

Estimación de la radiación solar global en la ciudad de Puno mediante la aplicación del modelo Bristow y Campbell

Estimation of global solar radiation in Puno city through the application of the Bristow and Campbell model

Lelia Quispe Huamán

leliaqh1@gmail.com – Universidad Nacional de Juliaca

Matías Huilca Arbieto

mhuilca@gmail.com – Universidad Nacional del Altiplano

Guina Sotomayor Alzamora

guinas@gmail.com – Instituto de Matemática y Ciencias Afines (IMCA), Universidad Nacional de Ingeniería

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo estimar la radiación solar global con el modelo Bristow y Campbell (1984), considerando las temperaturas máximas y mínimas diarias desde setiembre del 2015 hasta agosto del 2016, registrados en la estación meteorológica ubicada en la ciudad de Puno. El análisis de resultados de las radiaciones solares globales estimadas y medidas muestra que la correlación anual es 0.99, mientras que en la transmitancia atmosférica es mayor a 0.5. Los valores máximos y mínimos obtenidos corresponden a los meses de noviembre del 2015 con $6.9782\text{KWh}/\text{m}^2$ y julio del 2016 con $4.8981\text{KWh}/\text{m}^2$ respectivamente, con promedio anual de $5.8988\text{KWh}/\text{m}^2$. Los valores de radiación solar global en la ciudad de Puno muestran que es muy rentable para la aplicación de las energías renovables, según la Organización Latinoamericana de Energía.

Palabras claves: *Radiación Solar Global, Temperatura máxima y mínima, Bristow y Campbell, transmitancia atmosférica máxima.*

Abstract

The objective of this work is to estimate the Global Solar Radiation with the Bristow and Campbell Model (1984). Maximum and minimum daily temperatures from September 2015 to August 2016 have been considered. The registration has taken place at the Meteorological Station in Puno city. The analysis of results of the global Solar radiation estimated and measured, shows that the annual correlation is 0,99 while in the atmospheric transmittance, it is greater than 0,5. The maximum and minimum values obtained correspond to the months of November 2015 with $6.9782\text{KW h}/\text{m}^2$ and July 2016 with $4.8981\text{KW h}/\text{m}^2$ respectively. The annual average was $5.8988\text{KW h}/\text{m}^2$. According to the Latin American Energy Organization, the values of the global solar radiation in Puno show that the application of Renewable Energies in the city is very profitable.

Keywords: *Global Solar Radiation, Maximum and minimum temperature, Bristow and Campbell Model, Maximum atmospheric transmittance.*

Como citar: Quispe-Huamán, L., Huilca-Arbieto, M., & Sotomayor-Alzamora, Guina. (2018). Estimación de la radiación solar global en la ciudad de Puno mediante la aplicación del modelo Bristow y Campbell. ÑAWPARISUN - Revista de Investigación Científica, 1(1), 27-34.

Introducción

La radiación solar se define como la radiación electromagnética que llega a la tierra desde el sol, siendo extremadamente esencial para la vida (Querino, Moura, & Lyra, 2006), también es la principal fuente de energía renovable que soporta la

biosfera y estimula los procesos físicos, químicos y biológicos en la tierra. La energía recibida por el sistema tierra-atmosfera es también crucial para equilibrar la energía (Manzano, Martín, Valero, & Armenta, 2015), siendo elemento primordial para el proceso de la fotosíntesis, además de otros procesos ecológicos y ambientales relacionados a la

temperatura del aire y suelo, afectando la transferencia de calor por medio de la evaporación y transpiración (Silva, Silva, Finzi, & Dias, 2012). Pero no toda la radiación solar consigue efectivamente ingresar a la superficie terrestre, esto se debe a que interactúa con componentes atmosféricos al atravesar la masa óptica y sufre la acción de procesos de reflexión, dispersión y absorción. Así, el 51% de la radiación extraterrestre está disponible para procesos en medios físicos y biológicos, siendo la fracción que efectivamente llega a la superficie terrestre denominada radiación solar global (Beruski, Pereira & Sentelhas, 2015).

La radiación solar se divide en radiación solar directa y radiación solar difusa, la primera es la energía que llega a la tierra directamente sufriendo alteración en el camino por la diferencia de densidad en la atmósfera, y la segunda es toda radiación dispersada por la atmósfera debido a la presencia de diversas partículas (Da Silva, y otros, 2014), el preciso conocimiento de la radiación solar se considera como primer paso para la evaluación de su disponibilidad y sirve para diferentes aplicaciones, como en áreas de la meteorología, climatología, hidrología, modelos de simulación de cultivos y estimación de evapotranspiración (Hassan, Youssef, Mohamed, & Ali, 2016; Quej, Almorox, Ibrakhimov, & Saito, 2016), y también para la predicción de eficiencia de la energía solar fotovoltaica y térmica se necesitan datos de radiación solar global, así mismo para la ganancia de calor en edificios (Yao, Li, Wang, Jiang, & Hu, 2014).

Cuando la radiación solar global no es disponible, se puede estimar con fórmulas empíricas, dependiendo de otras variables meteorológicas (Dumas, y otros, 2015), algunos investigadores han desarrollado modelos empíricos que utilizan la temperatura del aire para estimar la radiación solar global, como los modelos propuestos por Hargreaves y Bristow y Campbell (Oliveira, Augusto, Finzi, & Da Silva, 2014)

Según Li, Lou y Lam (2015) los modelos empíricos para calcular la radiación solar se encuentran basados en factores astronómicos (constante solar, distancia tierra-sol, declinación y ángulo de la hora), geográficos (latitud, longitud y elevación de la sitio), geométricos (ángulo acimutal de la superficie, ángulo de inclinación, ángulo de elevación del sol, ángulo de acimut del sol), físicos (dispersión de moléculas de aire, contenido de vapor de agua, dispersión de polvo de los constituyentes atmosféricos tales como O₂, N₂, CO₂, O; etc.), meteorológicos (radiación solar extraterrestre, duración de la luz del sol, temperatura, precipitación, humedad relativa, efectos de nubosidad, temperatura del suelo, evaporación, reflexión, etc.).

De la física atmosférica se sabe 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 que en sitios menos altos (Iqbal, 1984).

Materiales y métodos

Para la estimación de la radiación solar global se utilizaron datos de temperatura máxima y mínima diaria, registrados por la estación meteorológica marca Davis Instrument, modelo VANTAGE PRO 2 PLUS de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano la cual tiene el mantenimiento y la calibración certificada por el fabricante. Los datos fueron registrados cada 15 minutos, desde setiembre del 2015 hasta agosto del 2016, obteniéndose 35136 datos en total los cuales fueron almacenados en la base de datos del software Weatherlink.

Modelo Bristow y Campbell

Se ha utilizado el modelo Bristow y Campbell para numerosos estudios y se han encontrado mejoras tanto en los valores de radiación solar global como también en la simplicidad de datos (Almorox, Bocco, & Willington, 2013).

Inicialmente este modelo fue empleado en las localidades de Pullman, Great Falls y Tacoma de los Estados Unidos, en donde se mostró que su desempeño fue capaz de explicar entre un 70% y 90% de la variación de la radiación solar. En el modelo se empleó la amplitud térmica ΔT durante el día. De acuerdo a los estudios, los valores para los coeficientes A, B y C son 0.7; entre 0.004 y 0.010; y 2.4 respectivamente (Bristow & Campbell, 1984). Cabe resaltar que este método es desarrollado originalmente para estimaciones diarias, también se puede probar para cálculos y aplicaciones mensuales (Bandyopadhyay, Raghuvanshi, Bhadra, & Sinh, 2008).

En general, el modelo Bristow y Campbell (1984) explica la relación entre la diferencia de las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire con calor sensible y calor latente. El calor latente depende de la radiación solar diaria y es el responsable de la temperaturas máximas del aire; además, el calor sensible al anochecer debido a la inercia térmica gradualmente se pierde en el espacio como radiación de onda larga y otros flujos radiantes, resultando en el decrecimiento de la temperatura hasta alcanzar su temperatura mínima justo antes del amanecer (Baigorria, Villegas, Trebejo, Carlos & Quiroz, 2004).

Cuando la radiación solar llega a la superficie de la Tierra, una parte se refleja y la otra es absorbida. Por

otra parte el suelo se calienta, emite radiación de onda larga que hace que caliente el aire adyacente, contribuyendo a cambiar su temperatura. En base a este argumento Bristow y Campbell (1984) construyeron un modelo físico empírico para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas máximas y mínimas (Queiroz, Nogueira, & De Assis, 2000), como se muestra en la ecuación (1).

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

Donde:

R_g : Radiación solar global [KWh/m²]

R_e : Radiación solar extraterrestre [KWh/m²]

T_{max} : Temperatura máxima [°C]

T_{min} : Temperatura mínima [°C]

A: Transmitancia atmosférica máxima.

B: Constante específica de la región (depende de C).

C: Constante específica de la región (depende de la amplitud térmica y latitud).

Donde A, B y C son constantes empíricas, con significado físico. El coeficiente A representa la transmitancia atmosférica máxima, que es característica del área de estudio, y depende de la contaminación y elevación de la zona. Los coeficientes B(°C⁻¹) y C determinan el efecto del incremento en la amplitud térmica ΔT en los máximos valores de transmitancia atmosférica (K_t) (Mesa & Varas, 2000).

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciados por la topografía, latitud y altitud, y entre otros factores, los coeficientes B y C propuestos pueden ser aplicados solo en áreas bajo similares condiciones de régimen térmico. Se desarrollaron las ecuaciones empíricas (2) y (3) para determinar el valor de los coeficientes (Camayo, Paucar, Massipe & Quispe, 2013).

$$C = 2.116 - 0.072(T_{max} - T_{min}) + 57.574e^\varphi \quad (2)$$

Donde:

φ : Latitud

$$B = 0.107C^{-2.6485} \quad (3)$$

Factores Astronómicos

Los factores astronómicos fundamentales para la estimación de la radiación solar global son: latitud $\varphi = -15.83^\circ$.

El aporte correspondiente del factor de corrección (E_0) mostrada en la ecuación (4), considera las perturbaciones producidas por la rotación de la tierra (Iqbal, 1984).

$$E_0 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (4)$$

Donde:

d_n : Día juliano.

La declinación solar (δ) corresponde a la posición angular del sol al mediodía solar respecto al plano de la ecuación, positivo hacia el norte (Recalde, Cisneros, Vaca, & Ramos, 2015), y se puede calcular mediante la ecuación (5).

$$\delta = 0.409 \sin\left[\frac{2\pi d_n}{365} - 1.39\right] \quad (5)$$

El ángulo horario (ω) mostrado en la ecuación (6) representa el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra (Recalde, Cisneros, Vaca, & Ramos, 2015).

$$\omega = \cos^{-1}(\text{tg}\phi \text{tg}\delta) \quad (6)$$

Radiación Extraterrestre

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 atmosfera, provocando que el sol emita radiación variable a lo largo del año (Recalde, Cisneros, Vaca, & Ramos, 2015). 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 (Gray, y otros, 2010).

El cálculo de la radiación solar extraterrestre mostrada en la ecuación (7) es indispensable para determinar la radiación solar global diaria con cualquier modelo que se desee emplear, necesariamente para poder estimar se requiere conocer el valor de la constante solar.

$$R_e = \frac{24(60)}{\pi} E_0 I_{cs} (\omega \text{sen}\varphi \text{sen}\delta + \cos\varphi \cos\delta \text{sen}\omega) \quad (7)$$

Dónde:

I_{cs} = Constante solar

$$0.082 \text{ [MJm}^{-2}\text{día}^{-1}\text{]}$$

Transmitancia Atmosférica (K_t)

La diferencia entre la temperatura máxima y mínima está relacionado al grado de cobertura de nube en una localización. El cielo claro condiciona el

resultado de temperaturas altas durante el día T_{max} por que la atmosfera es transparente y en bajas temperaturas durante la noche T_{min} por que la radiación de onda larga es menos absorbida por la atmósfera (Nogueira, Silva, Lêdo & Araujo, 2012). Iqbal (1983) postulo limites para definir los tipos de dias basados en (K_t).

Tabla 1. Escala de Iqbal donde se define el tipo de día basado en K_t

Transmitancia atmosférica	Tipo de día
$K_t \geq 0.6$	Días claros
$0.3 < K_t < 0.6$	Días parcialmente nublados
$K_t \leq 0.3$	Días nublados

Fuente: Iqbal (1984)

Aunque esta división es arbitraria puede ser considerada para definir el tipo de día según el

Tabla 2. Radiación solar global diaria estimada [FEGA1] y medida, amplitud térmica y transmitancia atmosférica máxima del mes de julio del 2016.

FECHA	A [Gra]	Disjuliano	[°C]	[°C]	Factor de correccion	Declinacion δ	Angulo horario ω	Radiacion extraterrestre	C [Gra]	B [Gra]	Radiacion solar global estimada	Radiacion solar global medida	Amplitud termica
1-Jul	0.932	183	14.3	2.0	0.9670	0.4017	1.4501	25.3289	1.2736	0.0564	4.9458	4.9473	11.7
2-Jul	0.831	184	13.6	2.1	0.9670	0.4003	1.4505	25.3663	1.2880	0.0547	4.3803	4.3797	11.5
3-Jul	0.780	185	15.1	1.8	0.9670	0.3988	1.4510	25.4071	1.1584	0.0725	4.3828	4.3823	13.3
4-Jul	0.547	186	15.0	1.8	0.9671	0.3972	1.4516	25.4512	1.1656	0.0713	3.0697	3.0683	13.2
5-Jul	0.909	187	16.2	1.9	0.9671	0.3954	1.4522	25.4987	1.0864	0.0859	5.2652	5.2645	14.3
6-Jul	0.765	188	13.8	0.1	0.9671	0.3936	1.4528	25.5485	1.1296	0.0775	4.3706	4.3710	13.7
7-Jul	0.931	189	6.1	2.3	0.9672	0.3916	1.4534	25.6036	1.8424	0.0212	1.5119	1.5143	3.8
8-Jul	0.726	190	15.5	2.8	0.9673	0.3895	1.4541	25.6609	1.2016	0.0658	4.0437	4.0418	12.7
9-Jul	0.899	191	14.1	1.3	0.9674	0.3873	1.4549	25.7215	1.1944	0.0668	5.0347	5.0337	12.8
10-Jul	0.904	192	15.7	1.1	0.9674	0.3850	1.4556	25.7853	1.0648	0.0906	5.3322	5.3310	14.6
11-Jul	0.956	193	13.9	1.3	0.9675	0.3826	1.4565	25.8523	1.2088	0.0648	5.3455	5.3463	12.6
12-Jul	0.922	194	14.3	0.3	0.9676	0.3800	1.4573	25.9224	1.1080	0.0815	5.3844	5.3880	14.0
13-Jul	0.895	195	15.3	1.2	0.9678	0.3774	1.4582	25.9956	1.1008	0.0830	5.2545	5.2580	14.1
14-Jul	0.901	196	15.8	1.6	0.9679	0.3746	1.4591	27.0718	1.0936	0.0844	5.3182	5.3157	14.2
15-Jul	0.857	197	17.6	1.6	0.9680	0.3717	1.4600	27.1510	0.9640	0.1179	5.2914	5.2948	16.0
16-Jul	0.908	198	15.4	1.6	0.9682	0.3687	1.4610	27.2332	1.1224	0.0788	5.3355	5.3307	13.8
17-Jul	0.767	199	14.8	4.2	0.9683	0.3656	1.4620	27.3183	1.3528	0.0481	4.0171	4.0190	10.6
18-Jul	0.910	200	15.1	3.7	0.9685	0.3624	1.4631	27.4063	1.2562	0.0539	4.9649	4.9645	11.4
19-Jul	0.751	201	14.7	3.8	0.9687	0.3591	1.4642	27.4971	1.3312	0.0502	4.0188	4.0190	10.9
20-Jul	0.944	202	14.4	3.3	0.9688	0.3557	1.4653	27.5906	1.3168	0.0516	5.1167	5.1165	11.1
21-Jul	0.927	203	14.5	2.9	0.9690	0.3523	1.4664	27.6869	1.2808	0.0556	5.1522	5.1522	11.6
22-Jul	0.969	204	14.4	3.1	0.9692	0.3485	1.4676	27.7859	1.3024	0.0531	5.3369	5.3373	11.3
23-Jul	0.914	205	14.5	1.9	0.9694	0.3448	1.4688	27.8875	1.2088	0.0648	5.3077	5.3078	12.6
24-Jul	0.878	206	15.9	2.0	0.9697	0.3409	1.4700	27.9916	1.1152	0.0802	5.3171	5.3148	13.9
25-Jul	0.918	207	15.2	2.1	0.9699	0.3370	1.4713	28.0983	1.1728	0.0702	5.4563	5.4593	13.1
26-Jul	0.902	208	14.7	0.4	0.9701	0.3329	1.4726	28.2074	1.0864	0.0859	5.5615	5.5653	14.3
27-Jul	0.875	209	14.7	2.1	0.9704	0.3288	1.4739	28.3188	1.2088	0.0648	5.1598	5.1580	12.6
28-Jul	0.901	210	15.8	2.4	0.9706	0.3246	1.4753	28.4326	1.1512	0.0737	5.4668	5.4635	13.4
29-Jul	0.908	211	15.7	2.5	0.9709	0.3202	1.4766	28.5487	1.1656	0.0713	5.4997	5.4987	13.2
30-Jul	0.881	212	15.3	0.6	0.9712	0.3158	1.4780	28.6669	1.0576	0.0922	5.5750	5.5775	14.7
31-Jul	0.865	213	15.5	-0.2	0.9714	0.3113	1.4794	28.7873	0.9856	0.1112	5.6250	5.6208	15.7
	0.870					Promedio					4.8981	4.8984	

estado de la atmósfera (Rodriguez, Hernandez & Simbaqueva, 2015).

La distribución de la radiación solar, transmitancia atmosférica y el conocimiento del tipo de cobertura del cielo son de suma importancia para áreas urbanas y rurales, pues influyen en diversos procesos termodinámicos (Gomes, Alves, Alves, & Chiletto, 2009).

Resultados y discusión

Aplicación del modelo a valores diarios

El cálculo de la radiación solar se realizó para cada día durante el periodo de setiembre del 2015 y agosto del 2016. El respectivo cálculo se muestra en la siguiente Tabla 2, como ejemplo para el mes de julio del 2016.

Para la obtención de la radiación solar global se probaron distintos valores de transmitancia atmosférica al modelo hasta que la radiación solar global diaria estimada y medida mostrara un buen desempeño.

Según Tabla 2, para el mes de julio del 2016 se observa que la radiación solar global es mayor a $4KWh/m^2$, excepto los días 04 y 07 de julio del 2016, lo que indica que es rentable en las aplicaciones de las energía renovables, además la transmitancia

atmosférica máxima son mayores a 0.6 lo que indica que en dicho mes los días fueron de cielo despejado, según la Tabla 1, indicada por Muhammad Iqbal (1983).

También se calculó el comportamiento diario de la radiación solar global estimada durante el 2015 y 2016 en la ciudad de Puno (Figura 1).

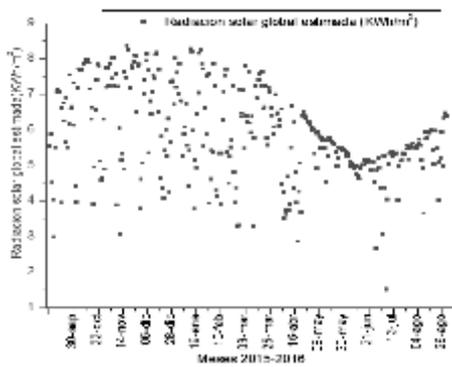


Figura 1. Radiación solar global estimada diaria 2015-2016.

La Figura 1 muestra que la radiación solar global estimada tiene un comportamiento anormal el día 07 de julio del 2016 con un valor de 1.5119 KWh/m² de radiación solar global, debido a las bajas temperaturas registradas, tales como la temperatura máxima de 6.1°C y temperatura mínima de 2.3°C y de amplitud térmica ΔT de 3.8°C que es muy baja a diferencia de los datos de los demás días del año. Otros días atípicos también se registraron el 28 de junio del 2016 con un valor de 2.6551KWh/m² y el 05 de setiembre del 2015 con un valor de 2.9850 KWh/m²

A continuación se muestra el comportamiento correspondiente de la radiación solar global estimada, radiación solar extraterrestre y la amplitud térmica diarios durante los meses del 2015 y 2016. Como se puede observar el comportamiento entre todas las variables están relacionadas, tal como se observa en la Figura 2.

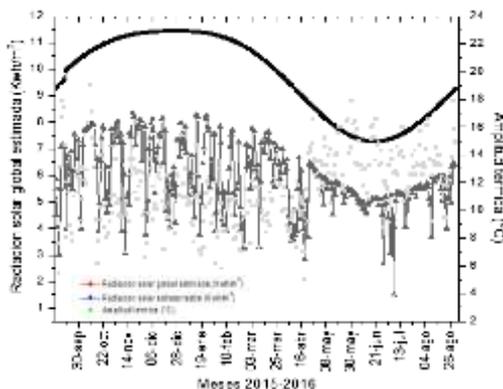


Figura 2: Radiación solar global, radiación solar extraterrestre y amplitud térmica diarias 2015-2016.

La Figura 2, muestra el comportamiento inversamente proporcional de la radiación solar global y la amplitud térmica, donde, mientras más bajo sea el valor de la amplitud térmica, el valor de la radiación solar global es más alto y mientras más alto sea el valor de la amplitud térmica, entonces la radiación solar global es más baja. Por otro lado, la radiación solar global estimada y la radiación solar extraterrestre tienen comportamientos similares,

además se puede observar que la radiación solar global es menor a diferencia de la radiación extraterrestre debido a que la energía procedente del sol atraviesa la atmosfera hasta llegar a la superficie terrestre, sufriendo una variación en su señal espectral debido a fenómenos atmosféricos como la absorción y dispersión por el ozono, aerosoles, nubes, masa óptica, CO₂, etc. Otra observación importante es que la radiación solar global tiene un comportamiento disperso en el verano, mientras que en el invierno su comportamiento es más estable.

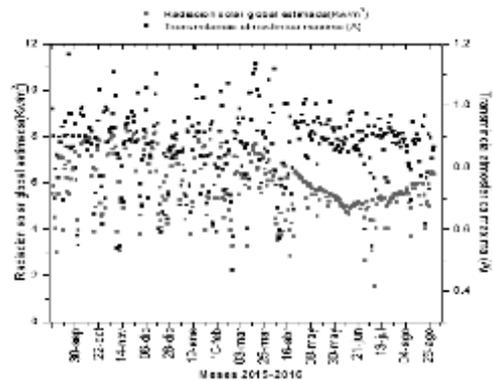


Figura 3. Transmitancia atmosférica máxima y radiación solar global diaria 2015-2016.

En la Figura 3, se muestra el comportamiento diario de la transmitancia atmosférica máxima durante el periodo de estudio. Los promedios mensuales obtenidos de transmitancia atmosférica máxima para los meses setiembre, octubre, noviembre, diciembre del 2015 y enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto del 2016 son 0.889, 0.875, 0.881, 0.815, 0.864, 0.811, 0.932, 0.850, 0.915, 0.881, 0.870 y 0.850 respectivamente.

Además, se puede observar los valores de transmitancia atmosférica en su mayoría fueron mayores de 0.6, el cual indica que la mayoría de los días de los meses entre 2015 y 2016 fueron de cielo despejado, según indica Muhammad Iqbal (1983) en la Tabla 1.

Conclusiones

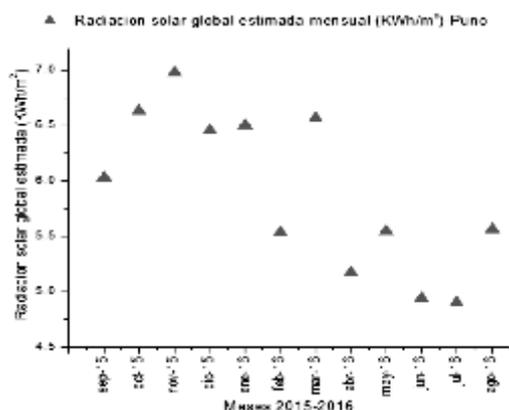


Figura 4. Radiación Solar Global Estimada Promedio Mensual 2015 Y 2016.

En la Figura 4, se muestra el comportamiento mensual de la radiación solar global durante el año 2015 y 2016. Los promedios mensuales de radiación solar global estimada para los meses setiembre, octubre, noviembre, diciembre del 2015 y enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto del 2016 son 6.0278KWh/m², 6.6278KWh/m², 6.9782KWh/m², 6.4526KWh/m², 6.4988KWh/m², 5.5375KWh/m², 6.5619KWh/m², 5.1725KWh/m², 5.5437KWh/m², 4.9407KWh/m², 4.8981KWh/m² y 5.5644KWh/m² respectivamente.

Se observa que la radiación solar global máxima se obtuvo en el mes de noviembre del 2015 con un valor de 6.9782KWh/m² y la radiación solar global mínima se obtuvo en el mes de julio del 2016 con un valor de 4.8981KWh/m². Estos resultados coinciden con los fenómenos de afelio y perihelio respectivamente.

Finalmente, la ciudad de Puno está sujeta a alteraciones constantes de las temperaturas máximas y mínimas dando como resultado la presencia de días atípicos, además se considera importante la influencia del lago Titicaca con su efecto termorregulador que hace que las temperaturas no sean muy bajas. Además, en este estudio se consideró que como la ciudad de Puno tiene como principal actividad económica el turismo y la pequeña industria, ambas actividades tienen un bajo impacto con respecto a la contaminación ambiental, con un bajo efecto de polvo y material particulado, por lo que se tiene una atmósfera relativamente limpia durante el año.

El modelo empírico Bristow y Campbell (1984) permite estimar la radiación solar global diaria en la ciudad de Puno, con los registros de las temperaturas máximas y mínimas se ha notado un buen desempeño siendo la correlación 0.99.

En el proceso de comparación del modelo con las mediciones se estimó las transmitancia atmosféricas obteniéndose un valor máximo promedio de 0.915 para el mes de marzo del 2016 y un valor mínimo promedio de 0.811 para el mes de febrero del 2016, estos resultados indican que la mayoría de los días fueron de cielo parcialmente despejado.

Además, se realizaron mediciones de radiación solar global durante el periodo de setiembre del 2015 hasta agosto del 2016, obteniéndose un máximo valor promedio de 6.9782KWh/m² para el mes de noviembre del 2015 y un mínimo valor promedio de 4.8981KWh/m² para el mes de julio del 2016, ambos valores relaciones al cambio estacional.

Finalmente, según los resultados la ciudad de Puno tiene un potencial de radiación solar global promedio anual de 5.8988KWh/m², lo cual es considerado muy rentable por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Los resultados obtenidos en este trabajo permitirán el desarrollo de energías renovables para el desarrollo de nuevas tecnologías como el uso de colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos y otros.

Referencias bibliográficas

- Almorox, J., Bocco, M., & Willington, E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at cañada luque, Cordova, Argentina. *Renewable Energy*, 60, 382-387.
- Baigorria, G. A., Villegas, E. B., Trebejo, I., Carlos, J. F., & Quiroz, R. (2004). Atmospheric transmissivity: distribution and empirical estimation around the Central Andes. *International journal of climatology*, 26, 1121-1136.
- Bandyopadhyay, A., Raghuvanshi, N. S., Bhadra, A., & Sinh, R. (2008). Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extreme. *Agricultural and forest meteorology*, 148, 1707-1718.
- Beruski, G. C., Pereira, A. B., & Sentelhas, P. C. (2015). Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol: 30, n.2, 205-213.
- Bristow, K., & Campbell, G. (1984). On The Relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, n31, 159-166.
- Camayo, B. F., Paucar, E. P., Massipe, J. R., & Quispe, M. O. (2013). Validación y aplicación del Modelo Bristow y Campbell para estimar la Radiación Solar Global de la región Junín. *Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Junín*, XX SPES, Tacna-Peru.
- Da Silva, D. A., Santos, C. A., Marques, V. V., Da Silva, J., Gomes, N., & Sacardi, M. (2014). Verificação da turbidez atmosférica em Humaitá-AM. *Revista EDUCAmazonia*, Vol. 12, 86-98.
- Dumas, A., Andrisani, A., Bonnici, M., Graditi, G., Leanza, G., Madonia, M., & Trancossi, M. (2015). A new correlation between global solar energy radiation and daily temperature variations. *Solar energy*, 116, 117-124.
- Gomes, F. J., Alves, L. S., Alves, M. C., & Chiletto, E. C. (2009). Índice de claridade em Cuiabá e Chapada dos Guimarães. *Mato Grosso, Brasil*.
- Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., . . . White, W. (2010). Solar influences on climate. *Rev. Geophys*, 48, 1-53.
- Hassan, G. E., Youssef, M. E., Mohamed, Z. E., & Ali, M. A. (2016). New temperature based models for predicting global solar radiation. *Applied energy*, 179, 437-450.
- Iqbal, M. (1984). *Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Academic press.
- Li, D., Lou, S., & Lam, J. (2015). An análisis of global, direct and diffuse solar radiation. *The 7th international conference on applied energy-ICAE2015. Energy procedia*, 75: 388-393.
- Liu, X., Mei, X., Li, Y., Wang, Q., Jensen, J. P., Zhang, Y., & Porter, J. P. (2009). Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. *Agricultural and forest meteorology*, 149, 1433-1446.
- Manzano, A., Martin, M. L., Valero, F., & Armenta, C. (2015). A single method to estimate the daily global solar radiation. *Atmospheric Research*.
- Mesa, F. J., & Varas, E. (2000). Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and forest meteorology*, 41, 100-231.
- Nogueira, D. H., Silva, M. G., Lêdo, E. R., & Araujo, E. M. (2012). Estimativa da radiação solar global (RS) através da amplitude térmica diária. *Workshop internacional de inovações tecnológicas na irrigação*.
- Oliveira, G., Augusto, G., Finzi, R. R., & Da Silva, A. (2014). Comparison between global solar radiation models in Aquidauana, alto pantanal, região Brasil. *Comunicata, scientiae*, 5, 222-228.
- Queiroz, M. R., Nogueira, C. B., & De Assis, S. V. (2000). Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região Amazônica. *Departamento de meteorologia Universidad de Pelotas Brasil*, 194-199.
- Quej, V. H., Almorox, J., Ibrahimov, M., & Saito, L. (2016). Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatan, Mexico. *Energy conversion and management*, 110: 448-456.
- Querino, C. A., Moura, M. A., & Lyra, R. (2006). Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 42-49.
- Recalde, C., Cisneros, C., Vaca, D., & Ramos, C. (2015). Relacion de la transmitancia atmosférica con heliofania y la diferencia de temperaturas extremas diarias en zona ecuatorial andina. *Informacion tecnológica*, Vol. 26, 143-150.
- Rodriguez, D. J., Hernandez, J., & Simbaqueva, O. (2015). Analisis estadístico del índice de claridad atmosférica para la ciudad de Bogota. *Revista científica. ISSN 0124-2253. Bogota, Colombia*, N° 21, pp. 65-70.
- Silva, V. J., Silva, C. R., Finzi, R. R., & Dias, N. S. (2012). Modelos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. *Ciência Rural*, Vol. 42: 276- 282.
- Teke, A., Yildirin, H. B., & Celik, O. (2015). Evaluation and performance comparison of different models for the estimation of solar radiation. *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, 1097-1107.

Yao , W., Li , Z., Wang, Y., Jiang, F., & Hu , L. (2014).
Evaluation of global solar radiation models for
Shanghai, China. *Energy conversión and
management*, 84, 597-612.