
Reconstrucción y análisis de la Evolución Temporal de la Radiación Solar Global en la ciudad de Puno durante el periodo 1964-2008

Reconstruction and analysis of the Temporary Evolution of Global Solar Radiation in the city of Puno during the period 1964-2008

Lelia Quispe Huamán
leliaqh1@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
Guina Sotomayor Alzamora
guinas@gmail.com - Universidad Nacional del Altiplano, Puno

Resumen

El estudio tiene como objetivo explicar el proceso de reconstrucción de la radiación solar global, así como analizar la evolución de su comportamiento desde 1964 hasta 2008. Se ha propuesto el modelo Bristow y Campbell, para reconstruir la radiación solar global diaria en el pasado, a partir de datos de temperaturas extremas registradas por SENAMHI-Puno y la transmitancia atmosférica máxima estimada con datos de la estación meteorológica de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano, Perú. En el proceso de reconstrucción de las series, se analizó la evolución de la radiación solar global. Cabe destacar que el resultado promedio anual es superior a $5.66244KWh/m^2$, con un incremento de radiación global de $0.00014473KWh/m^2$ por un periodo de cada cuatro años. Así mismo, la aplicación del modelo resulta de gran utilidad para obtener una base completa de radiación solar diaria, obteniéndose valores mayores de $4KWh/m^2$, tales resultados son muy rentables para las aplicaciones de energías renovables, según la Organización Latinoamericana de Energía. El incremento de la radiación solar global es resultado del adelgazamiento de la capa de ozono, generado por contaminantes antropogénicos.

Palabras claves: *Bristow y Campbell, reconstrucción, radiación solar global, temperaturas extremas, transmitancia atmosférica.*

Abstract

This study aims to explain the process of reconstruction of the global solar radiation, as well as to analyze the evolution of its behavior from 1964 to 2008 in Puno. The Bristow and Campbell model has been proposed, to reconstruct the daily global solar radiation in the past, from extreme temperature data recorded by SENAMHI-Puno and the estimated maximum atmospheric transmittance data from the meteorological station at the Professional School of Mathematical Physical Sciences at the Altiplano National University in Puno Peru. In the reconstruction process series, the evolution of global solar radiation was analyzed. It should be noted that the average annual average result is greater than $5.66244KWh/m^2$, with an increase in global radiation of $0.00014473KWh/m^2$ per period of every four years. Likewise, the application of the model is very useful to obtain a complete base of daily solar radiation, obtaining greater values than $4KWh/m^2$, such results are very profitable for renewable energy applications according to the Latin American Energy Organization. The increase in global solar radiation is the result of the thinning of the ozone layer, generated by anthropogenic pollutants.

Keywords: *Bristow and Campbell, reconstruction, global solar radiation, extreme temperatures, atmospheric transmittance.*

Introducción

La energía que irradia el sol es la principal causa de las diferencias climáticas en el planeta y sustenta todos los procesos vitales (Fernández, Campo, & Gentili, 2015), alcanza las gamas superficiales de la tierra principalmente entre $305\text{nm} - 2800\text{nm}$; además, su integración de longitud de onda, conocida como radiación solar global, es la única fuente de energía significativa para el sistema global (Wild, 2012). Casi todos los ciclos físicos y biológicos conocidos en el sistema de la tierra son impulsados por la radiación electromagnética emitida por el sol, conocida como radiación solar y por lo tanto, sus variaciones contribuyen al cambio climático (Fu, 2015; Velasco, Mendoza, & Velasco, 2015).

Con el cambio climático y la contaminación del aire, los recursos solares ya no serán estables a lo largo del tiempo y sufrirán cambios sustanciales en los próximos años (Wild et al., 2015). La evaluación de la variación a largo plazo de la radiación solar en la superficie terrestre es necesaria para diversos temas como el calentamiento global, el retro de los glaciares, los recursos hídricos y aplicaciones de energía solar (Antón et al., 2017); así mismo, para comprender el cambio climático a futuro y la forma en que estos cambios pueden afectar la generación de energía fotovoltaica (Yang et al., 2018; Wild et al., 2015).

Desafortunadamente hay una notable falta de estudios científicos centrados en la reconstrucción a largo plazo de los datos de radiación solar global (Ulloa et al., 2011; Antón et al., 2017), especialmente existe escasez de series temporales en el siglo XX (Sánchez & Wild, 2012). Por esta razón, se utilizan métodos de estimación, a fin de reconstruir la radiación solar global en estaciones meteorológicas que no registran la radiación solar global. Los datos reconstruidos son utilizados en modelos agrícolas e hidrológicos, como el rendimiento de cultivos, o en modelos sobre el cambio climático (Oesterle, 2001).

En los últimos años se ve un incremento de aplicaciones de energía solar, impulsados por intereses mundiales sobre energías verdes (Zhang, 2014). Así, el diseño, dimensionamiento y rendimiento de cualquier proyecto de energía solar busca como optimizar sistemas fotovoltaicos, colectores planos, calentadores de agua, construcción de edificios, aislamiento adecuado al clima local, calefacción, y capacidad de almacenamiento de sistemas de instalación solar, por lo que se requiere del conocimiento de la radiación solar global disponible en el lugar de instalación (Marzo et al., 2017).

Para que cualquier proyecto de energía solar tenga éxito, los datos de radiación solar global son necesarios (Ayodele & Ogunjuyigbe, 2015; El Mghouchi et al., 2016), además del conocimiento previo de la radiación solar *in situ*, es importante para una mejor gestión y control de instalaciones de energía solar (Belaid & Mellit, 2016), sobre todo para aplicaciones de investigación e ingeniería (El Mghouchi et al., 2016). La energía solar es el recurso de energía más abundante en la tierra, por ejemplo, la energía solar que alcanza la superficie de la tierra en

una hora es la misma cantidad de energía consumida por todos los seres humanos en un año (Pérez-Burgos et al., 2015). Además, ha sido identificada por el programa *Global Climate Observing System (GCOS)* como una de las variables climáticas esenciales, sumamente importante para caracterizar el clima de la tierra (Bengulescu, Blanc, & Wald, 2016).

Materiales y métodos

Área de estudio y datos utilizados

El estudio se desarrolló en la ciudad de Puno, que posee un clima frío, con amplitud térmica moderada (Claude & André, 1991), ubicada en la cuenca hidrográfica del Titicaca a 3827 m s. n. m. , en el piso ecológico circunlacustre, correspondiente al área que bordea al lago Titicaca, lago navegable más alto del mundo y que actúa con un efecto termorregulador, esto es, absorbe calor durante las horas de sol y lo pierde, lentamente, durante las noches, permitiendo que los vientos del Sur Este, que soplan sobre el agua, se calienten y humedezcan, elevando y manteniendo las temperaturas constantes (Flores, E., & Flores, 2011), permitiendo una mayor producción agrícola en la zona ribereña.

En la reconstrucción de la radiación solar global se utilizaron datos de temperaturas máximas y temperaturas mínimas diarias desde el año 1964 hasta el año 2008, medidos por la estación meteorológica Vaisala de SENAMHI, además de la latitud de la zona y la transmitancia atmosférica máxima estimadas con datos de la estación meteorológica modelo VANTAGE PRO 2 PLUS de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, que posee el mantenimiento y la calibración certificada por el fabricante. Estos datos fueron medidos cada 15 minutos durante el día y almacenados en la base de datos del software weatherlink.

Modelos de estimación

Los métodos para estimar la radiación solar global diaria basados en observaciones meteorológicas, pueden calcularse mejor con modelos empíricos (Ocampo & Rivas, 2013), en base al rango de temperatura, duración diaria del sol, nubosidad, humedad relativa, precipitación y pueden utilizarse como predictores en diferentes casos (Oesterle, 2001). Además, las escalas temporales intrínsecas e incompletas de la variabilidad de la radiación solar global superficial se abordan, también, por medio de modelos empíricos (Fernández et al., 2015; Bengulescu et al., 2016; Rojas et al., 2016), o en base a la insolación solar, como el modelo Ångström- Prescott, usado para reconstruir la radiación solar global en Izaña, España (García et al., 2014).

Existen numerosos modelos de estimación de radiación solar que usan diferentes variables meteorológicas, como los modelos basados en temperatura, que poseen una fácil disponibilidad de datos, además de medida simple y robusta. Entre los modelos más conocidos se encuentran los desarrollados por Hargreaves y Samani el 1982,

Bristow y Campbell el 1983 y Allen el 2002 (Swingedouw et al., 2017). Vale señalar que la radiación solar global y la temperatura están estrechamente relacionadas (Rojas et al., 2016; Chang et al., 2017), como muestra la Figura 2.

Modelo Bristow y Campbell

Se considera el modelo Bristow y Campbell, que explica la relación entre la diferencia de las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire con calor sensible y calor latente (Baigorria et al., 2004). 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 (Ming et al., 2014).

Cuando la radiación solar llega a la superficie de la tierra, una parte se refleja y el otro es absorbido. 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 sugirieron 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, & Vieira, 2000), como se muestra en la Ecuación (1).

$$\frac{R_g}{R_e} = A[1 - e^{-B(T_{Cmin,max})}] \quad (1)$$

Donde:

R_g : Radiación solar global [KWh/m^2]

R_e : Radiación solar extraterrestre [KWh/m^2]

T_{max} Temperatura máxima [$^{\circ}C$]

T_{min} Temperatura mínima [$^{\circ}C$]

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. El coeficiente B ($^{\circ}C^{-1}$) y C determina el efecto del incremento en la amplitud térmica ΔT en los máximos valores de transmitancia atmosférica (K_t) (Meza & 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 (Camayo et al., 2017).

Capa de Ozono

La cantidad de ozono se ve disminuida debido a su reacción con contaminantes de origen humano, entre los contaminantes más perjudiciales para la capa de ozono se encuentran: los clorofluorocarbonos (Cfcs), el gas metano (CH_4), el óxido nítrico, el monóxido de cloro (ClO), entre otros, la radiación solar rompe el enlace O-O del O_2 (Oxígeno) (Sánchez, 2008). La Figura 1 muestra la ubicación de la capa de ozono en la atmósfera terrestre.

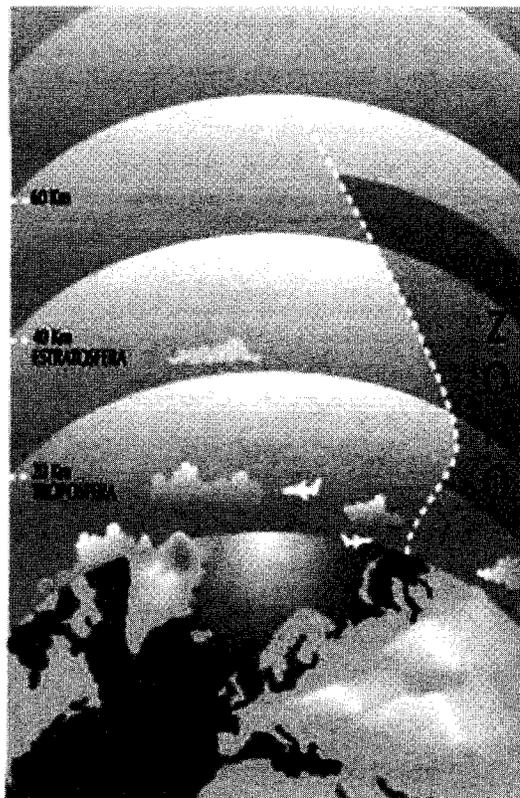


Figura 1. Ubicación de la capa de ozono en la atmósfera obtenido de (Sánchez, 2008).

Resultados y discusión

El modelo de Bristow y Campbell fue definido para valores diarios. Como la ciudad de Puno está sujeta a alteraciones constantes de las temperaturas máximas y mínimas, la utilización del modelo generó valores de radiación solar global esperados, ya que estas son resultados favorables para el aprovechamiento de la energía solar en la ciudad de Puno. Para la estimación de la radiación solar global fueron usadas las ecuaciones citados en esta investigación.

El comportamiento correspondiente a los datos estimados de la radiación solar global y la amplitud térmica diaria es mostrado en la Figura 2, a modo de ejemplo, estas imágenes corresponden a los años 1966 y 2008, respectivamente.

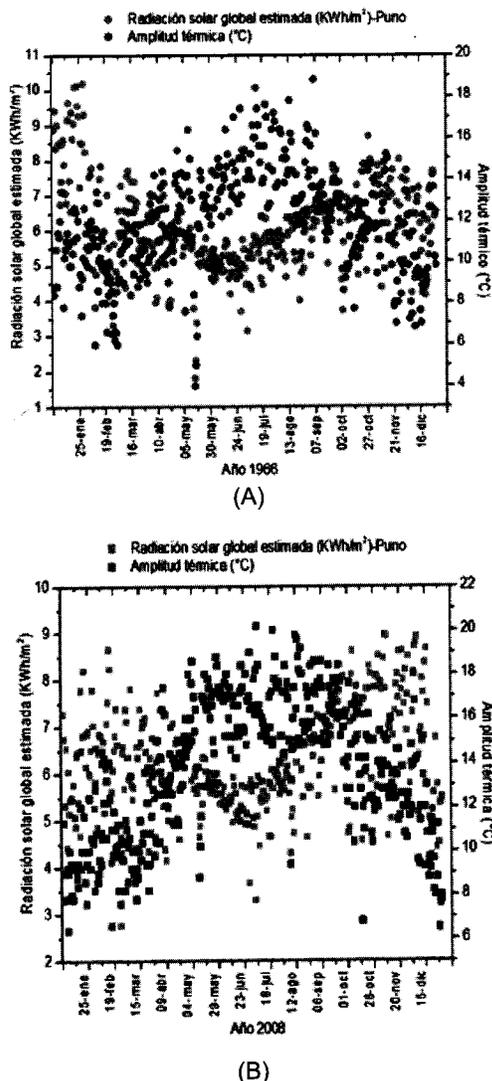


Figura 2. Radiación solar global y amplitud térmica diaria en los años 1966 (a) y 2008 (b).

La amplitud térmica es $\Delta T = T_{max} - T_{min}$. Es el rango de temperatura durante un día, la máxima se da durante el día entre las 11: am a 2: pm y la mínima en el amanecer a eso de las 4:00am a 5:00am (debido a las ondas cortas y largas de la radiación solar durante un día las 24 horas).

En los extremos la amplitud térmica es menor debido a que los días presentan nubosidad, precipitación y estas hacen que las temperaturas desciendan. Por otro lado, en el centro de la figura la amplitud térmica es alta debido a que las temperaturas descienden en la noche o en la sombra. Así mismo durante el día debido a los cielos despejados donde las temperaturas ascienden y ocasiona que las diferencias de temperaturas sean altas.

En las estaciones de invierno, la radiación solar global disminuye hasta en 10% y existe un incremento del material particulado al 16% en Sao Paulo, Brasil (De Oliveira et al., 2003). Además, la variación de radiación solar global se debe a la presencia de aerosol antropogénico en la atmósfera (Sanchez & Wild, 2012; Sanchez et al., 2016). A continuación, en la Figura 3, se muestra el comportamiento diario de las temperaturas máximas, mínimas y la amplitud térmica, como ejemplo para el año 2008.

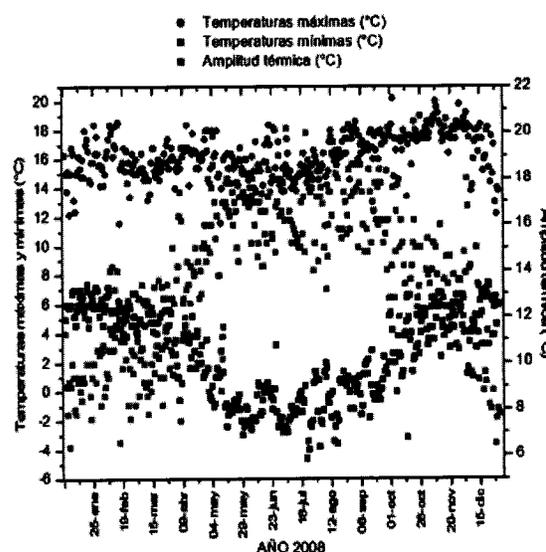


Figura 3. Amplitud térmica, temperaturas máximas y mínimas en el 2008.

La Figura 3 muestra el comportamiento diario de la temperatura máxima y mínima y la amplitud térmica para el año 2008. Se ve que en los extremos, la amplitud térmica es menor, debido a los días que presentan nubosidad, precipitación y esto ocasiona que la temperatura descienda. Por otro lado, en el centro de la figura, la amplitud térmica es alta, pues las temperaturas descenden por la noche o en la sombra. Además, en los días con cielos despejados, las temperaturas ascienden y ocasionan que la diferencia de temperatura sea alta. También se muestra que la temperatura mínima descende en la estación de invierno, es decir, entre los meses de mayo, junio, julio y agosto, por tanto, las máximas amplitudes térmicas se dan durante esa temporada, esto por el fenómeno del afelio es decir, la tierra se aleja del sol.

La Figura 4 muestra el comportamiento diario de la Transmitancia Atmosférica máxima durante un año, para tal se utilizaron datos medidos por la estación meteorológica de la Escuela Profesional de Físico Matemáticas; además, las constantes empíricas B y C,

se estimaron en base a los datos de temperatura máxima y mínima, y la latitud de la zona de estudio.

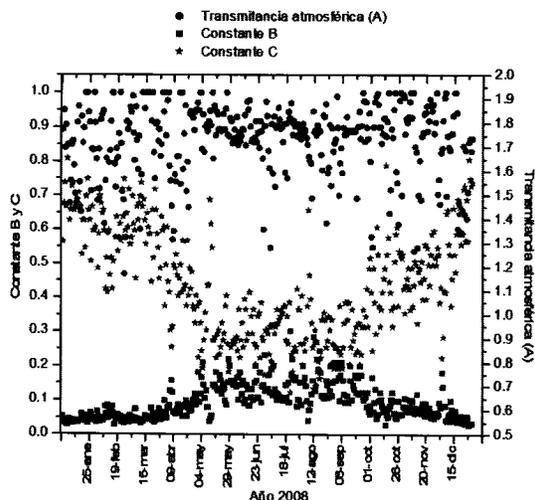


Figura 4. Relación entre la constante B, constante C y transmitancia atmosférica máxima.

Además, la Figura 4 muestra una dispersión en los extremos, debido a la presencia de días nublados y las precipitaciones dadas entre los meses de enero, febrero, marzo y abril y entre los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre. En el centro, existe menos dispersión, debido a la temporada de sequía, friaje o heladas y días más despejados, dada entre los meses de mayo, junio, julio y agosto. Finalmente, los valores de transmitancia atmosférica máxima son mayores a 0.6, que indica que la mayoría de días del año son despejados.

A continuación, en la Figura 5, se muestra el ajuste entre la amplitud térmica y la constante B.

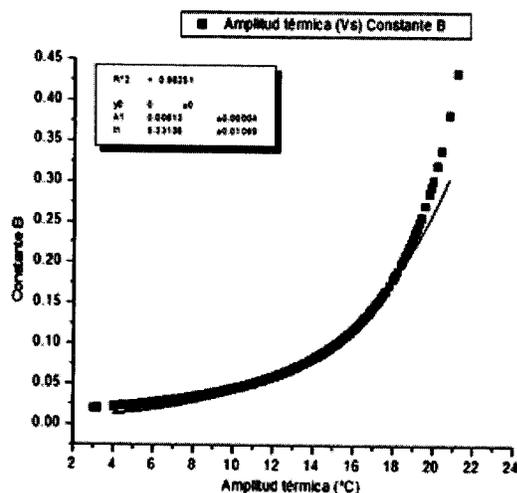


Figura 5. Relación entre la amplitud térmica y la constante B.

La amplitud térmica ΔT y el parámetro B incrementan sus valores durante el periodo de estudio debido a que el parámetro B depende del parámetro C y este depende de la temperatura máxima y mínima, y la latitud, por lo que estas variables generan una función exponencial decreciente. La relación entre la constante B y la amplitud térmica están estrechamente relacionados, pues se obtuvo una correlación de $R = 0.98251$. Además, el

comportamiento de la constante B, desde 1964 hasta el 2008, desciende tanto en los meses de enero, febrero, marzo y abril como en los meses de setiembre, octubre, noviembre y diciembre; y ascienden entre los meses mayo, junio, julio y agosto. Durante el estudio, se obtuvo un valor máximo de 0.4336 y un valor mínimo de 0.0195 durante los años evaluados.

Así mismo, el comportamiento de la constante C, desde 1964 hasta el 2008, asciende tanto entre los meses de enero, febrero, marzo y abril como en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, y desciende entre los meses de mayo, junio, julio y agosto. Los valores obtenidos en este estudio obtuvieron como valor máximo de 1.9000 y valor mínimo de 0.5896, durante los años evaluados.

La Figura 6 muestra el ajuste entre la amplitud térmica ΔT y la constante C, así, se verifica que la amplitud térmica incrementa sus valores y el parámetro C los disminuye, generando una función lineal decreciente. Se muestra también que la relación entre la constante C y la amplitud térmica están estrechamente relacionados.

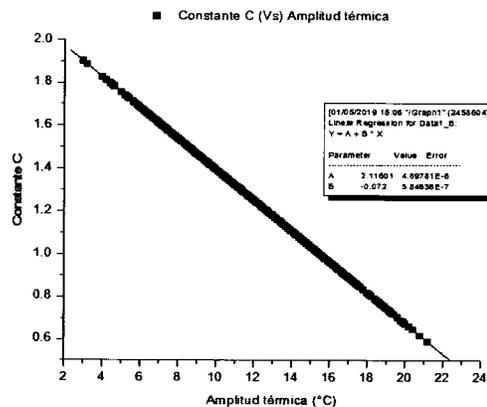


Figura 6. Relación entre la amplitud térmica y la constante C.

La Figura 7 muestra que los valores de la constante C se incrementan, mientras que los de la constante B disminuyen, generando una función decreciente. Tal comparación muestra que las constantes están estrechamente relacionadas, pues se obtuvo una correlación de $R = 0.99822$.

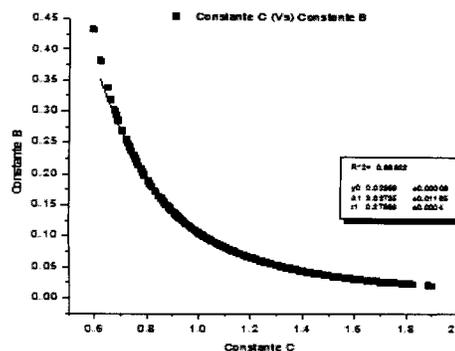


Figura 7. Relación entre la constante C y la constante B.

La Figura 8 muestra el ajuste entre la amplitud térmica ΔT y la transmitancia atmosférica durante el periodo evaluado, aquí se observa que los valores de amplitud térmica se incrementan, al igual que los valores de transmitancia atmosférica, generando una función creciente. La amplitud térmica y la transmitancia atmosférica también están relacionados, con una correlación de 0.85609.

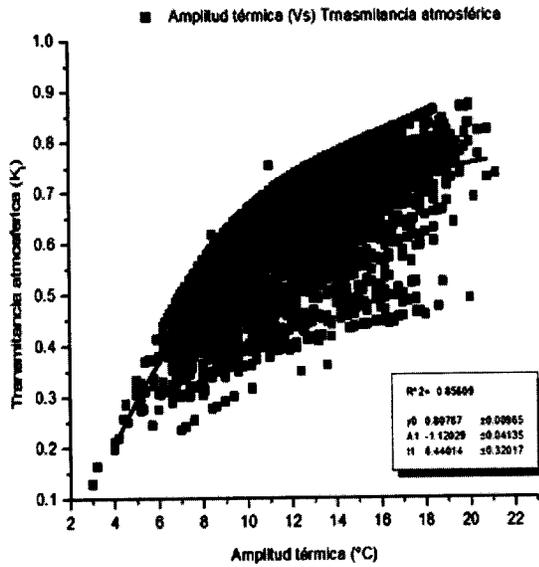


Figura 8. Relación entre la amplitud térmica y la transmitancia atmosférica.

La Figura 9 muestra la evolución de la radiación solar global durante el periodo evaluado, desde enero de 1964 hasta diciembre de 2008, en la ciudad de Puno, Perú. Con los datos de la serie histórica de temperatura, se ha logrado reconstruir el comportamiento de la radiación solar, notando una evolución temporal de:

$$Rad = 5.66244 + 0.00014473xT$$

Dónde: T es cada 4 años, los resultados muestran una ascendencia de la radiación solar en el periodo de estudio.

Además, la Figura 9 muestra que el promedio anual de radiación solar global es de 5.66244 kWh/m^2 , y el incremento mencionado es de $0.00014473 \text{ kWh/m}^2$ por un periodo de cuatro años. Este incremento se da, entre otros factores, por la reducción de la cantidad de ozono, por efectos antropogénicos de la industria automotriz (Arcos, 2007). Se pretende que estos resultados puedan servir como base para estudios de variabilidad temporal, como los relacionados al calentamiento global, retiro de los glaciares, recursos hídricos y aplicaciones de energía solar.

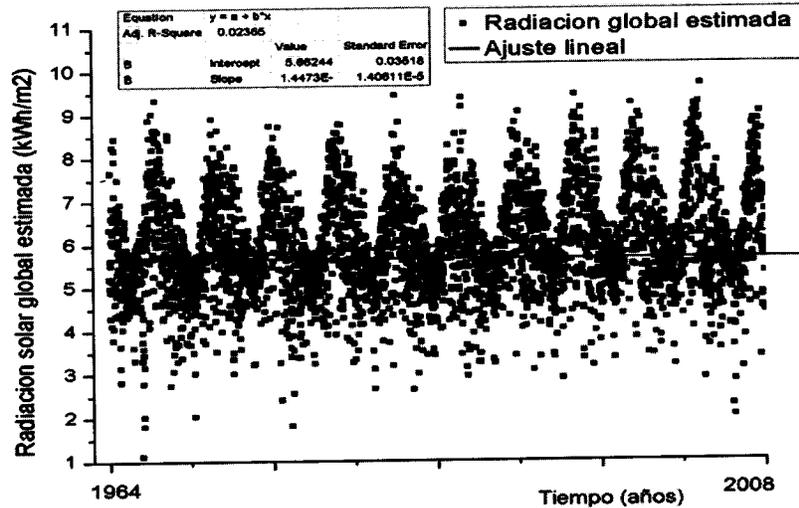


Figura 9. Evolución anual (cada 4 años) de la radiación solar global desde 1964 hasta 2008, la línea horizontal azul es referencial.

Los planes de mitigación del cambio climático exigen un aumento significativo de aplicaciones de energías renovables, por lo que se evalúan los impactos este cambio en sistemas fotovoltaicos, pues estos cambios se darían en un intervalo de -14% a $+2\%$ (Jerez et al., 2015), otros estudios indican que la nubosidad muestra un descenso continuo desde los años 1960s, que provocarán un incremento de la radiación solar en los próximos decenios (Calbó, González, & Sánchez, 2017).

Otros estudios realizados por (Yang et al., 2018) dan a conocer resultados sobre radiación solar, en China, se indica un incremento de la radiación solar de $0.4W/m^2$, y una tendencia decreciente de $-0.08W/m^2$ en Qinghai. Se indica también que la producción de energía fotovoltaica disminuyó anualmente en -0.04% del 2006 al 2015 al oeste de China, y se incrementó al sureste de China, de 0.06% a 0.1% por año. También Antón et al., (2017) presentaron un estudio que se centra en el análisis de la radiación solar global diaria determinada a partir de la insolación solar en Madrid, España, entre 1887-1950. También se analiza la relación entre la radiación solar global y la nubosidad, así mismo la reconstrucción de la radiación solar global a largo plazo fue con tendencia negativa de $-13KJ/m^2$ por año en el periodo 1887 a 1915 y con tendencia positiva de $+13KJ/m^2$ por año en el periodo 1916 a 1950, ambos estadísticamente significativos en el nivel de confianza del 95%.

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman cambios a largo plazo de la radiación solar global en la ciudad de Puno durante el periodo de enero de 1964 a diciembre de 2008, con un valor favorable, mayor a $5KWh/m^2$, que es rentable en las aplicaciones de energía solar. Cabe destacar que uno de los factores para tal incremento se da debido al deterioro de la capa de Ozono por contaminantes antropogénicos, como mencionado en el tercer panel intergubernamental de Cambio climático (IPCC) en 1990, 1995, 2001 y 2007 cada año con más complejidad (Power, 2009).

Conclusiones

Se ha reconstruido la radiación solar global, en el periodo de los años 1964 al 2008 aplicando el modelo Bristow y Campbell, obteniéndose valor promedio de $5.66244KWh/m^2$ anual, con un incremento de $0.00014473KWh/m^2$ cada periodo, determinado por cada cuatro años, como se muestra en la Figura 9, con tendencia a $6KWh/m^2$, lo cual permite realizar una evaluación de la variación de la radiación solar de la superficie terrestre a largo plazo, esta es necesaria para estudios de diversos temas como el calentamiento global, el retiro de los glaciares, los recursos hídricos y las aplicaciones de energía solar, en concordancia con lo indicado por Antón et al., (2017).

Así mismo, al tener la ciudad de Puno un potencial de radiación solar global promedio anual de $5.66244KWh/m^2$, se considera muy rentable para las aplicaciones en energía solar 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, células fotoeléctricas, heliostatos o colectores solares, arquitectura bioclimática, etc. Pudiendo transformarse en energía eléctrica o térmica, las llamadas energías renovables o energías limpias, que podrán ayudar a resolver los problemas más urgentes de friaje en la ciudad y la región de Puno que afronta la población y los seres vivos en las zonas alto andinas.

También el incremento de la radiación solar global de $0.00014473KWh/m^2$, se debe al adelgazamiento de la capa de ozono, por la reacción con contaminantes de origen humano. Entre los contaminantes más perjudiciales para la capa de ozono se encuentran: los clorofluorocarbonos (CFCs), el gas metano (CH_4), el óxido nitroso, el monóxido de cloro (ClO), entre otros. La destrucción de la capa de ozono hace que los rayos ultravioletas lleguen a la superficie de la biosfera y puedan interferir en la capacidad fotosintética y el crecimiento de las plantas. Otra consecuencia es el aumento del riesgo de cáncer de piel en los seres humanos y los animales. La mejor manera de reducir el calentamiento global es, sin duda, reducir las emisiones antropogénicas que producen los gases invernaderos.

Referencias bibliográficas

- Antón, M., Román, R., Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J., & Vaquero, J. M. (2017). Variability analysis of the reconstructed daily global solar radiation under all-sky and cloud-free conditions in Madrid during the period 1887–1950. *Atmospheric Research*, 191, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.013>
- Arcos Navarro, G. (2007). Calentamiento global. *Ciencia UAT*, 2(2), 10–14.
- Ayodele, T. R., & Ogunjuyigbe, A. S. O. (2015). Prediction of monthly average global solar radiation based on statistical distribution of clearness index. *Energy*, 90, 1733–1742. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.137>
- 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*, 24(9), 1121–1136. <https://doi.org/10.1002/joc.1060>
- Belaid, S., & Mellit, A. (2016). Prediction of daily and mean monthly global solar radiation using support vector machine in an arid climate. *Energy Conversion and Management*, 118, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.082>
- Bengulescu, M., Blanc, P., & Wald, L. (2016). Characterizing Temporal Variability in Measurements of Surface Solar Radiation and its Dependence on Climate. *Energy Procedia*, 97, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.045>
- Calbó, J., González, J. A., & Sanchez-Lorenzo, A. (2017). Building global and diffuse solar radiation series and assessing decadal trends in Girona (NE Iberian Peninsula). *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3–4), 1003–1015. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1829-3>
- Camayo Lapa, F. B., Massipe Hernandez, R. J., Pomachagua Paucar, E. J., Torres-Ten, A., & Quispe-Flores, M. (2017). Validación y aplicación del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junín. *Tecnología Química*, XXXVII(3), núm. 3, 2017, pp. 621–637.
- Chang, T.-P., Liu, F.-J., Ko, H.-H., & Huang, M.-C. (2017). Oscillation characteristic study of wind speed, global solar radiation and air temperature using wavelet analysis. *Applied Energy*, 190, 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.149>
- Claude, D., & André, L. (1991). El lago Titicaca: Síntesis del conocimiento limnológico actual. In *ORSTOM. Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération*.
- De Oliveira, A. P., Machado, A. J., Escobedo, J. F., & Soares, J. (2003). Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology*, 71(3–4), 231–249. <https://doi.org/10.1007/s007040200007>
- El Mghouchi, Y., Chham, E., Krikiz, M. S., Ajzoul, T., & El Bouardi, A. (2016). On the prediction of the daily global solar radiation intensity on south-facing plane surfaces inclined at varying angles. *Energy Conversion and Management*, 120, 397–411. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.005>
- El Mghouchi, Y., El Bouardi, A., Choulli, Z., & Ajzoul, T. (2016). Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.044>
- Fernández, M. E., Campo, A. M., & Gentili, J. O. (2015). Comportamiento temporal de la radiación solar global en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Revista de Climatología*, 15(August), 51–64.
- Flores Condori, E., & Flores Quispe, E. L. (2011). Caracterización agroclimática en función de los elementos meteorológicos en el altiplano del Perú (2010–2011). *Universidad Nacional Del Altiplano*.
- Fu, Q. (2015). Radiación transfer in the Atmosphere. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2nd editio, Vol. 5, pp. 37–44). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00444-8>
- García, R. D., Cuevas, E., Pallé, P., Romero-Campos, P. M., Cachorro, V. E., Bustos, J. J., ... de Frutos, A. M. (2014). Reconstruction of global solar radiation time series from 1933 to 2013 at the Izaña Atmospheric Observatory. *Atmospheric Measurement Techniques*. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3139-2014>
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J. P., López-Romero, J. M., Thais, F., ... Wild, M. (2015). The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>
- Marzo, A., Trigo, M., Alonso-Montesinos, J., Martínez-Durbán, M., López, G., Ferrada, P., ... Batlles, F. J. (2017). Daily global solar radiation estimation in desert areas using daily extreme temperatures and extraterrestrial radiation. *Renewable Energy*, 113, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.061>
- Meza, F., & Varas, E. (2000). Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(2–3), 231–241. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00090-8)
- Ming, T., Richter, R. De, Liu, W., & Caillol, S. (2014). Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 792–834. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.032>
- Ocampo, D., & Rivas, R. (2013). Estimación de la radiación neta diaria a partir de Modelos de Regresión Lineal Múltiple. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(2), 263–271. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.04.031>

- Oesterle, H. (2001). Reconstruction of daily global radiation for past years for use in agricultural models. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(3), 253–256. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00248-3](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00248-3)
- Perez-Burgos, A., Roman, R., Bilbao, J., De Miguel, A., & Oteiza, P. (2015). Reconstruction of long-term direct solar irradiance data series using a model based on the Cloud Modification Factor. *Renewable Energy*, 77, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.007>
- Power Porto, G. (2009). El calentamiento global y las emisiones de carbono. *Ingeniería Industrial*, (27), 101–122.
- Queiroz, M. R., Nogueira, C. B. R., & Vieira de Assis, S. (2000). *Avaliação de um método empírico para estimativa da radiação solar global – modelo de Bristow-Campbell*. 194–199.
- Rojas Serrano, J., Vásquez Vega, A., García Acevedo, F., Parra Peñaranda, D., & Castro Becerra, E. (2016). Estimating missing data in historic series of global radiation through neural network algorithms. *Sistemas & Telemática*, 14(37), 9–22. <https://doi.org/10.18046/syt.v14i37.2239>
- Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2012). Decadal variations in estimated surface solar radiation over Switzerland since the late 19th century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(18), 8635–8644. <https://doi.org/10.5194/acp-12-8635-2012>
- Sanchez-Romero, A., Sanchez-Lorenzo, A., González, J. A., & Calbó, J. (2016). Reconstruction of long-term aerosol optical depth series with sunshine duration records. *Geophysical Research Letters*, 43(3), 1296–1305. <https://doi.org/10.1002/2015GL067543>
- Sánchez Vega, V. M. (2008). La capa de ozono. *Revista Biocenosis*, 21, 1–2.
- Swingedouw, D., Mignot, J., Guilyardi, E., & Ormie, L. (2017). *Comptes Rendus Geoscience Tentative reconstruction of the 1998 – 2012 hiatus in global temperature warming using the IPSL – CM5A – LR climate model*. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.09.014>
- Ulloa, H.; García, M.; Pérez, A.; Meulenert, A.; Ávila, D. (2011). Clima y Radiación Solar en Las Grandes Ciudades: Zona Metropolitana de Guadalajara. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, (56), 165–175.
- Velasco Herrera, V. M., Mendoza, B., & Velasco Herrera, G. (2015). Reconstruction and prediction of the total solar irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st century. *New Astronomy*, 34, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009>
- Wild, M. (2012). Enlightening Global Dimming and Brightening. *American Meteorological Society*, 14(July 2011), 7927. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00074.1>
- Wild, M., Yang, L., Jiang, J., Liu, T., Li, Y., Zhou, Y., ... Sanchez-Lorenzo, A. (2015). Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Theoretical and Applied Climatology*, 71(3–4), 1–2. <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>
- Yang, L., Jiang, J., Liu, T., Li, Y., Zhou, Y., & Gao, X. (2018). Projections of future changes in solar radiation in China based on CMIP5 climate models. *Global Energy Interconnection*, 1(4), 452–459. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.005>
- Zhang, X. (2014). A statistical approach for sub-hourly solar radiation reconstruction. *Renewable Energy*, 71, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.038>