

# ANÁLISIS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL PARA LA CIUDAD DE PUNO

*Data de aceite: 01/09/2023*

### **Ciro William Taipe Huamán**

Universidad Nacional de Juliaca, Juliaca,  
Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-6075-5582>

### **Eva Genoveva Mendoza Mamani**

Universidad Nacional del Altiplano, Puno,  
Perú  
<https://orcid.org/0000-0003-0587-0753>

### **Marisol Rojas Barreto**

Universidad Nacional del Altiplano, Puno,  
Perú  
<https://orcid.org/0000-0001-6916-3754>

### **Russel Allidren Lozada Vilca**

Universidad Nacional de Juliaca, Juliaca,  
Perú  
<https://orcid.org/0000-0002-8915-3964>

### **Leandro Paucara Cahuana**

Universidad Nacional de Juliaca, Juliaca,  
Perú  
<https://orcid.org/0000-0003-0282-7936>

### **Valeriano Pari Torres**

Universidad Continental, Perú  
<https://orcid.org/0009-0009-4069-2607>

comparativo utilizando datos satelitales e información de estaciones meteorológicas para estudiar la radiación solar global en la ciudad de Puno. Para este fin, se tomaron en cuenta los datos proporcionados por el National Solar Radiation Data Base, las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú en la ciudad de Puno y la estación de la Universidad Nacional del Altiplano. El análisis se centró en realizar comparaciones y establecer relaciones de corrección basadas en los datos medidos en la ciudad de Puno. Se consideraron tanto correlaciones lineales como coeficientes de correlación para estimar los datos de radiación solar global para la ciudad de Puno. Los resultados de la investigación indican que es viable obtener datos de radiación solar global confiables a partir de las bases de datos disponibles en la web, así como mediante el uso de estaciones meteorológicas. Además, se logró establecer relaciones lineales de corrección al considerar las mediciones de radiación solar global efectuadas por las estaciones meteorológicas.

**PALABRAS CLAVE:** Radiación Solar, ciudad de Puno, correlación, estación meteorológica.

**RESUMEN:** El propósito de la investigación consistió en llevar a cabo un análisis

**ABSTRACT:** The purpose of the research was to carry out a comparative analysis using satellite data and information from weather stations to study global solar radiation in the city of Puno. For this purpose, the data provided by the National Solar Radiation Data Base, the meteorological stations of the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru in the city of Puno and the station of the National University of the Altiplano were taken into account. The analysis focused on making comparisons and establishing correction relationships based on the data measured in the city of Puno. Both linear correlations and correlation coefficients were considered to estimate the global solar radiation data for the city of Puno. The research results indicate that it is feasible to obtain reliable global solar radiation data from the databases available on the web, as well as through the use of weather stations. In addition, it was possible to establish linear correction relationships when considering the measurements of global solar radiation made by the weather stations.

**KEYWORDS:** Solar radiation, city of Puno, correlation, weather station.

## 1 | INTRODUCCIÓN

La energía solar es la principal fuente de energía en la Tierra y la atmósfera, representando más del 99,97% de toda la energía sin explotar. Esta energía calienta la superficie terrestre y el aire, generando vientos, corrientes, evaporación, formación de nubes y precipitaciones. Es un impulsor fundamental de diversos procesos atmosféricos y terrestres, desempeñando un papel crucial en la dinámica del clima y sustentando la vida en nuestro planeta. (Blal et al., 2020). Cuando la radiación solar global atraviesa la atmósfera terrestre, experimenta interacciones complejas con diversas partículas y moléculas presentes en ella, como partículas de polvo, moléculas de gas, ozono y vapor de agua. Estas interacciones incluyen fenómenos como la reflexión, la disipación y la absorción de la radiación solar por parte de estas partículas y moléculas. (Cervantes-Osornio et al., 2017). La cantidad de atenuación de la radiación solar en un momento y lugar determinado está determinada por la composición de la atmósfera y la longitud del trayecto al que se transmite la radiación solar, es por ello la necesidad de disponer con registros de radiación solar y estos cobra importancia principalmente debido al incremento en aplicaciones de la energía solar (Sindhu et al., 2016), en áreas de la ingeniería así como en: modelación del clima y tiempo, monitoreo de crecimiento en los cultivos y control de enfermedades. Obtener estos datos confiables de radiación solar requiere mediciones sistemáticas (Mubiru, 2008).

La radiación solar ultravioleta (UV) tiene efectos nocivos sobre la salud de los seres humanos. En la piel la radiación UV causando envejecimiento prematuro, reacciones de tipo alérgicas, como foto-queratitis (Sordo y Gutiérrez, 2013), cáncer en la piel (Levels, 2017). En los ojos causa cataratas (Gallagher y Lee, 2006) y afecta al sistema inmunológico (Norval, 2006). El efecto más común de la sobreexposición a la radiación solar es la quemadura solar o eritema, que aparece 10-16 horas después de la exposición al sol (Tanskanen et al., 2007). Los efectos en la naturaleza como en la agricultura y la vida acuática se presenta

en las plantas y peces (Sweet et al., 2012). A la vegetación afectando en su crecimiento (Zhang et al., 2014), en los animales produce quemaduras en su piel (Pahkala et al., 2003) but the effects on later life-stages (metamorphosis, en la conservación y durabilidad de materiales como el plásticos y la pintura (Verbeek et al., 2011).

Mayhua (2019), estudia el comportamiento de la radiación solar global para la ciudad de Arequipa, Perú, considerando el modelamiento matemático empírico obtenido de la correlación de datos de índice ultravioleta y radiación solar global obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) de la estación “la Pampilla”, logran validar la ecuación para la estimación del índice ultravioleta.

Antón y otros (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  $2 -13\text{KJ/m}$  por año en el periodo 1887 a 1915 y con tendencia positiva de  $2 +13\text{KJ/m}$  por año en el periodo 1916 a 1950, ambos estadísticamente significativos en el nivel de confianza del 95%.

Ayodele y Ogunjuyigbe (2015) proponen la distribución de probabilidad del índice de claridad para la predicción de la radiación solar global. El índice de claridad se obtiene a partir de la radiación solar global de años pasados. Para validar el método propuesto, se analizaron datos durante ocho años (2000-2007) en Ibadan, Nigeria. Los resultados mostraron que la distribución logística proporciona el mejor ajuste para el índice de claridad y el método.

Por ello nos propusimos como objetivo realizar un análisis de la radiación solar global en la ciudad de Puno.

## **2 | MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Datos de radiación solar en la ciudad de Puno**

Se utiliza datos de radiación solar medidos por la estación meteorológica DAVIS Vantage PRO 2.0 Plus mediante el sensor radiación solar (Piranómetro), el cual se muestra en la figura 1, en intervalos de 1 hora en unidades de  $\text{w/m}^2$ . La estación meteorológica está instalada en una zona libre de sombras y obstáculos en el pabellón de ingeniería civil de la Universidad Nacional del Altiplano - Puno (UNAP) en las coordenadas latitud  $-15,4890$ , longitud  $-70,1515$  y una altitud de  $3,825\text{msnm}$ .

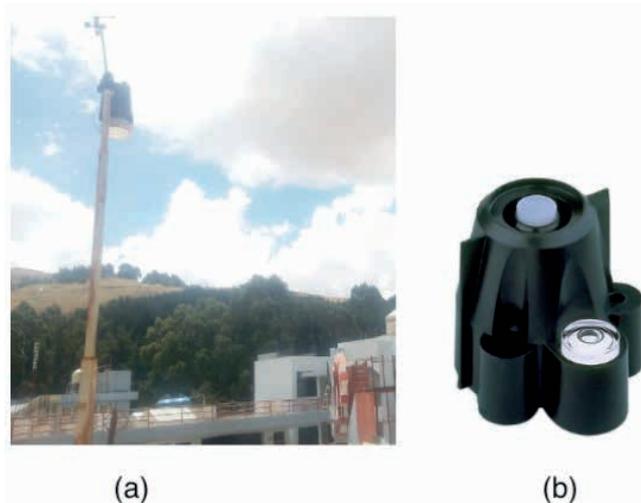


Figura 1. (a) Estación meteorológica DAVIS vantage PRO 2.0 Plus (b) Piranómetro

También se considera la estación meteorológica de SENAMHI ubicada en la coordenadas latitud  $-15.826250$  longitud  $-70.012083$ , el cual se ubica a  $747.90\text{m}$  de la estación meteorológica de UNAP como se muestra en la figura 2, el cual se ubica a orillas del lago Titicaca.



Figura 2. Ubicación de la estación meteorológica UNAP y SENAMHI ciudad de Puno

## 2.2 Datos satelitales

La National Solar Radiation Data Base (NSRDB) es un conjunto de datos de recursos solares públicos ampliamente utilizado que ha sido desarrollado y actualizado durante más de 20 años para reflejar los avances en la medición y modelización de la radiación solar. La versión más reciente de la NSRDB utiliza productos satelitales de 30 minutos a una

resolución de 4x4 km que cubren el período 1998-2018 (Habte et al., 2017; Sengupta et al., 2018).

### 2.3 Estadísticos de evaluación

Error estándar promedio o raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE)

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (R_{mi} - R_{si})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (1)$$

El error medio (MBE),

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{mi} - R_{si})}{n} \quad (2)$$

Coefficiente de determinación ( $R^2$ )

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (R_{mi} - \bar{R}_{mi})(R_{si} - \bar{R}_{si})]^2}{[\sum_{i=1}^n (R_{mi} - \bar{R}_{mi})^2][\sum_{i=1}^n (R_{si} - \bar{R}_{si})^2]} \quad (3)$$

El coeficiente de correlación ( $r$ )

$$r = \sqrt{R^2} \quad (4)$$

Donde:  $R_{mi}$  es el dato medido por la estación meteorológica,  $R_{si}$  es el dato obtenido del satélite,  $\bar{R}_{mi}$  es el promedio de los datos medidos por la estación meteorológica,  $\bar{R}_{si}$  es el promedio de los datos obtenidos del satélite y  $n$  es el número total de observaciones (Alexandris et al., 2006; Tabari, 2010)

## 3 | ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Radiación solar del periodo 1997-2020

La radiación solar lo obtenemos de los datos de la NSRDB (NASA), como se muestra en la figura 3. Sea obtenidos valores de radiación solar global para un plano horizontal para el periodo 1998 al 2020 de la NSRDB considerando las coordenadas de coordenadas latitud -15,4890, longitud -70,1515 para la ciudad de Puno con valores máximo de 9.806kwh/m<sup>2</sup>/día, mínimo de 3.004kwh/m<sup>2</sup>/día y un promedio de 6.857kwh/m<sup>2</sup>/día, el cual se muestra en la Figura 3, se observa un comportamiento senoidal similar a los obtenidos por (Jimenez et al., 2016) para la ciudad de Turcuman, Argentina, y (Antón et al., 2017) obtiene valores de radiación solar global para la Península Ibérica en el periodo 1986-2015, encontrando comportamiento estacional.

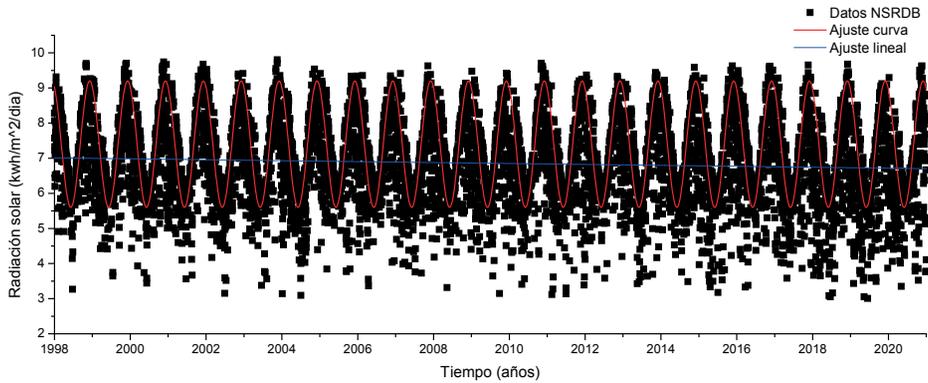


Figura 3. Radiación solar NASA para la ciudad de Puno, año 1998-2020.

### 3.2 Radiación solar para ciudad de Puno

Ahora se analiza datos de SENAMHI y NASA para la ciudad de Puno, para un periodo de 2013- 2020 de la radiación solar global diaria en unidades  $\text{kwh/m}^2/\text{día}$  el cual se muestra en la figura 5. En la figura 4 se observa datos de la radiación solar para el año 2020, en el cual se observa que existe una diferencia entre los valores medidos, estos está de acuerdo al trabajo de Nolasco et al., (2018), ahora para realizar la corrección en función a los datos medios por la estación de SENAMHI se realiza la correlación de los datos SENAMHI y NASA el cual se observa en la figura 5, datos para el periodo 2013 -2020. Considerando la totalidad de días nublados y parcialmente nublados y despejados, donde sea obtenido valores mínimos, máximo y promedio los cuales se muestran en la tabla 1. E unidades de  $\text{kwh/m}^2/\text{día}$ .

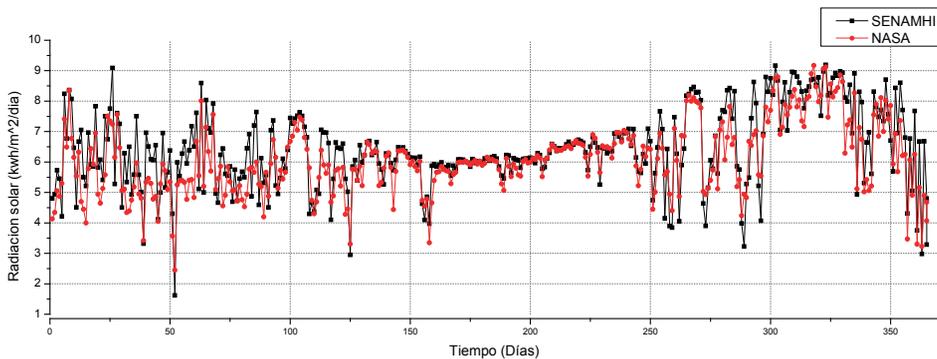


Figura 4. Radiación solar SENAMHI y NASA para la ciudad de Puno, año 2020.

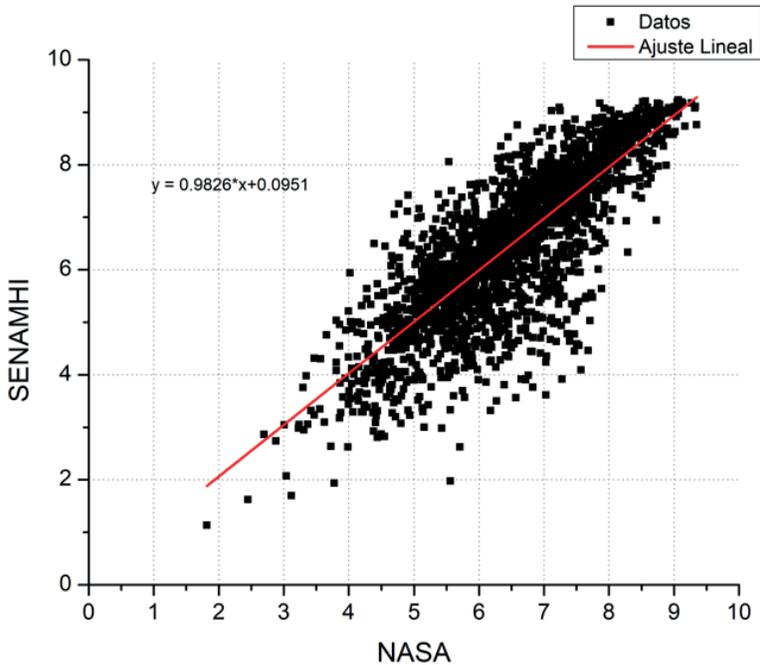


Figura. 5 Comparación de datos NASA y SENAMHI 2013 a 2020.

Valores	NASA	SENAMHI
Mínimo	2.450	1.619
Máximo	9.170	9.194
Promedio	6.088	6.423

Tabla 1. Datos de valores de mínimo, máximo y promedio para la el 2020

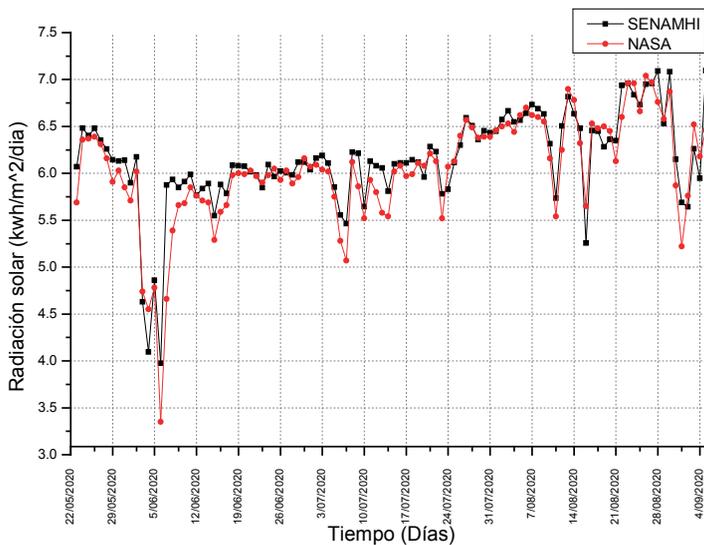
Al realizar la comparación de datos se obtiene una ecuación lineal de relación entre los datos de la NASA y SENAMHI el cual es:

$$R_S = 0.9826 * R_N + 0.0951 \quad (5)$$

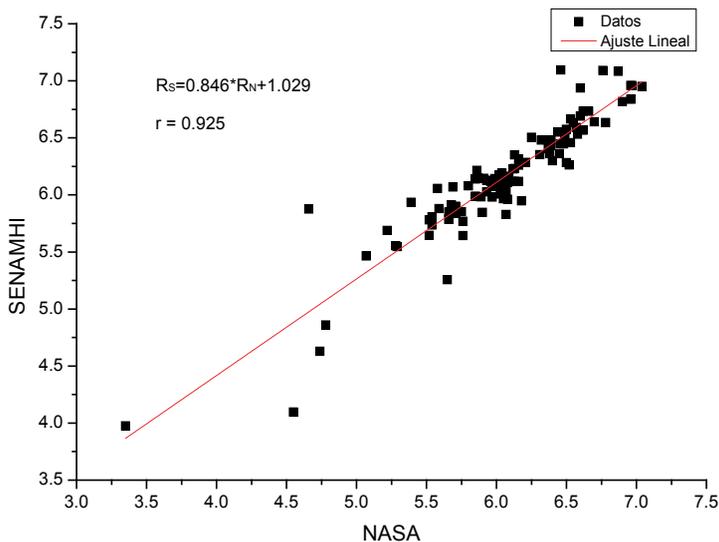
Donde  $R_S$  es la radiación solar medido por SENAMHI y  $R_N$  es la radiación solar estimado por la NASA, esta ecuación nos va permitir estimar datos para la ciudad de Puno.

Ahora analicemos el periodo de días del 01 de abril al 23 de julio del 2020, en el cual se presenta un mínimo número de días con nubosidad, sin presencia de lluvias como se observa en la figura 6a, donde se observa una sobre estimación de la radiación solar global por los datos obtenidos de NSRDB comparados con la estación, estos resultados concuerdan con los trabajos de (Antón et al., 2010; Buchard et al., 2008; Nolasco et al., 2018) donde se indican que los datos obtenidos de satélites sobre estiman los valores de radiación solar entre 17 a 40%, esto debido a las características climáticas del lugar (Blal

et al., 2020). Por ello realizamos el análisis de dispersión de datos mediante el coeficiente de correlación lineal encontrando  $r = 0.952$ , lo que indica del total de datos para cielos sin nubosidad y lluvias el 95.2% tienen relación lineal como se muestra en la figura 6b.



(a)



(b)

Figura 6 (a) Radiación solar global (b) Dispersión de datos NSRDB y estación

Para realizar la corrección de datos obtenidos satelitales por medio de la web según los autores (Jacobs et al., 2004; Mazorra Aguiar et al., 2019; Nolasco et al., 2018) se

considera la ecuación de la regresión lineal de los datos NSRDB y estación para la ciudad de Puno, se obtiene la ecuación

$$R_s = 0.846 * R_a + 1.029 \quad (6)$$

Donde  $R_s$ , es la radiación solar global ajustado para la ciudad de Puno,  $R_a$  es la radiación solar global obtenido de NASA ambos en unidades de  $\text{kwh/m}^2/\text{día}$ .

Promedio de la radiación solar global para la ciudad de Puno por meses y horas para el periodo 2013 a 2020 de los datos medidos por la estación meteorológica de SENAMHI, se muestra en la figura 7, considerando la totalidad de días nublados, parcialmente nublados y despejados.

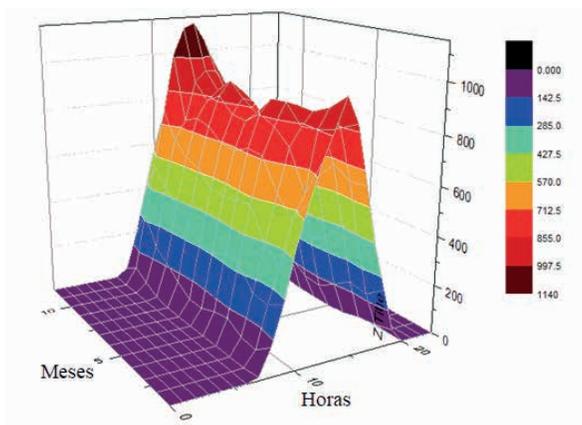


Figura 7. Promedios horarios de la radiación solar global en la ciudad de Puno 2020.

En la figura 8 se observa radiación solar global promedio mensual del periodo 2010-2018 en el cual se observa que los valores mínimos se presentan en la estación de invierno y los valores máximo se presenta en la estación de verano lo cual está de acuerdo a la distancia del sol y la tierra según (Iqbal, 1983) y el comportamiento de los valores promedio mensuales es estacional y cíclico de los valores de radiación solar global promedio mensual.

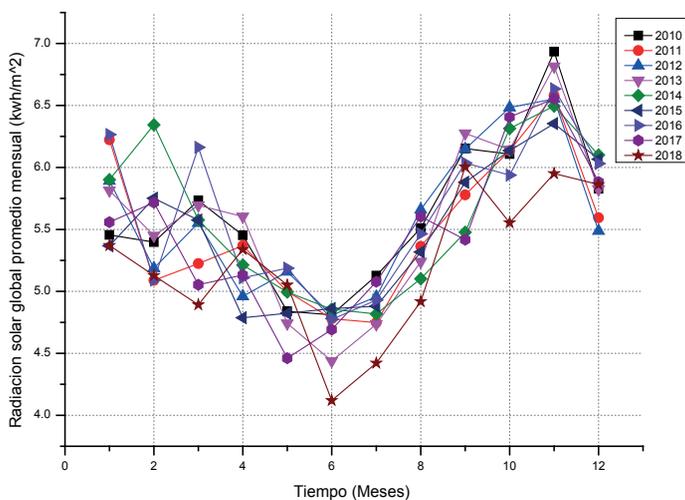


Figura 8. Radiación solar global promedio mensual del periodo 2010-2018

## 4 | CONCLUSIONES

Se ha llegado a la conclusión de que es factible obtener datos confiables sobre radiación solar a partir de las bases de datos proporcionados por el National Solar Radiation Data Base y las estaciones meteorológicas UNAP y SENAMHI, y estableciendo relaciones lineales de corrección basadas en mediciones de estaciones meteorológicas que miden la radiación solar global. Sin embargo, una limitación importante para estimar la radiación solar global en la ciudad de Puno radica en la falta de estaciones meteorológicas que abarquen toda la provincia de Puno. Además, las estimaciones de radiación solar global proporcionadas por las bases de datos de la National Solar Radiation Data Base son para áreas extensas, lo que puede diferir de las mediciones puntuales realizadas por estaciones meteorológicas. Esta discrepancia en la escala de medición puede afectar la precisión de las estimaciones de radiación solar global en la ciudad de Puno.

## REFERENCIAS

Alexandris, S., Kerkides, P. y Liakatas, A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the «Copais» approach. *Agricultural Water Management*, 82(3), 371-386. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.08.001>

Antón, M., Cachorro, V. E., Vilaplana, J. M., Toledano, C., Krotkov, N. A., Arola, A., Serrano, A. y De la Morena, B. (2010). Comparison of UV irradiances from Aura / Ozone Monitoring Instrument ( OMI ) with Brewer measurements at El Arenosillo ( Spain ) – Part 1 : Analysis of parameter influence. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6797-6827.

Antón, M., Román, R., Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J. y 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>

Ayodele, T. R. y 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>

Blal, M., Khelifi, S., Dabou, R., Sahouane, N., Slimani, A., Rouabhia, A., Ziane, A., Neçaibia, A., Bouraiou, A. y Tidjar, B. (2020). A prediction models for estimating global solar radiation and evaluation meteorological effect on solar radiation potential under several weather conditions at the surface of Adrar environment. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 152, 107348. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107348>

Buchard, V., Brogniez, C., Auriol, F., Bonnel, B., Lenoble, J., Tanskanen, A., Veeffkind, P., Buchard, V., Brogniez, C., Auriol, F., Bonnel, B., Lenoble, J., Buchard, V., Brogniez, C., Auriol, F., Bonnel, B. y Lenoble, J. (2008). Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites To cite this version : HAL Id : hal-00328314 Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, European Geosciences Union*, 8(2), 4309-4351.

Cervantes-Osornio, R., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A. y Ojeda Bustamante, W. (2017). Red neuronal artificial backpropagation versus modelos empíricos para estimación de radiación global diaria en Sinaloa, México\*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1029. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.229>

Gallagher, R. P. y Lee, T. K. (2006). Adverse effects of ultraviolet radiation : A brief review. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 92, 92, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.011>

Habte, A., Sengupta, M. y Lopez, A. (2017). Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998-2015. *Technical Report TP-5D00-67722, April*, 1-38. <https://doi.org/10.2172/1351858>

Jacobs, J. M., Anderson, M. C., Friess, L. C. y Diak, G. R. (2004). Solar radiation, longwave radiation and emergent wetland evapotranspiration estimates from satellite data in Florida, USA. *Hydrological Sciences Journal*, 49(3), 461-476. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.3.461.54352>

Jimenez, V. A., Barrionuevo, A., Will, A. y Rodríguez, S. (2016). Neural Network for Estimating Daily Global Solar Radiation Using Temperature, Humidity and Pressure as Unique Climatic Input Variables. *Smart Grid and Renewable Energy*, 07(03), 94-103. <https://doi.org/10.4236/sgre.2016.73006>

Levels, U. R. (2017). *fenotipos e infraestructura de protección solar en instituciones educativas de Piura , Perú Ultraviolet Radiation Levels , Phenotypes , and Infrastructure*. 1621, 40-49.

Mayhua, F. (2019). *Estudio comparativo y modelación de la radiación global y ultravioleta en la ciudad de Arequipa*. Universidad Nacional de San Agustín.

Mazorra Aguiar, L., Polo, J., Vindel, J. M. y Oliver, A. (2019). Analysis of satellite derived solar irradiance in islands with site adaptation techniques for improving the uncertainty. *Renewable Energy*, 135, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.099>

Mubiru, J. (2008). Predicting total solar irradiation values using artificial neural networks. *Renewable Energy*, 33(10), 2329-2332. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.009>

- Nolasco, M., Sayago, S. y Bocco, M. (2018). Un modelo lineal para estimar radiación solar global en la provincia de Córdoba a partir de datos satelitales CERES \_ SYN1. En S. A. de I. e I. Operativa (Ed.), *CAI, Congreso Argentino de Agroinformatica* (pp. 216-223).
- Norval, M. (2006). The Effect of Ultraviolet Radiation on Human Viral Infections. *Photochemistry and Photobiology*, *82*(6), 1495-1504. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2006.tb09805.x>
- Pahkala, M., Merilä, J., Ots, I. y Laurila, A. (2003). Effects of ultraviolet-B radiation on metamorphic traits in the common frog *Rana temporaria*. *Journal of Zoology*, *259*(1), 57-62. <https://doi.org/10.1017/S0952836902002984>
- Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G. y Shelby, J. (2018). The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *89*(September 2017), 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003>
- Sindhu, S., Nehra, V. y Luthra, S. (2016). Identification and analysis of barriers in implementation of solar energy in Indian rural sector using integrated ISM and fuzzy MICMAC approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *62*, 70-88. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.033>
- Sordo, C. y Gutiérrez, C. (2013). Cáncer de piel y radiación solar: experiencia peruana en la prevención y detección temprana del cáncer de piel y melanoma. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, *30*(1), 113-117. <https://doi.org/10.1590/S1726-46342013000100021>
- Sweet, M., Kirkham, N., Bendall, M., Currey, L., Bythell, J. y Heupel, M. (2012). Evidence of melanoma in wild marine fish populations. *PLoS ONE*, *7*(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041989>
- Tabari, H. (2010). Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resources Management*, *24*(10), 2311-2337. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9553-8>
- Tanskanen, A., Lindfors, A., Ma, A., Krotkov, N., Herman, J., Kaurola, J., Koskela, T., Lakkala, K., Fioletov, V., Bernhard, G., Mckenzie, R., Kondo, Y., Neill, M. O., Slaper, H., Outer, P. Den, Bais, A. F. y Tamminen, J. (2007). Validation of daily erythemal doses from Ozone Monitoring Instrument with ground-based UV measurement data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *112*, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2007JD008830>
- Verbeek, C. J. R., Hicks, T. y Langdon, A. (2011). Degradation as a result of UV radiation of bloodmeal-based thermoplastics. *Polymer Degradation and Stability*, *96*(4), 515-522. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.01.003>
- Zhang, L., Hartwell, L., Jr, A., Vaughan, M. M., Hauser, B. A. y Boote, K. J. (2014). Agricultural and Forest Meteorology Solar ultraviolet radiation exclusion increases soybean internode lengths and plant height. *Agricultural and Forest Meteorology*, *184*(July 2011), 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.011>