



Validación del modelo Bristow-Campbell como método de estimación de la radiación solar en Riobamba con fines de generación fotovoltaica

Validation of the Bristow-Campbell model as a method for estimating solar radiation in Riobamba for photovoltaic generation purposes

Validação do modelo de Bristow-Campbell como método de estimativa da radiação solar em Riobamba para fins de geração fotovoltaica

Verónica Paulina López-Pérez ^I

veplopezp@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3488-7039>

Jessica Alexandra Marcatoma-Tixi ^{III}

jessica.marcatoma@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9531-3234>

Víctor Isaac Herrera-Perez ^{II}

vherrera@usfq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8125-0727>

Cristina Estefania Ramos-Araujo ^{IV}

cristina.ramos@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8644-5814>

Correspondencia: veplopezp@gmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

***Recibido:** 23 de marzo de 2023 ***Aceptado:** 17 de abril de 2023 ***Publicado:** 23 de mayo de 2023

- I. Magíster en Diseño Mecánico, Ingeniera Mecánica, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Doctor en Ingeniería de Control, Automatización y Robótica, Máster en Ingeniería de Control, Automatización y Robótica, Ingeniero Electrónico Control y Redes Industriales, Universidad San Francisco de Quito, Grupo de Investigación: Instituto de Energía y Materiales, Quito, Ecuador.
- III. Máster Universitario en Estadística Aplicada, Ingeniera en Estadística Informática, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Ingeniera en Estadística Informática, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

Este trabajo presenta la metodología de validación del modelo matemático Bristow Campbell para estimar la radiación solar de la ciudad de Riobamba. Para este propósito, se determinaron de forma empírica los coeficientes de los modelos matemáticos de cuatro métodos diferentes. Los datos utilizados para el modelado matemático se obtuvieron de la estación meteorológica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). El 70% de los datos se emplearon para el ajuste de los coeficientes del modelo matemático, y el 30% restante, se utilizaron con fines de validación. Por otro lado, se realizó un estudio de caso para determinar el número de paneles fotovoltaicos necesarios para cubrir la demanda energética de una vivienda, con la finalidad de determinar y comparar el error que puede acarrear los datos de radiación solar del modelo validado de Bristow Campbell versus valores de reales durante el proceso de dimensionamiento de la estación fotovoltaica. Como conclusión principal, el modelo validado de Bristow Campbell, comparado con los datos reales, presenta un porcentaje de error absoluto promedio de 4,74%, un índice de concordancia de 0,836 y una raíz del error cuadrático medio de 0,887 [$MJ/m^2/día$].

Palabras Claves: Bristow Campbell; Modelo Matemático Empírico; Radiación Solar; Energía Renovable.

Abstract

This paper presents the validation methodology of the Bristow Campbell mathematical model to estimate the solar radiation of the city of Riobamba. For this purpose, the coefficients of the mathematical models of four different methods were determined empirically. The data used for the mathematical modeling were obtained from the meteorological station of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). 70% of the data were used to fit the coefficients of the mathematical model, and the remaining 30% were used for validation purposes. On the other hand, a case study was carried out to determine the number of photovoltaic panels necessary to cover the energy demand of a home, in order to determine and compare the error that the solar radiation data of the validated Bristow Campbell model can cause. versus real values during the sizing process of the photovoltaic station. As main conclusion, the validated Bristow Campbell model, compared to the real data, presents an average absolute error rate of 4,74%, a concordance index of 0,836, and a root mean square error of 0,887 [$MJ/m^2/día$].

Keywords: Bristow Campbell; Empirical Mathematical Model; Solar Radiation; Renewable Energy.

Resumo

Este trabalho apresenta a metodologia de validação do modelo matemático de Bristow Campbell para estimar a radiação solar da cidade de Riobamba. Para o efeito, foram determinados empiricamente os coeficientes dos modelos matemáticos de quatro métodos diferentes. Os dados utilizados para a modelação matemática foram obtidos na estação meteorológica da Escola Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Setenta por cento dos dados foram utilizados para ajustar os coeficientes do modelo matemático e os restantes 30% foram utilizados para efeitos de validação. Por outro lado, foi efectuado um estudo de caso para determinar o número de painéis fotovoltaicos necessários para cobrir as necessidades energéticas de uma casa, com o objectivo de determinar e comparar o erro que pode ser causado pelos dados de radiação solar do modelo de Bristow Campbell validado versus valores reais durante o processo de dimensionamento da estação fotovoltaica. Como principal conclusão, o modelo de Bristow Campbell validado, comparado com os dados reais, apresenta um erro percentual absoluto médio de 4,74%, um índice de concordância de 0,836 e um erro quadrático médio de 0,887 [MJ/m²/dia].

Palavras-chave: Bristow Campbell; Modelo Matemático Empírico; Radiação Solar; Energias Renováveis.

Introducción

En la actualidad, nuestro planeta atraviesa una etapa de contaminación alta por la gestión ineficiente que le damos los seres humanos a nuestros recursos. Sin embargo, progresivamente y de forma creciente se ve un interés por mitigar el daño medioambiental provocado. Una de las soluciones es aprovechar de mejor manera la energía solar ya que de los varios tipos de energía renovable, es una de las mejores alternativas por considerarse abundante, limpia, económica e ilimitada (Gouda, Hussein, Luo, & Yuan, 2019). La cantidad de energía emitida por el sol es tan grande que la tierra recibe en tan solo una hora más energía del sol que lo que consumimos a nivel mundial en un año. De tal manera que para obtener 17300 [GW] como potencia de salida, con una eficiencia del 10%, tendríamos que transformar el 0,1 % de la energía solar que llega a la superficie terrestre en electricidad (Khorasanizadeh & Mohammadi, 2016).

Ecuador es un país privilegiado en cuanto a recursos naturales se refiere. En el Plan de Expansión de Generación 2018 – 2027, considera que el recurso solar entre otros constituye una fuente renovable con fines de producción eléctrica. De manera que en el caso de la iniciativa “Cero combustibles Fósiles en Galápagos” indica que en el año 2018 la principal fuente de energía se produjo por generación térmica a diésel correspondiendo al 83,98% (47 785 [MWh/año]), en tanto que el 16,02% (9 112,41 [MWh/año]) fue mediante fuentes renovables. En consecuencia, se redujo el uso de 3 millones de galones de diésel para dicha generación, y con ello el ahorro de 2,73 millones de dólares y se evitó una emisión aproximada de 26,7 mil toneladas de CO_2 (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2018). Por otro lado, en el año 2020, se informó que el 92% de la generación de energía en el país provino de centrales hidráulicas, el 7% de centrales térmicas y el 1% de fuentes no convencionales (fotovoltaica, eólica, biomasa, biogás, geotermia, entre otras). Adicionalmente como parte del impulso de la generación distribuida renovable, en este mismo año, iniciaron operación comercial 19 proyectos que a partir de recursos hidroeléctricos y solar fotovoltaicos, suman una capacidad instalada de 30,93 [MW] (Organización Latinoamericana de Energía, 2021).

Para considerar la capacidad que involucra un proyecto de energía solar, es indispensable conocer el dato preciso de la radiación solar, de modo que permita materializar dichos proyectos (Boubaker, y otros, 2021). La energía mínima de radiación solar debe ser de 4 [KWh/m²] para que las aplicaciones derivadas de colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos y viviendas bioclimáticas, sean rentables (Organización Latinoamericana de Energía, 2021). La medición y estimación de la radiación solar se realiza en varias partes del planeta, ya sea mediante instrumentos de medición directa como el piranómetro, instrumentos de teledetección satelital, mapas solares, modelos de estimación, entre otros. Sin embargo, en la mayoría de países, especialmente los subdesarrollados por tema de costos, se inclina a la utilización de los modelos existentes para estimar el dato de radiación solar (Saeed, y otros, 2019). Es por ello que en la actualidad se aplican métodos alternativos para evaluar la estimación de la radiación solar global mediante métodos sencillos y de bajo costo, como son los modelos empíricos, modelos físicos y estadísticos de estimación (Meizoso López, 2012). Dichos modelos están basados en parámetros meteorológicos, geográficos, astronómicos y físicos. Por consiguiente, algunos investigadores han desarrollado

modelos que están en función de la amplitud térmica del aire, como es el caso del modelo de Bristow-Campbell (*BC*) y Hargreaves- Samani (*HS*) (De Oliveira y otros, 2014).

En estudios desarrollados en varias partes del mundo, han comparado diferentes modelos empíricos, físicos y estadísticos de estimación, con la finalidad de determinar cuál de ellos es el que mejores resultados brinda para esa región en particular y de esta manera poder validarlo. Es así que, en Irán se evaluó la radiación solar global (*RSG*) con técnicas basadas en datos (árboles de modelo, regresión de vector de soporte, programación de expresión genérica y sistema de inferencia neuro difuso adaptativo) y ecuaciones empíricas. En cuanto a estas últimas indican que el modelo Ångström-Prescott (*AP*), calcula mejores valores de *RSG* con un error cuadrático medio de 1,786, un error absoluto medio de 1,156, un coeficiente de correlación de 0,977 y un índice de Willmott de 0,988. Sin embargo, al comparar los resultados de los modelos basados en la diferencia de temperaturas, el de *BC*, dio mejor resultado (Saeed, y otros, 2019). En Colombia, determinaron los valores de la radiación solar incidente mediante tres modelos empíricos *AP*, *BC* y Black, cuyos resultados indican que en general los modelos mostraron ser aceptables y pueden ser implementadas en zonas cercanas a Bucaramanga para la estimación de la radiación solar (Olejua-Gómez & Navarro-León, 2020). Para el Perú, en el Altiplano de Puno, se determinó la radiación solar global durante los años 2007 al 2013 mediante el modelo de *BC* en las zonas circunlacustre, Puna húmeda y clima de altura, obteniendo un máximo valor promedio de 7,2984 [*kWh /m²*] en Mazocruz y, un mínimo de 5,4806 [*kWh /m²*] en Juli, ambos resultados son rentables para aplicaciones de energía solar (Quispe Huamán & Sotomayor Alzamora, 2022). Mientras que, en la región de Junín, se concluye que el modelo de *BC* permite estimar confiablemente la radiación solar global diaria media mensual, ya que al aplicar la prueba t Student para muestras relacionadas indica que no existen diferencias significativas entre los valores registrados y calculados con el modelo en 19 estaciones meteorológicas dentro de la región (Camayo-Lapa, Massipe-Hernández, Torres-Ten, Pomachagua-Paucar, & Quispe-Flores, 2015). En Bolivia se validó los modelos de *BC* y de *HS*, en donde la aplicación de los modelos considerados es perfectamente posible, los errores son mínimos y fácilmente superables, sin embargo, por la simplicidad e inmediatez se puede trabajar perfectamente con el modelo de *HS*, sin sacrificar precisión (Torrez, Burgoa, & Ricaldi, 2013). En el estado de Mato Grosso, Brasil, se estimó la radiación global mediante modelos simplificados de *HS* y *BC*, en donde los modelos simplificados de *BC*, mostraron un mejor desempeño estadístico para estimar la radiación global diaria (Pacheco de Souza, y otros, 2017).

En Chile evaluaron los modelos de Allen y *BC* que se basan en la variación de temperaturas del aire, para compararlos con modelos basados en las horas de sol, concluyendo que el modelo de Allen tiene un mayor coeficiente de determinación, sin embargo a parte de la variación de temperaturas, necesita el valor de la presión, ambos modelos tienen limitaciones cuando se aplican a los datos diarios, y para lugares con grandes diferencias de temperatura tuvo mejor rendimiento el modelo de *BC* (Meza & Varas, 2000). En Ecuador, específicamente para la ciudad de Cuenca se validó el modelo *BC* para determinar la radiación solar global, se concluyó que el modelo es factible para estimar el valor de la radiación solar global para esta ciudad con un porcentaje de error absoluto promedio (PEMA) de 15,82%, y raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 2,99 $MJ\ m^{-2}día^{-1}$. Además, indicaron que existe diferencias significativas entre los valores observados y estimados promedios diarios mensuales, sin embargo, al comparar con los promedios diarios anuales no existe diferencias significativas (Delgado & Orellana, 2015).

El modelo *BC*, que inicialmente fue empleado en Pullman, Great Falls y Tacoma, cuyo desempeño fue capaz de explicar entre el 70% y 90% de la variación de la radiación solar, empleando como variables de entrada la diferencia de temperaturas máxima y mínima (Bristow & Campbell, 1984), demuestra que es capaz de estimar la radiación solar con aproximaciones bastante satisfactorias. Al comprender la importancia de la utilidad que tiene la radiación solar, en este estudio se pretende validar el modelo de *BC*, para estimar la radiación solar global diaria media mensual en la ciudad de Riobamba.

Metodología

El flujograma de la figura 1, muestra la metodología utilizada en este documento, en la validación del modelo *BC* para estimar el valor de la radiación solar en la ciudad de Riobamba. Primero se recopila la base de datos de la estación meteorológica y agrometeorológica pertenecientes a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Posteriormente se realiza un análisis exploratorio de la base de datos, depurando datos erróneos y atípicos. Un 70% de la base de datos depurada, se destina para el ajuste, y el 30% restante, se destina para la validación del modelo *BC*. Luego, por medio de una linealización, se calculan los coeficientes empíricos *a* y *b*, con el modelo *AP*, para poder determinar el coeficiente empírico $A = a + b$, del modelo *BC*. Después, se calcula los coeficientes empíricos *B* y *C*, con cuatro métodos diferentes y, luego, al calcular la radiación

solar estimada con el modelo *BC*, se selecciona el método con sus coeficientes empíricos *B* y *C* que permitan estimar valores más cercanos a los de la base de datos real. La tabla 1 y la tabla 2, muestran valores referenciales de los coeficientes empíricos obtenidos por diferentes autores, donde se evidencia que varían en función de las condiciones tanto climáticas como geográficas del lugar en estudio. Finalmente se realiza una validación del modelo *BC*.

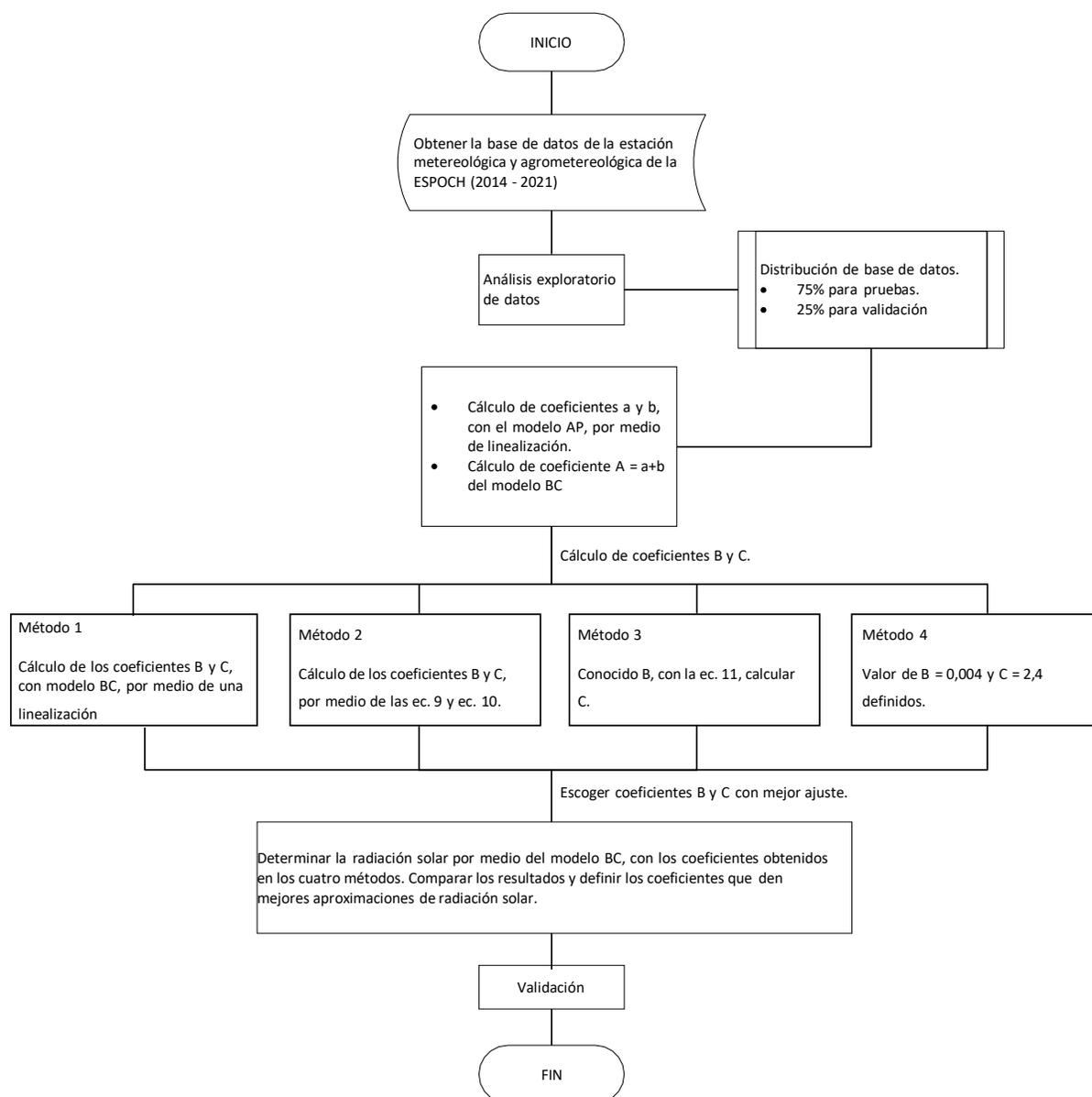


Figura 1. Metodología usada en la validación del modelo Bristow – Campbell.

Tabla 1. Valores de referencia de los coeficientes a y b del modelo AP obtenidos en otros estudios.

a	b	Referencia
0.25	0.75	(Angstrom, 1924)
0.22 – 0.28	0.46 – 0.57	(Meza & Varas, 2000)
0.301 – 0.397	0.320 – 0.521	(Baigorria, Villegas, Trebejo, Carlos, & Quiroz, 2004)
0.06 – 0.44	0.19 - 0.87	(Srivastava & Pandey, 2013)
0.28233	0.50460	(Contreras-Sepúlveda, Galban-Pineda, Bustos-Marquez, Sepúlveda-Mora, & Rmírez-Mateus, 2021)

Tabla 2. Valores de referencia de los coeficientes A, B y C del modelo BC obtenidos en otros estudios.

A	B	C	Referencia
0,7	0,004 – 0,010 (invierno - verano)	2,4	(Bristow & Campbell, 1984)
0,7	0,00491	2,4	(Meza & Varas, 2000)
0,6 - 0,82	0,02 - 0,23	0,8 - 1,86	(Baigorria, Villegas, Trebejo, Carlos, & Quiroz, 2004)
1.001	0.077	0.964	(Torrez, Burgoa, & Ricaldi, 2013)
0.558 – 0.820	0.0453 - 0.1103	0,9746 – 1,3445	(Camayo-Lapa, Massipe-Hernández, Torres-Ten, Pomachagua-Paucar, & Quispe-Flores, 2015)
0.7212 - 0.7816	0.0439 – 0.1281	1,1151 – 1,3269	(Delgado & Orellana, 2015)
0,797	0,06	1,17	(Quispe Huamán & Sotomayor Alzamora, 2022)
0.7 – 0.76	0,0377 - 0,3105 (alto andina – interandina)	0,6400 - 1,4320	(Caceres Masco, 2021)

Descripción del lugar

Riobamba se ubica en el centro de la región Interandina del Ecuador, a una altura de 2754 metros sobre el nivel del mar, a $1^{\circ} 41'46''$ latitud Sur, $0^{\circ} 3'36''$ longitud Occidental del meridiano de Quito, cerca del centro geográfico del país, se encuentra rodeada de varios volcanes, cuenta con estaciones húmeda y seca, su temperatura máxima media anual es de 19°C y una temperatura mínima media anual de 7°C .

Datos recopilados

La base de datos, se obtuvo de la Estación Meteorológica ESPOCH, la cual dispone de datos de Radiación Solar Global Promedio, proporcionados por la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas, esta estación dispone de un piranómetro con un sensor SR11 que cumple con la norma ISO 9060 y que en la estación se encuentra bajo la serie 7973/7961. Por otro lado, los datos de temperatura máxima, temperatura mínima y heliofanía diaria, se obtuvo de la Estación Agrometeorológica convencional, la cual cuenta con un sensor Campbell-Stokes, por lo que se registran los datos in situ (ESPOCH; INAMHI, 2017). Los datos de los parámetros indicados corresponden a los años comprendidos entre el año 2014 hasta el año 2021, constituyéndose el 100% de los datos disponibles para el presente estudio.

Modelos empíricos

Para aplicaciones energéticas nos interesa conocer el dato *RSG* que llega a la superficie de la tierra luego de atravesar las capas de la atmósfera y estar sujeta a los efectos de reflexión, absorción y dispersión. La *RSG* constituye la densidad de flujo de energía electromagnética que llega a la tierra originada desde el sol, misma que corresponde a la suma de las radiaciones difusa y directa, su magnitud está en función de la radiación solar extraterrestre (H_0 [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$]) (Iqbal, 1983). De tal manera que, solo el 51% de la *RSG* llega a la superficie terrestre y es aprovechable en procesos biológicos y físicos (Beruski, Pereira, & Sentelhas, 2015). Los modelos empíricos, aprovechan parámetros meteorológicos disponibles y son útiles para la estimación de la radiación solar. Entre las variables más utilizadas está la Temperatura y las horas de brillo solar. Por lo que en este trabajo se utiliza el modelo *BC* (Bristow – Campbell) para estimar la radiación solar y el modelo *AP* (Ångström-PreScott) para calcular la transmitancia atmosférica.

Modelo Bristow – Campbell

La explicación física de modelo *BC*, depende de la relación de Bowen, misma que explica la diferencia de las temperaturas máximas y mínimas en un día determinado con el calor sensible y el calor latente. El calor sensible varía de acuerdo a la radiación solar incidente y es responsable de las temperaturas máximas. Durante la noche, el calor sensible regresa hacia el espacio como radiación en onda larga, disminuyendo así la temperatura del aire hasta un valor mínimo antes del amanecer. El modelo *BC*, representado en la ecuación 1, relaciona la transmisividad atmosférica (T_t), representada en la ecuación 2 y la variación de temperatura diaria del aire (ΔT [°C]), representada en la ecuación 3 (Bristow & Campbell, 1984), donde H [MJ/m²/día], representa la radiación solar global en la superficie horizontal.

$$\frac{H}{H_0} = A[1 - e^{-B\Delta T^C}] \quad (1)$$

$$T_t = \frac{H}{H_0} \quad (2)$$

La ecuación 1, está en función de parámetros meteorológicos, astronómicos y geográficos. Los parámetros meteorológicos, lo conforman, la variación de la temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$ [°C]) y temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$ [°C]) diaria del aire ΔT , y la radiación solar extraterrestre H_0 , mostrada en la ecuación 4.

$$\Delta T = T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

$$H = \frac{24 \cdot 3600 \cdot I_{sc}}{\pi} \cdot E \cdot \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \text{ [MJ/m}^2\text{/día]} \quad (4)$$

Los parámetros astronómicos, lo conforman, la distancia tierra – sol (E_0), que se denomina también factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, y se muestra en la ecuación 5, donde (d_n), representa, el número del día del año o comúnmente llamado día juliano. De tal manera que, $d_n = 1$, es el 01 de enero y, $d_n = 365$, es el 31 de diciembre. La declinación solar (δ [°]), mostrada en la ecuación 6, corresponde a la posición angular del Sol durante el día con respecto al plano del

Validación del modelo Bristow-Campbell como método de estimación de la radiación solar en Riobamba con fines de generación fotovoltaica
ecuador, este ángulo varía en un rango de $\pm 23,5^\circ$ entre los solsticios de verano e invierno (Duffie & Beckman, 2013). El ángulo horario (ω_s [°]), mostrado en la ecuación 7, representa el ángulo

medido en el polo celestial entre el meridiano del observador y el meridiano del sol. El valor de la constante solar ($I_{sc} [W/m^2]$), varía desde 1338 a 1368 $[W/m^2]$, valores demostrados a partir de mediciones realizadas a gran altitud, sin embargo, el valor más preciso sería 1367 $[W/m^2]$. Bajo una escala nueva que se conoce como la Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR) basada en el resultado de una serie de mediciones que se mantienen en el Centro de Radiación Mundial (World Radiation Center, WRC) cuya desviación estándar para la Referencia Radiométrica Mundial es de $\pm 1,6 W/m^2$ con una desviación máxima de $\pm 7 W/m^2$ (Iqbal , 1983).

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \cdot d}{365} \right) \quad (5)$$

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (d_n + 284) \right] \quad (6)$$

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

Los parámetros geográficos, lo conforman, la latitud geográfica del lugar ($\phi [^\circ]$), que es la distancia medida en grados a partir de la línea del ecuador, variando de 0 a 90° , siendo positiva si es al norte o negativa si es al sur.

Los coeficientes empíricos A, B, C , tienen un significado físico también, A , representa el máximo valor de T_t que es característico de cada área de estudio y variará con la elevación y el contenido de contaminación del aire; $B [^\circ C^{-1}]$ y C , determinan qué tan pronto se alcanza la T_t máxima a medida que aumenta ΔT (Bristow & Campbell, 1984).

Modelo Ångström-Prescott

Uno de los primeros modelos que se desarrolló para predecir la radiación solar global promedio, es el conocido modelo de Angstrom (Angstrom, 1924) que fue modificado por Prescott (Prescott, 1940). En este trabajo, con el modelo AP, se calculan los coeficientes de transmisibilidad atmosférica. El modelo AP, mostrado en la ecuación 8, se fundamenta en las horas de sol diarias, el mismo que establece una relación lineal entre la radiación solar y las horas de brillo solar en un lugar específico. Los coeficientes empíricos a y b están en función del lugar geográfico específico del lugar en estudio, y su valor se obtiene por regresión lineal entre H/H_0 y n/N , donde n ,

representa las horas de brillo solar diarias y N , representa la duración máxima posible de luz solar, mostrada en la ecuación 9 (Tadros, 2000).

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N} \quad (8)$$

$$N = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) = \frac{2}{15} \omega \quad (9)$$

Los coeficientes empíricos a y b del modelo AP , tienen un significado físico, donde la suma de $a + b$ representan el valor máximo de T_t en condiciones de cielo perfectamente despejado, es decir que en un día claro $n/N = 1$, en tanto que para un día completamente nublado $n/N = 0$, en este caso, a , representa el mínimo valor de T_t (Srivastava & Pandey, 2013). En consecuencia, dado que la variación de temperatura en días despejados es alta, el coeficiente A del modelo BC , tiende a ser T_t en días claros, por lo que es similar a la suma de los coeficientes a y b del modelo AP (Meza & Varas, 2000). Su interpretación física se refiere al grado de claridad del cielo y sus valores sugeridos se presentan en la tabla 3, en tanto que B y C , determinan que tan pronto se alcanza la T_t máxima a medida que aumenta ΔT .

Tabla 3. Valores de la escala de transmitancia atmosférica.

Tipo de día	Transmitancia Atmosférica
Nublado	$0 < T_t < 0.2$
Parcialmente nublado	$0.2 < T_t < 0.6$
Soleado	$0.6 < T_t < 0.75$
Muy soleado	$0.75 < T_t < 1$

Nota. Datos tomados de (Yousif, Oña Quecedo, & Bilbao Santos, 2013)

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores en el cálculo de los coeficientes que interviene en el modelo BC , se calcula los coeficientes A, B, C , por cuatro métodos diferentes, para determinar cuál de ellos estima el valor más próximo a los datos reales de radiación solar en la ciudad de Riobamba.

Método 1:

Con el valor del coeficiente A , H_0 , H y mediante una linealización, se obtiene el valor tanto de C , como de B , con el modelo BC de la ecuación 1.

Método 2:

Mediante la aplicación de la ecuación 10 y ecuación 11, se puede calcular C y B , respectivamente, que están en función sólo de la ΔT y ϕ e independientes de otros factores, sugiriendo su aplicabilidad no sólo para lugares con similares regímenes térmicos (Baigorria, Villegas, Trebejo, Carlos, & Quiroz, 2004).

$$C = 2,116 - 0,072(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 57,574 e^{\phi} \quad (10)$$

$$B = 0,107 C^{-2,6485} \quad (11)$$

Método 3:

Para este método, se utiliza el valor A del modelo AP , en tanto que B , se relaciona con la media mensual (\bar{A}) y se determina mediante la ecuación 12 tomando en cuenta las estaciones del año de (invierno y verano), y finalmente C , se obtiene al ser despojada de la ecuación 1 del modelo BC .

$$B = 0.036 \exp(\bar{A}) \quad (12)$$

Método 4:

Este método toma valores fijos de $B = 0,004$ y $C = 2,4$, obtenidos del trabajo original de BC (1984).

Parámetros de evaluación

Se utilizaron tres parámetros estadísticos para comparar los resultados de los métodos utilizados para estimar la radiación solar con el modelo BC . I) Raíz del error cuadrático Medio ($RMSE$), mostrado en la ecuación 13 (Willmott & Matsuura, 2005). II) Índice de concordancia (d) de Willmott, mostrado en la ecuación 14 (Willmott C. J., 1981). III) Porcentaje de error absoluto promedio ($|\epsilon \%$) ($PEMA$), mostrado en la ecuación 15, donde, Y_i representa los valores observados, Y'_i representa los valores estimados, \bar{Y} representa el promedio de los valores observados, y m representa el número de observaciones. Estas pruebas aportan información sobre la precisión del método utilizado, donde valores bajos para ambos parámetros estadísticas I y III son deseados. En el caso del parámetro estadístico II, mientras más se acerca d a 1, expresa una buena precisión.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Y_i - Y'_i)^2} \quad (13)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Y_i - Y_i^f)^2}{\sum (|Y_i^f - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \right] \quad (14)$$

$$|\epsilon \%| = \left| \frac{Y_i - Y_i^f}{Y_i} \right| \cdot 100 \quad (15)$$

Análisis y resultados

Este apartado tiene dos cometidos, 1) es determinar si el modelo *BC* puede ser validado para estimar la radiación solar en la ciudad de Riobamba y 2) desarrollar un estudio de caso, que determine el número de paneles solares necesarios para cubrir las necesidades energéticas de una vivienda en la ciudad de Riobamba.

Para estimar la radiación solar global en la ciudad de Riobamba, por medio del modelo *BC*, primero, se determina, los coeficientes empíricos *a* y *b*, mediante regresión lineal, usando el modelo *AP*, los cuales se muestran en la tabla 4. Esto permitió calcular el coeficiente empírico $A = a + b$ en estaciones de invierno y verano, de donde se calcula un valor promedio de $A = 0,7954$ que se utiliza en los cálculos posteriores. Los valores de la T_t máxima ($A = a + b$), son mayores a 0,75 y menores a 1, lo cual nos indica que la mayoría de los días son muy soleados durante el año, de acuerdo a lo indicado en la tabla 3.

Tabla 4. Coeficientes *a* y *b* del modelo *AP*.

Estación del año	<i>a</i>	<i>b</i>	$A = a + b$
Invierno	0,345	0,432	0,777
Verano	0,341	0,491	0,832
Promedio anual	0,344	0,452	0,795

Posteriormente se calculan los coeficientes empíricos *B* y *C*, mediante cuatro métodos diferentes, cuyos resultados se muestran en la tabla 5. Con cada uno de estos coeficientes empíricos, se procede a calcular la radiación solar por medio de la ecuación 1, dichos resultados se muestran en la figura 2. Se observa que, los datos obtenidos de la estación meteorológica presentan una tendencia a disminuir la radiación solar desde el mes de mayo hasta agosto teniendo el pico más bajo en el mes

de junio debido al fenómeno de perihelio y los más altos desde octubre hasta marzo, siendo el pico más alto en septiembre debido al fenómeno de afelio. Además, se observa que los datos estimados y observados siguen la misma línea de tendencia, sin embargo, se puede ver que las estimaciones calculadas con los coeficientes empíricos del método 1, son más cercanos a los valores de radiación solar reales, obtenidos de la estación meteorológica de la ESPOCH.

Tabla 5. Coeficientes A, B y C obtenidos con los métodos planteados.

MÉTODO	B	C
1	0,0359334	1,41112127
2	0,00013982	12,2737194
3	0,00591823	2,19
4	0,004	2,4

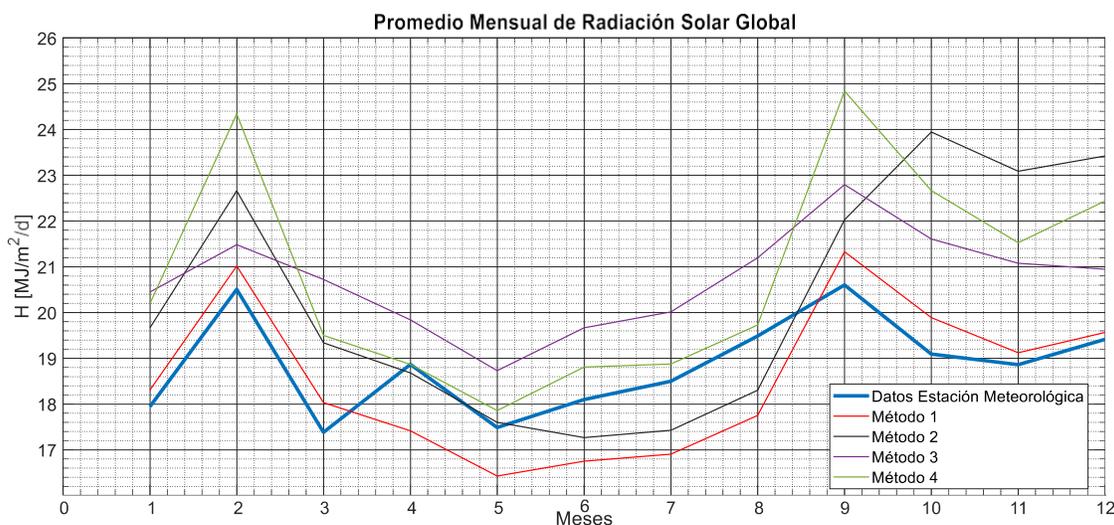


Figura 2. Radiación solar global media mensual observada y estimada por el modelo BC con los coeficientes obtenidos por los métodos 1, 2, 3 y 4.

En la tabla 6, se muestran los tres parámetros estadísticos utilizados en este documento para evaluar la precisión de los cuatro métodos. Se observa que el método 1 tiene un índice de concordancia $d = 0,791$, a raíz del error cuadrático medio $RMSE = 0,881$, y un porcentaje de error absoluto promedio $\epsilon = 4,68\%$, siendo este, el método, con coeficientes empíricos, que estima mejor la

radiación solar para la ciudad de Riobamba. Por lo tanto, los coeficientes empíricos utilizados en la ecuación 1, se muestran en la tabla 7.

Tabla 6. *Parámetros estadísticos de los cuatro métodos considerados (prueba).*

Método	<i>d</i>	<i>RMSE</i>	€ %
1	0,791	0,881	4,68%
2	0,201	3,394	18,17%
3	0,554	3,130	16,41%
4	0,412	1,935	10,24%

Tabla 7. *Coefficientes empíricos.*

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>A = a + b</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
0,344	0,452	0,795	0,036	1,411

La ecuación de *BC* a ser validada, se muestra en la ecuación 16, y los resultados de validación de los parámetros estadísticos, se presentan en la tabla 8. Se observa que los resultados son satisfactorios, por lo que la ecuación 16, puede ser utilizada para estimar la radiación solar en la ciudad de Riobamba con un error de $\pm 4,74\%$ aproximadamente.

$$\frac{H}{H_0} = 0,7954[1 - e^{-(0,0359334)\Delta T^{1,41112127}}] \quad (16)$$

Tabla 8. *Parámetro estadístico del método 1 (validación).*

Método	<i>RMSE</i>	€ %	<i>d</i>
1	0,887	4,74%	0,836

En el caso de estudio, se determinó el número de paneles solares (*M*) necesarios para cubrir las necesidades energéticas de una vivienda en la ciudad de Riobamba. Como parámetro comparativo se obtuvo *M* considerando dos tipos de paneles fotovoltaicos, con cada una de las tres bases de datos de radiación solar. La primera corresponde a los datos de la estación meteorológica ESPOCH, la segunda corresponde a los valores de radiación del Ecuador continental, indicado por el

Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, y la tercera corresponde a los datos estimados por el modelo *BC* validado para la ciudad de Riobamba mostrado en la ecuación 16. Esto permitió determinar cuán efectiva es la ecuación validada del modelo *BC*, frente a valores de radiación solar obtenidos con equipos tecnológicos.

Mediante la ecuación 17 se calcula *M*, para ello se elige el mes con mayor consumo de energía (julio), lo que permite obtener la cantidad de energía necesaria diaria ($E_N [Wh]$). Así como también se identifica el mes con menor cantidad de radiación solar (junio), que permite calcular las horas de sol pico promedio ($HSP [h]$). La potencia del panel fotovoltaico ($P_m [W]$), depende de las características físicas y tecnológicas del mismo. Un par de ejemplos con los que se realizaron los cálculos en la obtención de *M*, se indica en la tabla 9, donde una de sus principales características tecnológicas es la eficiencia de acuerdo al tipo de celda que posee. El factor global de funcionamiento (η), garantiza que el número de paneles solares abastezca la demanda energética de la vivienda, éste varía entre 0,65 y 0,90.

$$M \geq \frac{E_N}{P_m \cdot HSP \cdot y} \quad (17)$$

Tabla 9. Características del Panel solar Fotovoltaico utilizado para el caso de estudio.

Características	590 Watts Mono Luxen	330 Watts Poly Luxen
N° de modelo	LNVH-590M	LNSF-330P
Potencia máxima (P _{máx}) (W _p)	590 W	330 W
Voltaje en el punto de máxima potencia (V _{mpp})	43,48 V	37,39 v
Corriente en el punto de máxima potencia (I _{mpp})	13,57 A	8,83 A
Voltaje en circuito abierto (V _{oc})	51_42 V	46,36 V
Corriente de cortocircuito (I _{sc})	14_46 A	9,3 A
Eficiencia del módulo	21,11%	17,01%
Dimensiones	2465x1134x35 mm	1956x992x35 mm
Peso	30 kg	21 kg
Tipo de celdas	Monocristalinas	Policristalinas
Coeficiente de Temperatura de P _{máx}	-0,36 % /°C	-0,36 % /°C
Coeficiente de Temperatura de V _{oc}	-0,28 % /°C	-0,28 % /°C
Coeficiente de Temperatura de I _{sc}	+0,05 % /°C	+0,05 % /°C

Los resultados se presentan en la tabla 10, para el panel tipo 590 Watts Mono Luxen, se recomienda 4 paneles, que ocupan un área de 11,18 m^2 y su costo unitario al día de hoy es 1.062 dólares. Mientras que para el panel tipo 330 Watts Poly Luxen, se recomienda 7 paneles, que ocupan un área de 13,58 m^2 , y su costo unitario al día de hoy es 619 dólares. Al realizar el cálculo general se recomienda el uso del panel tipo 590 Watts Mono Luxen, ya que su costo es menor, ocupa menos espacio y su eficiencia es mayor.

Tabla 10. Número de paneles del caso de estudio.

Datos de Radiación	590 Watts Mono Luxen			330 Watts Poly Luxen		
	<i>M</i>	<i>M</i> (recomendado)	Área requerida [m^2]	<i>M</i>	<i>M</i> (recomendado)	Área requerida [m^2]
Estación meteorológica ESPOCH	3,078			6,253		
Atlas Solar del Ecuador	3,709	4	11,18	6,841	7	13,58
Modelo BC (ecuación 16)	3,270			6,631		

Conclusiones

En este trabajo se validó el modelo matemático *BC* para estimar la radiación solar de la ciudad de Riobamba. Para ello se determinaron los coeficientes empíricos por cuatro métodos, siendo el primero el de mejores aproximaciones a los datos reales obtenidos de la estación meteorológica de la ESPOCH. Posteriormente se realizó un estudio de caso que permitió determinar el número de paneles solares *M*, necesarios para cubrir la demanda energética de una vivienda.

El modelo *BC*, en comparación con los datos reales tienen un índice de concordancia de 0,836, un error cuadrático media de 0,887 y un porcentaje de error medio absoluto de 4,74%. El potencial de radiación solar para la ciudad de Riobamba es de 5,265 kWh / m^2 /día promedio diario anual obtenido con el modelo *BC*, que comparado con 5,258 kWh / m^2 /día, promedio diario anual de la estación meteorológica de la ESPOCH, es ligeramente mayor en un 0,13%; y que a la vez al relacionarlo con 4.575 kWh / m^2 /día que es el valor promedio diario anual del Ecuador continental, indicado por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, es mayor

en un 15,08%, valor que según la Organización Latinoamericana de Energía es muy rentable para las aplicaciones de energía solar.

En el estudio de caso, es importante señalar que el número de paneles M necesarios para solventar la demanda energética de la vivienda, depende de las características físicas y tecnológicas del panel solar fotovoltaico. Se concluye que el valor de M calculado utilizando los valores de radiación solar estimados mediante la ecuación 16, no difiere significativamente del M obtenido a partir de datos reales de radiación solar. Por lo que el modelo de BC validado, puede ser utilizado en la estimación de la radiación solar en la ciudad de Riobamba.

La metodología planteada en este trabajo se puede generalizar para encontrar los valores de los coeficientes del modelo BC para cualquier parte del Ecuador, más no así los valores de los coeficientes empíricos obtenidos para la ciudad de Riobamba, ya que éstos dependen de las condiciones geográficas, meteorológicas y astronómicas del lugar específico a evaluar.

En futuras investigaciones, se podrían realizar investigaciones adicionales para validar otros modelos empíricos que estimen la radiación solar en la ciudad de Riobamba. Una posible línea de investigación podría ser la comparación y validación de modelos como el Modelo de Hargreaves-Samani o el Modelo de Angstrom-Prescott, los cuales también se basan en la temperatura del aire y la duración del sol. Además, se podría considerar la incorporación de otros parámetros como la velocidad del viento y la presión atmosférica, ya que estos factores también pueden afectar la radiación solar en la región. Asimismo, sería interesante explorar la capacidad predictiva de modelos más complejos basados en redes neuronales o en técnicas de aprendizaje automático que puedan identificar patrones no lineales y mejorar la precisión en la estimación de la radiación solar.

Referencias

1. Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation*. *Q.J.R. Meteorol.*, 50: 121-126. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.49705021008](https://doi.org/10.1002/qj.49705021008)
2. Baigorria, G., Villegas, E., Trebejo, I., Carlos, J., & 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>

3. Beruski, G., Pereira, A., & Sentelhas, P. (2015). Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em ponta grossa, PR. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 30(2), 205–213.
4. Boubaker, S., Benghanem, M., Mellit, A., Lefza, A., Kahouli, O., & Kolsi, L. (2021). Deep Neural Networks for Predicting Solar Radiation at Hail Region, Saudi Arabia. *in IEEE Access*, 9, 36719-36729. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062205>
5. Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and forest meteorology*, 31(2), 159-166. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)
6. Caceres Masco, L. K. (2021). *APLICACIÓN DEL MODELO BRISTOW-CAMPBELL PARA ESTIMAR LA IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN LA ZONA ALTO ANDINA DE LA REGIÓN TACNA*. [Tesis. UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN].
7. Camayo-Lapa, B. F., Massipe-Hernández, J. R., Torres-Ten, A., Pomachagua-Paucar, J. E., & Quispe-Flores, M. O. (2015). Desarrollo del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global de la Región de Junin, Perú. *Tecnología Química, Vol. XXXV(2)*, 271-288. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543787010>
8. Contreras-Sepúlveda, W., Galban-Pineda, M., Bustos-Marquez, L., Sepúlveda-Mora, S., & Rmírez-Mateus, J. (2021). Angstrom-Prescott empirical model to estimate solar radiation in Norte de Santander, Colombia. *Rev.investig.desarro.innov.*, 11(2), 413-428.
9. De Oliveira, G. Q., Biscaro, G. A., da Silva Lopes, A., Jung, L. H., & Schwerz, F. (2014). Comparison between global solar radiation models in Aquidauana, “Alto Pantanal” region, Brazil. *Comunicata Scientiae*, 5(3).
10. Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4ta ed.). University of Wisconsin-Madison, New Jersey.
11. ESPOCH; INAMHI. (2017). *Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas*. Obtenido de Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas Web site: <http://ceaa.esepoch.edu.ec:8080/redEma/>
12. Gouda, S. G., Hussein, Z., Luo, S., & Yuan, Q. (2019). Model selection for accurate daily global solar radiation prediction in China. *Journal of Cleaner Production*, 221, 132-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.211>.

13. Iqbal , M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto: Academic Press.
14. Khorasanizadeh, H., & Mohammadi, K. (2016). Diffuse solar radiation on a horizontal surface: Reviewing and categorizing the empirical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 338-362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.037>.
15. Meizoso López, M. (2012). *Distribución de la Irradiación Solar Global directa y difusa, en la Ciudad de A Coruña*. España: A Coruña.
16. 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.
17. Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2018). *Plan Maestro de Electricidad. Expansión de la Generación*. Obtenido de <https://www.recursoyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>
18. Olejua-Gómez, A., & Navarro-León, A. (2020). Estimación de la Radiación Solar Mediante Métodos Empíricos en Bucaramanga, Colombia. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable RINDERESU*, Vol. 5(No. 2), 724 - 733. Obtenido de <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/88/92>
19. Delgado, G. J., & Orellana, M. L. (2015). Estimación de la Radiación Solar Cantón Cuenca Mediante la Aplicación del Modelo Bristow y Campbell (Tesis de pregrado de la Universidad Politécnica Salesiana). Cuenca, Azuay, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8428/1/UPS-CT004934.pdf>
20. Organización Latinoamericana de Energía. (2021). *Panorama Energético de América Latina y el Caribe*. Quito - Ecuador.
21. Pacheco de Souza, A., Carvalho da Silva, A., Tanaka, A., Uliana, E., Terra de Almeida, F., Klar, A., & Almeida Gomes, A. (2017). Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(4), 215–227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000400001>
22. Prescott, J. A. (1940). Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. Aust.* 48, 114-118.
23. Quispe Huamán, L., & Sotomayor Alzamora, G. (2022). Determinación y análisis espacio temporal de la radiación solar global en el Altiplano de Puno. *Revista chilena de ingeniería*, 30(1), 69-81. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052022000100069>

24. Saeed, S., Abolfazl, M.-H., Sultan, N., Ozgur, O., Shahaboddin, S., & Kwok-wing, C. (2019). Daily global solar radiation modeling using data-driven techniques and empirical equations in a semi-arid climate. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 142-157. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1560364>
25. Srivastava, R. C., & Pandey, H. (2013). Estimating Angstrom-Prescott Coefficients for India and Developing a Correlation between Sunshine Hours and Global Solar Radiation for India. *ISRN Renewable Energy*. *ISRN Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1155/2013/403742>
26. Tadros, M. (2000). Uses of sunshine duration to estimate the global solar radiation over eight meteorological stations in Egypt. *Renewable Energy*, 21, 231-246. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00009-4)
27. Torrez, R., Burgoa, A., & Ricaldi, E. (2013). MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR PARA EL ALTIPLANO CENTRAL DE BOLIVIA. *Revista Boliviana de Física*, 23(23), 1-7. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232013000200001&lng=es&nrm=iso. ISSN 1562-3823.
28. Willmott, C. J. (1981). On the Validation of Models. *Physical Geography*, 2, 184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
29. Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82.
30. Yousif, C., Oña Quecedo, G., & Bilbao Santos, J. (2013). Comparison of solar radiation in Marsaxlokk. *Renew. Energy*, 49, 203-206.