

Modelo Bristow-Campbell para Estimar Radiación Difusa en Sistemas Fotovoltaicos para EPIME-LABS

Bristow-Campbell Model for Estimating Diffuse Radiation in Photovoltaic Systems for EPIME-LABS

Margarita Fredesvinda Murillo Manrique¹  , John Pool Ricaldi Suasnabar¹,  y Lenner Emilio Cardeña Pinedo¹. 

¹Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima, Perú

Recibido: 04/01/2025 Revisado: 08/03/2025 Aceptado: 15/05/2025 Publicado: 30/06/2025

Resumen

El objetivo de la investigación fue estimar la radiación solar difusa mediante el modelo Bristow-Campbell y simulaciones en Python y MATLAB, para los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (EPIME-LABS). En la primera fase, se recopiló y analizaron datos climáticos de diferentes plataformas. En la segunda fase, se construyó una base de datos con niveles de irradiancia para diferentes ángulos de inclinación (10°, 15°, 20°, 25°, 30° y 35°) evaluando el impacto en la captación de energía solar a lo largo del año. Estos datos se simuló para determinar los coeficientes del modelo Bristow-Campbell. Los resultados mostraron que para un ángulo de inclinación de 10°, los valores de radiación máxima, promedio y mínima fueron 190.41, 156.10 y 124.03 kWh/m², respectivamente, mientras que, para un ángulo de 35°, los valores correspondientes fueron 187.13, 148.48 y 123.37 kWh/m². Se observó que el coeficiente del modelo permaneció relativamente constante en latitudes similares. El análisis de estas variaciones mensuales permitió determinar la configuración óptima de inclinación y época del año para maximizar la hora solar pico (HSP) y optimizar la captación de energía solar en los EPIME-LABS.

Keywords: Radiación difusa, latitud, longitud, hora solar pico, ángulo de inclinación, Bristow-Campbell

Abstract

The objective of the research was to estimate diffuse solar radiation using the Bristow-Campbell model and simulations in Python and MATLAB for the laboratories of the Professional School of Mechanical and Electrical Engineering (EPIME-LABS). In the first phase, climatic data from various platforms were collected and analyzed. In the second phase, a database was built with irradiance levels for different tilt angles (10°, 15°, 20°, 25°, 30°, and 35°), evaluating the impact on solar energy capture throughout the year. These data were simulated to determine the coefficients of the Bristow-Campbell model. The results showed that for a 10° tilt angle, the maximum, average, and minimum radiation values were 190.41, 156.10, and 124.03 kWh/m², respectively, while for a 35° angle, the corresponding values were 187.13, 148.48, and 123.37 kWh/m². It was observed

that the model's coefficient remained relatively constant at similar latitudes. The analysis of these monthly variations allowed for the determination of the optimal tilt configuration and time of year to maximize peak solar hours (PSH) and optimize solar energy capture in EPIME-LABS.

Keywords: diffuse radiation, latitude, longitude, peak solar hours, tilt angle, Bristow-Campbell

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda global de energía, junto con la preocupación por el impacto ambiental, ha impulsado el desarrollo de tecnologías sostenibles como la energía solar. No obstante, uno de los desafíos principales radica en la correcta estimación de la radiación solar difusa, un componente crítico para evaluar su desempeño y maximizar su eficiencia (Duffie & Beckman, 2013). En este contexto, el modelo Bristow-Campbell ha demostrado ser una herramienta eficaz para estimar la radiación solar difusa, gracias a su capacidad de correlacionar parámetros meteorológicos con niveles de irradiancia (Bristow & Campbell, 1984).

Según investigaciones recientes como de Solano-Peralta, Iverson and Dervan (2015) sostienen que países de América Latina y el Caribe (LAC) han incrementado el desarrollo de proyectos fotovoltaicos debido a factores como la búsqueda de acceso a electricidad en zonas no conectadas al sistema eléctrico interconectado, el aumento de tarifas eléctricas, la reducción de costos de los módulos fotovoltaicos y los avances tecnológicos. Por ejemplo, Wright (2008), desarrolló mapas detallados de energía solar incidente diaria, tanto a nivel mensual como anual, mediante técnicas avanzadas de estimación e interpolación basadas en procesos físicos.

La investigación también analiza patrones de irradiancia en diferentes ángulos de inclinación y épocas del año, buscando maximizar el rendimiento energético. Al respecto, Murillo, Choque y Salazar (2023) señalan que, aunque los EPIME-LABS no cuentan con tecnología de vanguardia, es esencial introducir procesos innovadores para fomentar el desarrollo de energías renovables con el fin de reducir los costos por tarifas eléctricas.

1. Material y método

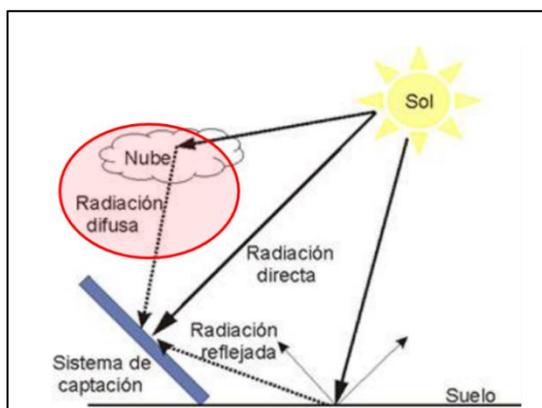
1.1 Material

a. Parámetros de la Energía Solar Difusa

Al respecto de sistemas solares con celdas fotovoltaicas, Gamio (2014) explica que el Perú es un lugar ideal para iniciar proyectos de energía renovable, sostiene que explorar y desarrollar este potencial ayudará al país a satisfacer su creciente demanda de energía. En sus estudios Duffie & Beckman (2013), han demostrado que, según el mes del año y la ubicación geográfica, la energía solar diaria acumulada se encuentra en un rango de 2 a 8 kW.h/m². Considerando estos datos, se puede afirmar que, la media en nuestro país estaría en los 5 kW.h/m². Esto es importante si se considera que los valores iguales o superiores a 4 kW.h/m² hacen atractivo el uso de tecnologías de conversión fotovoltaica.

En la **Figura 1**, se muestra los tipos de radiación que inciden sobre la superficie de nuestro planeta; para esta investigación se define solamente la **radiación difusa**, como la radiación que en los días más soleados sin presencia de nubosidades puede suponer aproximadamente el 15% de la radiación global, pero en los días nublados en los que se reduce la cantidad de radiación directa este tipo de radiación aumenta de manera considerable.

Figura1. Tipos de radiación solar terrestre.



b. Estimación de radiación solar

Las investigaciones de Wright (2008) y Valdés et al. (2012), han demostrado que la cantidad de radiación solar difusa sobre una superficie horizontal puede ser estimada mediante parámetros meteorológicos como la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica y el número de horas de sol brillante o heliofanía.

c. Hora Solar Pico (HSP)

La HSP es un concepto clave en el análisis de sistemas solares fotovoltaicos, que representa el número de horas en las que la irradiancia solar es equivalente a 1000 W/m^2 , como si se estuviera bajo condiciones óptimas de cielo despejado (Pérez, Morales y otros, 2017). De acuerdo con las recomendaciones de ASTM (2000) consideramos adoptar la constante solar medida fuera de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos solares, a una distancia de 1 Unidad Astronómica (UA), con un promedio de $1366.1 \text{ W/m}^2/\text{día}$. Según Labouret y Viloz (2008), las estaciones meteorológicas proporcionan datos estadísticos esenciales sobre radiación solar en $\text{Wh/m}^2/\text{día}$, fundamentales para determinar la HSP.

d. Modelo Bristow-Campbell

El modelo Bristow-Campbell, es utilizado para estimar la radiación solar difusa a partir de datos meteorológicos. Este modelo considera variables como la temperatura mínima y máxima diaria, la presión atmosférica, la humedad relativa y la precipitación.

De acuerdo con González y otros (2022) y Cáceres et al. (2020), el modelo Bristow-Campbell determina la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima en un día determinado, es decir, la relación entre el calor sensible y el calor latente, además el calor sensible depende de la irradiancia solar y es responsable de las temperaturas máximas.

Después de recopilar datos de varios modelos de estimación solar en diversos países, Labouret y Viloz (2008), González et al. (2022), llegaron a la conclusión que el modelo Bristow-Campbell era el que mejor se adecua a las condiciones de Perú. Por tanto, este modelo sugiere la estimación de la transmisividad o irradiancia solar relativa (H/H_o) en función de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínimas (ΔT , °C), que responde a la siguiente formula:

$$\frac{H}{H_o} = a_B [1 - \exp(-b_B \Delta T^{c_B})] \quad \frac{H}{H_o} = a_B \cdot [1 - e^{-b_B(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{c_B}}] \quad \dots (1)$$

Sin embargo, sostienen que es necesario recalcar que el valor del coeficiente a_b corresponde a la sumatoria de los coeficientes a y b encontrados para el modelo Ångström-PreScott ($a=0.355$ y $b=0.392$) debido a que tienen exactamente el mismo significado físico. Este modelo ha sido elegido para ser desarrollado en la presente investigación.

Investigaciones como el de Cáceres y otros (2020) y CaCondezo y otros (2019), aplican el modelo Bristow-Campbell generando una base de datos anuales de irradiación solar de hasta 5,5 - 6,5 kWh m², otros estudios, como los referenciados en Murillo (2017- 2018), resaltan la importancia de las energías renovables, junto con estrategias para su comercialización. Todos los autores mencionados argumentan que la adopción de energías renovables puede contribuir significativamente a la reducción de los elevados costos energéticos asociados con los peajes a lo largo de los sistemas de transmisión, también hacen referencia que el balance de T-Solar, muestra que la generación de 245 gigavatios/hora (GWh) evita la emisión de 87 mil toneladas de CO₂ en la atmósfera.

2.2 Método de la investigación

La metodología de la investigación se divide en dos fases. En la primera fase, se recopilan datos sobre radiación solar difusa desde diversas plataformas. Esta información se utiliza para elaborar una base de datos climáticos. En la segunda fase, los datos recopilados se procesan y simulan utilizando Python y MATLAB.

Fase 1: Recopilación de datos sobre radiación solar difusa

a. Ubicación geográfica de los EPIME-LABS

En la **Figura 2**, se presenta la ficha de datos correspondiente a la ubicación geográfica de los EPIME-LABS, basada en las coordenadas de latitud -12.22 y longitud -76.96, obtenida a través del Software (RETScreen, 2024).

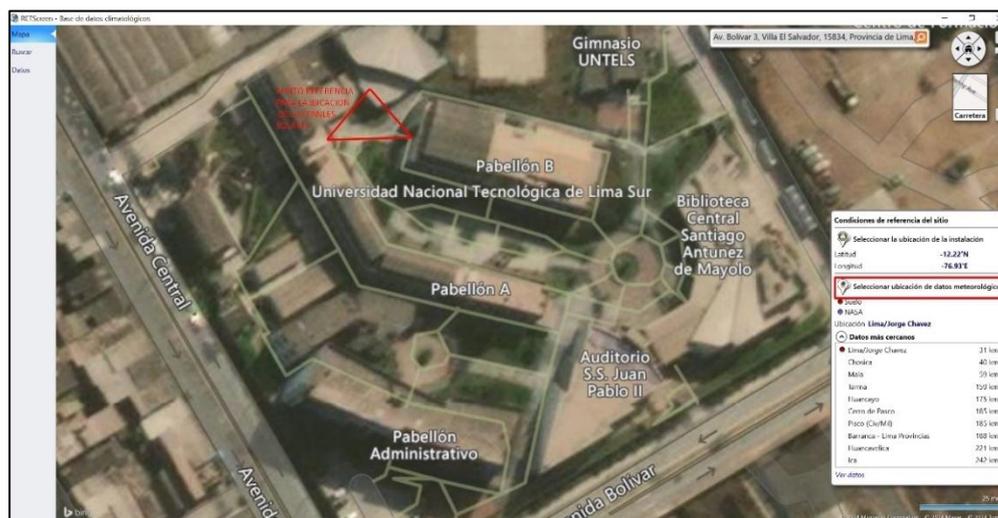
Figura 2. Datos de ubicación de la UNTELS.

Información de la instalación	
Tipo de instalación	Comercial/Institucional
Tipo	Educación
Descripción	Laboratorio
Preparado para	Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur
Preparado por	Dra. Margatita Murillo Manrique
Nombre de la instalación	Sistema de generación Solar
Dirección	Av. Bolívar S/N, sector 3 grupo 1, mz. A, sub lote 3
Ciudad/Municipalidad	Villa el Salvador
Provin./Estado	Lima
País	Perú

Nota: Plataforma del software (RETScreen, 2024)

Asimismo, la **Figura 3** detalla la ubicación geográfica desde donde se recopilaron los datos climáticos necesarios para el análisis de la radiación solar difusa.

Figura 3. Datos Geográficos EPIME-LABS para tomar los datos climáticos.



Nota: Plataforma del software (RETScreen, 2024)

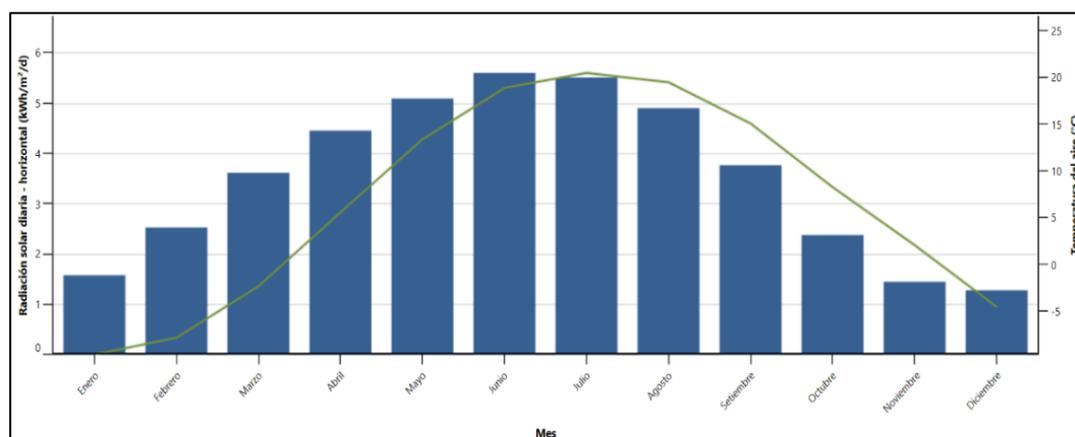
Además, se integraron datos de los institutos nacionales de meteorología y del Ministerio del Ambiente, junto con registros provenientes de la plataforma de monitoreo en tiempo real del sistema solar conectado a la red (On Grid). El informe de irradiación anual, se presenta de manera estructurada: la **Tabla 1** contiene los datos climatológicos recopilados, la **Figura 4** muestra la variación mensual de la radiación solar y la temperatura y la **Tabla 2** detalla los parámetros de irradiación difusa horizontal ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$) y la temperatura, obtenidos de las plataformas (RETScreen, 2024 y Censolar – PVsyst, 2024). Esta temperatura (T_{min}) será utilizada para evaluar los coeficientes del modelo.

Tabla 1. Datos Climatológicos en el área EPIME-LABS.

	Unidad	Ubicación de datos meteorológicos	Ubicación de la instalación	Fuente
Latitud		45.7	45.6	
Longitud		-73.4	-73.4	
Zona climática		6B - Frío - Seca		
Elevación	m	18	23	Definido por el usuario
Temperatura de diseño de la calefacción	°C			Suelo - Mapa
Temperatura de diseño del aire acondicionado	°C			Definido por el usuario
Amplitud de la temperatura del suelo	°C			Definido por el usuario

Mes	Temperatura del aire	Humedad relativa	Precipitación	Radiación solar diaria - horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del Viento	Temperatura del suelo	Grados-días de calefacción 18 °C	Grados-días de refrigeración 10 °C
	°C	%	mm	$\text{kWh}/\text{m}^2/\text{d}$	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Enero	-9.6	74.1%	70.37	1.58	100.9	4.7	-13.4	856	0
Febrero	-7.8	71.4%	58.52	2.53	100.9	4.5	-11.3	722	0
Marzo	-2.3	70.9%	70.99	3.62	100.9	4.6	-4.3	629	0
Abril	5.6	63.8%	84.00	4.46	100.7	4.4	5.4	372	0
Mayo	13.4	63.5%	89.90	5.10	100.7	4.2	12.7	143	105
Junio	18.9	68.6%	100.50	5.61	100.5	3.6	18.0	0	267
Julio	20.5	74.9%	98.89	5.52	100.6	3.2	20.5	0	326
Agosto	19.5	75.9%	97.34	4.91	100.7	2.8	19.7	0	295
Setiembre	15.1	77.7%	92.70	3.77	100.9	3.1	14.9	87	153
Octubre	8.3	76.5%	95.17	2.38	100.9	3.7	7.5	301	0
Noviembre	2.1	78.9%	85.80	1.45	100.9	4.2	0.2	477	0
Diciembre	-4.5	78.5%	85.56	1.28	100.9	4.4	-8.9	698	0
Anual	6.7	72.9%	1,029.74	3.52	100.8	3.9	5.2	4,284	1,145
Fuente	Suelo	Suelo	NASA	NASA	NASA	Suelo	NASA	Suelo	Suelo
Medido a					m	10	0		

Nota: Plataforma del software Censolar - PVsyst (2024)

Figura 4. Radiación Solar diaria /Temperatura del Aire mensual en los EPIME-LABS.

Nota: Plataforma del software Censolar - PVsyst (2024)

Tabla 2. Parámetros de Irradiación Global en el área EPIME-LABS.

Meses del año	Irradiación horizontal global	Irradiación difusa horizontal	Temperatura	Velocidad del viento	Turbidez linke	Humedad relativa
-	kWh/m2/día	kWh/m2/día	°C	m/s	-	%
Enero	7.94	2.36	13.4	2.50	4.294	61.3
Febrero	7.14	2.19	13.2	2.51	4.054	65.4
Marzo	7.38	1.75	13.3	2.40	4.010	63.6
Abril	6.93	1.45	12.9	2.30	3.858	58.1
Mayo	6.54	1.32	12.3	2.20	3.250	48.9
Junio	6.18	1.19	11.1	2.19	3.085	45.0
Julio	6.45	1.29	11.0	2.39	3.028	42.5
Agosto	6.73	1.40	12.1	2.60	3.369	39.5
Septiembre	7.18	1.75	12.9	2.70	3.670	44.8
Octubre	8.01	1.85	13.8	2.80	3.825	47.3
Noviembre	7.85	2.13	13.9	2.80	4.048	49.6
Diciembre	8.78	1.77	13.6	2.71	4.255	55.8
Promedio ai	7.26	1.70	12.8	2.5	3.729	5.18

Nota: Plataforma del software Censolar - PVsyst (2024)

b. Base de Datos de la Irradiación Solar

Para generar la base de datos, se recopilieron parámetros de la plataforma de información climática Censolar – PVsyst (2024). Este proceso se complementó con el modelo propuesto por Solano (2015) para el cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa. Asimismo, se consideró el estudio de Uzquiano & Sullivan (2015), quienes destacan que la energía solar captada anualmente por la Tierra asciende aproximadamente a $5,4 \times 10^{24}$ J, equivalente a 4,500 veces la energía consumida por la humanidad.

Los datos recopilados se organizaron en seis tablas (3, 4, 5, 6, 7 y 8), que presentan la irradiación solar correspondiente a ángulos de inclinación de 10°, 15°, 20°, 25°, 30° y 35°. En el artículo, se incluye únicamente la **Tabla 3**, correspondiente a 10°, como referencia para ilustrar los valores aplicados en el modelo, ya que las demás tablas presentan los mismos parámetros con diferentes datos.

Tabla 3. Niveles de Irradiación a 10° de inclinación.

MES/AÑO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	PROMEDIO
Jan	184.93	201.50	206.69	172.31	186.63	190.41
Feb	176.28	181.62	176.13	185.32	160.39	175.95
Mar	200.04	186.60	185.49	184.05	193.92	190.02
Apr	182.75	184.34	198.76	171.53	182.44	183.96
May	140.49	145.31	148.28	100.74	144.79	135.92
Jun	122.21	127.07	153.22	111.86	105.77	124.03
Jul	151.21	116.97	190.72	118.79	115.1	138.56
Aug	175.95	117.04	157.44	139.26	161.88	150.31
Sep	170.86	74.75	153.90	125.35	136.53	132.28
Oct	163.87	140.46	145.65	141.15	143.87	147.00
Nov	163.07	144.21	148.25	143.15	125.64	144.86
Dec	166.57	156.92	180.42	164.36	136.40	160.93
ANUAL	1998.23	1776.79	2044.95	1757.87	1793.36	1874.24

Nota: Plataforma del software Censolar - PVsyst (2024)

En la evaluación se analizaron tres factores clave: la intensidad de la radiación recibida por la tierra, los ciclos diarios y anuales de exposición, y las condiciones climatológicas específicas de los EPIME-LABS.

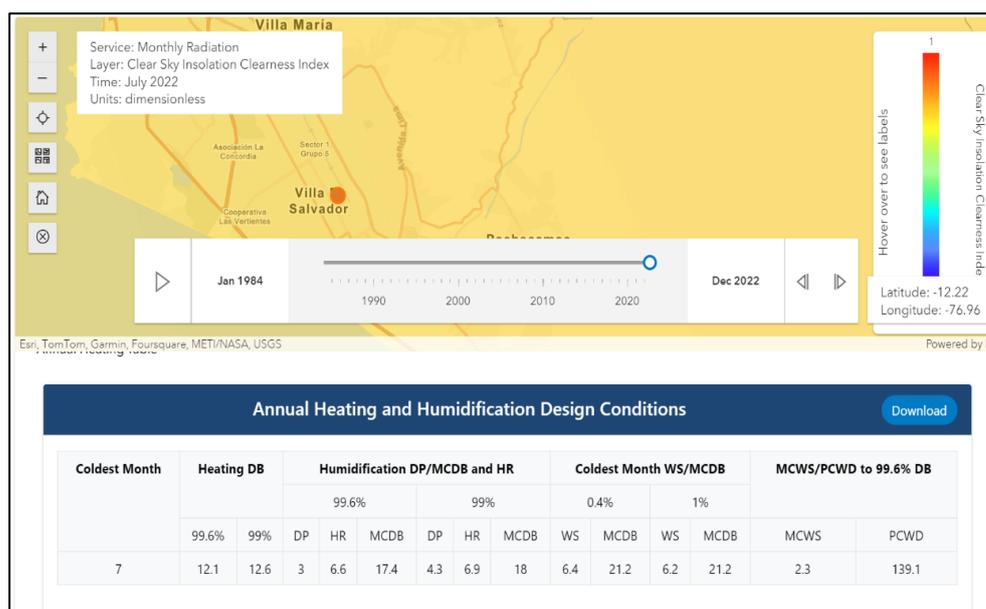
c. Evaluación de la HSP:

La HSP se calcula a partir de los datos de irradiación solar del lugar, expresados generalmente en kWh/m²/día o mes. Para determinarla, se divide la irradiación diaria total (kWh/m²/día) entre 1 kW/m² (1000 W/m²), lo que equivale a las horas en las que la irradiancia sería de 1000 W/m² bajo condiciones ideales.

$$HSP = \frac{kWh/m^2/mes}{1kW/m^2} \dots (2)$$

En este caso, el valor acumulado de irradiación solar mensual es de 190.4 kWh/m² (Tabla 3, promedio mensual de 5 años). Dividiendo entre los 30 días del mes, se obtiene una HSP diaria promedio de 6.35 horas. Estos valores fueron obtenidos a partir de la base de datos de irradiancia difusa generada con coordenadas de latitud -12.22 y longitud -76.96. Los resultados, se presentan en la **Figura 5**.

Figura 5. Niveles de humedad- frio y calor por año en la EPIME-LABS.



Nota: Nasa.gov (2024), ubicación EPIME-LABS-UNTELS

En la **Tabla 4**, se presentan las características geográficas específicas de potencia (w/día) y temperatura, utilizando la plataforma (SENAMHI, 2023). Esta temperatura (Tmax) será utilizada para evaluar los coeficientes del modelo.

Tabla 4. Parámetros de Irradiación Global en el área EPIME-LABS.

MES/AÑO	Potencia W/día	Temperatura °C	Velocidad del Viento m/s	Turbidez linke [-]	Humedad Relativa %
Jan	45.33	28.00	1.60	3.304	73.30
Feb	43.00	27.60	1.30	3.292	76.10
Mar	53.33	27.20	1.09	3.180	77.90
Apr	56.66	26.60	0.89	3.132	79.80
May	65.33	27.20	0.89	3.039	77.30
Jun	65.33	26.50	0.80	3.033	78.10
Jul	66.33	26.60	0.79	3.072	75.60
Aug	55.66	27.40	1.00	3.725	72.70
Sep	47.66	27.20	1.11	4.323	75.10
Oct	44.33	27.90	1.28	3.545	73.60
Nov	41.33	27.90	1.49	3.524	74.70
Dec	43.33	28.00	1.71	3.346	73.70

Nota: Plataforma (SENAMHI, 2023)

d. Desarrollo del modelo Bristow-Campbell.

Se aplicó el modelo Bristow-Campbell, ampliamente reconocido en estudios de estimación de radiación solar, siguiendo las definiciones establecidas en material teórico (Cáceres y otros, 2020; CaCondezo, 2019).

Primero calculamos las constantes:

$$a_B = 0.7$$

$$c_B = 2.116 - 0.0072(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) + 57.574e^{\phi} \quad \dots(3)$$

$$b_B = 0.107c_B^{-2.6485} \quad \dots(4)$$

ϕ - latitud de la ubicación en radianes.

- a_B**: Representa el valor máximo del coeficiente de transmisión atmosférica, característico de cada área de estudio y dependiente de factores como la contaminación atmosférica y la altitud.
- b_B**: Determina la sensibilidad del modelo frente a los cambios en la amplitud térmica diaria ($\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$).
- c_B**: Relaciona la amplitud térmica con la transmisión atmosférica, ajustándose a las condiciones específicas del lugar.

Posteriormente evaluamos el modelo H/H_0 en la siguiente ecuación:

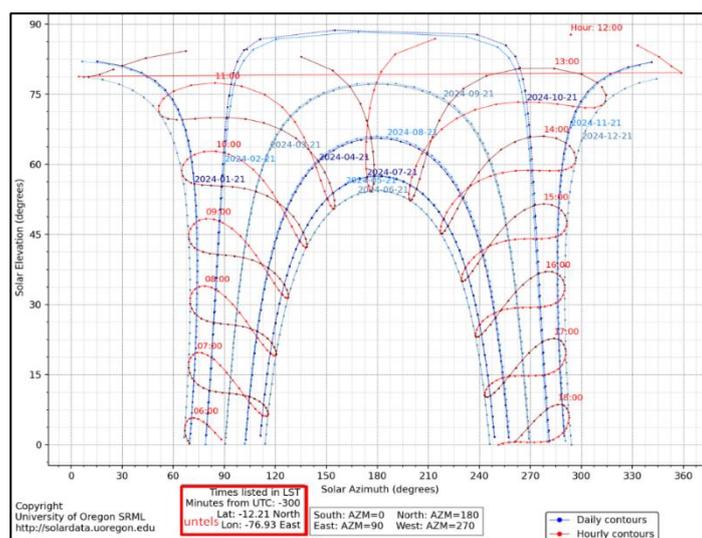
$$\frac{H}{H_0} = a_B \cdot [1 - e^{-b_B(T_{\max} - T_{\min})^{c_B}}] \quad \dots\dots (1)$$

Fase 2: Procesamiento y simulación de los datos

Resulta fundamental analizar el recorrido del sol a lo largo del año. Para el caso de los EPIME-LABS, este análisis se realizó utilizando la plataforma PVGIS-NSRDB (2024).

En la **Figura 6**, se presenta el gráfico del camino solar cartesiano generado a partir de simulaciones realizadas con las coordenadas de latitud -12.22° y longitud -76.96° . Los ejes del gráfico representan la elevación solar (en grados) y el azimut solar (en grados), permitiendo visualizar la trayectoria del sol durante un período determinado.

Figura 6. Recorrido solar cartesiano en la zona de los EPIME-LABS.



Para comparar las estimaciones de la irradiancia solar, es necesario calcular los

valores correspondientes a las ecuaciones (2), (3) y (1) del modelo Bristow-Campbell. Para este análisis, se utilizaron datos de temperatura (Tabla 3= $T_{\min}=13^\circ\text{C}$, Tabla 4= $T_{\max}=28^\circ\text{C}$) correspondientes al mes de enero. Para facilitar los cálculos, se desarrolló un programa en Python, cuya implementación se detalla en la **Figura 7**.

Figura 7. Programa en Python- Modelo de Bristow-Campbell

```
python Copiar código

# Parámetros iniciales
T_max = 28 # Temperatura máxima (°C)
T_min = 13 # Temperatura mínima (°C)
Delta_T = T_max - T_min # Diferencia de temperaturas

# Constantes del modelo Bristow-Campbell
a_B = 0.7
c_B = 2.116 - 0.0072 * Delta_T + 57.574 * (2.718 ** -Delta_T) # Fórmula para c_B
b_B = 0.107 * c_B - 2.6485 # Fórmula para b_B

# Cálculo de la relación H/H0
tau = a_B * (1 - (2.718 ** (-b_B * Delta_T)))

# Mostrar resultados
print(f"Temperatura máxima (T_max): {T_max}°C")
print(f"Temperatura mínima (T_min): {T_min}°C")
print(f"Diferencia de temperatura (Delta_T): {Delta_T}°C")
print(f"Coeficiente a_B: {a_B}")
print(f"Coeficiente c_B: {c_B:.4f}")
print(f"Coeficiente b_B: {b_B:.4f}")
print(f"Relación H/H0 (tau): {tau:.4f}")
```

Nota: Coeficientes del modelo.

Posteriormente se desarrolló un programa en la plataforma Matlab Professional (2019), para todos los valores (Tabla 3 y Tabla4), la sintaxis se muestra en la **Figura 8**.

Figura 8. Programa en el MATLAB- Modelo Bristow-Campbell.

```
Editor - C:\Users\User\Downloads\Bristow_Campbell.m
Bristow_Campbell.m x +
1 function [H, bB, cB] = Bristow_Campbell(Tmax, Tmin, x)
2
3 %%
4 % * Modelo de Bristow-Campbell para estimar la radiación solar *
5 % Entradas:
6 % Tmax - Temperatura máxima diaria (°C)
7 % Tmin - Temperatura mínima diaria (°C)
8 % phi - Latitud (radianes)
9 % Salidas:
10 % * H - Radiación solar diaria (MJ/m²/día)
11 % bB, cB - Coeficientes del modelo de Bristow_Campbell_
12 % * Coeficiente del modelo de Bristow-Campbell_
13 aB = 0.68;
14
15 %%
16 % * Calcular los coeficientes de Bristow_Campbell_
17 % * Tener presente las temperaturas_
18 Tmax=[23.1 24.8 21.5 23.4 21.6 22.9 22.1 22.9]';
19 Tmin=[15 13.3 17.9 16.2 17.8 15.8 17.1 17.4 ]';
20
21 %%
22 % * Tener en cuenta que x=latitud (Phy)_
23 x=[0.2093 0.2086 0.2106 0.2056 0.2106 0.2109 0.2109 0.2094]';
24 cB = 2.116 - 0.072*(Tmax - Tmin) + 57.574*exp(x);
25 bB = 0.107 *cB.^(-2.6485);
26
27 %%
28 % * Calcular la radiación solar diaria_
29 % * Tener en cuenta que Hp=H/Ho_
30 H = aB * (1 - exp(-bB .* (Tmax - Tmin).^cB))
31 plot(x,H,"r--");
32 title('Bristow-Campbell')
33 ylabel('H/Ho')
34 xlabel('Latitud')
35
Command Window
```

Nota: Coeficientes del modelo. Matlab Profesional (2024)

Para estas simulaciones se han trabajado con 1800 días (12m*30d*5a), para cada ángulo de elevación) sin embargo, se recomienda que se considere un

mínimo de 100 a 3000 días distribuidos adecuadamente a lo largo del año para proporcionar estimaciones razonables.

2. Resultados

Los resultados del modelo Bristow-Campbell incluye los coeficientes (a_B , b_B , c_B) y el índice de radiación difusa (H/H_o), específicamente adaptados a las condiciones de los EPIME-LABS. De la base de datos sobre la estimación de irradiación solar, se han obtenido los siguientes resultados preliminares:

En la **Tabla 5** se presentan los promedios mensuales de irradiación solar difusa, calculados para diferentes ángulos de inclinación (10° , 15° , 20° , 25° , 30° y 35°), así como los valores máximos y mínimos registrados para cada mes. Estos datos fueron extraídos de las plataformas (RETScreen (2024), Censolar - PVsyst (2024), SENAMHI (2023), Matlab Professional (2019) y Mapa solar del Perú (2024) y procesados con el fin de evaluar el impacto de la inclinación en la captación de energía solar a lo largo del año.

Tabla 5. Valores de Irradiación solar Difusa por Mes y Angulo de inclinación.

Meses	Inclinación ($^\circ$)	Máximo (kWh/m 2)	Promedio Mensual (kWh/m 2)	Mínimo (kWh/m 2)
Jan- Dec	10	190.41	156.19	124.03
Jan- Dec	15	189.71	156.15	126.5
Jan- Dec	20	188.39	155.45	130.21
Jan- Dec	25	188.56	153.95	131.63
Jan- Dec	30	188.4	151.75	129
Jan- Dec	35	187.13	148.48	123.37

Nota: Tomados de RETScreen (2024), Censolar - PVsyst (2024)

En la **Tabla 6**, se muestra la evaluación de la HSP para todos los meses, además es importante resaltar los valores Máximo, Promedio y Mínimo.

Este enfoque permite mostrar cómo varía la HSP de acuerdo con la inclinación y el mes del año y cómo esos valores pueden influir en la eficiencia del sistema fotovoltaico (Martínez y otros, 2017; ASTM, 2000).

Tabla 6. HSP de Irradiación solar Difusa por Mes y Angulo.

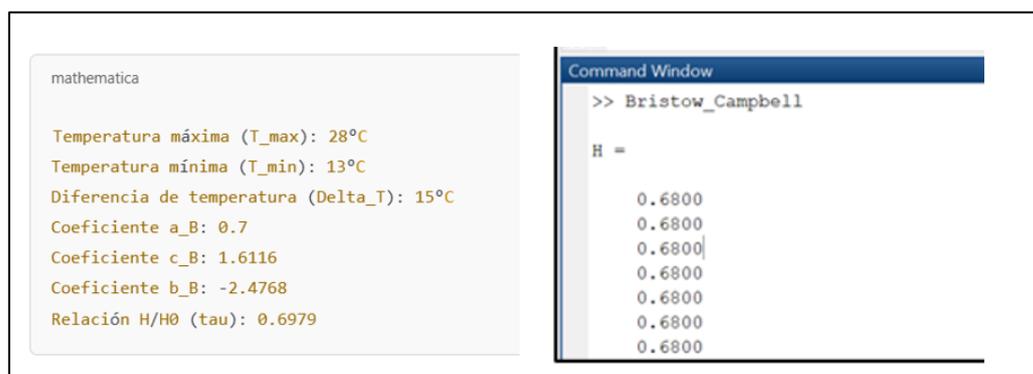
Meses	Inclinación ($^\circ$)	HSP-Max (hora/mes)	HSP-Promedio (hora/mes)	HSP-Max (hora/mes)
Jan- Dec	10	6.35	5.21	4.13
Jan- Dec	15	6.32	5.21	4.13
Jan- Dec	20	6.28	155.45	4.22
Jan- Dec	25	6.29	155.45	4.34
Jan- Dec	30	6.28	155.45	4.39
Jan- Dec	35	6.24	155.45	4.30

De la base de datos sobre la estimación de irradiación, se elaboró la **Tabla 7**, cuyos datos han servido para desarrollo la sintaxis en Matlab Professional (2019) para determinar los coeficientes del modelo Bristow-Campbell.

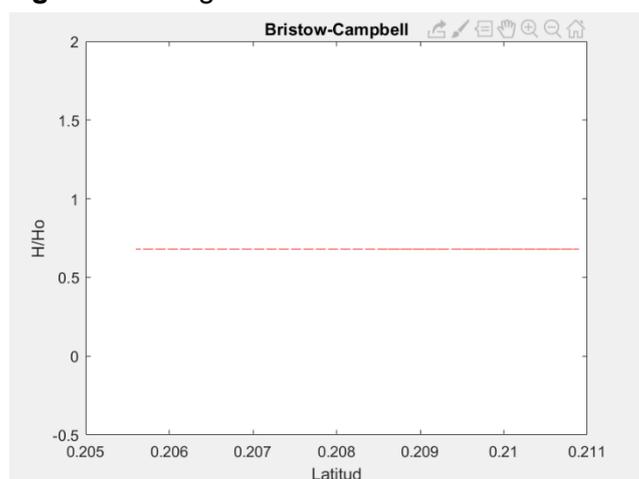
Tabla 7. Coeficientes del modelo Bristow-Campbell.

Código	Latitud °C	Latitud (Rad)	Tmax	Tmin	Altitud
110543	11°59'	0.2091	23.1	15	566
120544	11°57'	0.2086	24.8	13.3	850
120515	12°04'	0.2186	21.5	17.9	70
120618	11°47'	0.2056	23.4	16.2	410
110601	12°04'	0.2106	21.6	17.8	13
130610	12°05'	0.2109	22.9	15.8	238
130617	12°05'	0.2109	22.1	17.1	137
140500	12°00'	0.2094	22.9	17.4	13

Para latitudes similares y temperaturas similares, el resultado (H/H_0) tiende a ser constante con valores muy cercanos a la simulación con Python y Matlab, según se muestra en la **Figura 9**.

Figura9. Corrida en Python y en MATLAB- Modelo Bristow-Campbell.

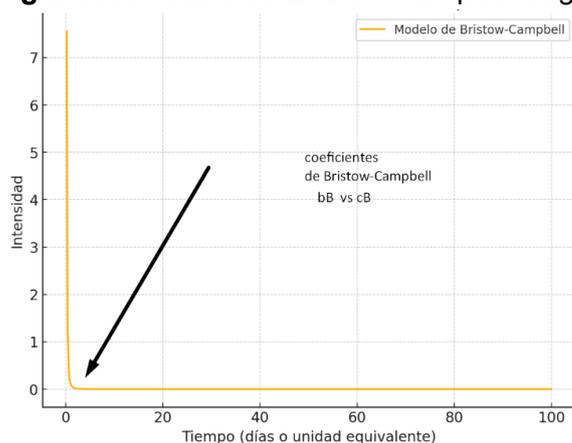
Las predicciones de irradiancia solar obtenidas en las simulaciones se presentan en la **Figura 10**, donde se evidencia que el coeficiente H/H_0 tiende a mantenerse constante.

Figura 10. Programa en el MATLAB- Modelo de Bristow-Campbell.

Nota: Niveles de Irradiancia. Matlab Profesional (2024)

Por otro lado, en la **Figura 11** se muestra comparativamente los valores de los coeficientes b_B y c_B del modelo Bristow-Campbell, resaltando sus variaciones y su relación con las condiciones climáticas de los EPIME-LABS.

Figura 11. Modelo de Bristow-Campbell segun sus coeficientes b_B y c_B .



Nota: Simulación Matlab Profesional (2024)

La **Tabla 8**, muestra los resultados preliminares, de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell (a_B , b_B , c_B), así como el error promedio porcentual encontrados en las zonas propuestas donde se instalarán los paneles solares. Estas zonas comprenden el pabellón B, el pabellón C y el mini auditorio, seleccionados por estar más cercanos a los EPIME-LABS. Se puede observar que los coeficientes del modelo Bristow-Campbell, no tienen gran variación, por lo cual se puede conceptualizar la elección de la mejor zona en cuanto a infraestructura para designar la ubicación de los paneles fotovoltaicos.

Tabla 8. Coeficientes del modelo Bristow-Campbell.

Ubicación Meteorológica	a_B	b_B ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	c_B	Numero de datos	Error %
UNTELS - LABS					
Pabellón B	0.68	1.26	72.51	1800	9.33
Pabellón C	0.68	1.25	72.53	1800	9.31
Mini-auditorio	0.68	1.26	72.52	1800	9.32

3. Discusión

Sobre la importancia del Modelo Bristow-Campbell, los resultados en los EPIME-LABS permitió analizar con precisión la variabilidad de la radiación solar bajo diferentes condiciones climáticas. En comparación con estudios previos, como los presentados por Ordoñez-Palacios et al. (2020) y Cuestan et al. (2023), que emplean técnicas avanzadas como redes neuronales recurrentes y aprendizaje automático, el modelo Bristow-Campbell ofrece una solución más simplificada pero igualmente efectiva en áreas con datos climáticos limitados, como temperaturas máximas y mínimas, obteniendo resultados precisos con menor dependencia de datos complejos.

Además, Baigorria et al. (2023b) destacan la importancia de los modelos de interpolación para regiones montañosas, enfatizando la capacidad de estas metodologías para adaptarse a condiciones topográficas desafiantes. En este sentido, los coeficientes derivados del modelo Bristow-Campbell muestran comportamientos similares, destacando la estabilidad del coeficiente H/H_0 . Este hallazgo es consistente con lo reportado por Murillo (2017), quien resalta la relevancia de los análisis locales para la integración efectiva de fuentes renovables en sistemas de generación distribuida.

Finalmente, se observó que el ángulo de inclinación óptimo varía ligeramente dependiendo de la época del año y de la latitud específica del lugar. Para inclinaciones bajas (10°), se maximiza la captación de radiación durante los meses con mayor ángulo solar, mientras que para inclinaciones más altas (35°), la captación mejora en meses con menor radiación directa. Esto subraya la importancia de ajustar la inclinación según las condiciones estacionales, como también lo mencionan estudios recientes enfocados en el diseño dinámico de sistemas solares (Gamio, 2014)

Ordoñez y otros (2020), Cuestan A (2023) y Baigorria (2017) por su parte, han empleado el entrenamiento de redes neuronales artificiales (RNA), recomendando que se realice estudios posteriores empleando inteligencia artificial, mientras que Ygos (2022) ha propuesto el uso del software Power Factory para describir la radiación solar y ha realizado simulaciones con el programa PV*SOL, finalmente Bristow & Campbell, (1984), CaCondezo y otros (2019), aplican el modelo Bristow-Campbell generando una base de datos anuales de irradiación solar de hasta $5,5 - 6,5 \text{ kWh m}^2$. Todos los trabajos revisados coinciden en la importancia de comprender el comportamiento de la “radiación solar” en una región específica para el diseño adecuado de parques solares.

Conclusiones

Los resultados obtenidos a través del modelo Bristow-Campbell muestran un alto grado de consistencia en la predicción de la irradiación solar para diferentes ángulos de inclinación. El análisis de los valores de H/H_0 , demuestran que el modelo es capaz de capturar con precisión las variaciones de radiación solar bajo condiciones climáticas específicas de los EPIME-LABS. Respecto a la aplicación de los coeficientes del Modelo (a_B , b_B y c_B), estos corresponden a zonas con características específicas de régimen térmico, lo que valida su uso en áreas que comparten condiciones similares. Por tanto, los resultados obtenidos son representativos y adecuados únicamente para la zona de los EPIME-LABS, destacando la necesidad de ajustar los coeficientes para otras ubicaciones.

En cuanto a la optimización de ángulos de inclinación, los análisis realizados evidencian que el ángulo de inclinación óptimo para maximizar la captación de radiación solar varía según la época del año. Se concluye que una inclinación menor (10°) es más efectiva durante los meses con mayor ángulo solar, mientras que una inclinación mayor (35°) es más adecuada en meses con menor radiación directa. Esto subraya la importancia de considerar variaciones estacionales en el diseño de sistemas solares.

Finalmente, la relevancia para estudios futuros, se determina en los hallazgos de esta investigación, proporcionando un marco de referencia sobre radiación solar, promoviendo la optimización de tecnologías renovables y su integración en escenarios reales y desarrollar otros modelos como redes neuronales artificiales (RNA) e inteligencia artificial.

4. Referencias Bibliográficas

- ASTM (2000). *Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables*. Standard E490-00, ASTM.
- Baigorria, G.A., W.T. Bowen and J.J. Stoorvogel. (2023b). *A process-based interpolation model for maximum and minimum temperatures and solar radiation in mountain areas*”, revista *Agricultural and Forest Meteorology* – Elsevier.
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). *On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(2), 159–166.
- CaCondezo, D., Ramos, A., Massipe, J., Camayo B., Adrianmayo, and Becquer. (2019). *Estimación de la radiación solar global, mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow – Campbell en la región Junín*. *Prospect. Univ.*, vol. 1, no. 1990–2409, p. 10. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000400643>
- Cáceres, L., Torres, H., and Chávez J. (2020). *Aplicación del modelo Bristow-Campbell para estimar la irradiación solar global en la zona alto andina de la región Tacna*. *Ciencias*, vol. 3, no. 3, pp. 81–91. doi: 10.33326/27066320.2019.3.954.
- Censolar - PVsyst 7.2 (2015). *Software solar para plantas a gran escala, Radiation database:PVGIS-SRDB 7.2*. - https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP
- Cuestan A., Constante, J., Jijón, D. (2023). *Modelos de predicción de radiación solar y temperatura ambiente mediante redes neuronales recurrentes*. *Revista Técnica “energía”*. No. 19, Issue II, Pp. 81-89 ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074. Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n2.2023.552>
- Datos de energía solar (2024) https://idesepe.senamhi.gob.pe/portalidesepe/idesepe_tema_atlas_energiasolar.jsp
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.
- Gamio, P. (2014). *Energías Renovables y Cambio Climático, 7 proyectos demostrativos de un desarrollo sustentable*. *Konrad Adenauer Stift. e.V.*, p. 84, [Online]. Available: http://www.kas.de/wf/doc/kas_39491-1522-4-30.pdf?141110180444
- Iverson, B. L. and P. B. Dervan (2015). *Experiencias con Sistemas Fotovoltaicas de Tercera Generación en Argentina, Bolivia y Perú*, pp. 7823–7830.
- Labouret y Viloz (2008). *Energía Solar Fotovoltaica. Manual Práctic*. Editorial: AMV Edición: 1 / Materia: Ingeniería Electrónica - Electricidad ISBN: 978-84-96709-00-3 Páginas: 322 Encuadernación: Tapa dur.
- Mapa solar del Perú (2024). <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/peru>
- Matlab Professional (2019). *Software MathWorks T2019a-*

- Martinez, M., Morales, T., Clemente, I. y Castro, E.(2017). *The hour equivalent solar pick: Definition and interpretation*. *Energética* [online]., vol.38, n.2, pp.124-131. Disponible en:<http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012017000200007&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1815-5901.
- Minister Of Natural Resources, RETSscreen Software (2024). *Energias Limpias. V9.1. Clean Energy Management Software platform enables low-carbon planning, implementati vareness-Quebec-CANADA*
- Murillo, M. Choque, M. and Salazar, K. (2023). *Emprendimiento sobre electrificación en baja tensión en la innovación del laboratorio de instalaciones eléctricas en la UNTELS*. vol. 3, no. 2, pp. 92–107, 2023, [Online]. Available: <https://revistas.untels.edu.pe/index.php/files/article/view/94/vol>
- Murillo, M. (2018). *Estrategias para comercializar energías renovables en el mercado eléctrico peruano*. *Perfiles Ing.*, vol. 13, no. 13, pp. 155–170. doi: 10.31381/perfiles_ingenieria.v13i13.1471.
- Murillo, M. (2017). *Instalaciones inteligentes en el uso racional de la energía eléctrica*. *Paideia*, vol. 3, no. 4, pp. 171–181. doi: 10.31381/paideia.v3i4.936.
- Nasa.gov (2024). *Plataforma Power Dta Acces Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Ordoñez, L., León D., Bucheli- V. A. and Ordoñez H.(2020). *Solar Radiation Prediction on Photovoltaic Systems Using Machine Learning Techniques*. *Rev. Fac. Ing.*, vol. 29, no. 54. doi: 10.19053/01211129.v29.n54.2020.11751.
- Servicio Nacional De Meteorología E Hidrología-DEP-MEM (2003). *Atlas De Energía Solar Del Perú*, SENAMHI, pp. 1–66. <https://www.senamhi.gob.pe/pdf/Atlas%20deRadiacionSolar.pdf>
- Uzquiano, C. & Sullivan, M. (2015). *Solar Energy International*.
- Solano-Peralta (2015). *Estado actual de la energía solar fotovoltaica en Latinoamérica y el Caribe*, p. 260.
- Valdés, M. and Aracinbia, R. (2012). *Radiación Solar. La Radiac. Sol.*, p. 80.
- Wright, J. (2008). *Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica*. *Uniciencia*, vol. 22, no. 1–2, pp. 55–69. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475948929008>
- Ygos, F., González, M., Vilaragut, A., Martínez, Salgado, Y., and Szpytko, J. (2022). *Modelos de radiación solar a emplear en PowerFactory para la simulación de Sistemas Fotovoltaicos*. *Ing. Energética*, vol. 43, no. 2, pp. 1–8. [Online]. Available: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>