

Desarrollo del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global de la Región de Junín, Perú

Campbell-Bristow development Model for Estimating Global Solar radiation in the Region of Junín, Perú

Dr. Becquer Frauberth Camayo-Lapa^I, Dr. Juan Raúl Massipe-Hernández^I,
MSc. Alonso Torres-Ten^{II}, alonso_660@yahoo.com,
Dr. Jesús Eduardo Pomachagua-Paucar^I, Dr. Marcos Oswaldo Quispe-Flores^I

^IUniversidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Junín

^{II}Centro de Investigaciones de Energía Solar de Santiago de Cuba

Con el propósito de contar con una herramienta que estime la radiación solar mensual y anual sobre la superficie horizontal terrestre en la Región Junín, zona en la cual no se dispone con esta información, se adaptó el modelo Bristow-Campbell (1984) para estimar la radiación solar global media mensual /1/. Para desarrollar el modelo de Bristow-Campbell que estima la radiación solar global diaria media mensual se tomó la técnica del modelaje propuesto por Espinoza (2010), se registraron las temperaturas máximas y mínimas diarias de 19 estaciones meteorológicas y las ecuaciones propuestas por el Atlas Solar del Perú 2003 se adaptó a dicho modelo. El modelo Bristow-Campbell fue desarrollado con datos registrados en la estaciones de: Santa Ana, Tarma y Satipo pertenecientes a Sierra y Selva, respectivamente. La rentabilidad de las aplicaciones de la radiación solar calculada fue determinada mediante la consideración de la OLADE (1992) que radiaciones solares mayores de 4,0 kWh/m²/día son rentables y de 5,0 kWh/m²/día muy rentables. Los resultados indican que la radiación solar global media mensual en la Región Junín es de 5,3 kWh/m²/día, correspondiendo a la Selva 4,2 kWh/m²/día y a la Sierra 5,6 kWh/m²/día. La rentabilidad determinada para la Selva es menos rentable y para Sierra es muy rentable. El modelo es de funcionamiento simple y accesible a todo usuario. Se concluye que la aplicación del modelo Bristow-Campbell adaptado, resulta un instrumento de gran utilidad para generar una base de datos completa de la radiación solar disponible en la Región Junín.

Palabras clave: estimación de energía solar, radiación solar de Junín, disponibilidad de energía solar.

In order to have a tool to estimate the monthly and annual solar radiation on the horizontal surface in Junín region, in which is not available with this information, adapted Bristow-Campbell (1984) model for estimating global solar radiation monthly average. To develop the model of Bristow-Campbell that estimates the average daily global solar radiation monthly modeling technique proposed by Espinoza (2010), were recorded daily maximum and minimum temperatures of 19 weather stations and the equations proposed by the Solar High Peru 2003 was adapted to this model. The Bristow-Campbell model was developed with data recorded in stations: Santa Ana, Tarma and Satipo belonging to Sierra and Selva, respectively. The performance of applications calculated solar radiation was determined by considering the OLADE (1992) that solar radiation over 4,0 kWh/m²/day are profitable and 5,0 kWh/m²/day very profitable. The results indicate that the monthly average global solar radiation in Junín region is 5,3 kWh/m²/day corresponding to the 4,2 Forest and the Sierra 5,6 kWh/m²/day kWh/m²/day. Profitability is determined for the less profitable Selva and Sierra is very profitable. In addition, the operating model is simple and available to all users. We conclude that application of the Bristow-Campbell model adapted, it is an instrument of great utility to generate a comprehensive database of available solar radiation in Junín region.

Keywords: solar energy estimate, solar radiation Junín, availability of solar energy.

Introducción

El calentamiento global que es el incremento promedio de la temperatura de la atmósfera cercana a la superficie de la Tierra y de la Troposfera y contribuye a los cambios climáticos a nivel global. De ahí que las energías renovables son necesarias e imprescindibles en el desarrollo sostenible y en el respeto a la naturaleza de nuestro pueblo. En este contexto es que la energía solar como una fuente energética contribuye a reducir el CO₂ para conseguir calidad ambiental.

Perú debe tener un horizonte claro a la hora de planificar su desarrollo sostenible con energía limpia, segura y económica como es la energía solar. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) hizo el esfuerzo de elaborar el Atlas Solar del Perú, 2003 /2/; a fin de impulsar el uso masivo de la energía solar como fuente de energía renovables no ha sido suficiente, ya que sus informaciones son generales a nivel de estaciones y departamentales con mucho margen de error y no en forma puntual y detallada. Esta carencia ha motivado que se investigue la necesidad de cuantificar la disponibilidad de energía solar en la Región Junín.

Con el propósito de contar con una herramienta capaz de entregar el comportamiento mensual y anual de la radiación solar sobre la superficie horizontal terrestre en zonas donde no se dispone con esta información precisa y detallada, se propone como objetivo general desarrollar y validar el modelo físico Bristow-Campbell para estimar la radiación global solar diaria media mensual en la Región Junín.

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo Bristow-Campbell adaptado son:

- La Región Junín cuenta con una potencialidad promedio de 5,3 kWh/m²/día de radiación global media mensual anual, lo cual es considerado muy rentable para sus aplicaciones fotovoltaicas y térmicas.
- El Valle del Mantaro es una de las zonas que cuenta con mayor radiación solar con un promedio de 6 kWh/m²/día, lo que le confiere una singularidad única en nuestra región Junín para aplicaciones fotovoltaicas.

- La sierra de la Región Junín tiene un promedio de 5,6 kWh/m²/día de radiación solar global considerado muy rentable y en la selva se estimó 4,2 kWh/m²/día lo cual es de menos rentabilidad en producción de energía pero muy rentable social y ambientalmente.

La información obtenida permitirá captar la atención de la administración, inversionistas y público en general hacia las fuentes renovables de energía y el desarrollo de las tecnologías necesarias para obtener calor y electricidad mediante el uso de colectores solares térmicos y módulos fotovoltaicos, respectivamente, entre otros equipos.

Formulación del problema de investigación

La interrogante principal de la presente investigación es: ¿Cuál es el modelo físico estimador de la radiación solar global diaria media mensual en la Región Junín?

El contar con un modelo adecuado para estimar la radiación solar diaria media mensual según las estaciones y sub regiones contando como base los datos de temperaturas máximas y mínimas, es esencial ya que no se tiene datos registrados medidos de radiación solar global en todas las estaciones de la Región Junín para construir una base de datos de radiación solar global estimados.

Una base de datos de radiación solar diaria media mensual nos permitirá proponer programas y proyectos de los usos de la energía solar térmica y fotovoltaica con la finalidad de disminuir el CO₂ que es el principal causante de efecto invernadero y que nos lleva al calentamiento global.

Criterios para evaluar el potencial de la radiación solar

Se ha establecido el valor potencial y la importancia del modelo Bristow-Campbell para la estimación de la radiación solar global de la Región de Junín tomando en cuenta los criterios siguientes:

Científico: Se tomará como base los fundamentos científicos de las ciencias físicas, astronómicas y meteorológicas para elaborar el modelo de estimación del régimen de radiación solar global.

Metodológico: Su valor metodológico viene dado en que se detallan los procedimientos para la elaboración y validación del modelo Bristow-Campbell para las condiciones de la Región Junín, y se puede replicar a otros lugares para estimar su radiación solar global.

Social: Al conocer la situación actual de las potencialidades en energía solar en la Región Junín, que son muy altas, servirán a las autoridades municipales, regionales, colegios profesionales y universidades plantear políticas de incentivos para su utilización como fuente de energía renovable e incluirla en los planes y programas de desarrollo sostenible dando énfasis en los sectores urbanos marginales y rurales.

Alcance y limitaciones

La investigación conlleva modelar y validar con datos directos de piranometría de radiación solar registrados nos lleva de una investigación descriptiva a una explicativa que permitirá estimar datos de radiación solar global diaria mensual de lugares que solo cuenten con temperatura extremas (máxima y mínima) y un clima determinado sea de sierra o selva.

La principal limitación para la determinación de la radiación solar es la escasa información de datos registrados de piranometría, ya que son contadas las estaciones que tiene esta implementación por lo que no existe una base de datos de radiación solar en la mayoría de estaciones meteorológicas de la Región Junín.

Por otro lado, investigaciones sobre radiación solar en la Región Junín todavía no se han realizado en forma puntual, tan solo se cuenta con los datos del Atlas Solar del Perú publicado el 2003 y son datos generales por departamentos representados mediante gama de colores y que cada gama de color representa un intervalo de valores $\pm 0,5 \text{ kWh/m}^2$. Por la complejidad geográfica se aplicará el estudio solamente a la Región Junín y por su amplitud se tomará solo el desarrollo de un modelo para cuantificar la radiación solar global.

Hipótesis fundamental

El modelo físico estimador de la radiación solar global diaria media mensual potencial en la Región Junín es el modelo de Bristow-Campbell. La identificación y clasificación de las variables vienen dadas por las expresiones siguientes:

Variable Dependiente:

Y = Radiación solar global

Variable Independiente:

X = Temperaturas máximas y mínimas.

Indicadores:

X₁ = Temperatura máxima

X₂ = Temperatura mínimo

X₃ = Latitud

X₄ = Día Juliano

Estudio bibliográfico

Se ha realizado un estudio bibliográfico tanto de investigaciones a nivel internacional como nacionales dando los resultados siguientes:

Muñoz A. D. /3/ en “Aplicación de la energía solar para electrificación rural en zonas marginales del país”, nos muestra las potencialidades del uso de la energía solar: el Sol posee una elevada calidad energética no contaminante y renovable que permite usos variados y efectivos, es inagotable a escala humana y no necesita de mucho espacio para ser utilizada. La energía solar puede ser utilizada de una manera muy fácil para la generación de energía eléctrica y no produce residuos tóxicos de difícil o imposible tratamiento o eliminación. Las desventajas del uso de esta energía son despreciables al compararla con el inmenso beneficio de su uso.

Altbir *et al.*, /4/ se preguntan ¿Cuánta energía solar llega a nuestro país diariamente?. Nos da los criterios siguientes: Los objetivos de nuestro experimento eran obtener la cantidad de energía que llega a nuestro país diariamente. Esta pregunta la hemos contestado con nuestras mediciones. Sin embargo la respuesta es más compleja de lo que pensamos. Lo primero que observamos es que la energía solar que llega a nuestro país no se distribuye de manera homogénea. A partir de los gráficos podemos ver que, incluso en el norte de Chile, hay sectores donde llega menos energía a determinadas horas del día. Por otro lado, la radiación solar varía bastante según la hora del día, la humedad y nubosidad.

En el trabajo de Gueymard /5/ se evaluaron los 18 modelos de descomposición para estimar la radiación solar normal directa que mejor se adaptan a valores obtenidos en 4 estaciones que responden, según el autor, a los más estrictos procedimientos de mantenimiento, calibración y control de calidad establecidos por la BSRN (Baseline Solar Radiation Network). En la

Estación de Mauna Loa, Hawaii, donde se evaluaron datos horarios, se observaron para los 18 modelos, entre los cuales se encuentran 11 de los 12 modelos estudiados en el presente trabajo, valores de RMSE% que varían entre 15,2 % y 30,7 % siendo los modelos de Pérez con 15,2 % y el de Skartveit (1998) con 16,3 % los de mejor respuesta. Destaca que, en general y al igual de lo observado aquí, no se puede advertir que los nuevos modelos mejoren significativamente en su capacidad predictiva a los establecidos 30 años atrás.

De la Casa A. *et al* [6] en el trabajo “Estimación de la Radiación Solar Global en la Provincia de Córdoba, Argentina y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa” llega a establecer que:

Los modelos de estimación de la radiación solar de naturaleza menos compleja que el que analiza el trabajo, de los que emplean como variable independiente la heliofonía relativa o la nubosidad presentan mejor capacidad predictiva a escala diaria que los procedimientos basados en la amplitud térmica.

Los coeficientes empíricos de ajuste presentan en general una marcada uniformidad en la región, razón por la cual sería admisible la elaboración de un modelo de estimación único para cada tipo en la llanura central de la Provincia de Córdoba.

La transmisividad máxima de la radiación solar diaria observada es inferior en Córdoba respecto a la de Río Cuarto o Marco Juárez.

A diferencia de los resultados de regiones geográficas del hemisferio norte, en Córdoba no se detectó un comportamiento estacional en los coeficientes de regresión que contribuya a mejorar los resultados de la estimación y, en este sentido, es también un argumento para elaborar un modelo único.

La utilización de valores estimados de radiación solar global con el modelo (Bristow-Campbell) produce simulaciones del rendimiento potencial de papa similares a las que se obtiene con datos observados de radiación solar global. Raichijk C. *et al* [7], realizó un estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria en la localidad de Luján, provincia de Buenos Aires, se evaluó 12 modelos de descomposición para estimar la radiación solar directa mediante distintos estimadores estadísticos

y se compararon los modelos entre sí estableciendo un orden relativo medio de sus capacidades predictivas. Los modelos que mostraron mejor respuesta son los que emplean una función logística, el modelo de Boland *et al.* (2001) y su generalización posterior en Ridley *et al.* (2010) junto al modelo de Skartveit *et al.* (1998). Al comparar valores estimados con registrados se observaron desvíos cuadráticos medios, RMSE %, que varían entre 11,6 % y 18,4 % y sesgos medios relativos, MBE %, entre 0,3 % y -9,2 %., estos valores son comparables a los publicados por Gueymard (2010).

La radiación solar

El aprovechamiento de la energía solar, como fuente de energía útil tiene un doble objetivo: por un lado ahorrar las energías de fuentes no renovables, sobre todo la energía fósil y la energía nuclear, y por otro lado amortiguar el impacto ambiental generado por ellas (Jutglar, /8/).

Las ventajas de la utilización y aprovechamiento de la radiación solar radican en que es una energía inagotable y en abundancia, que puede contribuir a los objetivos de seguridad de suministro y sustentabilidad ambiental de las políticas energéticas. Entre sus desventajas se destaca el hecho de que es una energía de baja intensidad e intermitente, por lo que requiere frecuentemente un sistema de acumulación. No obstante, la intensidad de radiación emanada por el Sol disponible en un tiempo y lugar determinado de la superficie terrestre depende de forma compleja pero predecible de ciertas disciplinas que varían desde conocimientos elementales de astronomía hasta las características topográficas y atmosféricas de la superficie de la Tierra.

La distribución espectral de la energía del Sol que incide sobre la superficie de la Tierra varía en función de la distribución de la radiación solar en el espacio y de los constituyentes que forman la atmósfera terrestre. A partir de esto se generan dos flujos de energía radiante denominados radiación solar extraterrestre (R_e) y radiación solar global (R_g). El flujo de radiación solar que incide sobre un plano horizontal situado en el borde externo de la atmósfera terrestre es conocido como radiación solar extraterrestre (R_e). En cambio, el flujo de radiación solar que atraviesa la atmósfera terrestre e incide sobre una superficie horizontal de la Tierra es conocido como radiación solar global (R_g) (Liu and Jordan, 1960 /9/).

La intensidad de radiación solar extraterrestre (R_e) que recibe la Tierra por parte del Sol varía de acuerdo a la distribución de la radiación solar en el espacio. Los ciclos de manchas solares junto con algunas actividades que se desarrollan en la superficie externa del Sol producen variaciones temporales en la distribución espectral de la energía radiante el Sol en el espacio (Iqbal, /10/).

La intensidad de radiación solar global (R_g) que llega a la Tierra varía de acuerdo a factores atmosféricos relacionados con la composición de la atmósfera terrestre. Esta interacción afecta la dirección e intensidad de los rayos del Sol, generando dos nuevos flujos de energía radiante denominados radiación solar directa (R_{dir}) y radiación solar difusa (R_{dif}) tal como se muestran en la figura 1, (Sarmiento, /11/).

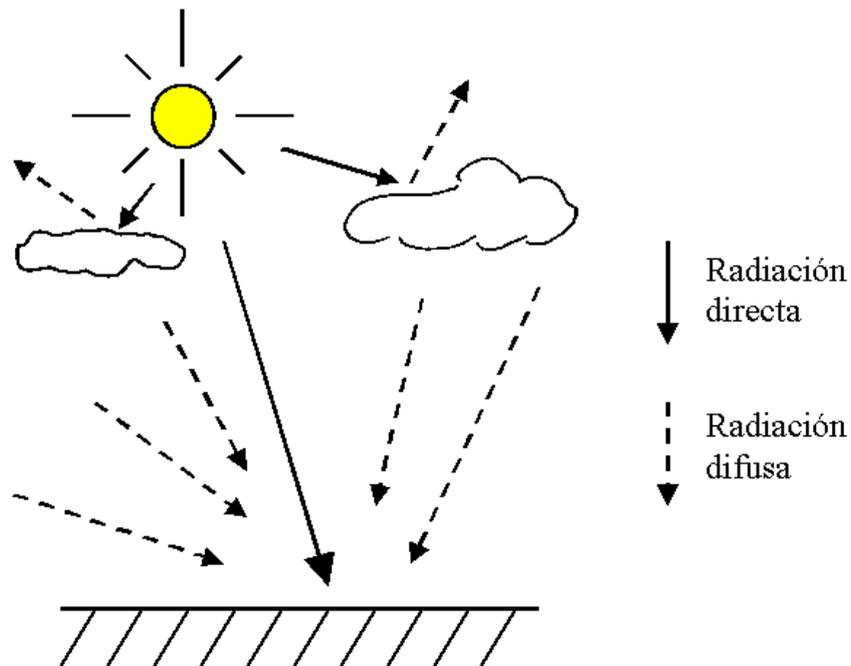


Fig. 1 Radiación solar directa y difusa. (Fuente: Sarmiento, /11/).

Se ha comprobado que la mayor parte del calor y luz del Sol incide sobre las regiones ecuatoriales y sólo una pequeña parte va a parar a las zonas polares. Este calentamiento desigual de la superficie terrestre produce una compleja circulación de los elementos que componen la atmósfera, los cuales

se desplazan desde las regiones más cálidas hacia las regiones más frías. A través del estudio de estos fenómenos es posible concluir que existen ciertas variables meteorológicas, que, junto con influir sobre los parámetros atmosféricos producen notables variaciones en la cantidad de radiación solar global (R_g) dentro de las cuales se considera la temperatura y la presión atmosférica (Romero, 1985).

Según los antecedentes mencionados anteriormente, el comportamiento de la radiación solar sobre la superficie terrestre estaría determinado a través de la siguiente expresión matemática (ecuación 1).

$$R_g = R_{dir} + R_{dif} \quad (1)$$

Esta relación determina las características de disponibilidad de la radiación solar global en una localidad específica, este cálculo se puede realizar de manera directa instalando aparatos de medición debidamente calibrados y durante largos períodos de tiempo. Cuando lo anterior no es posible se recurre a los métodos computacionales o a los métodos empíricos, los cuales estiman el valor de la radiación solar global a partir de modelos estadísticos elaborados en base a datos de ciertas variables climáticas (Jutglar, /8/).

Métodos directos de estimación de la radiación solar

Para ciertas condiciones astronómicas, la variabilidad del estado atmosférico a lo largo de un día es tan amplia que la radiación solar global puede estimarse procesando la información disponible sólo en términos estadísticos, así se manejan valores medios observados de la radiación solar para la localización de interés (Jutglar, /8/).

Cabe señalar que, los datos de irradiación horaria y diaria son normalmente utilizados en aquellos procesos de simulación de disponibilidad del recurso solar, en los cuales se requiere de un estudio exhaustivo para evaluar el comportamiento esperado.

Cuando se habla de la irradiación solar diaria para un mes determinado debe entenderse como el valor de la radiación solar global calculado como el valor medio de los valores diarios de la radiación global durante dicho mes y durante varios años. La irradiación solar media mensual diaria multianual disponible en una determinada localidad se caracteriza por 12 promedios mensuales de radiación solar global diaria durante varios años (Jutglar, /8/).

Si bien, la metodología para la evaluación de la radiación solar global depende del tipo de información disponible, lo mejor es instalar un grupo de instrumentos capaces de medir la radiación solar global durante varios años. El pirheliómetro y el piranómetro corresponden a los aparatos comúnmente empleados en la medición de la radiación solar sobre la superficie terrestre. Los pirheliómetros son instrumentos empleados para medir la intensidad e incidencia normal de la radiación solar directa emitida por el disco solar. En cambio, los piranómetros son instrumentos empleados para medir la cantidad de la radiación solar global considerando tanto la componente directa como difusa (Atlas Energía Solar del Perú, /2/).

La clasificación de los instrumentos, se muestran en la figura 2, está basada en diferentes criterios, algunos se ciñen a criterios de estandarización, otros lo asocian a su grado de calidad.



Fig. 2 Instrumentos para medir la Radiación solar-Global, Directa y Ultra Violeta.

El Heliógrafo es un instrumento que mide la cantidad de horas de sol durante el día en un lugar determinado. Es esencialmente una esfera de vidrio sólido pulido con un eje montado paralelo al de la tierra. La esfera actúa como un lente y la imagen focalizada se mueve a lo largo de una banda de papel especialmente preparada que tiene una escala de tiempo. La quemadura de la banda ocurre cuando la irradiancia solar directa supera un límite variable entre 120 y 210 W/m², que depende de la ubicación (turbidez atmosférica, altitud, humedad atmosférica), el clima, el tipo de banda de registro utilizada y los métodos de análisis.

Mediante el uso de correlaciones simples, las series históricas de insolación pueden ser utilizadas para estimar irradiación solar diaria, media mensual o anual, con errores mínimos del orden de 10 %. (Muños D., /3/).

Métodos empíricos directos de estimación de la radiación solar

Desde comienzos del siglo XX han existido esfuerzos por establecer fórmulas simples, que permitan estimar la radiación solar global que incide sobre la superficie, a partir de la radiación solar extraterrestre y el estado de la atmósfera. Uno de los modelos más significativos es el de A. K. Angström (1924, citado por Atlas Energía Solar del Perú, [2]) que estima la densidad de flujo diario de radiación global a partir de una ecuación de regresión lineal simple (ecuación 2).

$$\frac{H_s}{H_e} = a + b \cdot \left(\frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

Los coeficientes "a" y "b" están asociados al tipo de nubes y a las condiciones generales que determinan la turbidez de la atmósfera. Angström, después de haber analizado estos coeficientes, sugirió los valores de 0,2 para el coeficiente "a" y de 0,5 para el coeficiente "b" (Castillo y Santibáñez, citados en /1/).

Los coeficientes a+b representan el valor máximo de la transmisibilidad de la atmósfera (τ ,) mientras que el coeficiente "a" representa el mínimo valor de τ (Atlas Energía Solar del Perú, /2/).

En el Atlas Solar del Perú se utilizó la información a nivel diario de las estaciones de base con instrumentación piranométrica y actinométrica, se hicieron los cálculos respectivos de H_0 y N y se procedió a estimar los valores de los coeficientes empíricos para cada uno de las estaciones, los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Coeficientes del modelo Ångström-Prescott por estación.
(Baigorria et. al., 2003a)

Estación meteorológica	a	b	Número de datos	Error (%)
Costa				
Miraflores	0,355	0,392	3 681	-2,4
A. Von Humboldt	0,211	0,467	12 186	12,9
San Camilo	0,321	0,468	2 241	-0,4
La Joya	0,593	0,181	7 534	2,8
Sierra				
Bambamarca	0,322	0,336	2 697	6,6
Weberbauer	0,231	0,521	1 859	-2,7
Cosmos	0,32	0,384	929	7,4
Huayao	0,397	0,379	6 285	2,2
Granja Kcayra	0,376	0,364	2 199	3,4
Chuquibambilla	0,395	0,384	1 892	-2,1
Puno	0,378	0,438	2 805	9,2
Characato-La Pampilla	0,367	0,396	1 220	10,7
Selva				
San Ramon SM	0,301	0,377	2 742	6,6
El Porvenir	0,278	0,32	1 613	7
Bellavista	0,355	0,341	714	5,9

Fuente: Atlas Energía Solar del Perú, 2003

Por otro lado, para estimar la radiación solar a través de un modelo estadístico, algunos autores han considerado el efecto que producen los rayos solares sobre la amplitud térmica. La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas en un día determinado depende de la relación entre 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 es perdido hacia el espacio como radiación en onda larga, disminuyendo así la temperatura del aire hasta su valor mínimo, valor que normalmente se alcanza antes del amanecer (Meza y Varas, en /1/).

Esta explicación física justifica el hecho del uso de modelos para estimar la irradiación solar en función de la temperatura, pero con la ventaja de una gran red de estaciones que realizan este tipo de mediciones (Atlas Energía Solar del Perú, /2/).

A partir de esta descripción, Bristow-Campbell (1984, citado por Atlas Energía Solar del Perú, /2/) desarrollaron un modelo (ecuación 3) para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la

diferencia de temperaturas. Dentro de los modelos existentes, Baigorria et al. llegaron a la conclusión que el modelo Bristow-Campbell era el que mejor se adecuaba a las condiciones de Perú. Este modelo sugiere la estimación de la transmisividad o irradiación solar relativa (H/H_0) en función de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínimas:

$$\frac{H_g}{H_e} = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot (T_{máx} - T_{mín})^c} \right) \quad (3)$$

Los valores descritos para cada coeficiente son de 0,7 para el coeficiente "a", entre 0,004 y 0,010 para el coeficiente "b" y 2,4 para el coeficiente "c" (Meza y Varas, en /1/).

En este caso, los valores empíricos (a_B , b_B y c_B) tienen también un significado físico; a_B representa el máximo valor característico de cada área de estudio y depende de la contaminación atmosférica y de la altitud; b_B ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) y c_B determinan el efecto del incremento de ΔT sobre la máxima "T" de la atmósfera (Mesa y Varas, citado por citado por Atlas Energía Solar del Perú, /2/).

La tabla 2 muestra los valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell encontrados para cada estación así como su error promedio. Es necesario recalcar que el valor del coeficiente a_B corresponde a la sumatoria de los coeficientes a y b encontrados para el modelo Ångström-Prescott mostrados en la tabla 2 debido a que tienen exactamente el mismo significado físico.

Tabla 2
Coefficientes del modelo Bristow-Campbell por estación
(Baigorria *et. al.*, 2003a)

Estación metereológica	a_B	b_B	c_B	Número de datos	Error (%)
		(°C ⁻¹)			
Costa					
Miraflores	0,75	0,04	1,49	3 597	3,8
A. Von Humboldt	0,68	0,06	1,42	13 712	14,1
San Camilo	0,79	0,09	1,05	2 244	3,9
Sierra					
Bambamarca	0,66	0,23	0,8	2 033	12,6
Weberbauer	0,75	0,04	1,28	1 607	3,2
Cosmos	0,7	0,03	1,62	773	8,5
Huayao	0,78	0,11	0,97	5 387	4,6
Granja Kcayra	0,74	0,11	0,92	1 961	11,6
Chuquibambilla	0,78	0,19	0,76	1 476	3,6
Puno	0,82	0,2	0,87	2 156	7,2
Characato-La pampilla	0,76	0,16	0,91	3 134	7,5
Selva					
San Ramón SM	0,68	0,02	1,86	2 864	7,5
El Porvenir	0,6	0,06	1,21	2 346	4,1
Bellavista	0,7	0,06	1,22	1 038	2,3

Fuente: Atlas Solar del Perú, /2/.

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciadas por la topografía, latitud (ϕ) y altitud, entre otros factores (Baigorria *et al.*, 2001), los coeficientes b_B y c_B propuestos pueden ser aplicados sólo en áreas bajo similares condiciones de régimen térmico. Esto hace inadecuada una aplicación directa del modelo en áreas donde no existe este requisito. Es por esto que se desarrollaron algunas ecuaciones empíricas para determinar el valor de estos dos coeficientes (Baigorria *et. al.*, 2 003a; citado por el Atlas Solar del Perú, /2/).

$$C_B = 2.116 - 0.072(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 57.574 e^{\phi} \quad (4)$$

$$b_B = 0.107 C_B^{-2.6485} \quad (5)$$

Desarrollo del modelo Bristow-Campbell

Conocer los valores diarios, mensuales o anuales de la radiación solar global disponible sobre la superficie terrestre de una localidad con el tiempo se ha ido transformando cada vez más en una necesidad para ciertas aplicaciones de la energía solar. Si bien, las estaciones de monitoreo disponibles a lo largo y ancho del territorio peruano, donde se mide esta variable, son escasas, suelen estar vinculadas a los núcleos de población y están situadas preferentemente en los fondos de los valles y a baja altitud, la estimación de la radiación solar a través de ciertos modelos que se basan en la simulación de los procesos físicos que ocurren durante la trayectoria de la radiación solar es una de las soluciones que se plantea frente a este problema.

Para desarrollar el modelo de Bristow-Campbell (1984) que estima la radiación solar global diaria media mensual se tomó la técnica del modelaje propuesto por Espinoza /12/. En este sentido, se propone el modelo empírico de Bristow-Campbell para estimar la irradiación solar global diaria media mensual correspondiente a distintas localidades ubicadas en la zona de la Región Junín, considerando los factores disponibles que modifican la radiación solar a lo largo de su recorrido por el espacio tales como: las variables de temperaturas máximas y mínimas, además de los valores de la constante aB propuestos de acuerdo al clima y altitud.

A través de la utilización de las expresiones matemáticas que hemos mencionado se logró representar y estimar la radiación solar global para las localidades estudiadas. Cada una de las expresiones matemáticas utilizadas en el modelo de estimación de la irradiación solar global diaria media mensual sobre una superficie horizontal, fueron evaluadas y calibradas a través de las herramientas de cálculo mediante el programa Excel. A continuación se detalla los pasos seguidos para llegar hasta la elaboración de una base de datos de radiación solar global estimada con el modelo Bristow-Campbell.

Creación de la base de datos

Para la creación de la base de datos de la zona de estudio se utilizó la técnica documental propuesta por Espinoza /12/ y en ese sentido para obtener una

base de datos adecuada fue necesario recopilar la mayor cantidad de información disponible de magnitudes como las temperaturas máximas y mínimas de los registros elaborados de las localidades de Junín ubicadas dentro de la zona de estudio. Con respecto a las variables actinométricas necesarias la información disponible es muy escasa por eso se tomó los datos de las estaciones de Satipo, Tarma y Santa Ana y el coeficiente empírico a_B de la estación de Huayao del Atlas de Energía Solar del Perú.

Modelo Bristow-Campbell

Para la aplicación del modelo propuesto mediante el programa Excel se ha seguido la secuencia de ecuaciones que se resume a continuación para generar los valores medios mensuales diarios de la radiación solar global terrestre de las localidades estudiadas:

$$E_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_n}{365}\right) \quad (6)$$

$$\delta = \text{sen}^{-1}\left[0,4 \cdot \text{sen}\left(\frac{360 \cdot (d_n - 82)}{365}\right)\right] \quad (7)$$

$$\omega_h = \pm \cos^{-1}(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (8)$$

$$H_{eh} = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\frac{\text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi \cdot \omega_h \cdot \frac{\pi}{180}}{\cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \text{sen}\omega_h} + \right] \quad (9)$$

$$\frac{H_{gh}}{H_{eh}} = a_B \cdot \left(1 - e^{-b_B(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{c_B}}\right) \quad (10)$$

$$c_B = 2.116 - 0.072(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 57.574 e^{\phi} \quad (11)$$

$$b_B = 0.107 c_B^{-2.6485} \quad (12)$$

Conclusiones

El modelo físico Bristow-Campbell es un modelo que permite estimar confiablemente la radiación solar global solar diaria media mensual en la Región Junín.

El modelo físico Bristow-Campbell permite estimar confiablemente la radiación solar global diaria media mensual potencial en la Región Junín con solo datos de temperaturas máximas y mínimas diarias de las estaciones existentes.

La cuantificación de la disponibilidad de la energía solar sirve de base para que sea posible el diseño de políticas y medidas para incentivar el mayor uso de estas energías limpias que promuevan el desarrollo sostenible de la Región Junín y de todo Perú.

Simbología

R_g : radiación solar global, [W/m^2];

R_{dir} : radiación solar directa, [W/m^2];

R_{dif} : radiación solar difusa, [W/m^2].

H_g : radiación solar global, [Wh/m^2];

H_e : radiación solar extraterrestre, [Wh/m^2];

n : horas de sol real, [horas];

N : duración teórica del día, [horas].

$T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima, [$^{\circ}C$];

$T_{m\acute{i}n}$: temperatura mínima., [$^{\circ}C$].

E_0 = factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre;

d_n = día juliano del año;

δ = declinación solar, [grados];

ϕ = Latitud geográfica del lugar, [grados];

ω_h = ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal, [grados];

I_{sc} = constante solar, [W/m^2];

H_{eh} = irradiación extraterrestre sobre un plano horizontal, [Wh/m^2];

H_{gh} = irradiación terrestre sobre un plano horizontal, [Wh/m^2].

Bibliografía

1. CAMAYO LAPA, Becquer Frauberth. “*Radiación solar y calidad ambiental de la región de Junín*”. Director: José Cerrón Rojas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional el Centro. Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente, Huancayo, Perú, 2013.
2. SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (SENAMHI). Ministerio de Energía y Minas. *Atlas de Energía Solar del Perú*. Lima, Perú. 2003. 72 p.
3. MUÑOZ Anticono, Delfor Flavio. “Aplicación de la energía solar para electrificación rural en zonas marginales del país”, Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2005.
4. ALTBIR Dora, et. al. *¿Cuánto de energía solar llega a nuestro país diariamente?* Chile. Disponible en Web: www.viosol.cl/imagcs/cuantaenergiallega.pdf. 2008.
5. GUEYMARD, Christian A. “*Progress in direct irradiance modeling and validation*”. Solar 2010 Conference. American Solar Energy Society, Phoenix, USA. May 2010.
6. DE LA CASA A.; OVANDO G.; RODRÍGUEZ A. “*Estimación de la Radiación Solar Global en la Provincia de Córdoba y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa*”. Revista de Investigaciones Agropecuarias. 2011, agosto, vol 32, núm. 002.
7. RAICHJK, C.; TADDEI, F. “*Estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria*”. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. 2012, vol 16. Disponible en la Web: <http://www.gersol.unlu.edu.ar/trabajos/ESTUDIOCOMPARATIVODEMODOLOS.PDF>.
8. JUTGLAR Lluís. “*Energía Solar: Energías Alternativas y Medio Ambiente*”, Ediciones CEAC, España, 2004. 267 p. ISBN: 9788432910631.
9. LIU B.Y.H. and JORDAN, R.C. “*The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation*”, Solar Energy, V. 4, N. 3, 1960. pp. 1-19.
10. IQBAL, M. “*An introduction to solar radiation*”. Academic Press. 1983. 390 p. ISBN: 0-12-373750-8.
11. Sarmiento, P. “*Energía solar: aplicaciones e ingeniería*”. 4ta Edición. Universidad Católica de Valparaíso, Ediciones Universitarias. Chile, 2008. 250 p. ISBN: 956-17-0280-0.
12. Espinoza Montes, Ciro. “*Metodología de investigación tecnológica. Pensando en sistemas*”. Huancayo, Perú: Imagen Gráfica SAC , 2010. 187 p. ISBN: 978-612-00-0222-3.

