

Determinación y análisis temporal de la radiación solar global en el Altiplano de Puno

Determination and temporal analysis of global solar radiation in the Puno Altiplano

Lelia Quispe Huamán^{1*} Guina Sotomayor Alzamora²

Recibido 14 de septiembre de 2020, aceptado 23 de diciembre de 2021

Received: September 14, 2020 Accepted: December 23, 2021

RESUMEN

El sol proporciona una fuente estable y confortable de calor, luz y es la fuente central de energía renovable. Su estudio es vital para evaluar su disponibilidad y utilidad en diversas aplicaciones para establecer recursos de energía solar utilizando energía limpia y gratuita. Este trabajo analiza la disponibilidad de radiación solar global en tres zonas ecológicas del altiplano de Puno como Circunlacustre, Puna Húmeda y Clima de Altura; involucrando catorce estaciones meteorológicas del SENAMHI desde 2007 al 2013. El modelo utilizado es el de Bristow y Campbell, que es simple, confiable y efectivo, y utiliza datos que se encuentran fácilmente en las estaciones meteorológicas. Como resultado, se ha encontrado una correlación de 0,938, entre la radiación solar global estimada y medida, además, se ha observado que la radiación solar global tiene comportamientos estacionales durante los años analizados. Posteriormente, se obtuvieron los promedios anuales máximos y mínimos de las zonas evaluadas. Los valores son 6,342 y 5,481; 6,783 y 5,908; 7,298 y 5,945 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$, respectivamente. Se concluye que los resultados en el área de estudio son apropiados y muy rentables para aplicaciones de energía solar debido a que son superiores a 4,000 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en el período analizado. Finalmente, se busca que la radiación solar global se transforme en energía térmica y eléctrica, para ayudar a solucionar problemas como las heladas, que afronta la población de la zona altoandina de la región Puno.

Palabras clave: Altiplano de Puno, Bristow y Campbell, variabilidad de la energía solar, radiación solar global, amplitud térmica, transmitancia atmosférica máxima.

ABSTRACT

The sun provides a stable and comfortable source of heat, light and is the central source of renewable energy. Its study is vital to evaluate its availability and usefulness in various applications to establish solar energy resources using clean and free energy. This work analyzes the availability of global solar radiation in three ecological zones of the high plateau of Puno as Circunlacustre, Puna Húmeda and Climate of Height; involving fourteen SENAMHI meteorological stations from 2007 to 2013. The model used is that of Bristow and Campbell, which is simple, reliable and effective, and uses data that are easily found in meteorological stations. As a result, a correlation of 0,938 was found between the estimated and

¹ Universidad Nacional del Altiplano. Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas. Puno, Perú.
E-mail: lquispeh@unap.edu.pe

² Universidad Nacional del Altiplano. Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas. Puno, Perú.
E-mail: gsotomayor@unap.edu.pe

* Autor de correspondencia: lquispeh@unap.edu.pe

measured global solar radiation, observing the global solar radiation has seasonal behaviors during the years analyzed. Subsequently, the maximum and minimum annual averages of the evaluated areas were obtained. The values are 6,342 and 5,481; 6,783 and 5,908; 7,298 and 5,945 kWh.m⁻².day⁻¹, respectively. It is concluded that the results in the study area are appropriate and very profitable for solar energy applications because they are higher than 4,000 kWh.m⁻².day⁻¹ in the period analyzed. Finally, it is sought that global solar radiation is transformed into thermal and electrical energy, to help solve problems such as frost, faced by the population of the high Andean area of the Puno region.

Keywords: *Altiplano de Puno, Bristow and Campbell, variability of solar energy, global solar radiation, thermal amplitude, maximum atmospheric transmittance.*

INTRODUCCIÓN

La fuente de energía para la vida proviene del sol, que proporciona una fuente estable y confortable de calor y luz [1]. La energía recibida por el sistema de la tierra y atmósfera es también crucial para equilibrar la energía en nuestro planeta [2]; además, es la principal fuente de energía renovable que soporta la biósfera y estimula los procesos físicos, químicos y biológicos en la tierra, tales como los procesos ecológicos y biofísicos [3], como la fotosíntesis y los procesos ambientales relacionados a la temperatura del aire y suelo, afectando la transferencia de calor por medio de la evaporación y transpiración [4]. Sin embargo, no toda la radiación solar consigue incidir a la superficie terrestre, esto se debe a que interactúa con componentes atmosféricos al atravesar la masa atmosférica y sufre la acción de procesos de reflexión, dispersión y absorción [5]. Así, el 51% de la radiación extraterrestre está disponible para procesos en medios físicos y biológicos, la fracción que efectivamente llega a la superficie terrestre se denomina radiación solar global [6].

El conocimiento preciso de la radiación solar permite evaluar su disponibilidad y utilidad en aplicaciones de diversas áreas, como la meteorología, climatología, hidrología, agricultura, entre otros [7, 8, 9]. Además, los datos de la radiación solar global son útiles para poder predecir la eficiencia y optimización del diseño de dispositivos solares como los colectores solares térmicos y sistemas fotovoltaicos [10, 11]. Predecir la radiación solar global es fundamental para establecer la eficacia de los recursos de la energía solar, haciendo uso de energía libre y limpia, identificando y evaluando el uso de energía solar en diferentes lugares alrededor del mundo [12].

En zonas altoandinas del Perú, no existen muchas estaciones meteorológicas del SENAMHI que recolectan datos para que se puedan realizar mediciones de radiación solar, por lo que la información existente puede no ser de fácil acceso o puede estar incompleta [13]. En este escenario, surgen los modelos empíricos [14, 15, 16], que sirven como herramientas esenciales y económicas, pues dependen de datos básicos, como el geoposicionamiento y las variables meteorológicas [17, 18, 19]. Por ejemplo, los modelos Bristow y Campbell y Hargreaves-Samani [20] utilizan la temperatura del aire, ubicación, el día del año, amplitud térmica y las condiciones atmosféricas para estimar la radiación solar global [21], así estos modelos empíricos pueden ser usados como predictores [22].

Dada la importancia que tiene el estudio y aplicación de la radiación solar en proyectos energéticos, se presenta el Modelo Bristow y Campbell para determinar la radiación solar global y analizar la disponibilidad en tres zonas altoandinas, ubicadas dentro del departamento de Puno: La zona Circunlacustre, la zona de Puna Húmeda y la zona de Clima de Altura, durante el periodo de 2007 a 2013.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y datos utilizados

La presente investigación se realizó en el departamento de Puno, específicamente en el altiplano Puneño, ubicado a más de 3810 m.s.n.m. y abarcó tres zonas específicas: La zona Circunlacustre, la zona de Puna Húmeda y la zona de Clima de Altura, considerando las estaciones que se encuentran dentro de cada zona [23]. Algunas especificaciones se detallan a continuación:

- **Zona Circunlacustre**, corresponde al área que bordea al lago Titicaca, comprende a las

estaciones de Puno, Juli, Capachica, Moho y Yunguyo. En esta zona ocurre un efecto termorregulador, que consiste en que el lago absorbe el calor del sol durante el día y lo pierde de forma lenta durante la noche, debido a este efecto, disminuye fuertemente la amplitud térmica.

- **Zona Puna Húmeda**, comprende a las estaciones de Azángaro, Crucero, Desaguadero, Huancané, Ilave y Putina. En esta zona la temperatura sufre fuertes descensos, debido a la presencia de heladas más o menos intensas, específicamente en estaciones de invierno.
- **Zona Clima de Altura**, comprende a las estaciones de Ananea, Capazo y Mazocruz. En esta zona de altura, la topografía es sumamente accidentada, con suelos erosionados y vegetación natural muy pobre. Existe poca información meteorológica; sin embargo, se estima que la temperatura promedio es sumamente baja, clara indicación de heladas intensas frecuentes durante todo el año.

Los datos utilizados para la determinación de la radiación solar global han sido medidos por las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). El periodo de estudio considerado fue de enero del 2007 a diciembre de 2013, con intervalos de 15 minutos. Como excepción a la toma de datos, los correspondientes a la estación de Puno corresponden al periodo de enero del 2007 a diciembre del 2017. Todos los datos fueron almacenados en la base de datos que proporciona el software Weatherlink. Además, para la validación, se consideraron los datos de radiación solar global medidos con el Piranómetro de la marca Kipp-Zonen, específicamente utilizando el modelo de clase CMP11, que es un piranómetro estándar secundario ISO, el cual posee un nivel de sensibilidad de $7,000$ a $14,000 \mu V.W^{-1}.m^{-2}$.

Modelo Bristow y Campbell

El costo de realizar mediciones de radiación solar global es alto, además se requiere de equipos altamente especializados y un tiempo extenso de procesamiento, por esta razón datos de la radiación solar global no están disponibles en la mayoría de las regiones del mundo [24, 25]. Sin embargo, se puede estimar la radiación solar global utilizando métodos empíricos como el modelo de Bristow y Campbell, el cual es un método simple, rápido, confiable

y efectivo [3]. Su uso se simplifica pues utiliza datos comunes, los cuales pueden ser fácilmente encontrados en las estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Cuando la radiación solar llega a la superficie terrestre, una parte de ella se refleja y la otra se absorbe. Además, al calentarse el suelo, se emite una radiación de onda larga, que calienta el aire adyacente, contribuyendo a cambiar su temperatura. Basados en ese argumento, Bristow y Campbell presentaron un modelo empírico para estimar la radiación solar global diaria, en función de la radiación extraterrestre y la diferencia diaria entre las temperaturas máximas y mínimas [26], por esta razón, este modelo depende de la relación entre el calor sensible y el calor latente. El calor sensible depende de la radiación solar diaria entrante y es responsable de las temperaturas máximas del aire. Por la noche, el calor sensible se pierde en el espacio, en forma de radiación de onda larga, junto con los flujos radiantes, esto da lugar a un descenso de la temperatura del aire, hasta que se alcanza la temperatura mínima diaria, normalmente justo antes del amanecer [27].

La radiación solar global diaria es estimada como una función de radiación extraterrestre y la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima diarias, como se muestra en la ecuación (1), donde R_g es la radiación solar global ($kWh.m^{-2}$), R_e la radiación solar extraterrestre ($kWh.m^{-2}$), T_{max} la temperatura máxima ($^{\circ}C$), T_{min} la temperatura mínima ($^{\circ}C$). Además, se utilizan los coeficientes empíricos con significado físico A, B y C, siendo A el valor máximo de la transmitancia atmosférica característica a cada área de estudio, depende de la contaminación y altitud de la zona, los coeficientes B ($^{\circ}C^{-1}$) y C determinan el efecto del incremento en la amplitud térmica (representada también como ΔT) en los máximos valores de transmitancia atmosférica (A_t) [26], vale decir que estos últimos coeficientes dependen de la amplitud térmica y latitud correspondiente a la zona evaluada.

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

Los coeficientes B y C propuestos, pueden ser aplicados solamente en áreas con similares

condiciones de régimen térmico, esto debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciados por la topografía, latitud y altitud, entre otros factores. Las ecuaciones empíricas, ecuación (2) y ecuación (3) determinan el valor de tales coeficientes [28], donde ϕ representa a la latitud.

$$C = 2,116 - 0,072(T_{\max} - T_{\min}) + 57,574e^{\phi} \quad (2)$$

$$B = 0,107C^{-2,6485} \quad (3)$$

Para la aplicación de este modelo, es necesario contar con las coordenadas geográficas de las zonas de estudio, representadas por la latitud ϕ , que es la distancia angular entre la línea ecuatorial a un punto de la tierra, al norte o al sur del ecuador, entre los $-90^{\circ} \leq \phi \leq 90^{\circ}$ [29]; la longitud es el ángulo formado por el meridiano de Greenwich y un punto de la superficie de la tierra, el ángulo es negativo en el oeste y positivo hacia el este [30]; y la altitud, que es la cantidad de metros sobre el nivel del mar del lugar evaluado, en la Tabla 2 se muestran tales valores para la zona de estudio, localizada en el Altiplano Puneño.

El modelo de Bristow y Campbell ha sido utilizado en diversos estudios, debido a la simplicidad de datos utilizados [31]. En estados Unidos se demostró que su desempeño pudo explicar entre un 70% y 90% de la variación de la radiación solar de la zona evaluada, esto se dio de manera similar en China [3, 27], en Bolivia se obtuvo una validez al 89% [21] y al sureste de Brasil se obtuvo un mejor desempeño de la estimación de radiación solar global [32, 33].

En el Perú se han desarrollado diversos trabajos sobre Energía Solar, entre ellos se destaca la generación de un Atlas de Energía solar [34], trabajo multisectorial que buscaba establecer las zonas con elevado potencial de energías renovables, cuantificando su disponibilidad a fin de conocer su distribución temporal a lo largo del territorio peruano, utilizando además diferentes metodologías para probar la efectividad de diferentes modelos para la costa, sierra y selva del Perú, donde, al igual que en el trabajo de Baigorria *et al.* [25] concluyen que el modelo Bristow y Campbell es el que se adecua mejor a las condiciones de Perú, esto debido a que la topografía peruana es compleja.

Otro trabajo más reciente, utilizando el modelo Bristow y Campbell fue presentado por Camayo *et al.* [28], quienes comprobaron la validación del modelo, a través de la radiación solar global media mensual en Junín, cuyos resultados indican que no existen mayores diferencias entre los valores registrados y los calculados por el modelo aplicado. Así mismo, concluyeron que para que una región sea económicamente rentable, la energía solar debe ser mayor que $4,000 \text{ kWh.m}^{-2}$ por día. Los autores consideraron el valor empírico A de la estación Huayao del Atlas de Energía Solar [34], cabe mencionar que este Atlas informa también sobre el fenómeno del efecto termorregulador de Puno, por estar a orillas del lago, evitando que valores de temperatura mínima sean extremadamente bajos, como debería corresponder a zonas de gran altura, como es la zona evaluada en el presente estudio.

Factores astronómicos

Para comprender el comportamiento de la radiación solar extraterrestre (R_e) se debe considerar que el sol es una estrella variable debido a fenómenos como las manchas y fáculas solares, presentes principalmente en las zonas de convección, superficie y atmósfera, provocando que el sol emita radiación variable a lo largo del año [35]. Se conoce que estas variaciones son menores a $\pm 1,5\%$; sin embargo, la distancia tierra sol varía un 6,7% a lo largo del año [36].

Para determinar la radiación solar global diaria, utilizando un modelo determinado, es indispensable calcular la radiación solar extraterrestre, como se muestra en la ecuación (4), donde se consideran factores astronómicos como el factor de corrección E_0 , la declinación solar δ , el ángulo horario ω , y la constante solar I_{CS} ; valores que pueden ser encontrados con la ecuación (5), ecuación (6) y ecuación (7) respectivamente. Recordando además que ϕ representa la latitud. Además, se ha utilizado $I_{CS} = 1367 \text{ W.m}^{-2}$ valor indicado en [29].

$$R_e = \frac{24(60)}{\pi} E_0 I_{CS} (\omega \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega) \quad (4)$$

El factor de corrección (E_0) está relacionado con la variación de la distancia entre la tierra y el sol, representado por el valor r , que varía a lo largo del año con respecto a su valor medio $r_0 = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$, distancia denominada Unidad Astronómica [37]. Aplicaciones tecnológicas y de ingenierías aplican la

ecuación (5), que se da en función del día del año d_n [29], que corresponde al número del día Juliano del año ($1 \leq d_n \leq 365$), que varía desde el día 1 para el primero de enero y hasta el día 365 para el 31 de diciembre.

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0,33 \cos \left[\frac{2\pi d_n}{365} \right] \quad (5)$$

La declinación solar (δ) corresponde a la posición angular del sol al mediodía solar respecto al plano del ecuador terrestre, positivo hacia el norte [38], y se puede calcular mediante la ecuación (6), obtenida por Perrín de Brichambaut indicada en [29].

$$\delta = 0,409 \sin \left[\frac{2\pi d_n}{365} - 1,39 \right] \quad (6)$$

El ángulo horario (ω) representa el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra [35]. La ecuación (7) corresponde al ángulo horario de salida del sol.

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (7)$$

Transmitancia atmosférica

La transmitancia de la atmósfera A_t representa la fracción de energía solar que incide en la superficie terrestre, con respecto a la radiación solar que llega hasta el tope de la atmósfera [33]. Al llegar a la atmósfera, esta no se comporta como un filtro homogéneo, sino que ocurren múltiples fenómenos como la difracción, reflexión y absorción, así como

Tabla 1. Escala de transmitancia atmosférica.

Tipo de día	Transmitancia Atmosférica
Nublado	$0 < A_t \leq 0,2$
Parcialmente nublado	$0,2 < A_t \leq 0,6$
Soleado	$0,6 < A_t \leq 0,75$
Muy soleado	$0,75 < A_t < 1$

Fuente: [40].

dispersión por aerosoles, CO_2 , ozono, vapor de agua, etc.; causados por diferentes agentes atmosféricos y contaminantes [39, 5]. La interpretación física de la transmitancia atmosférica se refiere al grado de claridad del cielo, considerando bandas que clasifican el tipo de día, según la escala de transmitancia atmosférica que se muestra en la Tabla 1 [40]. Además, la distribución de probabilidad indicada, se considera esencial para la predicción de la energía de la radiación solar global [41]. Cuando el día es soleado, la radiación solar se incrementa y en presencia de nubosidad disminuye [42]; así, las nubes que cubren de 40% a 60% de la superficie de la tierra, desempeñan un papel fundamental en el balance de energía del planeta, así como en la variación de la radiación solar global [43].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados en esta sección fueron obtenidos utilizando los datos de las estaciones de

Tabla 2. Estaciones meteorológicas SENAMHI Zonal Puno.

Estación	Provincia	Distrito	Latitud	Longitud	Altitud m.s.n.m.	Piso Ecológico
Ananea	San Antonio de Putina	Ananea	-14°40'43"	-69°32'04"	4660	Clima de altura
Capazo	El Collao	Ilave	-17°11'16"	-69°44'08"	4530	Clima de altura
Mazocruz	Chucuito	Mazocruz	-16°44'25"	-69°42'22"	4100	Clima de altura
Crucero	Carabaya	Crucero	-14°21'44"	-70°01'28"	4100	Puna húmeda
Huancané	Huancané	Huancané	-15°12'05"	-69°45'13"	3890	Puna húmeda
Ilave	El Collao	Ilave	-16°05'18"	-69°38'42"	3880	Puna húmeda
Putina	San Antonio de Putina	Putina	-14°54'53"	-69°52'04"	3878	Puna húmeda
Azángaro	Azángaro	Azángaro	-14°54'52"	-70°11'27"	3863	Puna húmeda
Desaguadero	Chucuito	Desaguadero	-16°34'07"	-69°02'25"	3860	Puna húmeda
Capachica	Puno	Capachica	-15°36'56"	-69°50'38"	3933	Circunlacustre
Moho	Moho	Moho	-15°23'18"	-69°29'04"	3890	Circunlacustre
Yunguyo	Yunguyo	Yunguyo	-16°18'28"	-69°04'29"	3890	Circunlacustre
Puno	Puno	Puno	-15°49'35"	-70°00'44"	3825	Circunlacustre
Juli	Chucuito	Juli	-16°12'14"	-69°27'36"	3812	Circunlacustre

Tabla 3. Radiación solar global diaria durante el mes de diciembre del 2017 de la estación Puno.

Fecha	Coefficiente A [-]	Día juliano d_n [-]	T_{max} [°C]	T_{min} [°C]	Factor de corrección E_0 [-]	Ángulo horario ω [rad.]	Radiación extraterrestre R_e (kWh.m ⁻²)	Coefficiente C [-]	Coefficiente B [-]	Radiación solar global estimada R_g (kWh.m ⁻²)	Radiación solar global medida R_g (kWh.m ⁻²)
01-dic	0,797	335	18,8	6,1	1,029	1,686	11,369	1,202	0,066	6,815	6,521
02-dic	0,819	336	18,9	5,5	1,029	1,687	11,374	1,151	0,074	7,159	7,369
03-dic	0,814	337	18,9	5,5	1,029	1,688	11,378	1,151	0,074	7,112	7,048
04-dic	0,812	338	17,9	6,3	1,029	1,688	11,382	1,281	0,056	6,679	6,328
05-dic	0,825	339	17,9	5,9	1,030	1,689	11,386	1,252	0,059	6,895	6,423
06-dic	0,824	340	17,6	6,4	1,030	1,690	11,390	1,310	0,052	6,665	6,377
07-dic	0,933	341	17,7	6,4	1,030	1,690	11,394	1,302	0,053	7,583	7,501
08-dic	0,745	342	17,7	5,1	1,030	1,691	11,397	1,209	0,065	6,365	6,317
09-dic	0,754	343	17,4	5,1	1,031	1,691	11,400	1,230	0,062	6,378	6,498
10-dic	0,844	344	19	3,2	1,031	1,692	11,403	0,978	0,113	7,844	7,295
11-dic	0,788	345	19	3,2	1,031	1,692	11,406	0,978	0,113	7,325	7,901
12-dic	0,815	346	18,4	6,3	1,031	1,693	11,409	1,245	0,060	6,853	6,610
13-dic	0,915	347	19	6,5	1,031	1,693	11,411	1,216	0,064	7,798	7,259
14-dic	0,947	348	19	6,5	1,032	1,693	11,413	1,216	0,064	8,078	8,926
15-dic	0,820	349	18,4	7,9	1,032	1,693	11,415	1,360	0,047	6,427	6,483
16-dic	0,923	350	17,8	6,8	1,032	1,694	11,417	1,324	0,051	7,421	7,664
17-dic	0,787	351	17,8	6,8	1,032	1,694	11,419	1,324	0,051	6,324	6,098
18-dic	0,693	352	16,4	5,7	1,032	1,694	11,421	1,346	0,049	5,493	5,938
19-dic	0,731	353	16,4	5,7	1,032	1,694	11,422	1,346	0,049	5,790	5,396
20-dic	0,660	354	17,6	6,9	1,032	1,694	11,424	1,346	0,049	5,233	5,697
21-dic	0,642	355	17,6	6,7	1,033	1,694	11,425	1,331	0,050	5,136	5,315
22-dic	0,660	356	17,7	6,6	1,033	1,694	11,426	1,317	0,052	5,330	5,596
23-dic	0,809	357	19,1	6,6	1,033	1,694	11,426	1,216	0,064	6,907	6,437
24-dic	0,759	358	19,1	6,6	1,033	1,694	11,427	1,216	0,064	6,480	6,307
25-dic	0,795	359	19	6,1	1,033	1,694	11,428	1,187	0,068	6,879	6,865
26-dic	0,720	360	17,7	5,7	1,033	1,693	11,428	1,252	0,059	6,037	5,801
27-dic	0,772	361	17,7	5,7	1,033	1,693	11,428	1,252	0,059	6,473	6,845
28-dic	0,872	362	16,3	6,3	1,033	1,693	11,428	1,396	0,044	6,650	6,287
29-dic	0,775	363	16,3	5,4	1,033	1,693	11,428	1,331	0,050	6,205	6,414
30-dic	0,849	364	12,4	4,7	1,033	1,692	11,427	1,562	0,033	5,328	5,411
31-dic	0,867	365	17,8	5,1	1,033	1,692	11,427	1,202	0,066	7,451	7,346

SENAMHI Zonal Puno listadas en la Tabla 2, las cuales están dentro del área de estudio seleccionado en el presente trabajo. Tales datos permitieron analizar el comportamiento de la radiación solar global diaria, mensual y anual a lo largo de los años seleccionados de 2007 a 2013, involucrando además datos que pudieron ser recuperados de la Estación de Puno, correspondientes a los años 2014, 2015 y 2017. Los datos estimados, obtenidos por el modelo de Bristow y Campbell, fueron contrastados con los datos medidos por las Estaciones, a fin de encontrar el nivel de correlación existente. Así mismo, se ha evaluado el valor máximo de la transmitancia atmosférica

diaria (A_p), a fin de contrastar su comportamiento con el propuesto por otros trabajos de investigación [25, 34]. Finalmente, se verifica si existen resultados favorables para el aprovechamiento de la energía solar en el altiplano de Puno.

Como ejemplo de todas las mediciones efectuadas y los datos estimados con el modelo propuesto, en la Tabla 3 se muestran los valores correspondientes a la estación Puno, con latitud $\phi = 15^\circ 49' 35''$, durante el mes de diciembre de 2017, donde se observa que la radiación solar global, durante todos los días supera al valor de $4,000 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, indicado por Camayo

et al. [44] como el mínimo valor aceptable para el aprovechamiento de la energía solar. Así mismo, viendo la columna de A, se observa que los valores diarios superan 0,6, indicando que durante todo ese mes, el tipo de día fue soleado o muy soleado, como se indica en la Tabla 1.

La Figura 1 muestra el resumen de la variación entre la Radiación solar global medida por el SENAMHI en la estación Puno (círculos rojos) y la estimada (cuadrados negros) usando el modelo Bristow y Campbell correspondiente, para los años 2014, 2015 y 2017. Se observa la similitud entre ambos datos, donde las oscilaciones estacionales de radiación solar global se deben a los solsticios en el hemisferio sur del planeta, obteniéndose la correlación de Pearson $R = 0,938$, como se muestra en la Figura 2, que indica un alto valor de confianza, al 93,8%.

En la Figura 3 se muestran los valores del promedio mensual de la radiación solar global, estimadas con el modelo Bristow y Campbell, correspondientes a los años 2007 a 2013, de todas las estaciones involucradas en el presente estudio. Como era esperado, se ve que, para los meses de enero, febrero, marzo y abril, los valores son altos; al igual que para los meses

de setiembre, octubre, noviembre y diciembre; sin embargo, durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, la radiación solar global disminuye, debido al solsticio de invierno en el hemisferio sur.

Además, se observa que la radiación solar global se comporta de forma estacional por ejemplo, los valores más altos fueron alcanzados durante el mes de noviembre, en la estación de Capazo, donde se obtuvieron los valores máximos de 9,488; 9,290; 9,290; 9,168; 9,174 y 9,092 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en el periodo 2008 a 2013, respectivamente; y los valores más bajos fueron alcanzados durante el mes de junio, en la estación de Ananea, donde se obtuvieron valores de 4,700; 4,858 y 4,523 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en los años 2007, 2008 y 2013 respectivamente.

La Figura 4 muestra el valor máximo de transmitancia atmosférica promedio, de los años 2015, 2016 y 2017, para ello se utilizaron datos medidos de la estación meteorológica Davis del Laboratorio de Física de la Universidad Nacional del Altiplano Puno. Se observa que existe una mayor dispersión en los extremos, durante los meses enero, febrero, marzo y abril, así como en los meses de setiembre, octubre, noviembre y diciembre, esto debido a la

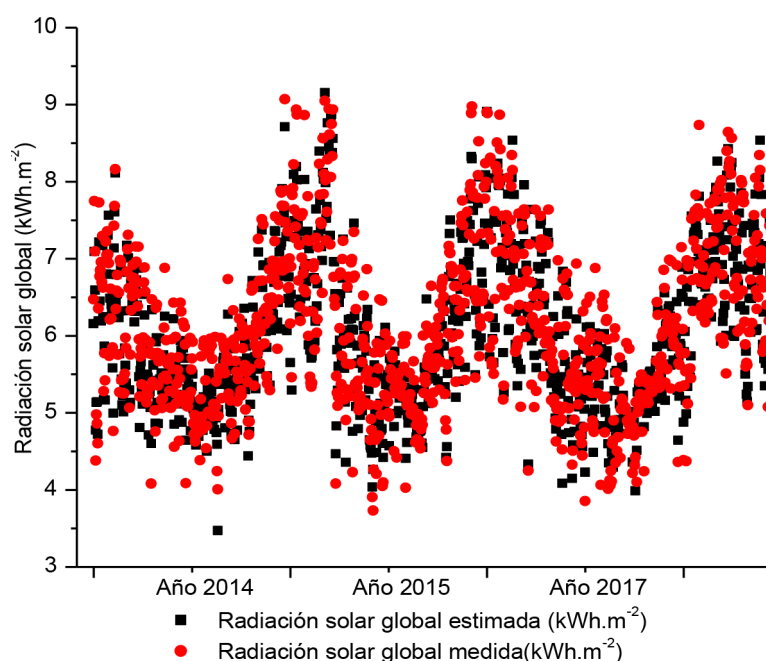


Figura 1. Radiación solar global diaria estimada y medida en la estación de Puno durante los años 2014, 2015 y 2017.

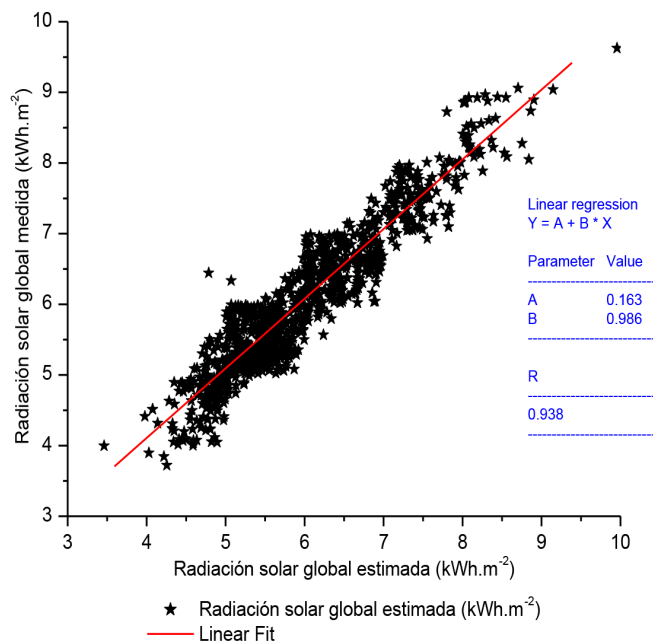


Figura 2. Correlación de Pearson de la radiación solar global estimada y medida de la estación Puno durante los años 2014, 2015 y 2017.

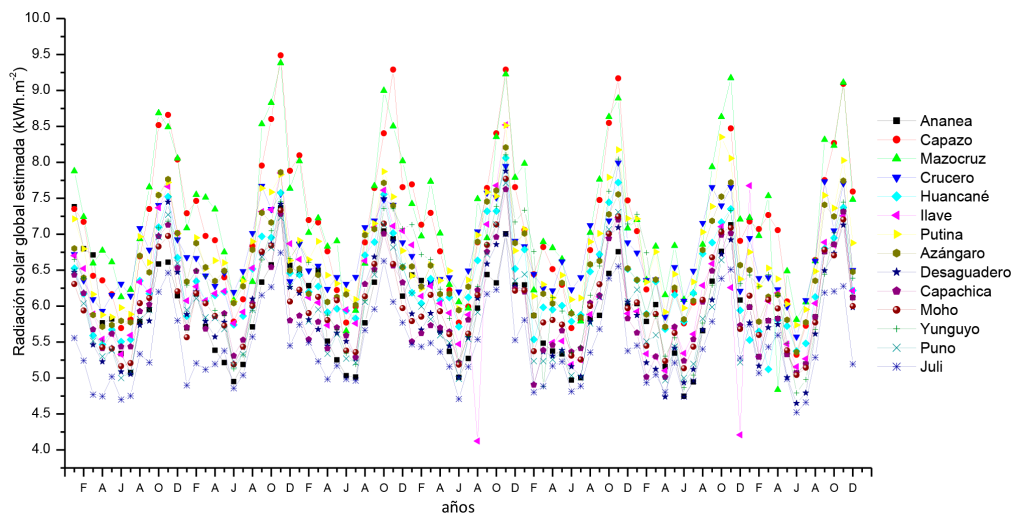


Figura 3. Promedio mensual de la Radiación solar global estimada en el altiplano puneño de 2007 a 2013.

presencia de días parcialmente nublados o nublados, algunas veces acompañados por precipitaciones, esto en contraste con las zonas menos dispersas, durante los meses de mayo, junio, julio y agosto, debido a la temporada de sequía y heladas, donde los días son soleados o muy soleados.

Así mismo, la Figura 4 muestra que los valores de la transmitancia atmosférica máxima diaria (A) son mayores a 0,6, lo cual indica que la mayoría de días durante el año son soleados o muy soleados [40]. Además, se obtiene el promedio anual $A = 0,84$, que difiere en dos décimas el promedio anual sugerido

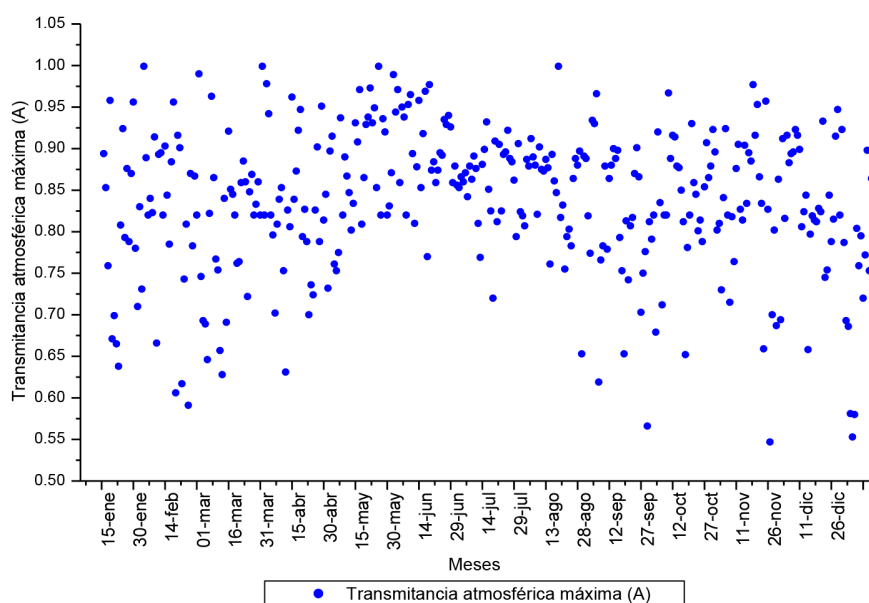


Figura 4. Promedio de la transmitancia atmosférica máxima diaria de la estación Davis Pro Plus 2, años 2015, 2016 y 2017.

para Puno ($A = 0,82$) el 2003 y 2004 por [25] y [34], estudios que utilizaron el modelo Angstrom-Prescott, basados en insolación solar. Así, al compararlo con los resultados de esta investigación, se encontró un error relativo porcentual de 2,38%. Por esta razón, se considera el resultado confiable para realizar futuras investigaciones, relacionadas para la determinación de la radiación solar global en zonas altoandinas del Perú, tales como: Puno, Junín, Cajamarca, Ayacucho, Cusco, Cerro de Pasco, Huancayo, Arequipa, Huancavelica, Huánuco, entre otros.

La Figura 5 muestra el valor promedio anual de la radiación solar global estimada de 2007 a 2013 de las zonas de estudio, donde el valor más alto corresponde a la Zona de Clima de Altura, estación de Mazocruz, a 4100 m.s.n.m., con un promedio de $7,298 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ entre los años analizados; así mismo, el valor mínimo corresponde a la Zona Circunlacustre, estación de Juli, a 3812 m.s.n.m., con un promedio de $5,481 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ entre los años analizados. Tales resultados superan las expectativas mínimas esperadas para el uso del recurso solar, pues se sabe por la Física Atmosférica que, a medida que aumente la altura, la atmósfera se hace más tenue, por lo que el valor de la radiación solar debe ser mayor en sitios de mayor altitud [35], esto se cumple en el altiplano de Puno.

La Figura 5 muestra que el 2012 se obtuvo la radiación solar global más baja, aunque con valores superiores a $5,000 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, lo que representa valores alentadores para la aplicación de energías limpias y verdes. Además, en los resultados de radiación solar global por zonas de estudio se observa en la zona de Clima de Altura dos de las tres estaciones obtuvieron resultados superiores a $7,000 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, Capazo y Mazocruz, que obtuvieron promedios anuales de $7,060$ y $7,298 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ respectivamente, a excepción de Ananea, que obtuvo $5,945 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; en la zona de Puna húmeda, donde se encuentran las estaciones de Azángaro, Crucero, Desaguadero, Huancané, Ilave y Putina se obtuvieron los promedios anuales de $6,551$; $6,744$; $5,908$; $6,340$; $6,228$ y $6,783 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ respectivamente; y la zona Circunlacustre, donde se encuentran las estaciones de Capachica, Juli, Moho, Puno y Yunguyo se obtuvieron promedios anuales de $5,983$; $5,481$; $6,071$; $5,997$ y $6,342 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ respectivamente.

Según Villicaña *et al.* [45], para el desarrollo de instalaciones solares fotovoltaicas de tipo aislado se requiere un nivel de radiación solar global entre $3,000$ y $4,000 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; para instalaciones solares con conexión a red se requiere un nivel de radiación solar de $4,000 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, en cuanto a

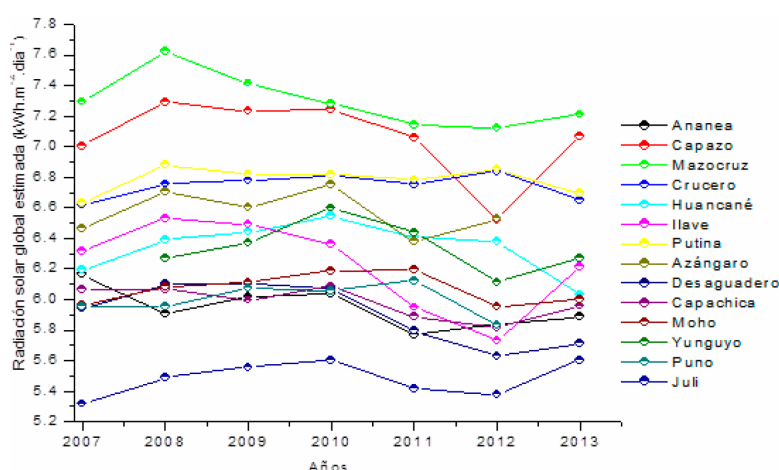


Figura 5. Promedio anual de la radiación solar global estimada de la zona de estudio, periodo de 2007 a 2013.

la producción de agua caliente sanitaria se requiere menores niveles de radiación solar diaria, entre 2,500 y 3,000 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$. Por los valores obtenidos en este estudio, se puede afirmar que los resultados son importantes para el uso del recurso solar a lo largo del año, principalmente en zonas aisladas de las redes del Servicio Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), más aún en zonas de mayor altitud y de clima continental con gran amplitud térmica; sin embargo, cabe mencionar que costos, como el de los paneles fotovoltaicos, no fueron considerados en el presente estudio.

Camayo *et al.* [28] realizaron un estudio aplicando el modelo Bristow y Campbell para estimación de la radiación solar global, obteniendo un promedio anual de 6,000 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en la sierra y 4,000 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en la selva de la región de Junín, donde concluyen que existe potencial en el recurso solar de dicha región. Así mismo, Vanegas *et al.* [46] realizaron la cuantificación y caracterización de la radiación solar en La Guajirá, Colombia, encontrando valores en el intervalo de 6,000 y 6,800 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$, indicando que los resultados son adecuados para el desarrollo de instalaciones solares del tipo eléctrico y térmico. En el presente trabajo, se ha obtenido los valores promedios anuales por piso ecológico, con 5,975 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en la zona Circunlacustre, 6,429 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en la zona Puna Húmeda y 6,768 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ en la zona Clima de Altura, tales resultados superan las expectativas en la potencialidad del recurso solar

del altiplano puneño y el desarrollo de instalaciones solares del tipo eléctrico y térmico.

En la literatura, otros estudios han considerado también el modelo Bristow y Campbell, obteniendo resultados particulares, como el estudio en Cúcuta, Colombia, que posee disponibilidad de energía solar constante durante todo el año, con un promedio anual de 5,335 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ [47] y Nepal, donde la radiación solar global estimada y medida fue 3,210 y 3,440 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ respectivamente, resultado poco alentador para la zona de estudio, ubicada a 1350 m.s.n.m. [48], altitud muy por debajo del área de estudio del presente trabajo, cuya altitud se encuentra entre los 3812 y 4660 m.s.n.m.

CONCLUSIONES

El modelo empírico Bristow y Campbell permite determinar la radiación solar global diaria de forma confiable en el altiplano de Puno en las zonas Circunlacustre con 5,975 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$; Puna Húmeda con 6,429 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ y Clima de Altura con 6,768 $kWh.m^{-2}.dia^{-1}$ con datos de entrada de temperaturas máximas, temperaturas mínimas y latitud; así mismo, se ha obtenido el coeficiente de correlación $R = 0,938$ en relación a la ciudad de Puno tal como se muestra en la Figura 2. También, se demuestra que existe una influencia directa de los elementos climáticos de amplitud térmica y latitud de la zona de estudio en relación a la radiación solar global.

Se han realizado estimaciones de radiación solar global diaria en el Altiplano de Puno durante los años 2007 al 2013 con datos de entrada de SENAMHI Zonal Puno obteniéndose un máximo valor promedio de los años estudiados de $7,298 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ en la estación de Mazocruz ubicada a una altitud de 4100 m.s.n.m. en la zona Clima de Altura y un valor mínimo promedio de $5,481 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ en la estación de Juli ubicada a una altitud de 3812 m.s.n.m. en la zona Circunlacustre, resultados propicios para la instalación de paneles fotovoltaicos.

Finalmente, los resultados obtenidos de los niveles de radiación solar global en las zonas del altiplano de Puno, son mayores a $4,000 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ y son muy rentables para las aplicaciones en energía

solar, según la Organización Latinoamericana de Energía Solar OLADE; como son el uso de bombas hidráulicas solares, sistemas de transferencia de calor, colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos, viviendas bioclimatizadas, entre otros. Además, se espera que se pueda transformar la energía solar en energía térmica y eléctrica, lo que ayudaría a resolver problemas como heladas que son afrontadas por pobladores, animales y plantas en las zonas altoandinas de la Región Puno.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] D.L. Hartmann. "Global Physical Climatology". Elsevier. Second edition. 2016.
- [2] A.M. Manzano, L. Martín, F. Valero and C. Armenta. "A single method to estimate the daily global solar radiation from monthly data". Atmos. Res. Vol. 166, pp. 70-82. 2015.
- [3] T. Pan, S. Wu, E. Dai and Y. Liu. "Estimating the daily global solar radiation spatial distribution from diurnal temperature ranges over the tibetan plateau in China". Appl. Energy. Vol. 107, pp. 384-393. 2013.
- [4] V.J. da Silva, C.R. da Silva, R.R. Finzi and N. da S. Dias. "Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais". Ciência Rural. Vol. 42 N° 2, pp. 276-282. 2012.
- [5] Q. Fu. "Radiación transfer in the Atmosphere". Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Vol. 5, pp. 37-44. 2015.
- [6] G.C. Beruski, A.B. Pereira and P.C. Sentelhas. "Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em ponta grossa, PR". Rev. Bras. Meteorol. Vol. 30 N° 2, pp. 205-213, 2015.
- [7] S.G. Gouda, Z. Hussein, S. Luo and Q. Yuan. "Model selection for accurate daily global solar radiation prediction in China". J. Clean. Prod. 2019.
- [8] G.E. Hassan, M.E. Youssef, Z.E. Mohamed, M.A. Ali and A.A. Hanafy. "New Temperature-based Models for Predicting Global Solar Radiation". Appl. Energy. Vol. 179, pp. 437-450. 2016.
- [9] S. Steinmetz, A. Nunes Deibler e J. Baptista da Silva. "Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar". Ciência Rural. Vol. 43 N° 2, pp. 206-211. 2013.
- [10] B. Jamil and E. Bellos. "Development of empirical models for estimation of global solar radiation exergy in India". J. Clean. Prod. Vol. 207, pp. 1-16. 2019.
- [11] Y. Feng, N. Cui, Y. Chen, D. Gong and X. Hu. "Development of data-driven models for prediction of daily global horizontal irradiance in Northwest China". J. Clean. Prod. Vol. 223, pp. 136-146. 2019.
- [12] J. Fan, L. Wu, F. Zhang, H. Cai, W. Zeng, X. Wang and H. Zou. "Empirical and machine learning models for predicting daily global solar radiation from sunshine duration: A review and case study in China". Renew. Sustain. Energy Rev. Vol. 100, pp. 186-212. 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.018.
- [13] J. Almorox, M. Benito and C. Hontoria. "Estimation of global solar radiation in Venezuela". Interciencia. Vol. 33 N° 4, pp. 280-283. 2008.
- [14] D. Ocampo y R. Rivas. "Estimación de la radiación neta diaria a partir de Modelos de Regresión Lineal Múltiple". Rev. Chapingo,

- Ser. Ciencias For. y del Ambient. Vol. 19 Nº 2, pp. 263-271. 2013.
- [15] M. Bengulescu, P. Blanc and L. Wald. "Characterizing Temporal Variability in Measurements of Surface Solar Radiation and its Dependence on Climate". *Energy Procedia*. Vol. 97, pp. 164-171. 2016.
- [16] J. Rojas Serrano, A. Vásquez Vega, F. García Acevedo, D. Parra Peñaranda and E. Castro Becerra. "Estimating missing data in historic series of global radiation through neural network algorithms". *Sist. Telemática*. Vol. 14 Nº 37, pp. 9-22. 2016.
- [17] R. Torrez, A. Burgoa and E. Ricaldi. "Modelos de Estimación de la Radiación Solar para el Altiplano Central de Bolivia". *Rev. Boliv. Física*. Vol. 23, pp. 1-7. 2013.
- [18] A. Dumas, A. Andrisani, M. Bonnici, G. Graditi, G. Leanza, M. Madonia and M. Trancossi. "A new correlation between global solar energy radiation and daily temperature variations". *Sol. Energy*. Vol. 116, pp. 117-124. 2015.
- [19] A. Marzo, M. Trigo-Gonzalez, J. Alonso-Montesinos, M. Martínez-Durbán, G. López, P. Ferrada, E. Fuentealba, M. Cortés and F.J. Batlles. "Daily global solar radiation estimation in desert areas using daily extreme temperatures and extraterrestrial radiation". *Renew. Energy*. Vol. 113, pp. 303-311. 2017.
- [20] A.P. De Oliveira, A.J. Machado, J.F. Escobedo and J. Soares. "Diurnal eVolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: Seasonal variation and modeling". *Theor. Appl. Climatol.* Vol. 71, Nº 3-4, pp. 231-249. 2003.
- [21] J. Álvarez, H. Mitsova and H.L. Allen. "Estimating Monthly Solar Radiation in South Central Chile". *Chil. J. Agric. Res.* Vol. 71 Nº 4, pp. 601-609. 2012.
- [22] H. Oesterle. "Reconstruction of daily global radiation for past years for use in agricultural models". *Phys. Chem. Earth*. Vol. 26, Nº 3, pp. 253-256. 2001.
- [23] C. Dejollx y A. Iltis. "El lago Titicaca: Síntesis del conocimiento limnológico actual". 1991.
- [24] Y. Feng, D. Gong, Q. Zhang, S. Jiang, L. Zhao and N. Cui. "Evaluation of temperature-based machine learning and empirical models for predicting daily global solar radiation". *Energy Convers. Manag.* Vol. 198. 2019.
- [25] G.A. Baigorria, E.B. Villegas, I. Trebejo, J.F. Carlos and R. Quiroz. "Atmospheric transmissivity: Distribution and empirical estimation around the central Andes". *Int. J. Climatol.* Vol. 24 Nº 9, pp. 1121-1136. 2004.
- [26] F. Meza and E. Varas. "Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature". *Agric. For. Meteorol.* Vol. 100 Nº 2-3, pp. 231-241. 2000.
- [27] K.L. Bristow and G.S. Campbell. "On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature". *Agric. For. Meteorol.* Vol. 13 Nº 3, pp. 576. 1984.
- [28] B.F. Camayo Lapa, D.E. Condezo Hurtado, A.Y. Ramos Cadillo, J.R. Massipe Hernández and A.B. Camayo Vivas. "Estimation of global solar radiation, using extreme temperatures, applying the bristow-campbell model in the junín region". *Ingeniare*. Vol. 27 Nº 4, pp. 643-651. 2019.
- [29] J.A. Duffie and W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth edition. Canada. 2013.
- [30] A. Ben Othman, K. Belkilani and M. Besbes. "Global solar radiation on tilted surfaces in Tunisia: Measurement, estimation and gained energy assessments". *Energy Reports*. Vol. 4, pp. 101-109. 2018.
- [31] J. Almorox, M. Bocco and E. Willington. "Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina". *Renew. Energy*. Vol. 60, pp. 382-387. 2013.
- [32] M. Conceição. "Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell". *Eng. Agric. Jaboticabal*. Vol. 30 Nº 4, pp. 619-626. 2010.
- [33] A. Pacheco de Souza, A. Carvalho da Silva, A. Aki Tanaka, E. Morgan Uliana, F. Terra de Almeida, A. Evaldo Klar e A. Almeida Gomes. "Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil". *Pesqui. Agropecu. Bras.* Vol. 52 Nº 4, pp. 215-227. 2017.
- [34] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). "Atlas de Energía Solar del Perú", pp. 72. 2003.
- [35] C. Recalde, C. Cisneros, D. Vaca y C. Ramos. "Relación de la transmitancia atmosférica con la heliofanía y la diferencia de temperaturas extremas diarias en la zona ecuatorial Andina". *Inf. Tecnol.* Vol. 26 Nº 1, pp. 143-150. 2015.

- [36] L.J. Gray, J. Beer, M. Geller, J.D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, J. Luterbacher, G.A. Meehl, D. Shindell, B. Geel and W. White "Solar influences on climate". *Rev. Geophys.* Vol. 50 Issue 1. 2012.
- [37] M. Iqbal. "An introduction to solar radiation". Academic Press. First edition. Vancouver, Canada. 1983.
- [38] Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli and T. Ajzoul. "Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations". *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 56, pp. 87-99. 2016.
- [39] N. Falcón, F. Peña, H. Mavo y R. Muñoz. "Irradiación solar global en la ciudad de Valencia". *Rev. Ing. UC.* Vol. 8 N° 2, pp. 0. 2001.
- [40] C. Yousif, G. Oña Quecedo and J. Bilbao Santos. "Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain". *Renew. Energy.* Vol. 49 N° June, pp. 203-206. 2013.
- [41] T.R. Ayodele and A.S.O. Ogunjuyigbe. "Prediction of monthly average global solar radiation based on statistical distribution of clearness index". *Energy.* Vol. 90, pp. 1733-1742. 2015.
- [42] F.J. Lopes de Lima. "Previsão de irradiação solar no nordeste do Brasil empregando o modelo WRF ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs)". Tesis. São José dos Campos, Brazil. 2015.
- [43] E. Echer, M.P. Souza and N. J. Schuch. "A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre". *Rev. Bras. Ensino Física.* Vol. 23 N° 3, pp. 276-283. 2001.
- [44] F.B. Camayo Lapa, R.J. Massipe Hernandez E.J. Pomachagua Paucar, A. Torres-Ten and M.O. Quispe-Flores. "Desarrollo del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global de la Región de Junin, Perú". *Tecnol. Química.* Vol. XXXV N° 2, pp. 271-288. 2015.
- [45] E. Villicaña-Ortiz, A.J. Gutiérrez-Trashorras, J.P. Paredes-Sánchez and J. Xiberta-Bernat. "Solar energy potential in the coastal zone of the gulf of Mexico". *Renew. Energy.* Vol. 81, pp. 534-542. 2015.
- [46] M. Vanegas Chamorro, E. Villicaña Ortíz y L. Arrieta Viana. "Cuantificación y caracterización de la radiación solar en el departamento de La Guajira-Colombia mediante el cálculo de transmisibilidad atmosférica". *Prospect.* Vol. 13 N° 2, pp. 54-63. 2015.
- [47] W. Contreras, M.G. Galban y S.B. Sepúlveda. "Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta". *Entre Cienc. e Ing.* Vol. 12 N° 23, pp. 16. 2018.
- [48] K.N. Poudyal, B.K. Bhattarai, B. Sapkota, B. Kjeldstad and P. Daponte. "Estimation of the daily global solar radiation; Nepal experience". *Meas. J. Int. Meas. Confed.* Vol. 46 N° 6, pp. 1807-1817. 2013.