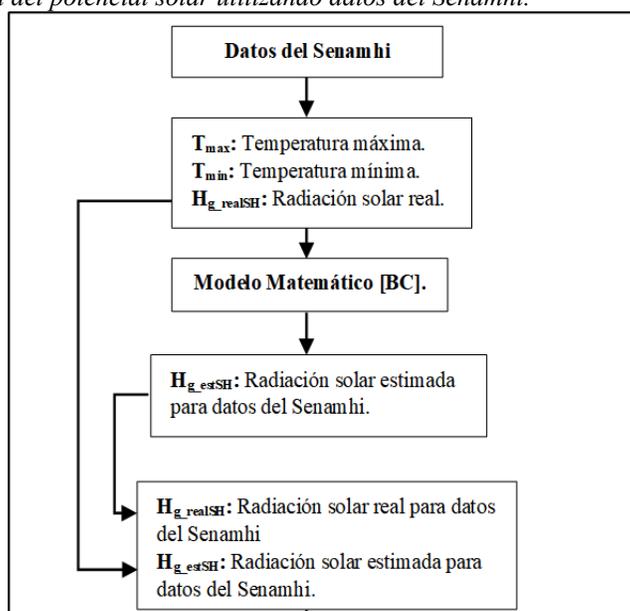
Se logró determinar que existe un potencial solar estimado entre 4.040-4.246 kWh/m² y un potencial solar real entre 3.956-4.317 kWh/m², estos resultados se obtuvieron para datos analizados de la Nasa Power (2022), obtenidos de su portal Web disponible. Además, los valores promedios para las constantes “a”, “b” y “c” son, 0.550-0.040-1.461, respectivamente.

Potencial solar para datos del Senamhi.

A continuación, se utiliza un esquema similar, pero adaptado para datos obtenidos del Senamhi, de esta forma se encontraron cifras de significativas.

Figura 5

Esquema para la determinación del potencial solar utilizando datos del Senamhi.



↓

Potencial solar real= PS_{realSH}

$$PS_{realSH} = \sum_{i=1}^n H_{g_realSH}$$

$$Promedio_{realSH} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{g_realSH}}{n}$$

Potencial solar estimado = PS_{estSH}

$$PS_{estSH} = \sum_{i=1}^n H_{g_estSH}$$

$$Promedio_{estSH} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{g_estSH}}{n}$$

Tabla 4
Potencial solar real y estimado en Jaén, utilizando datos de Senamhi.

| Potencial solar para datos del Senamhi (2018 - 2021) | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|---------------|---------------------|--------------|--------------------|
| <i>Año</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | PS_{realSH} | $Promedio_{realSH}$ | PS_{estSH} | $Promedio_{estSH}$ |
| 2018 | 0.620 | 0.044 | 1.406 | 57.556 | 4.796 | 57.853 | 4.821 |
| 2019 | 0.640 | 0.038 | 1.486 | 56.999 | 4.750 | 57.300 | 4.775 |
| 2020 | 0.650 | 0.040 | 1.464 | 58.900 | 4.908 | 58.855 | 4.905 |
| 2021 | 0.620 | 0.040 | 1.452 | 56.554 | 4.713 | 56.640 | 4.720 |
| Máximo | 0.650 | 0.044 | 1.486 | 58.900 | 4.908 | 58.855 | 4.905 |
| Mínimo | 0.620 | 0.038 | 1.406 | 56.554 | 4.713 | 56.640 | 4.720 |
| Promedio | 0.633 | 0.040 | 1.452 | 57.502 | | 57.662 | |

Se logró determinar que existe un potencial solar estimado entre 4.720-4.905 kWh/m² y un potencial solar real entre 4.713-4.908 kWh/m², estos resultados se obtuvieron para datos analizados del Senamhi, obtenidos de su estación meteorológica Jean Gore. Además, los valores promedios para las constantes “a”, “b” y “c” son, 0.633-0.040-1.452, respectivamente.

Análisis estadístico para datos de la radiación solar en la ciudad de Jaén

Análisis estadístico para datos de la Nasa Power

Tabla 5
Resultados Acumulados - Nasa Power (2015-2021)

| Nasa Power - "Portal Web" | | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|------------|------------|-------------|-------------|-----------------|----------|------------------|--------------------|
| <i>Año</i> | <i>a</i> | <i>MAD</i> | <i>MSD</i> | <i>MAPE</i> | <i>RMSE</i> | <i>"CC o r"</i> | <i>p</i> | <i>F crítico</i> | <i>F calculado</i> |
| 2015 | 0.530 | 0.280 | 0.181 | 7.797% | 0.426 | 0.471 | 63.130% | 4.301 | 0.23686 |
| 2016 | 0.550 | 0.396 | 0.212 | 8.960% | 0.461 | 0.689 | 74.362% | 4.301 | 0.10970 |
| 2017 | 0.560 | 0.192 | 0.051 | 4.712% | 0.226 | 0.770 | 94.816% | 4.301 | 0.00432 |
| 2018 | 0.560 | 0.215 | 0.098 | 5.486% | 0.314 | 0.663 | 68.025% | 4.301 | 0.17443 |
| 2019 | 0.550 | 0.246 | 0.123 | 6.395% | 0.351 | 0.406 | 46.852% | 4.301 | 0.54414 |
| 2020 | 0.550 | 0.269 | 0.114 | 6.428% | 0.338 | 0.554 | 66.533% | 4.301 | 0.19224 |
| 2021 | 0.550 | 0.189 | 0.048 | 4.473% | 0.220 | 0.777 | 45.113% | 4.301 | 0.58858 |
| Máximo | 0.560 | 0.396 | 0.212 | 8.960% | 0.461 | 0.777 | 94.816% | 4.301 | 0.58858 |
| Mínimo | 0.530 | 0.189 | 0.048 | 4.473% | 0.220 | 0.406 | 45.113% | 4.301 | 0.00432 |
| Promedio | 0.550 | 0.255 | 0.118 | 6.322% | 0.333 | 0.618 | 65.547% | | |

Como se muestra, “No existen diferencias significativas entre los medios aritméticos de los grupos de la radiación solar real y estimada” para cada uno de los años evaluados, cumpliéndose que “ $F_{critica} \geq F_{calculada}$ ”. Además; existe una probabilidad entre 45.113-94.816% de que los datos evaluados sean similares. Estos resultados se obtuvieron para datos de la Nasa Power (2022).

Análisis estadístico para datos del Senamhi

Tabla 6

Resultados Acumulados - Senamhi (2018-2021).

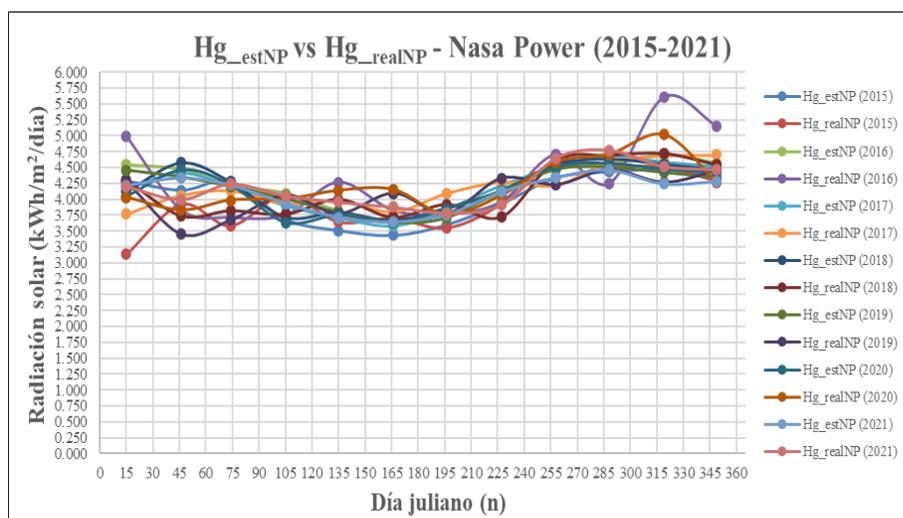
| Senamhi - "Estación Jean Gore" | | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------|-------|-------|--------|-------|---------|---------|---------------|-----------------|
| Año | α | MAD | MSD | MAPE | RMSE | "CC or" | p | $F_{critico}$ | $F_{calculado}$ |
| 2018 | 0.620 | 0.317 | 0.150 | 6.823% | 0.388 | 0.450 | 87.619% | 4.301 | 0.02484 |
| 2019 | 0.640 | 0.334 | 0.141 | 7.059% | 0.375 | 0.462 | 86.937% | 4.301 | 0.02769 |
| 2020 | 0.650 | 0.333 | 0.196 | 7.116% | 0.443 | 0.396 | 98.277% | 4.301 | 0.00048 |
| 2021 | 0.620 | 0.409 | 0.259 | 8.934% | 0.509 | 0.150 | 96.600% | 4.301 | 0.00186 |
| Máximo | 0.650 | 0.409 | 0.259 | 8.934% | 0.509 | 0.462 | 98.277% | 4.301 | 0.02769 |
| Mínimo | 0.620 | 0.317 | 0.141 | 6.823% | 0.375 | 0.150 | 86.937% | 4.301 | 0.00048 |
| Promedio | 0.633 | 0.349 | 0.187 | 7.483% | 0.429 | 0.364 | 92.358% | | |

Como se muestra, “No existen diferencias significativas entre los medios aritméticos de los grupos de la radiación solar real y estimada” para cada uno de los años evaluados, cumpliéndose que “ $F_{critica} \geq F_{calculada}$ ”. Además; existe una probabilidad entre 86.937-98.277% de que los datos evaluados sean similares. Estos resultados se obtuvieron para datos proporcionados por el Senamhi de la estación Jean Gore.

Análisis gráfico del comportamiento de la radiación solar estimada y real (Hg_est vs Hg_real)

Figura 6

Comportamiento de la radiación solar 2015-2021 [Nasa Power].

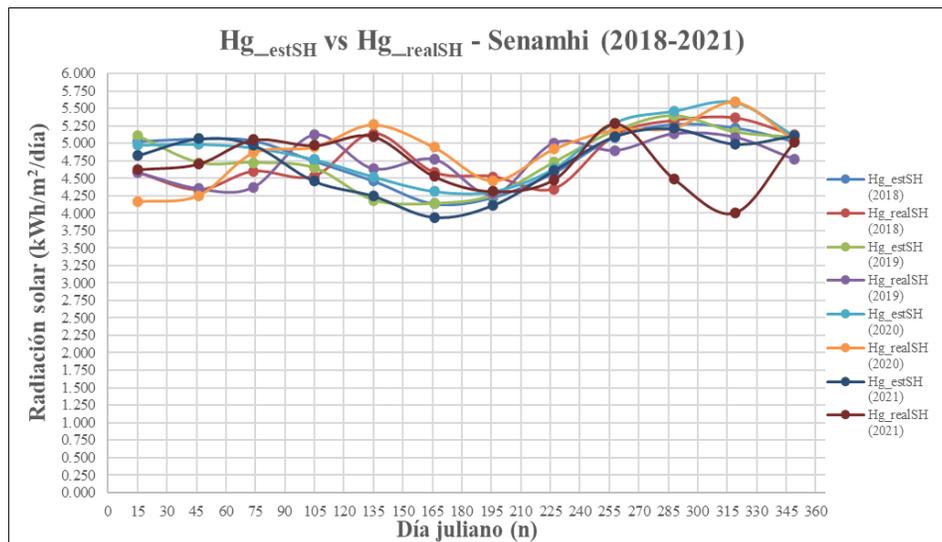


Como es evidente, la radiación real y estimada para datos procesado de la Nasa Power, tienen una tendencia similar al momento de transcurrir el tiempo. Sin embargo, se puede observar que también existen picos que muchas veces el modelo matemático no puede predecir con exactitud. Es importante recalcar, que los beneficios de conocer este modelo matemático nos ayudan a conocer el comportamiento de la radiación solar, solo teniendo datos de temperaturas extremas.

Análisis gráfico para datos procesados del “Senamhi”.

Figura 7

Comportamiento de la radiación solar 2018-2021 [Senamhi].



Ahora, con los datos de Senamhi se ve un patrón similar a la figura anterior, solo existiendo un desnivel abrupto entre los 315-330, sin embargo, esto no descarta la utilidad del modelo matemático. Quedando evidente, que la implementación de este recurso es necesario, si no se cuenta con estaciones meteorológicas de última generación, resaltando que solo se necesita de temperaturas mínimas y máximas para su utilización de manera efectiva.

DISCUSIÓN

En la investigación se halló un valor promedio de potencial solar entre $(3.956 \leq Promedio_{realNP} \leq 4.317) kWh/m^2/día$ y $(4.040 \leq Promedio_{estNP} \leq 4.246) kWh/m^2/día$, para datos de la Nasa Power. Y, un valor entre $(4.713 \leq Promedio_{realSH} \leq 4.908) kWh/m^2/día$ y $(4.720 \leq Promedio_{estSH} \leq 4.905) kWh/m^2/día$, para datos del Senamhi. En ese sentido, la siguiente investigación menciona que “Con los resultados obtenidos se puede diseñar sistemas que permitan aprovechar la energía solar disponible en la zona ya sea para colectores solares (calentamiento de un fluido) o sistemas fotovoltaicos para la generación de electricidad; sugiriendo utilizar el valor de 4.0 Kw-

$\text{h/m}^2\text{-día}$, garantizando de esta manera la funcionabilidad del sistema solar diseñado.” (Farfán, 2020, p. 55). En consecuencia, los resultados obtenidos evidenciaron que es posible un aprovechamiento óptimo de este recurso renovable en nuestra ciudad de Jaén, garantizando un aprovechamiento energético de manera eficiente.

Otro estudio acota lo siguiente “En la Sierra se alcanzó valores del orden de los $6 \text{ kWh/m}^2\text{/día}$, y en la Selva de $4 \text{ kWh/m}^2\text{/día}$. Consideramos que ambos valores son rentables para aplicaciones térmicas y de generación de electricidad con energía solar.” (Camayo et al., 2017, pp. 14, 15). Comparando con los resultados obtenidos y reconociendo que la ciudad de Jaén se encuentra en “*Ceja de Selva*”, los datos obtenidos tanto para la radiación solar real y estimada, se encuentra dentro del intervalo mencionado.

Los datos de Nasa Power son importantes para dimensionar paneles fotovoltaicos, pero son procesados por métodos matemáticos europeos y obtenidos de estaciones meteorológicas en aeropuertos. En Jaén, la estación más cercana está en Shumba y solo está activa durante los vuelos, lo que puede generar variaciones en las mediciones.

Los datos del Senamhi, sin alteraciones por modelos matemáticos adicionales, se aproximan mejor a los valores reales de radiación solar utilizando solo temperaturas extremas. Aunque tener una estación meteorológica en cada ciudad sería costoso, es necesario para realizar estudios de potencial energético y desarrollar proyectos de energías renovables en zonas estratégicas.

CONCLUSIONES

Se logró describir el comportamiento de la radiación solar en la ciudad de Jaén para datos reales de la Nasa Power y Senamhi.

Se determinó el potencial solar en la ciudad de Jaén, este potencial solar anual acumulado se encuentra entre $(47.471 \leq PS_{realNP} \leq 51.798) \text{ kWh/m}^2$ y $(48.476 \leq PS_{estNP} \leq 50.948) \text{ kWh/m}^2$, para datos de la Nasa Power (2015-2021). También, se halló $(56.554 \leq PS_{realSH} \leq 58.900) \text{ kWh/m}^2$ y $(56.640 \leq PS_{estSH} \leq 58.855) \text{ kWh/m}^2$, para datos del Senamhi (2018 – 2021). Y sus promedios anuales son los siguientes $(3.956 \leq Promedio_{realNP} \leq 4.317) \text{ kWh/m}^2\text{/día}$ y $(4.040 \leq Promedio_{estNP} \leq 4.246) \text{ kWh/m}^2\text{/día}$, para datos de la Nasa Power; $(4.713 \leq Promedio_{realSH} \leq 4.908) \text{ kWh/m}^2\text{/día}$ y $(4.720 \leq Promedio_{estSH} \leq 4.905) \text{ kWh/m}^2\text{/día}$, para datos del Senamhi. Es evidente que, tantos los resultados reales y estimados, guardan cierta similitud al momento de evaluarlos.

En el análisis estadístico realizado para los datos de *Senamhi*, el estudio arrojó resultados muy positivos, cuando se ha evaluado los datos de la estación meteorológica del “*Senamhi*”. Se obtuvo un *MAD* entre $(0.317 - 0.409)$, *MSD* entre $(0.141 - 0.259)$, *MAPE* entre $(6.823\% - 8.934\%)$, recordando que un modelo

es aceptable cuando es menor a un 10%. También; arrojó un $RMSE$ entre (0.375 – 0.509), idealmente se desearía que fuera “0”; sin embargo, este se acerca y está por debajo de la unidad. Otro estadístico esencial es el coeficiente de correlación, obteniendo un “CC o r ” entre (0.150 – 0.462) demostrando que existe un nivel de correlación aceptable, aunque idealmente se desearía que fuera lo más cercano a “1”; sin embargo, este no es cercano “0”, por tanto, no se descarta. Finalmente, utilizando $ANOVA$ se obtuvo un $F_{\text{calculado}}$ entre (0.00048 – 0.02769), teniendo en cuenta que el $F_{\text{crítico}} = 4.301$ es igual para todos los años evaluados, cumpliéndose el principal criterio $F_{\text{crítica}} \geq F_{\text{calculada}}$, concluyendo que: “*No existen diferencias significativas entre los medios aritméticos de los grupos de la radiación solar real y estimada*” y obteniéndose una probabilidad de que las variables evaluadas sean similares con un “ p ” entre (86.937% - 98.277%). Estos resultados se obtuvieron con un “ a ” entre (0.620 – 0.650), para los años (2018 – 2021), cumpliéndose lo mostrado en la (Tabla 4), geográficamente nuestra ciudad se caracteriza por un clima “*Soleado*”; confirmando que el modelo matemático arroja valores significativos y es aceptable para la aplicación en esta zona geográfica.

- En cambio; en el análisis estadístico realizado para los datos del portal web *Nasa Power*, se obtuvo un MAD entre (0.189 – 0.396), MSD entre (0.048 – 0.212), $MAPE$ entre (4.473% - 8.960%), recapitulando que un modelo es aceptable cuando es menor a un 10%. También; se reportó un $RMSE$ entre (0.220 – 0.461), idealmente se pretendería que fuera “0”; en cambio, este se acerca y está por debajo de la unidad. Además; se ha determinado el coeficiente de correlación, obteniendo un “CC o r ” entre (0.406 – 0.777), confirmando que existe un nivel de correlación aceptable, aunque idealmente se desearía que fuera lo más cercano a “1”; sin embargo, este no es cercano “0”, por tanto, no se descarta. Por último, utilizando $ANOVA$ se obtuvo un $F_{\text{calculado}}$ (0.00432 – 0.58858), teniendo en cuenta que el $F_{\text{crítico}} = 4.301$ es igual para todos los años evaluados, cumpliéndose el principal criterio $F_{\text{crítica}} \geq F_{\text{calculada}}$, concluyendo que: “*No existen diferencias significativas entre los medios aritméticos de los grupos de la radiación solar real y estimada*” y obteniendo una probabilidad de que las variables evaluadas sean similares con un “ p ” entre (45.113% - 94.816%). Estos resultados se obtuvieron con un “ a ” entre (0.530 – 0.560), para los años (2015 – 2021), evidenciándose que no se cumple lo enunciado en la (Tabla 1), porque el rango de “ a ” se encuentra en “*Parcialmente nublado*”, y la ciudad de Jaén se caracteriza por poseer un clima “*Soleado*”.

- En general, el modelo matemático es ideal para utilizarlo con mediciones reales de temperatura que se hayan registrado en una estación meteorológica, utilizando sensores de temperatura, como mínimo. Sin embargo, si se utiliza datos ya estimados mediante otros modelos matemáticos, el modelo “*Bristow – Campbell*” se vería seriamente afectado al momento de realizar las estimaciones, porque la constante “ a ” no reflejaría la condición climática (Tabla 1) de la zona de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, A. (Ed.). (2014). *Energías renovables y cambio climático 7 proyectos demostrativos de un desarrollo sustentable* (Primera). Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2014-12082.
- Acosta, E. H., Valle, M. T., Quijano, W. S., Lizarzaburu, D. A., Castañeda, C. A., y Benites, E. G. (2023). Solar radiation as a source of clean energy: Calculation by Bristow-Campbell thermal amplitude model and validation, 2020. *LACCEI*, 1(8), Article 8. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.455>
- Alonso, M. R., Rodríguez, R. O., Gómez, S. G., y Giagnoni, R. E. (2002). Un método para estimar la radiación global con la amplitud térmica y la precipitación diarias. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires*, 22, 51–56.
- Bahel, V., Bakhsh, H., y Srinivasan. (1987). A correlation for estimation of global solar radiation. *Energy*, Vol. 12, 131–135. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(87\)90117-4](https://doi.org/10.1016/0360-5442(87)90117-4)
- Camayo, V., Bécquer, F., Condezo, H., David, E., Ramos, C., Adam, Y., Massipe, H., y Juan, R. (2017). *Estimación de la radiación solar global, mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow–Campbell en la región Junín, Perú*.
- Camayo-Lapa, B. F., Pomachagua-Paucar, J. E., Massipe-Hernaández, J. R., Quispe-Flores, M. O., y Torres-Ten, A. (2017). Validación y aplicación del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junin. *Tecnología Química*, Vol. 37(3), 574–590.
- Chávez, E. (2019). *Evaluación de las energías renovables eólica y solar, para el suministro de energía eléctrica a la comunidad ecológica Majanumia de la provincia de Jaén, departamento Cajamarca* [Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. [https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/9057/Ch%
%c3%a1vez_Castro_Ever.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/9057/Ch%c3%a1vez_Castro_Ever.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- De La Casa, A., Ovando, G., y Rodríguez, A. (2003). Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(2), 45–61.
- Evrendilek, F., y Ertekin, C. (2007). Assessing solar radiation models using multiple variables over Turkey. *Clim Dyn* (2008), 131–149. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0338-6>
- Farfán, J. (2020). *Evaluación del modelo empírico de Bristow-Campbell en el registro de la irradiancia solar diaria en las estaciones meteorológicas del Senamhi de la Provincia de Lambayeque* [Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8701>
- Gavilán, P. (2010). *Modelos de estimación de la radiación solar diaria a partir de medidas de la temperatura*.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.
- Jara, C. L. (2018). *Implementación de energía fotovoltaica para optimizar el costo por consumo de energía eléctrica en edificio multifamiliar del distrito Baños del Inca Cajamarca* [Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/25027/jara_fc.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Mejía, E. (2019). Predicción del consumo de energía eléctrica global de la Empresa Municipal de Servicios Eléctricos Utcubamba mediante modelos Holt–Winters. *Revista Científica Pakamuros*, 7(1), 12–12.
- Meza, F., y Varas, E. (2000). Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 231–241. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00090-8)
- Muzathik, A. M., Nik, W. S., Ibrahim, M., y Samo, K. (2011). Daily global solar radiation estimate based on sunshine hours. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 6, 75–80.
- NASA POWER. (2022). *POWER | Data Access Viewer*. POWER | Data Access Viewer. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Sulca, L., y Paulino, C. (2019). *Estimación de la radiación solar global mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow–Campbell en la región Pasco*.
- Yousif, C., Quecedo, G. O., y Santos, J. B. (2013). Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain. *Renewable Energy*, 49, 203–206. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.031>