

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL, MEDIANTE TEMPERATURAS EXTREMAS, APLICANDO EL MODELO BRISTOW – CAMPBELL EN LA REGIÓN JUNÍN

Camayo Lapa Bécquer Frauberth - UNCP
Condezo Hurtado David Elvis - UNCP
Ramos Cadillo Adam Yanina - SENAMHI JUNIN
Massipe Hernández Juan Raúl - ESPAÑA
Camayo Vivas Adrian Becquer - UNCP

PRIMER CONGRESO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y
ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA | **CABER 2017**

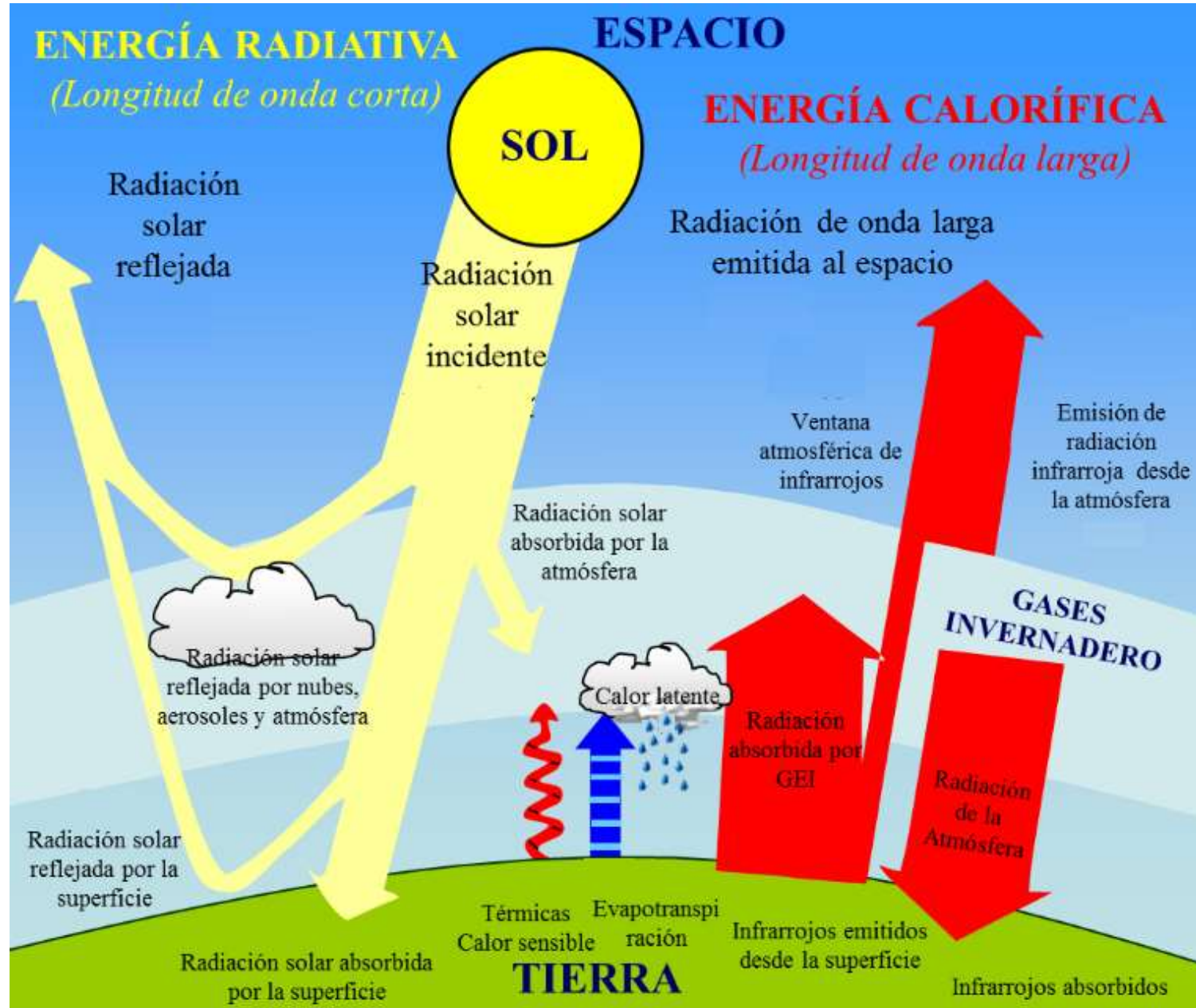
"Reconstruyendo el Perú Sosteniblemente"



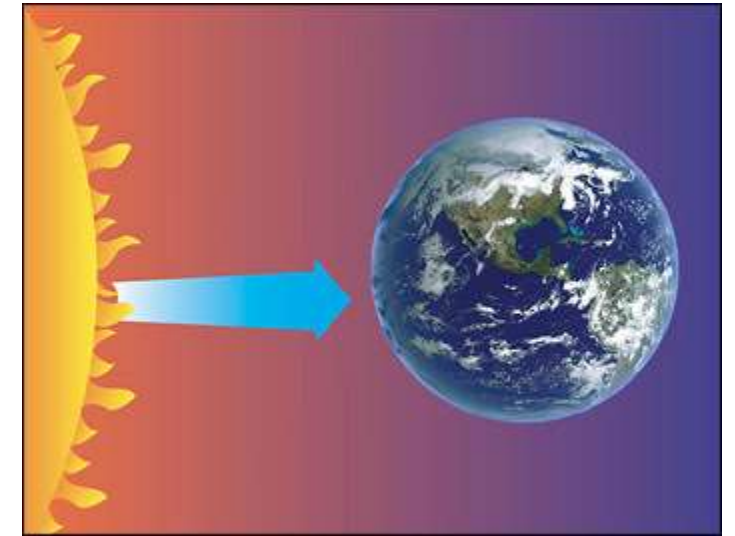
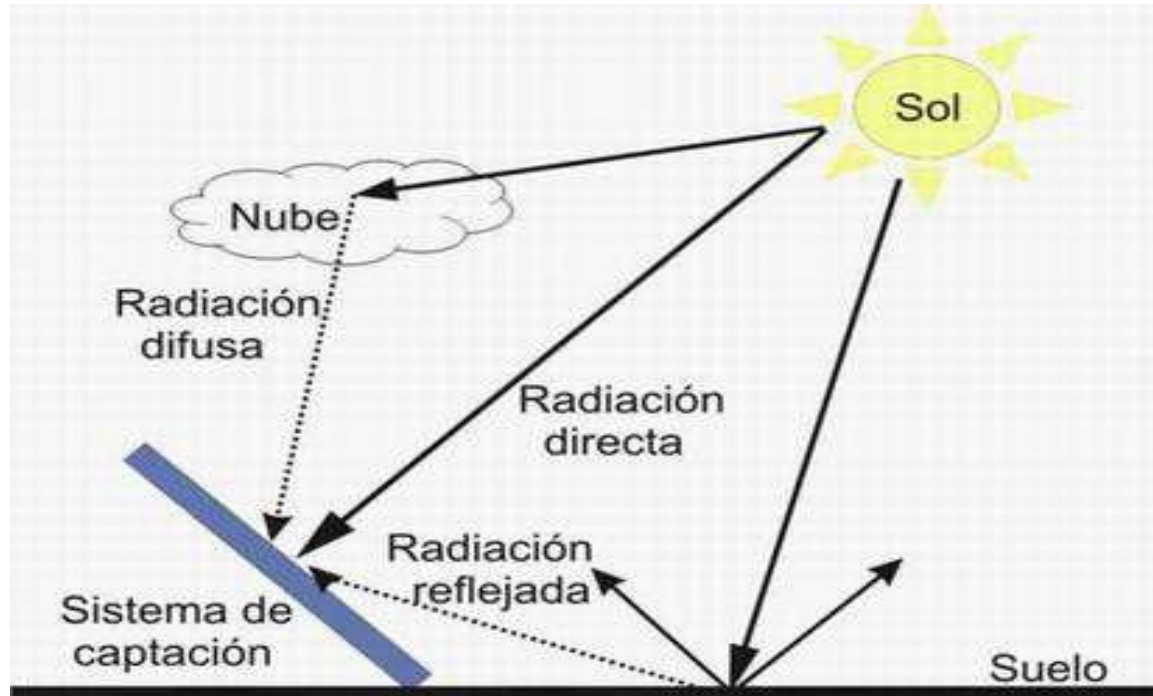
Se planteó el objetivo principal de estimar la radiación solar global solar media diaria mensual y anual, mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow – Campbell a las 19 estaciones meteorológicas de la Región Junín, responsabilidad del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El método utilizado para la estimación de la radiación solar global media diaria mensual y anual fue el modelaje mediante el modelo empírico Bristow Campbell y para el pronóstico de las temperaturas se utilizó la serie de tiempos mediante la técnica documental de los datos históricos de la página web de SENAMHI desde los años 2000 al 2015. Se determinó modelos predictivos estacionales para pronosticar temperaturas máximas y mínimas al 2017 de las 19 estaciones de la Región Junín. Con las temperaturas extremas pronosticadas se estimó la radiación solar global diaria media mensual mediante el modelo empírico Bristow Campbell validado, consiguiendo que en la Sierra el valor promedio es $6 \text{ kW/m}^2/\text{día}$ y Selva en Selva $4 \text{ kW/m}^2/\text{día}$, ambos valores resultan rentables para su aplicación para fines de producir calor, frío y electricidad con energía solar. Estos resultados validan el modelo Bristow – Campbell para estimar confiablemente la radiación solar global diaria media mensual y anual, mediante temperaturas extremas en la Región Junín-Perú.



BASES TEORICAS



Radiación solar sobre la superficie de la Tierra



$$R_g = R_{dir} + R_{dif}$$

MÉTODOS PARA ESTIMAR RADIACIÓN SOLAR EN LA TIERRA

1. Métodos empíricos indirectos de estimación de la radiación solar

Angström 1924

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

- H_g : radiación solar global, [Wh/m²];
- H_e : radiación solar extraterrestre, [Wh/m²];
- n : horas de sol real, [h];
- N : duración teórica del día solar, [h].

Bristow-Campbell (1984)

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

Coeficiente $a = 0,7$; $b =$ entre 0,004 y 0,010 y para el $c = 2,4$ para (Meza y Varas, 2000 citado por Atlas Energía Solar del Perú, 2003)

2. Métodos directos de estimación de la radiación solar

Modelo con programa Excel para estimar la radiación solar global mensual (HS)

Procedimiento:

✓ **Datos de entrada de las estaciones meteorológicas:**

Temperatura máxima, [°C];

Temperatura mínima, [°C];

Latitud (ϕ), [grados].

✓ **Cálculo de Latitud en radianes:**

$$\phi \text{ (Radianes)} = 3.1416 * \phi / 180$$

✓ **Cálculo del Factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre (E_0):**

$$E_0 = 1 + (0.033 * \text{Cos}(2 * 3.1416 * dn / 365))$$

✓ **Cálculo de la declinación solar (δ) en radianes**

$$\delta = 0.409 * \text{Seno} ((2 * 3.1416 * dn / 365) - 1.39)$$



- ✓ **Cálculo del ángulo horario para una superficie horizontal (ω_h)**

$$\omega_h = \text{ACos} (-\text{Tan} (\phi) * \text{Tan}(\delta))$$

- ✓ **Cálculo de la irradiancia extraterrestre horizontal (H_{eh}) en $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$**

$$H_{eh} = (24 * 60 * 0.082 * E_0 / 3.1416) * (\omega_h) \text{Sen}(\phi) * \text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\phi) * \text{Cos}(\delta) * \text{Sen}(\omega_h)$$

a_B es la constante de la zona más representativa

$$C_B = (2.116 - (0.072 * (T_{\max} - T_{\min}))) + 57.574 * \text{EXP}(\phi)$$

$$b_B = 0.107 * \text{POTENCIA}(C_B, -2.6485) \text{ y}$$

- ✓ **Calculando la Radiación Global en $\text{MJh m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ (H_s):**

$$H_s = (H_{eh} * a_B) * (1 - \text{EXP}(-b_B * \text{POTENCIA}((T_{\max} - T_{\min}), C_B)))$$

Estaciones de estudio de las estaciones en la Región Junín

ESTACION	PROVINCIA	DISTRITO	LATITUD (S)	LONGITUD (w)	ALTITUD msnm	Tipo de clima	a _R
PICHANAKI	Chanchamay	Pichanaki	10°56'	74°52'	514	Semi Húmedo y Cálido	0,560
RUNATULLO	Concepción	Comas	11°37'	75°00'	3498	Moderadamente Húmedo y semifrío	0,780
JAUJA	Jauja	Jauja	11°47'	75°28'	3378	Semi Húmedo y semifrío	0,780
TARMA	Tarma	Tarma	11°23'	75°41'	3034	Arido y semifrío	0,718
HUASAHUASI	Tarma	Huasahuasi	11°16'	75°38'	2765	Seco y semifrío	0,718
COMAS	Concepción	Comas	11°44'	75°07'	3590	Ligeramente Húmedo y semifrío	0,780
SAN RAMON	La Merced	San Ramón	11°07'	75°21'	888	Ligeramente Húmedo y Cálido	0,600
SATIPO	Satipo	Río Negro	11°13'	74°36'	590	Ligeramente Húmedo y Cálido	0,558
PUERTO OCOPA	Satipo	Río Tambo	11°08'	74°18'	336	Seco y cálido	0,600
LA OROYA	Yauli	La Oroya	11°34'	75°57'	3957	Semi Húmedo y semifrío	0,780
RICRAN	Jauja	Ricrán	11°32'	75°31'	3580	Semi Húmedo y semifrío	0,780
INGENIO	Concepción	Santa Rosa d	11°52'	75°16'	3450	Semi Húmedo y semifrío	0,780
JUNIN	Junín	Junín	11°08'	75°59'	4114	Muy Húmedo y frío moderado	0,820
SAN JUAN DE JARPA	Chupaca	San Juan de J	12°07'	75°25'	3671	Ligeramente Húmedo y semifrío	0,800
VIQUES	Huancayo	Viques	12°09'	75°13'	3218	Seco y semifrío	0,800
HUAYAO	Chupaca	Huachac	12°02'	75°19'	3328	Semi Húmedo y semifrío	0,780
LAIVE	Chupaca	Yanacancha	12°15'	75°21'	3842	Moderadamente Húmedo y frío moderado	0,780
SANTA ANA	Huancayo	El Tambo	12°00'	75°13'	3298	Semi Húmedo y semifrío	0,671
SHULLCAS	Huancayo	Huancayo	10°02'	75°17'	3510	Semi Húmedo y semifrío	0,780
				Promedio	2872		0,730

1. Modelos, precisión y gráficos de las estaciones en estudio

a) Descripción del modelo:

Se encontró un modelo estacional simple sin ninguna tendencia para todas las estaciones.

b) Error medio cuadrático (RMSE)

$$\text{RMSE} = 0,6 \text{ a } 0,9$$

Información del error medio cuadrático estadísticamente significativo con error menores de 0,05.

c) Parámetros del modelo

$$X_t = \alpha + E_t * R_t$$

a) Gráfica del valor real y el valor pronosticado

En la Figura 3, se muestra las temperaturas históricas máximas y mínimas del 2000 hasta el 2016 y las temperaturas pronosticadas del 2017 de la estación meteorológica de la estación Huayao.

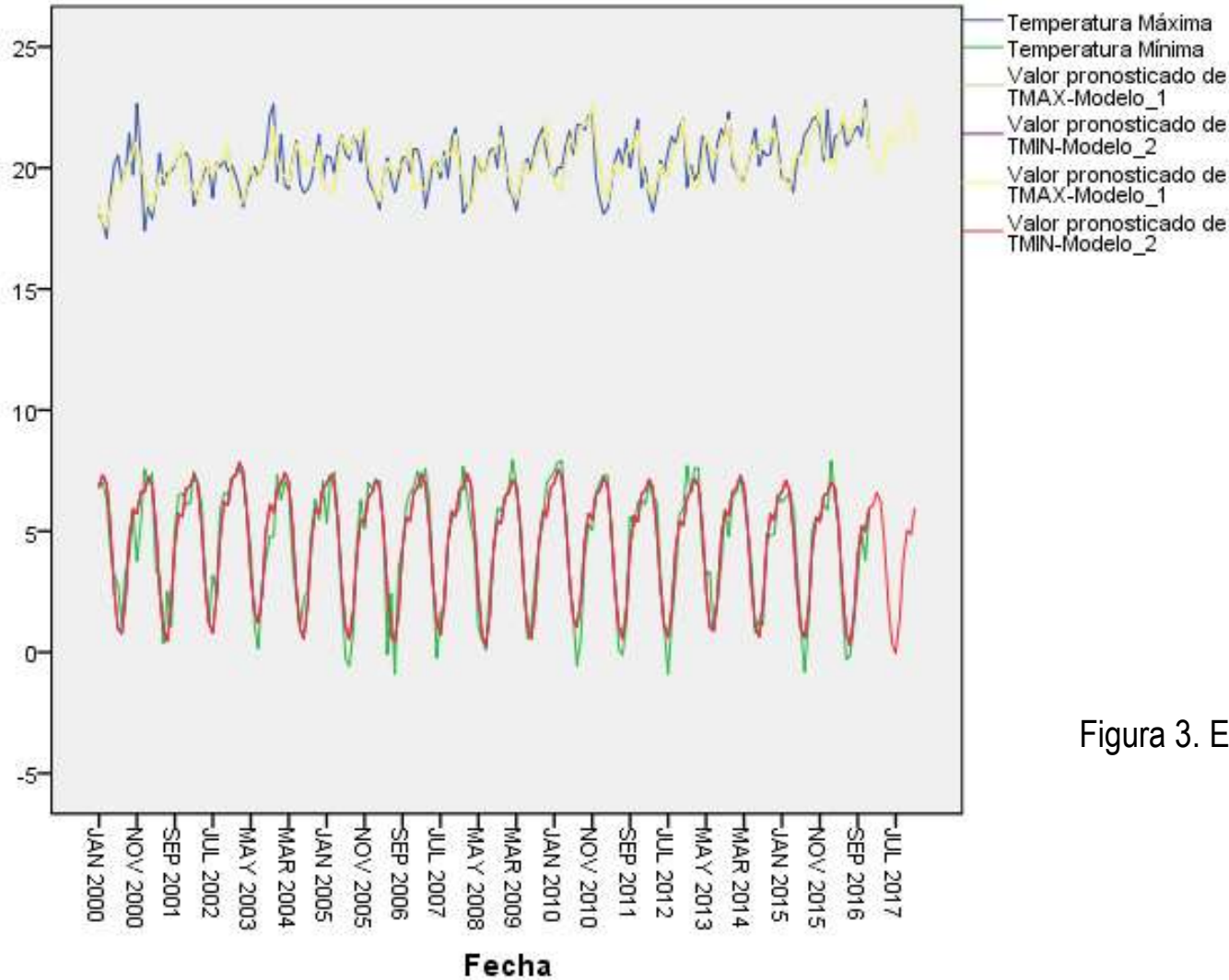


Figura 3. Estación meteorológica de la estación Huayao.

Tabla 2. Temperaturas máximas y mínimas promedios mensuales del 2000 al 2015, pronosticados al 2017, de las estaciones monitoreadas de la Región Junín, de responsabilidad de SENAMHI.

N°	Localidad estación de monitoreo	Temperatura máxima y mínima promedios mensuales del 2000 al 2015, pronosticados al 2017																								Promedio	
		Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		Julio		Agosto		Setiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre			
		T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.	T Max.	T Min.
1	PICHANAKI	31.20	21.12	30.74	21.14	31.39	21.09	31.85	20.98	31.76	20.45	31.82	19.51	31.91	18.89	33.06	19.16	33.36	19.43	33.13	20.77	32.43	21.23	31.34	21.32	32.00	20.42
2	RUNATULLO	13.1	6.0	12.74	6.29	13.03	5.84	13.00	5.24	13.10	3.66	12.52	2.42	12.36	2.04	12.58	2.11	12.76	3.81	13.00	5.37	13.39	5.76	12.93	6.04	12.87	4.55
3	JAUJA	18.42	7.46	18.08	7.73	17.54	7.39	18.62	5.90	19.68	3.45	19.56	1.67	19.28	1.17	19.67	2.24	19.68	4.75	19.79	6.30	19.95	6.66	18.71	7.48	19.08	5.18
4	TARMA	20.92	6.79	20.62	6.76	20.89	6.81	21.17	5.93	21.10	5.04	21.04	4.27	20.61	3.60	20.73	3.95	20.95	5.57	21.21	6.51	21.46	6.67	20.63	6.94	20.94	5.74
5	HUASAHUASI	18.53	10.14	17.77	10.26	18.18	10.13	18.77	9.10	18.70	7.57	18.17	6.13	17.71	5.85	18.42	6.53	18.91	8.27	19.14	9.43	19.51	9.65	18.56	10.09	18.53	8.60
6	COMAS	15.19	3.36	14.71	3.78	14.78	3.72	15.47	2.88	16.11	1.81	15.89	0.86	15.47	0.33	16.06	0.63	15.84	1.82	15.82	2.74	16.30	2.75	15.45	3.26	15.59	2.33
7	SAN RAMON	30.49	19.12	30.09	19.03	30.5	18.93	31.27	18.74	31.09	17.66	31.15	17.66	31.09	16.37	32.06	16.73	32.43	16.82	32.53	16.84	32.18	18.67	31.02	19.46	31.33	18.00
8	SATIPO	31.13	20.24	30.78	20.10	31.24	19.82	32.00	19.70	31.39	19.35	31.46	18.22	31.66	17.29	32.62	17.51	32.88	18.11	33.00	19.34	32.61	19.99	31.39	20.13	31.85	19.15
9	PUERTO OCOPA	31.83	22.71	31.46	22.69	31.93	22.62	32.57	22.37	32.22	21.70	32.15	20.88	32.13	19.83	33.98	20.30	34.43	20.96	34.20	22.11	33.64	22.56	32.25	22.71	32.73	21.79
10	LA OROYA	15.36	3.95	15.03	4.51	14.73	4.71	15.24	2.69	15.85	0.05	15.40	-1.69	15.24	-2.24	15.32	-1.34	15.61	1.19	15.96	2.43	16.49	2.56	15.54	3.78	15.48	1.72
11	RICRAN	13.71	4.99	13.16	5.14	12.85	5.18	12.93	4.05	14.28	2.47	14.39	1.02	14.07	0.36	14.16	1.29	13.84	2.77	14.44	4.27	14.62	4.71	13.38	5.15	13.82	3.45
12	INGENIO	19.14	6.63	18.51	7.16	18.14	6.94	19.00	5.73	19.80	3.34	19.53	1.79	19.40	1.14	20.05	2.14	19.92	4.62	20.10	5.79	20.48	6.23	19.26	6.85	19.44	4.86
13	JUNIN	15.39	2.16	14.85	2.93	14.96	2.74	15.59	1.57	16.30	-0.14	16.08	-2.34	15.72	-3.94	16.30	-3.51	16.04	-1.29	16.08	0.76	16.53	0.25	15.74	2.11	15.80	0.11
14	JARPA	15.44	5.32	14.79	5.75	14.46	5.60	15.08	4.21	15.93	1.74	15.41	0.16	15.14	-0.18	15.96	0.75	15.88	2.93	16.09	4.09	16.70	4.19	15.52	5.28	15.53	3.32
15	VIQUES	20.50	8.38	20.00	8.78	19.81	8.17	20.63	6.30	21.36	4.35	21.22	2.97	20.97	2.54	21.46	3.74	21.54	5.04	21.68	7.34	21.84	7.49	20.49	8.29	20.96	6.12
16	HUAYAO	20.58	6.07	20.05	6.58	19.80	6.25	20.72	4.56	21.48	2.05	21.13	0.36	20.89	-0.03	21.56	1.30	21.67	3.81	21.88	5.04	22.52	4.86	20.97	5.92	21.10	3.90
17	LAIVE	14.62	2.46	14.24	3.04	14.09	2.83	14.61	0.59	15.15	-2.36	15.23	-5.17	14.96	-5.86	15.23	-4.84	15.10	-1.33	15.15	0.51	15.89	0.37	14.74	2.22	14.92	-0.63
18	SANTA ANA	20.44	6.11	20.39	6.18	19.72	5.98	20.73	3.85	21.69	1.84	21.34	0.05	21.14	-0.59	21.51	0.63	21.48	3.16	21.55	4.77	22.10	4.67	20.74	5.95	21.07	3.55
19	SHULLCAS	13.01	4.28	12.49	4.89	12.38	4.85	14.36	3.70	13.03	2.22	13.01	0.33	13.14	-0.20	13.67	0.65	12.94	1.51	13.46	2.92	13.92	3.71	13.71	4.13	13.26	2.75
	Promedios	19.95	8.80	19.50	9.09	19.50	8.93	20.19	7.79	20.53	6.12	20.34	4.69	20.15	4.02	20.76	4.74	20.80	6.42	20.96	7.75	21.19	8.05	20.12	8.80	20.33	7.10

Tabla 3. Radiación solar diaria media mensual estimada mediante el modelo Bristow Campbell de las estaciones con temperaturas máximas y mínimas pronosticadas del 2017 en la Región Junín.

N°	Localidad estación de monitoreo	Radiación global horizontal promedios diarios mensuales kWh/m ² /día												Promedio
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1	PICHANAKI	4.151	3.989	3.989	3.734	3.407	3.308	3.471	3.932	4.383	4.464	4.367	4.123	3.943
2	RUNATULLO	4.385	3.934	4.206	4.085	4.237	4.119	4.281	4.785	4.841	4.557	4.680	4.262	4.364
3	JAUJA	6.092	5.831	5.498	5.553	5.405	5.221	5.388	5.886	6.233	6.446	6.588	6.154	5.858
4	TARMA	6.234	6.122	5.885	5.482	4.981	4.717	4.866	5.361	5.806	6.117	6.290	6.147	5.667
5	HUASAHUASI	4.695	4.223	4.295	4.459	4.314	4.176	4.256	4.715	4.979	5.046	5.224	4.718	4.592
6	COMAS	6.322	6.007	5.765	5.531	5.172	4.902	5.045	5.634	6.096	6.370	6.636	6.393	5.823
7	SAN RAMON	4.752	4.641	4.541	4.270	3.922	3.666	3.881	4.354	4.885	5.230	5.080	4.777	4.500
8	SATIPO	4.323	4.234	4.192	3.933	3.479	3.376	3.570	4.021	4.450	4.626	4.598	4.385	4.099
9	PUERTO OCOPA	4.173	4.016	4.010	3.854	3.504	3.390	3.621	4.179	4.633	4.739	4.659	4.290	4.089
10	LA OROYA	6.207	5.881	5.459	5.533	5.370	5.148	5.330	5.801	6.164	6.452	6.697	6.282	5.860
11	RICRAN	5.265	4.867	4.470	4.559	4.804	4.716	4.886	5.283	5.516	5.641	5.702	5.019	5.061
12	INGENIO	6.491	6.127	5.798	5.635	5.413	5.182	5.385	5.934	6.279	6.590	6.771	6.456	6.005
13	JUNIN	6.938	6.575	6.362	6.094	5.760	5.617	5.939	6.593	6.933	7.089	7.422	6.997	6.527
14	SAN JUAN DE JARPA	5.990	5.489	5.151	5.279	5.262	5.022	5.166	5.726	6.056	6.303	6.607	6.021	5.673
15	VIQUES	6.572	6.250	6.057	5.941	5.610	5.366	5.534	6.052	6.611	6.764	6.966	6.579	6.192
16	HUAYAO	6.869	6.595	6.296	6.049	5.796	5.584	5.758	6.284	6.646	6.981	7.315	6.945	6.427
17	LAIVE	6.421	6.090	5.810	5.742	5.523	5.509	5.723	6.238	6.433	6.645	6.986	6.491	6.134
18	SANTA ANA	5.886	5.790	5.449	5.291	5.045	4.877	5.068	5.502	5.783	6.001	6.264	5.941	5.575
19	SHULLCAS	5.217	4.623	4.411	5.186	4.696	4.735	4.949	5.394	5.644	5.748	5.755	5.544	5.159
	Promedios	5.631	5.331	5.139	5.064	4.826	4.665	4.848	5.351	5.704	5.885	6.032	5.659	5.345

- El modelo Bristow – Campbell permite estimar confiablemente la radiación solar global diaria media mensual y anual, mediante temperaturas extremas de las 19 estaciones meteorológicas de responsabilidad de Servicio Nacional de meteorología e hidrología del Perú (SENAMHI) región Junín 2017.
- Las temperaturas pronosticadas de máximas y mínimas a través de serie de tiempo fueron con datos de 15 años desde el año 2000 hasta el 2015 de las 19 Estaciones de la Región Junín.
- La radiación global solar media diaria mensual y anual mediante el modelo Bristow Campbell se estimó con temperaturas promedio mensuales pronosticadas al 2017 de las 19 Estaciones de la Región Junín siendo mayores en la Sierra con promedios de $6 \text{ kW/m}^2/\text{día}$ que en la selva con un promedio de $4 \text{ kW/m}^2/\text{día}$.
- 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.

- (1) Camayo, B., et al. Desarrollo del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junín, Perú. **RTQ**, Santiago de Cuba, v. 35, n. 2, p. 220-234, agosto 2015. Disponible en <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852015000200008&lng=es&nrm=iso>. Accedido en 23 nov. 2016.
- (2) De La Casa A, Rodríguez A, Ovando G, Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias* 20033245-61. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86432204>. Fecha de consulta: 23 de noviembre de 2016.
- (3) Alvarez J.; Mitsova H. y Allen L. Estimating Monthly Solar Radiation in South-Central Chile. *Chilean J. Agric. Res.* [online]. 2011, vol.71, n.4 [citado 2016-11-26], pp.601-609. Disponible en: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-58392011000400016&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0718-5839. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392011000400016>
- (4) Torres R., Burgoa A. y Ricaldi E. Modelos de estimación de la radiación solar para el Altiplano Central de Bolivia. *Revista Boliviana de Física* [online]. 2013, vol.23, n.23 [citado 2016-11-26], pp. 1-7. Disponible en: <http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232013000200001&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1562-3823.
- (5) Castro M. y Colmenar A. *Energía Solar Térmica y de Baja Temperatura* 3ª ed. España; Progensa; 2008.
- (6) Jutglar L. *Energía solar: Energías Alternativas y Medio Ambiente*; España; Ceac; 2014.
- (7) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Ministerio de Energía y Minas. *Atlas de Energía Solar en el Perú*. Lima; 2003.
- (8) SENAMHI. http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi
- (9) Camayo B. *Radiación solar y calidad ambiental de la región de Junín*. Universidad Nacional del centro del Perú. Huancayo, Perú, 2013
- (10) CEPLAN. *Plan Bicentenario: El Perú hacia el 2021*. Lima, Perú 2011. 282p. Ubicado en: https://www.mef.gob.pe/contenidos/acerc_mins/doc_gestion/PlanBicentenarioversionfinal.pdf.