

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

PROGRAMA DE MAESTRÍA

**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
AGRÍCOLA**



TESIS

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA RADIACIÓN
SOLAR GLOBAL EN EL ALTIPLANO DE PUNO**

PRESENTADA POR:

LELIA QUISPE HUAMÁN

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PUNO, PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA
TESIS



**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE LA RADIACIÓN
SOLAR GLOBAL EN EL ALTIPLANO DE PUNO**

PRESENTADA POR:
LELIA QUISPE HUAMÁN
PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE


.....
Dr. EDUARDO FLORES CONDORI

PRIMER MIEMBRO


.....
Dr. EDILBERTO VELARDE COAQUIRA

SEGUNDO MIEMBRO

.....
M.Sc. JOSÉ ANTONIO MAMANI GÓMEZ

ASESOR DE TESIS


.....
Dra. GUINA GUADALUPE SOTOMAYOR ALZAMORA

Puno, 06 de diciembre del 2018

ÁREA: Medio ambiente.
TEMA: Radiación solar global.
LÍNEA: Control de contaminación ambiental.

DEDICATORIA

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto, por haberme dado la vida y salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios nuestro padre celestial, por darme la oportunidad de poder ser lo que soy y alcanzar mis objetivos.
- A mis jurados calificadores: Dr. Eduardo Flores Condori y Dr. Edilberto Velarde Coaquira por su asesoría en este trabajo de investigación.
- Un agradecimiento especial a la Dra. Guina Guadalupe Sotomayor Alzamora por su asesoría y aporte a este trabajo de investigación.
- A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, en especial a la mención en Ingeniería Ambiental, que gracias a las cátedras magistrales de sus docentes que forman profesionales de gran saber científico y técnico.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1.1 Problema general	4
1.1.2 Problemas específicos.....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 HIPÓTESIS.....	6
1.4.1 Hipótesis general	6
1.4.2 Hipótesis específicos	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES.....	7
2.1.1 Antecedentes a nivel nacional	7
2.1.2 Antecedentes a nivel internacional	8
2.2 EL SOL	10
2.3 RADIACIÓN SOLAR	11
2.3.1 Espectro electromagnético	13
2.4 CAMBIO CLIMÁTICO	16
2.4.1 El clima.....	17
2.4.2 La meteorología.....	17
2.5 IMPORTANCIA DEL REGISTRO DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	19
2.6 LA MODELACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	20
2.7 CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES SOLARES	20
2.8 SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL	22
2.9 FACTORES MODULARES DE LA RADIACIÓN SOLAR	23
2.9.1 Factores geométricos	24
2.9.2 Factores atmosféricos.....	28
2.10 CONSTANTE SOLAR.....	30
2.11 RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE.....	32
2.12 RADIACIÓN SOLAR GLOBAL.....	35
2.13 TRANSMITANCIA DE LA ATMÓSFERA (K_t).....	38
2.14 MODELOS DE ESTIMACIÓN.....	39
2.14.1 Temperatura	40

2.15 MODELO DE BRISTOW Y CAMPBELL.....	40
2.16 VARIABLES E INDICADORES DE LA INVESTIGACIÓN	43
2.16.1 Variable independiente	43
2.16.2 Indicadores	44
2.16.3 Variable dependiente	44
2.16.4 Modelos empíricos.....	44
2.17 DIAGRAMA DE FLUJO.....	45

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO	46
3.2 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	47
3.2.1 Tipo de investigación	47
3.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	48
3.4 TÉCNICAS Y ESTRATEGIAS.....	49
3.4.1 Técnica.....	49
3.4.2 Estrategia	49
3.4.3 Requerimientos.....	49
3.5 CORRELACIÓN.....	50
3.6 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	51
3.6.1 Primera etapa	51
3.6.2 Segunda etapa	51
3.6.3 Tercera etapa	52
3.7 MEDICIÓN.....	52



3.7.1 Técnicas de procesamiento	52
3.8 EQUIPO ESTACIÓN METEOROLÓGICA VAISALA	54
3.9 EQUIPO ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS	55
3.10 COMPONENTES DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	56
3.10.1 Consola	56
3.10.2 Weatherlink datalogger y software	57
 CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN 	
4.1 RESULTADOS.....	60
4.1.1 Resultados experimentales.....	60
4.1.2 Modelo.....	60
4.1.3 Valores medidos diarios.....	62
CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
1. Conversión de unidades en solarimetría.....	13
2. Escala de transmitancia atmosférica.	38
3. Coeficientes del modelo Bristow y Campbell por estación	43
4. Operacionalización de variables	44
5. Estaciones meteorológicas SENAMHI-Puno	61
6. Radiación solar global diario en el mes de diciembre del 2017	66
7. Indicadores estadísticos	67
8. Resultados del análisis estadístico	68
9. Radiación solar global estimada mensual en el año 2013 en el altiplano de Puno y rentabilidad.....	73
10. Radiación solar global promedio anual estimada en el altiplano	77

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Estructura del sol.....	11
2. Balance radiactivo global de la tierra y la atmósfera.	12
3. Espectro de radiación solar extraterrestre y en la superficie.....	14
4. Espectro electromagnético	15
5. Clasificación del estado de cielo realizada.....	18
6. Radiación solar recibida por los sistemas de aprovechamiento de energía.	21
7. Proporción de fuentes primarias en la demanda energética.	22
8. Potencia instalada para generación de energía.	23
9. Órbita de la tierra alrededor del sol.....	24
10. Distribución de la radiación solar.	31
11. Variación de la radiación extraterrestre a lo largo del año.	33
12. Radiación solar directa y difusa.	37
13. Diagrama de flujo que representa el procedimiento general.	45
14. Área de estudio	46
15. Estación meteorológica Vaisala.....	55
16. Estación meteorológica Davis.....	56
17. Consola	57
18. Weatherlink Software.....	58
19. Radiación solar global diaria estimada y amplitud térmica en Yunguyo año 2013.	69
20. Radiación solar global estimada diaria y amplitud térmica en Juli del 2007 al 2013.	70
21. Radiación solar global diaria estimada y medida en la ciudad de Puno en los años 2014, 2015 y 2017.	71

22. Correlación de Pearson de la Radiación solar global estimada y medida del 2014, 2015 y 2017.....	72
23. Radiación solar global promedio mensual en el Altiplano de Puno durante el año 2013.	74
24. Promedio de la Transmitancia atmosférica máxima del 2015, 2016 y 2017	75
25. Promedio anual de la radiación solar global del 2007 al 2013	78
26. Radiación solar global estimada y medida en Puno.....	79
27. Radiación solar global estimada desde 2008 al 2013 en Yunguyo.	90
28. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Juli.	90
29. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Desaguadero.	91
30. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Azángaro.	91
31. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Putina.	92
32. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en llave.....	92
33. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Moho.	93
34. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Huancané.	93
35. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Capachica.....	94
36. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Crucero.....	94
37. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Masacruz.	95
38. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Capaso.	95
39. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Ananea.	96
40. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Puno.	96
41. Programa Wolfram Mathematica	97
42. Ajuste del Modelo Bristow y Campbell.....	98
43. Estación Meteorológica Vaisala SENAMHI- PUNO 2018.....	99
44. Piranómetro Kipp Zonen.....	99

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Radiación solar global en el altiplano de Puno desde 2007 al 2013.	90
2. Programa Wolfram Mathematica 10	97
3. Ajuste del Modelo Bristow y Campbell en Wolfram Mathematica.....	98
4. Fotografías	99

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo explicar el proceso de determinación de la radiación solar global y analizar su comportamiento en el altiplano de Puno durante el periodo 2007 al 2013 en las zonas de Circunlacustre, Puna húmeda y clima de altura; la investigación surge debido a la carencia de datos de radiación solar global. Se propone el modelo Bristow y Campbell para estimar la radiación solar global diaria a partir de datos de temperaturas extremas diarias registradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)-Puno y la transmitancia atmosférica máxima estimada con datos de la estación meteorológica de la escuela profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano. Así mismo, la aplicación del modelo Bristow y Campbell resulta de gran utilidad para obtener una base de datos completa de radiación solar global diaria, obteniéndose un valor máximo promedio anual de 7.2984KWh/m^2 en Masacruz y un valor mínimo promedio anual de 5.4806KWh/m^2 en Juli, tales valores son mayores de 4KWh/m^2 , y estas son muy rentables para las aplicaciones de energía solar según la Organización Latinoamericana de Energía, tales como: colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos y viviendas bioclimáticas; además estas transforman la energía solar en energía eléctrica o térmica, que podrán ayudar a resolver los problemas más urgentes de friaje o heladas que afrontan los seres humanos, los animales y plantas en las zonas alto andinas de la Región de Puno.

Palabras claves: Altiplano de Puno, Bristow y Campbell, disponibilidad de energía solar, Radiación Solar Global, temperatura máxima, temperatura mínima, transmitancia atmosférica máxima.

ABSTRACT

The present work has as objective to explain the process of determination of the global solar radiation and to analyze its behavior in the highlands of Puno during the period 2007 to 2013 in the Circunlacustrial zone, Humid Puna and high climate; this investigation arises due to the lack of global solar radiation data. The Bristow and Campbell model is proposed to estimate the daily global solar radiation from data of daily extreme temperatures registered by the National Meteorology and Hydrology Service (SENAMHI) -Puno and the maximum atmospheric transmittance estimated with data from the Meteorological Station of the Professional School of Physical Mathematical Sciences of the National University of the Altiplano. Likewise, the application of the Bristow and Campbell model is very useful to obtain a complete database of daily global solar radiation, obtaining an average annual maximum value of 7.2984 KWh/m² in Masocruz and an average annual minimum value of 5.4806 KWh/m² in Juli, such values are greater than 4 KWh/m², these are very profitable for solar energy applications according to the Latin American Energy Organization, such as: solar thermal collectors, photovoltaic modules and bioclimatic houses, they also transform solar energy into electrical or thermal energy, which can help solve the most urgent cold or frost problems faced by humans, animals and plants in high Andean areas of the Region of Puno.

Keywords: Altiplano de Puno, availability of solar energy, Bristow and Campbell, Global Solar Radiation, maximum atmospheric transmittance, maximum temperature, minimum temperature.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar se define como la radiación electromagnética que llega a la tierra desde el sol, siendo extremadamente esencial para la vida (Querino *et al.*, 2006); también, es la principal fuente de energía renovable que soporta la biosfera y estimula los procesos físicos, químicos y biológicos en la tierra, tales como la fotosíntesis y los procesos ecológicos y ambientales relacionados a la temperatura del aire y suelo, afectando la transferencia de calor por medio de la evaporación y transpiración (Silva *et al.*, 2012). La energía recibida por el sistema tierra-atmosfera es también crucial para equilibrar la energía (Manzano *et al.*, 2015).

No toda la radiación solar consigue efectivamente ingresar a la superficie terrestre, esto se debe a que interactúa con componentes atmosféricos al atravesar la masa óptica y sufre la acción de procesos de reflexión, dispersión y absorción. Así, se puede afirmar que el 51% de la radiación extraterrestre está disponible para procesos en medios físicos y biológicos, siendo la fracción que efectivamente llega a la superficie terrestre denominada radiación solar global (Beruski *et al.*, 2015).

El conocimiento preciso de la radiación solar se considera como primer paso para la evaluación de su disponibilidad y sirve para diferentes aplicaciones, como en áreas de la meteorología, climatología, hidrología, modelos de simulación de cultivos y estimación de evapotranspiración (Hassan *et al.*, 2016; Quej *et al.*, 2016), y también para la predicción de eficiencia de la energía solar fotovoltaica y térmica se necesitan datos de radiación solar global, así mismo para la ganancia de calor en edificios (Yao *et al.*, 2014).

Cuando la radiación solar global no esta disponible, se puede estimar con fórmulas empíricas, dependiendo de otras variables meteorológicas (Dumas *et al.*, 2015); algunos investigadores han desarrollado modelos empíricos que utilizan la temperatura del aire para estimar la radiación solar global, como los modelos Bristow y Campbell y Hargreaves (Oliveira *et al.*, 2014).

Según Li *et al.* (2015) los modelos empíricos para calcular la radiación solar se encuentran basados en los siguientes factores: Astronómicos (constante solar, distancia tierra-sol, declinación y ángulo de la hora), geográficos (latitud, longitud y elevación de la sitio), geométricos (ángulo acimutal de la superficie, ángulo de elevación del sol, ángulo de acimut del sol), físicos (dispersión de moléculas de aire, contenido de vapor de agua, dispersión de polvo de los constituyentes atmosféricos tales como O_2 , N_2 , CO_2 , O ; etc.), meteorológicos (radiación solar extraterrestre, temperatura de aire, precipitación, humedad relativa, efectos de nubosidad, temperatura del suelo, evaporación, reflexión, etc.).

Estudios realizados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI (2003) en Puno y Camayo *et al.*(2017) en Junín, determinaron que por su ubicación geométrica son consideradas área de alto potencial de Radiación solar global con valores de $6.36KWh/m^2$ y $5.3KWh/m^2$ respectivamente.

Al saber la importancia que tiene la aplicabilidad de la radiación solar para proyectos energéticos, se pretende conocer la aplicabilidad y veracidad del Modelo Bristow y Campbell, que se basa en la amplitud térmica por ser más típica en las estaciones meteorológicas de SENAMHI en el Altiplano de Puno.

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

El altiplano de Puno está ubicado a más de 3810 msnm y goza de bastante afluencia turística tanto nacional e internacional, por lo tanto la población y los recursos naturales están expuestos a la radiación solar global. Además, el altiplano de Puno está en la sierra por lo tanto el clima es frígido y seco dependiendo de la estación del año, por lo que se puede decir que el clima de la región de Puno es variado.

En la actualidad la estimación, cuantificación, y beneficios de la radiación solar global es desconocida por la población y no existen medios de información *insitu* para realizar consultas; así mismo, el control de los niveles de la radiación solar global tiene una importancia fundamental a nivel mundial, debido al calentamiento global así como en zonas altiplánicas como Puno, Cusco, Arequipa, etc. en los que el interés turístico o el desarrollo de actividades al aire libre como la agricultura los hacen especialmente susceptibles a los daños que la radiación solar global puede provocar en los seres vivos como seres humanos, animales y recursos naturales.

Las medidas de la radiación solar son más bien escasas desde un punto de vista histórico. De hecho, a escala global hay escasísimas series de radiación solar global, y por esta razón se ha impulsado la generación de modelos empíricos que permitan la estimación de la radiación solar global. En esta investigación se aplicó del Modelo Bristow y Campbell en base al uso de parámetros físicos como el intercambio de temperaturas tierra-atmósfera en el Altiplano de Puno en las zonas de circalacustre, Puna húmeda y Clima de altura.

1.1.1 Problema general

El estudio de la radiación solar global plantea responder a la siguiente interrogante:

- ¿De qué manera influyen los elementos climáticos en la determinación de la radiación solar global en el Altiplano de Puno?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿Cómo evaluar la determinación espacio temporal de la radiación solar global en el Altiplano de Puno durante el periodo de estudio?
- ¿Cómo estimar la radiación solar global en el Altiplano de Puno mediante la aplicación del modelo empírico Bristow y Campbell?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La radiación solar es el motor del sistema climático del planeta, resulta de vital importancia establecer su variabilidad espacial y temporal para evaluar los siguientes aspectos:

El conocimiento de la cantidad de la radiación solar global es de fundamental importancia para estudiar, planear y diseñar sistemas de aprovechamiento de energía solar (López, 2013). Así mismo, cuantificar el recurso solar disponible en una región determinada para definir procesos de instalación de sistemas fotovoltaicos y arquitectura bioclimática.

Como variable termodinámico asociado al comportamiento de la dinámica atmosférica, para la caracterización de la atmosfera y para conocer la variación temporal (Falcón, 2001). También, como variable fundamental para el desarrollo de cultivos, ecosistemas naturales, producción de energía eléctrica y el turismo e información de apoyo a las entidades de salud para prevenir futuras enfermedades asociados a los efectos nocivos a la exposición a la radiación solar.

La poca información acerca de la radiación solar ha despertado el interés a nivel mundial tanto en su cantidad y calidad, se estima que aproximadamente una de cada 500 estaciones meteorológicas en el mundo realiza medidas de radiación solar global (Delgado y Orellana, 2015). Por este motivo se aplicó el Modelo empírico Bristow y Campbell, y además se estimó la transmitancia atmosférica máxima para cada día juliano del año, de modo que nos permita estimar la radiación sola global diaria en las zonas ecológicas en el Altiplano de Puno.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

- Determinar la radiación solar global en base a elementos climáticos en el altiplano de Puno.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la determinación espacio temporal de la radiación solar global en el Altiplano de Puno.
- Estimar la radiación solar global en el Altiplano de Puno mediante la aplicación del modelo empírico Bristow y Campbell.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis general

- Los elementos climáticos influyen en la determinación de la radiación solar global en el Altiplano de Puno.

1.4.2 Hipótesis específicos

- La determinación espacio temporal de la radiación solar global puede ser evaluada en el Altiplano de Puno durante el periodo de estudio.
- El modelo empírico Bristow y Campbell permite estimar la radiación solar global en el Altiplano de Puno.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

En el presente trabajo se considera un estudio teórico y experimental sobre la estimación de la radiación solar global. Además, a continuación se resume con conceptos básicos sobre el modelo teórico y las mediciones experimentales relacionados al trabajo desarrollado.

2.1.1 Antecedentes a nivel nacional

En la región Junín, Camayo *et al.* (2017) aplicaron y validaron el modelo Bristow y Campbell para estimar la radiación solar global, obteniendo un valor de $5.3\text{KWh}/\text{m}^2$, lo cual indica un alto potencial de radiación solar global, el cual es rentable para diversas aplicaciones de energía solar. También (Camayo *et al.* (2015) desarrollaron el modelo empírico en base a parámetros físicos en una superficie horizontal para estimar la radiación solar global.

Baigorria *et al.* (2004) aplicaron el modelo Bristow y Campbell con el objetivo de estudiar la distribución de la transmitancia atmosférica en el Perú,

obteniendo un valor de 0.82 para el altiplano de Puno y aplicarlos en modelos empíricos para la determinación de la radiación solar global.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (2003), publicó el Atlas de energía solar; en la cual aplico el Modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global, obteniendo un valor promedio anual de radiación solar de 6.36KWh/m^2 , este resultado es adecuado para diseñar sistemas fotovoltaicos de acuerdo a la ubicación geográfica de la localidad donde deban ser instalados.

2.1.2 Antecedentes a nivel internacional

Antón *et al.* (2017) presentaron un estudio que se centra en el análisis de la radiación solar global diaria determinada a partir de la insolación solar en Madrid, España, entre 1887-1950. También se analiza la relación entre la radiación solar global y la nubosidad, así mismo la reconstrucción de la radiación solar global a largo plazo fue con tendencia negativa de -13KJ/m^2 por año en el periodo 1887 a 1915 y con tendencia positiva de $+13\text{KJ/m}^2$ por año en el periodo 1916 a 1950, ambos estadísticamente significativos en el nivel de confianza del 95%.

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

propuesto fue eficaz para predecir el promedio mensual de radiación solar global con un ajuste de correlación de 0.967.

La investigación de Delgado y Orellana (2015) pretende dar a conocer la aplicabilidad del modelo Bristow y Campbell para la determinación de la radiación solar global diaria en el Cantón Cuenca, Ecuador. Estimaron que la radiación solar global en el año 2014 fue de $15,367\text{MJ}/\text{m}^2$.

Román *et al.* (2014) utilizaron un método para la determinación de series de radiación solar utilizaron un método basado en simulaciones sin nubes y expedientes de duración del sol. Estos resultados fueron validados con datos experimentales, proporcionando un buen ajuste (con un error medio de 0.4% y error cuadrático medio de 5.8%). Los promedios mensuales de radiación modelado y medido presentaron un error raíz cuadrático medio de 3%. La radiación solar mostró estadísticamente una significativa disminución anual de 1950 a mediados de la década de 1980 (1,7%) y un aumento significativo desde mediados de 1980 hasta 2011 (1,6%). Así mismo Álvarez *et al.* (2014); Pérez-Burgos *et al.* (2015); Bengulescu *et al.* (2016); Velazco *et al.* (2015); Rojas *et al.* (2017), reconstruyeron la radiación solar global en base a modelos empíricos.

Muñoz *et al.* (2013) explicaron el proceso de reconstrucción de toda la serie, obteniendo a partir de datos originales los valores horarios, diarios y mensuales. Se analizó la evolución de la radiación solar en Girona desde principios de 1990 hasta 2013, enmarcando el incremento de la radiación solar global observado en España en este periodo. En este estudio

encontraron un incremento de 3.6W/m^2 por década y en verano con tendencia de 9.1W/m^2 .

Oesterle H. (2001) determinó la radiación solar global en Alemania en base a datos de insolación solar y temperaturas obteniendo 1.6MJ/m^2 y 3.0MJ/m^2 respectivamente, estos datos reconstruidos fueron aplicados en la agricultura y modelos de hidrología. Steinmetz *et al.* (2013) también los aplicaron en el cultivo de arroz en Matto Grosso, Brasil.

Cañada (1988) propone el modelo empírico Reddy para determinar la radiación solar global en Valencia, España durante 11 años, también compara datos estimados y medidos de radiación solar global en el Centro Meteorológico Levante, y muestran un valor promedio anual de 4.23KWh/m^2 con error relativo porcentual del 5% entre los datos medidos y estimados.

Bristow y Campbell (1984), propusieron un modelo empírico para estimar la radiación solar global en función de las temperaturas extremas y radiación extraterrestre, encontraron una relación entre 70% y 90% entre la radiación solar global y las temperaturas extremas. Finalmente Rojas *et al.* (2016) y Chang *et al.* (2017) encontraron una relación estrecha entre la amplitud térmica y la radiación solar global.

2.2 EL SOL

La fuente de energía para la vida proviene del sol, que proporciona una fuente estable y confortable de calor y luz (Hartmann, 2016). El sol es una esfera gaseosa compuesta primordialmente por hidrógeno (H) y Helio (He), su interior es considerado como un enorme reactor nuclear y la temperatura central es de

15×10⁶ a 40×10⁶ K (Iqbal, 1983). Con un radio de aproximadamente 6.96×10⁵ km y una masa aproximada de 1.99×10³⁰ kg (Liou, 2002; Hartmann, 2016). La superficie del sol parece estar compuesta de gránulos con dimensiones de 1000 a 3000 km. Otra de las características de la superficie solar son pequeñas áreas oscuras llamadas poros y otras más grandes llamadas manchas solares, que varían en tamaño. La capa exterior de la capa convectiva se llama fotosfera, y es de baja densidad de 10⁴ kg/m³ y se muestra en la Figura 1.

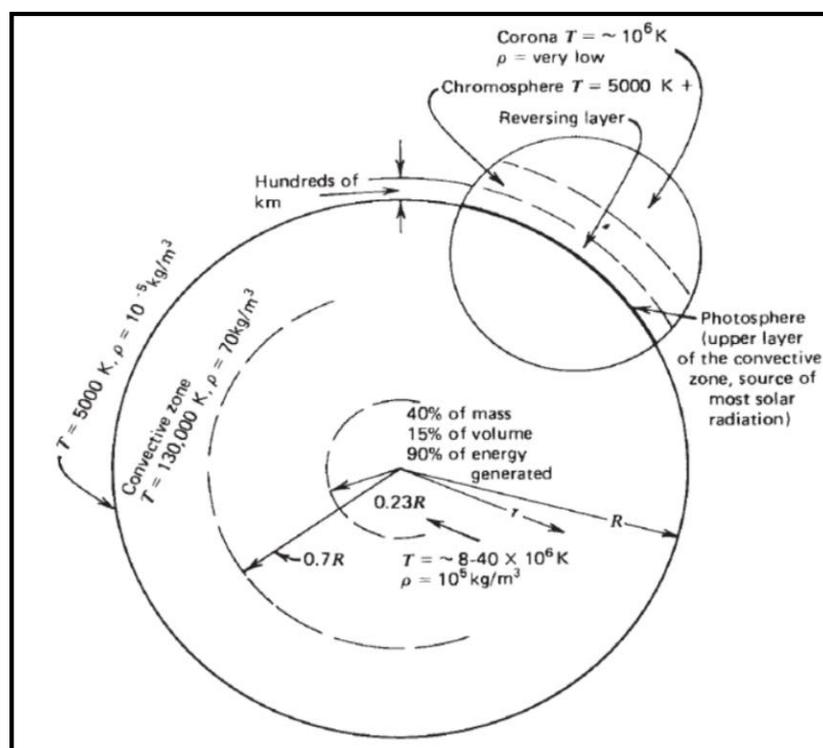


Figura 1. Estructura del sol.

Fuente: (Duffie y Beckman, 2013).

2.3 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar que llega a la superficie de la atmosfera terrestre procede del sol es la principal fuente de energía a partir de la cual se desarrollan todos los procesos en el sistema tierra-atmosfera-océano (Díaz, 2005), como se muestra en la Figura 2, esta es vital en los procesos biológicos (fotosíntesis), ecológicos

(modificación de ecosistemas) y fotoquímicos (formación y descomposición de contaminantes) (Antón *et al.*, 2017; Wild, 2012), siendo el principal responsable del ciclo del agua, los cambios de presión, la formación de vientos, y de garantizar la temperatura ambiente en el globo terráqueo, haciéndolo habitable (Izquierdo, 2010). La proporción de energía que este sistema recibe del sol es superior al 99.9%. Además, es el origen del resto de fuentes energéticas de nuestro planeta, a excepto de la energía geotérmica y la energía nuclear (Pomares, 2012).

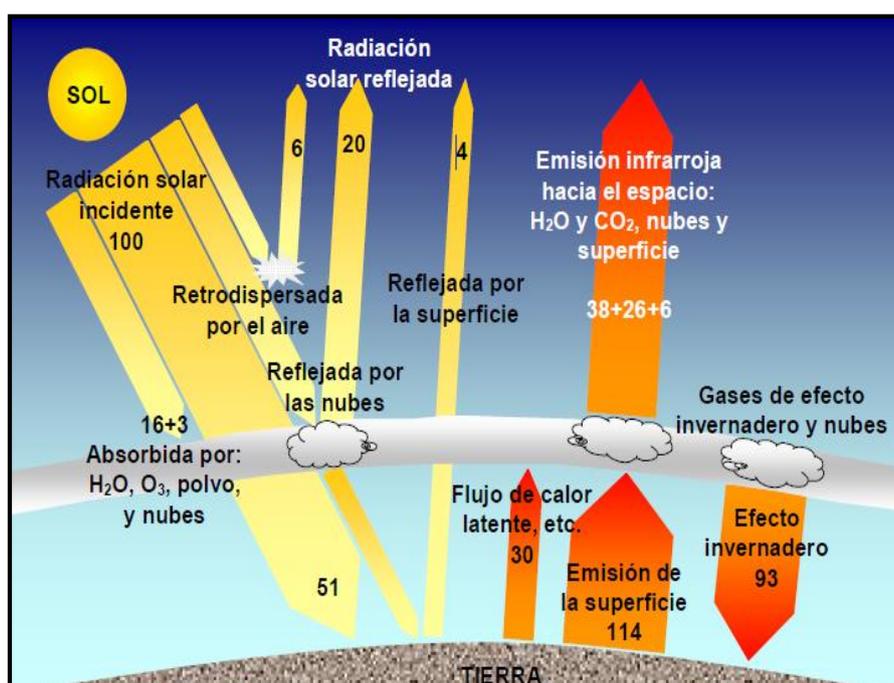


Figura 2. Balance radiativo global de la tierra y la atmósfera.

Fuente: (Díaz, 2005).

El balance medio de energía para el sistema climático mundial muestra que la superficie de la tierra absorbe aproximadamente la mitad de la radiación solar incidente, la cual se encuentra situada entre las longitudes de onda 0.2 a 0.4 μm (espectro de onda corta). Dicha radiación, calienta la superficie de la tierra que,

a su vez, emite energía en la región infrarroja de 4 a 100 μm (espectro de onda larga) (Díaz, 2005).

La variación de la radiación solar, cuya contribución al calentamiento global desde el comienzo del periodo industrial ha sido seis veces menor que de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Barros, 2005). Además la estimación de la actividad solar para los próximos cien años es uno de los problemas actuales en Física Solar debido al posible suceso de un futuro de la disminución solar, probablemente tendrá un impacto en el clima de la tierra (Velasco *et al.*, 2015).

Cuadro 1. Conversión de unidades en solarimetría

Unidad de Origen	Factor de corrección multiplicar por	Unidad de destino
kW h/m ²	85,984194	cal/cm ²
	3,6	MJ/m ²
MJ/m ²	277,777778	W h/m ²
J/cm ²	2,777778	W h/m ²
	0,238845	cal/cm ²
kJ/m ²	0,0238845	cal/cm ²
J/m ²	0,000277778	W h/m ²
Ly = cal/cm ²	11,622447	W h/m ²
	0,0418682	MJ/m ²

Fuente: (SENAMHI, 2003).

2.3.1 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético está formado por el conjunto de radiaciones monocromáticas que componen la radiación electromagnética (Antón *et al.*, 2017). Así mismo, las cargas eléctricas estacionarias producen campos eléctricos y las cargas eléctricas en movimiento campos eléctricos y

magnéticos. Los cambios cíclicos de estos campos producen radiación electromagnética, que consiste en una oscilación perpendicular de un campo eléctrico y magnético. La radiación electromagnética transporta energía de un punto a otro y se mueve a la velocidad de la luz (siendo esta un tipo de radiación electromagnética). Independientemente de su frecuencia y longitud de onda todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de la luz (C) igual 299792km/s (Casal , 2010).

Se debe diferenciar entre los espectros de radiación solar y terrestre, ya que el primero es la radiación emitida por el sol, y el segundo emitida por el planeta tierra debido a su temperatura. Ambos espectros abarcan diferentes intervalos de longitud de onda (λ), como se muestra en la Figura 3. El espectro de radiación terrestre tiene importantes aplicaciones en las técnicas de teledetección y determinación de componentes atmosféricos (Román, 2010); además, la radiación UV constituye el 8% de la radiación solar extraterrestre (Antón, 2007).

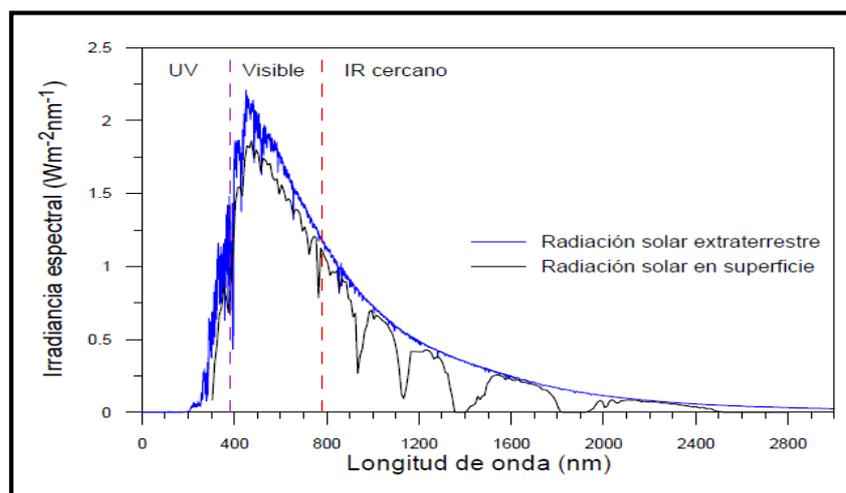


Figura 3. Espectro de radiación solar extraterrestre y en la superficie.
Fuente: (Román, 2010).

El espectro de radiación solar se divide en tres intervalos según sus características, ultravioleta (UV, 100-400nm), Visible (400-720nm), e infrarrojo-cercano (720-3000nm) (Antón, 2007) como se muestra en la Figura 4. El intervalo visible es el único perceptible por el ojo humano, y corresponde a la franja del espectro solar en los valores más altos de irradiancia, siendo el máximo el espectro extraterrestre a 475nm (azul). El espectro infrarrojo abarca las longitudes de onda menos energéticas del espectro solar (Román, 2010).

En función de los efectos biológicos producidos por la radiación UV se distinguen tres zonas en el espectro ultravioleta. La UVC comprende las longitudes de onda (100nm-290nm), UVB comprende (290nm-320nm) y UVA (320nm-400) (Antón, 2007).

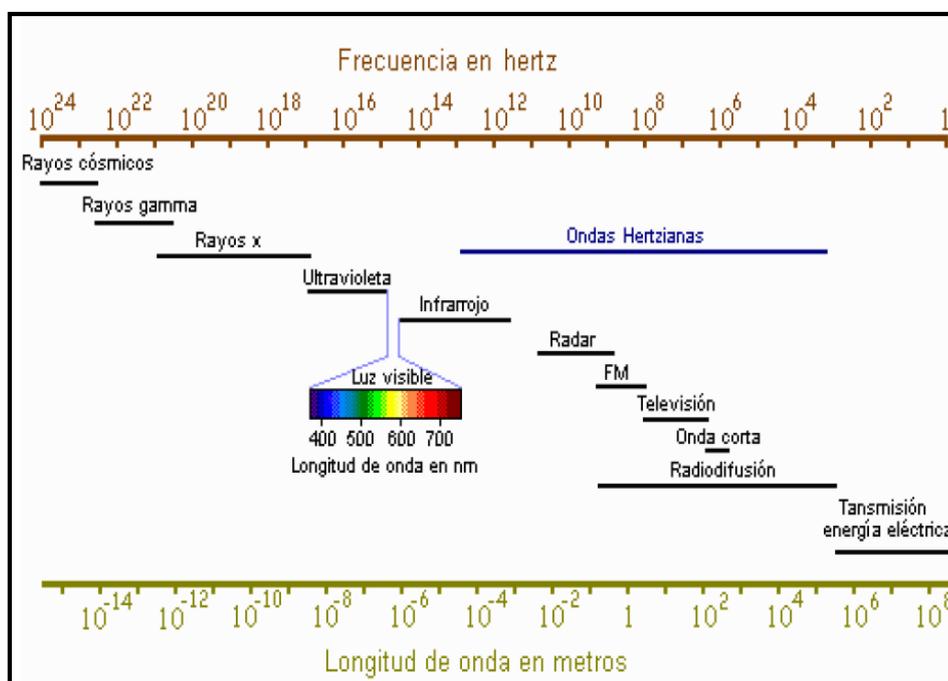


Figura 4. Espectro electromagnético.

Fuente: (Antón, 2007).

2.4 CAMBIO CLIMÁTICO

La radiación solar es la principal fuente de energía para el sistema Tierra-atmósfera y directa o indirectamente es la responsable de todos los fenómenos que afectan a la meteorología y climatología de dicho sistema. En promedios largos de tiempo la superficie terrestre cede a la atmósfera una cantidad de energía igual a la que absorbe, así cualquier factor que altere la composición de la atmósfera o la energía emitida por el sol, modifica el balance radiactivo neto del sistema tierra-atmósfera y por lo tanto afecta el clima (Díaz, 2005).

El cambio climático es el principal problema ambiental de nuestro tiempo, y es provocado por determinados gases, cuyas concentraciones atmosféricas crecen con perfil exponencial. Sus consecuencias se dejaron sentir en toda la biósfera, desde los fenómenos meteorológicos al ser humano, creando un panorama incierto que exigirá una rápida adaptación de todas las especies (Velázquez, 2005).

En el tercer panel intergubernamental de Cambio climático, IPCC el 2001, se recogieron las principales consecuencias observadas de este desequilibrio como el incremento de la temperatura promedio global de la superficie en $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ y la razón promedio de elevación del mar en el rango de 1.0 a 2.0 mm/año a partir de la segunda mitad del siglo XX (Díaz, 2005). También se concluyó que el calentamiento global observado en el siglo XX tiene un importante componente de origen antrópico (Barros, 2005) y la mejor manera de reducir el calentamiento global es, sin duda, reducir las emisiones antropogéneas que producen los gases invernaderos. Pero la economía mundial es adicta a la energía producida principalmente por fósiles (Ming *et al.*, 2014).

Por todo esto se hace de vital importancia el estudio de factores que controlan y modifican el clima, porque en definitiva se modifican las condiciones de vida sobre el planeta.

2.4.1 El clima

Conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan las condiciones habituales o más probables de un punto determinado de la superficie terrestre. La climatología es la ciencia que estudia el clima y sus variaciones a lo largo del tiempo. Aunque utiliza los mismos parámetros de la meteorología, su objetivo es distinto, ya que no pretende hacer previsiones inmediatas, pues estudia las características ambientales a largo plazo (Pomares, 2012).

El estudio del clima requiere amplios intervalos y series temporales largos (frente a hechos meteorológicos puntuales), por lo que siempre se necesita tiempo para poder llegar a conclusiones con mayor rigor (Velázquez, 2005).

2.4.2 La meteorología

Es la ciencia que se encarga del estudio de los fenómenos, las leyes y el estado de la atmósfera en las capas bajas, donde se desarrolla la vida de las plantas y animales. Uno de sus objetivos es el conocimiento de dichos fenómenos orientados a su predicción (Pomares, 2012).

El estudio de la radiación solar incidente en la superficie terrestre tiene implicaciones directas en la meteorología, especialmente sobre estudios sobre el clima y la variabilidad climática (López, 2013).

A pesar de que la radiación solar es una variable de suma importancia, como se ha comentado anteriormente, la meteorología ha prestado mayor importancia al estudio y predicción de otras variables meteorológicas, entre ellas la presión, la temperatura, la humedad y precipitación. De hecho, es común ver en las partes meteorológicas la cuantificación de dichas variables con magnitudes exactas y precisas. Sin embargo, en el caso de la radiación solar la variable con mayor relación directa y de la que históricamente se dan estimaciones es el nivel de nubosidad que establece únicamente seis valores discretos como se puede observar en la Figura 5, realizada en las predicciones por AEMet (Agencia Estatal de Meteorología).



Figura 5. Clasificación del estado de cielo realizada.

Fuente: (Pomares, 2012).

Los resultados obtenidos por Liou (1976), indican que las nubes nimbo estratos y cúmulos nimbo reflejan 80 a 90% y absorben 10 a 20% de la radiación solar incidente sobre ellas. La reflexión y absorción de los cúmulos

de espeso igual a 0,45km varían de 68 a 85% y de 4 a 9% respectivamente. Una nube estrato fina de espeso 0,1km, refleja cerca de 45 a 72% y absorbe cerca de 1 a 6% de flujo de radiación solar incidente. Una nube alto estrato de espesor 0,6km tiene una reflexión variante entre 55 a 77% y una absorción de 30 a 40%.

2.5 IMPORTANCIA DEL REGISTRO DE LA RADIACIÓN SOLAR

El conocimiento de la cantidad de la radiación solar global y sus componentes (la radiación directa y difusa) es de fundamental importancia para estudiar, planear y diseñar sistemas de aprovechamiento de energía solar (López, 2013). Así como, para la caracterización de la atmosfera y para conocer la variación temporal (Falcón *et al.*, 2001), también es importante en la investigación de energía solar y los programas de desarrollo que se están implementando (Cañada, 1988).

En muchas zonas del mundo, las mediciones de radiación solar no se encuentran fácilmente disponibles (Almorox *et al.*, 2008), a esto se suman las limitaciones financieras, técnicas e institucionales. Además, no se cuenta con registros de sus componentes (radiación directa y difusa) los cuales son requeridos para diversos propósitos, como establecer balances energéticos útiles para el aprovechamiento de energía solar (López, 2013).

El conocimiento de la disponibilidad de los recursos solares, es requerido usualmente por ingenieros, arquitectos, agricultores, hidrólogos y en diversas aplicaciones. Sin embargo, la escasez de su disponibilidad sugiere la búsqueda de métodos y procedimientos para su estimación.

2.6 LA MODELACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

La modelación de variables meteorológicas es usada extensivamente en la climatología, no solamente como una alternativa para su medición, sino también para abordar o aprovechar el entendimiento de los procesos físicos y además como una herramienta de la predicción de fenómenos meteorológicos.

Según Linacre (2005), hay cuatro casos para los cuales es posible estimar los datos climáticos de un lugar.

- Cuando se requieren datos de fechas anteriores en las cuales el dato no fue medido, o se requieren datos a futuro.
- Cuando es necesario estimar los valores, en lugares donde no existen equipos de medición.
- Cuando la estimación de un dato es útil para comprobar la veracidad de algunas mediciones sospechosas.
- Por último, cuando la posibilidad de obtener una estimación precisa y consistente, por medio de variables independientes, demuestra una comprensión de la física del proceso de estudio.

2.7 CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES SOLARES

Se requiere el conocimiento de la energía incidente para su captura. La disponibilidad de esta energía se modifica en base a su intensidad, distribución y dirección, ambas mediante días y años, factores que cuando son conocidas se convierten en posibilidades de desarrollo en muchos sistemas solares (López, 2013).

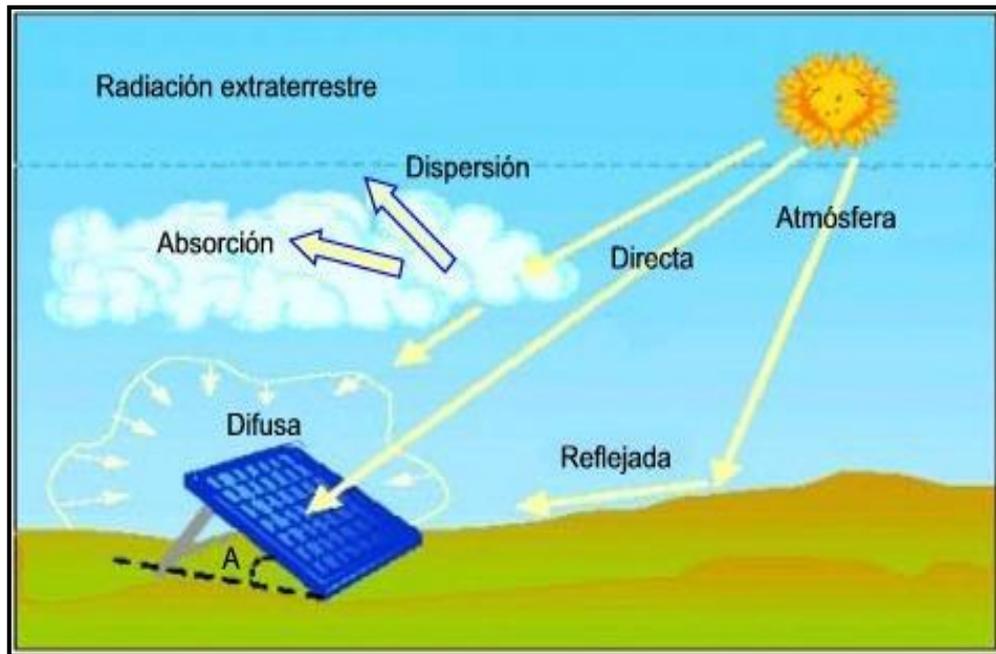


Figura 6. Radiación solar recibida por los sistemas de aprovechamiento de energía.

Fuente: (López, 2013).

Es necesario desarrollar métodos para estimar la radiación solar global a partir de datos meteorológicos disponibles con mayor facilidad tales como las temperaturas extremas. En el presente trabajo se utilizó una base de datos de radiación solar y variables meteorológicas disponibles para el Altiplano de Puno (Latitud -15.83°C , longitud -70.03°C y altitud 3827 msnm) y se utilizó el modelo Bristow y Campbell para estimar la radiación solar global diarios, mensuales y anuales en base a temperaturas máximas y mínimas en la ciudad y el Altiplano de Puno en la zona circunlacustre, puna húmeda y clima de altura. También se estimó la transmitancia atmosférica máxima, que indica el grado de nubosidad en el altiplano de Puno.

2.8 SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL

En diversos estudios como el realizado sobre perspectivas de la energía en el mundo (International Energy Agency, 2011), en su prospectiva de 2011, estima que la proporción de los combustibles fósiles en el mercado global de la energía primaria disminuirá del 81% registrados en 2010 a un 75% en 2035. Según se puede observar en la Figura 7 el gas natural será la única fuente primaria de origen fósil que aumente su presencia en la combinación energética mundial en el periodo que va hasta 2035 (Díaz, 2013).

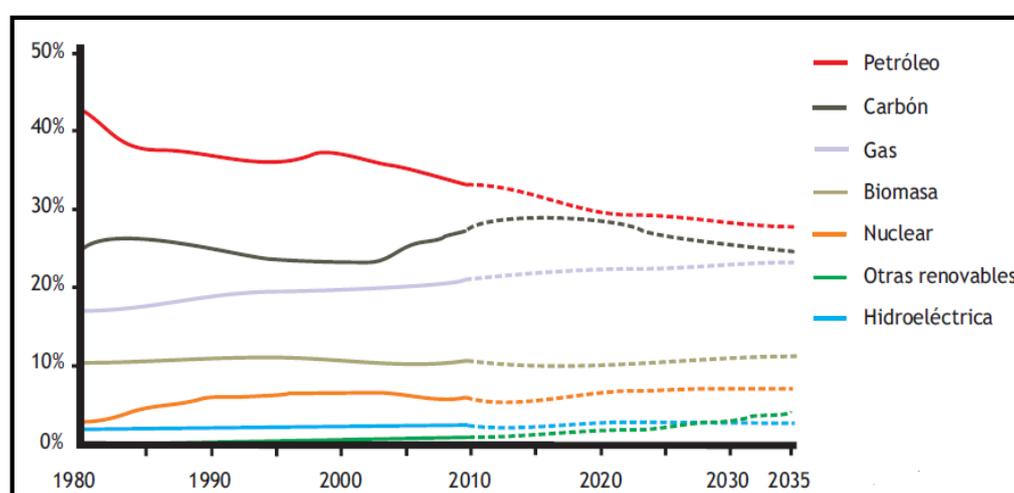


Figura 7. Proporción de fuentes primarias en la demanda energética.

Fuente: (Díaz, 2013).

Además, en el sector eléctrico, las tecnologías basadas en energías renovables, encabezadas por la energía hidroeléctrica y la eólica, representan la mitad de la nueva capacidad que se instale para responder a la creciente demanda. Como se observa en la Figura 8, el peso de las energías renovables será cada vez más importante dentro del conjunto de las diferentes energías primarias a emplear. De ellas, la energía solar en sus diferentes variantes es en la actualidad una de las opciones más sólidas para complementar y posiblemente sustituir a las fuentes primarias convencionales de energía.

En cualquier caso, su aportación en el futuro parece ser cada vez mayor.

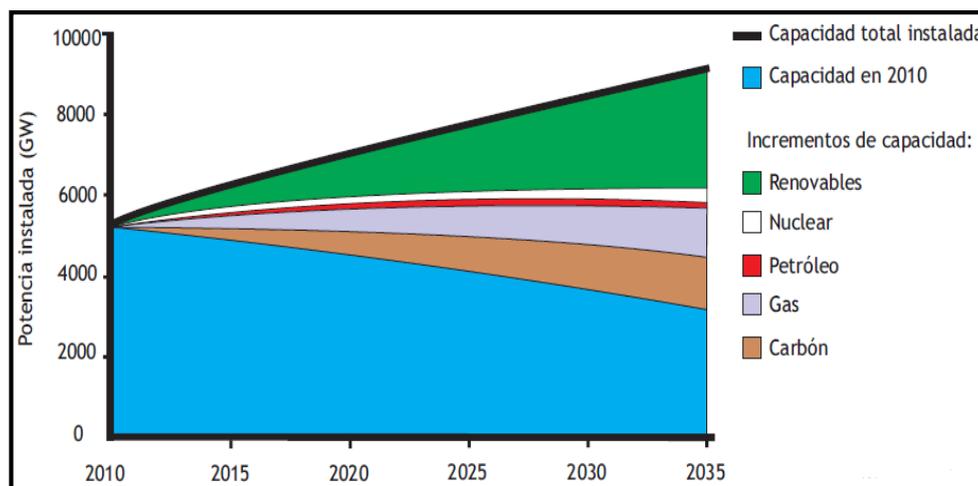


Figura 8. Potencia instalada para generación de energía.

Fuente: (Díaz, 2013).

La competitividad en costes de las energías renovables usadas para generación eléctrica es variable por ejemplo la biomasa, geotérmica y eólica están próximas a ser competitivas con las fuentes convencionales. En cuanto a la solar, aún necesita el apoyo en su comercialización, si bien la disminución de costes debida a la investigación y su desarrollo, además de la competencia entre productores, está impulsando fuertemente esta fuente energética. Así, el coste de panel solar fotovoltaico instalado se redujo un 42% desde 2009 debido a competencia entre fabricantes y la incorporación de China al mercado, la industria solar fotovoltaica espera ser competitiva, al menos en su lucha con el gas como fuente para cubrir pico de demanda, a partir del 2015 (Díaz, 2013).

2.9 FACTORES MODULARES DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar que llega a la superficie terrestre está controlada por dos tipos de factores: geométricos y atmosféricos. Los primeros causan variaciones en la radiación solar extraterrestre, mientras que los segundos modifican la radiación solar extraterrestres durante su paso por la atmosfera (Román, 2010).

2.9.1 Factores geométricos

Los factores geométricos, o astronómicos son los siguientes:

- **Distancia tierra –sol (r)**

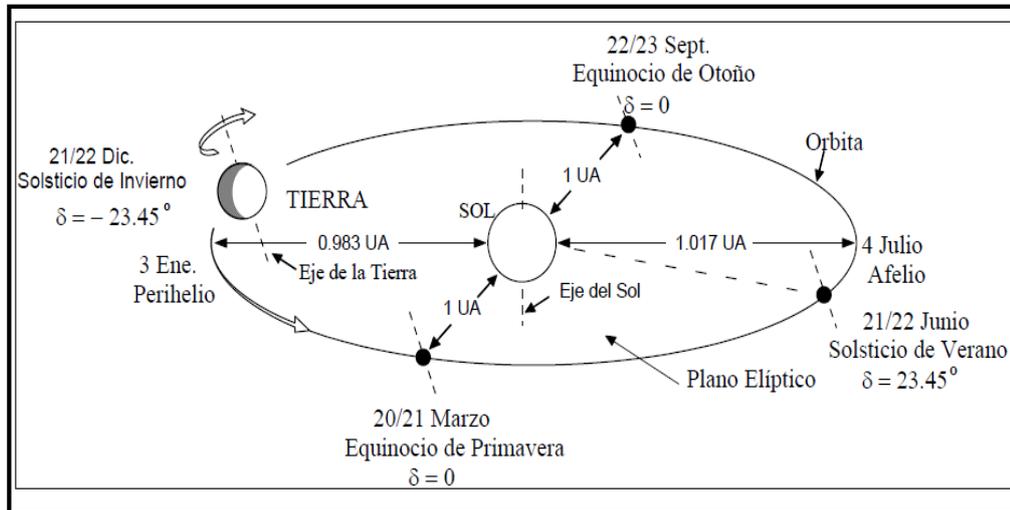


Figura 9. Órbita de la tierra alrededor del sol.

Fuente: (Román, 2010).

La tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica, con el sol ubicado en uno de sus focos (Rodríguez *et al.*, 2004), como se muestra en la Figura 9, la distancia media tierra-sol r_0 se denomina unidad astronómica cuyo valor es $1,496 \times 10^8 \text{ km}$ (Fu, 2015). La distancia mínima tierra-sol es alrededor de 0.983AU, en el paso por el punto de la órbita terrestre más próximo al sol, denominado perihelio ocurre (aproximadamente el 3 de enero), y un valor máximo de 1.017AU en el paso por el afelio, punto de la órbita terrestre más alejado del sol ocurre aproximadamente el 4 de julio (Román, 2010).

- **Factor de Corrección (E_0)**

Es conveniente expresar la distancia tierra-sol en una forma matemática simple, para este propósito se han desarrollado una serie de expresiones

matemáticas de diversa complejidad. Tradicionalmente la distancia tierra-sol (r) se expresa mediante una expansión de términos de series de Fourier con un número determinado de coeficientes. Con error máximo de 0.0001, Duffie y Beckman (2013) han utilizado la ecuación (2.1) para evaluar la relación r_0 y r , en función del día del año d_n .

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0,033 \cos \left[\frac{2\pi d_n}{365} \right] \dots\dots\dots (2.1)$$

Dónde: d_n corresponde al número del día Juliano del año ($1 \leq d_n \leq 365$), variando desde 1 para primero de enero, hasta 365 para el 31 de diciembre.

- **Coordenadas Geográficas:** Las coordenadas geográficas de un lugar de estudio están representadas por la latitud (grados), longitud (grados) y altitud (metros); donde la latitud es el ángulo entre el estudio de la posición del ecuador y la longitud es el ángulo entre el meridiano de la posición del estudio con el meridiano (El Mghouchi *et al.*, 2016).
- **Declinación (δ):** El plano de revolución de la tierra alrededor del sol se denomina eclíptica. La tierra a su vez gira, alrededor de su propio eje, el cual se encuentra inclinado con respecto a la normal al plano de la eclíptica con un ángulo constante de 23.27° . Debido a esta inclinación del eje de la tierra, la cantidad de radiación solar recibida durante el día en un punto determinado de la tierra varía a lo largo del año, dando lugar a los cambios estacionales. El ángulo entre el eje polar y la normal al plano elíptico permanece invariable, al igual que el formado entre el plano ecuatorial de la tierra y el plano eclíptico. Sin embargo, el ángulo que forma la línea que une los centros del sol y la tierra con el plano ecuatorial

terrestre, denominado declinación, varía a lo largo del año desde 23.27° en el solsticio de verano hasta los -23.27° en el solsticio de invierno, haciéndose cero en los equinoccios de primavera y otoño. Al igual que la distancia tierra-sol, diversos autores han estudiado técnicas para el cálculo de la declinación, siendo una de ellas obtenida por Perrín de Brichambaut como se muestra la ecuación (2.2):

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen} \left[\frac{2\pi d_n}{365} - 1,39 \right] \dots \dots \dots (2.2)$$

- **Cenit (θ_z):** El ángulo solar cenital es el complemento de la altura solar, es el factor principal que controla la variación de radiación durante el día, cuanto menor sea (θ_z), mayor inclinación tendrá el solar y los rayos solares llegarán más perpendiculares sobre la superficie horizontal terrestre (mayor flujo radiactivo). A medida que crece el (θ_z), el flujo de radiación que llega al plano horizontal terrestre es menor, hasta llegar al límite de (θ_z) igual a 90°, cuando el sol desaparece por el horizonte, y la radiación solar recibida es nula (Antón, 2007).

La relación trigonométrica entre el sol y una superficie horizontal de la tierra viene dada por la ecuación (2.3):

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \text{cos} \delta \cdot \text{cos} \phi \cdot \text{cos} \omega = \text{sen} \alpha \dots \dots \dots (2.3)$$

Dónde:

δ : ángulo de declinación; ϕ : latitud local; ω : ángulo horario

- **Ángulo horario (ω):** Es el ángulo que forma con respecto al polo norte celeste, el meridiano local y el meridiano solar. Por tanto, es igual a 0 en

el mediodía solar, y aumenta 15° por cada hora desde el mediodía, siendo positivo por la mañana y negativo por la tarde. Para una posición geográfica dada, las relaciones trigonométricas entre el sol y una superficie horizontal son conocidas (Aburto, 2013).

Estos son como sigue:

De la ecuación (2.3), se obtiene:

$$\cos\theta_z = \text{sen}\delta \cdot \text{sen}\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega$$

Despejando $\cos\omega$, cuando $\theta_z = 90^\circ$, se obtiene:

$$\cos\omega = -\frac{\text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta}{\cos\varphi \cdot \cos\delta}$$

El ángulo horario se puede determinar con la ecuación (2.4):

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \dots \dots \dots (2.4)$$

Es necesario señalar que la diferencia del signo representa el ángulo horario correspondiente al orto y ocaso del sol, donde el signo negativo corresponde a la salida del sol por el horizonte. De esta manera, el ángulo horario de cada uno de estos puntos para una superficie horizontal corresponde a las ecuaciones (2.5) y (2.6):

$$\omega = -\cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\omega = +\cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \dots \dots \dots (2.6)$$

El número de horas del sol en un día, o longitud del día en horas, vendrá dado por la ecuación (2.7):

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \dots \dots \dots (2.7)$$

2.9.2 Factores atmosféricos

La atmósfera no se comporta como un “filtro homogéneo” si no que ocurren múltiples fenómenos de difracción, reflexión, absorción y adsorción (Falcón *et al.*, 2001); así mismo, dispersión por aerosoles, CO_2 , ozono, vapor de agua, entre otros; causados por diferentes agentes atmosféricos y contaminantes.

- **Ozono (UD):** El ozono es un gas necesario para la existencia de la vida en nuestro planeta (Antón, 2007), está presente de forma natural en la atmósfera terrestre. Cada molécula de Ozono está formada por tres átomos de Oxígeno (O_3) y se encuentra principalmente en dos regiones de la atmósfera. Aproximadamente el 10% (de 20 a 100 moléculas por cada mil millones de moléculas de aire) se encuentra en la tropósfera que es la región más cercana a la superficie (hasta los 10-16km s.n.m), es perjudicial para la salud. El resto de Ozono (90%: 12 moléculas por millón de moléculas de aire) está ubicado en la estratósfera, a 50 km de altitud, y su función es de vital importancia al absorber una gran cantidad de radiación solar perjudicial para los seres vivos. A la gran cantidad de ozono en la estratósfera, se la conoce como la capa de ozono. El ozono troposférico se forma debido a los hidrocarburos y gases contaminantes, mientras que el ozono estratosférico se debe a la radiación solar y el oxígeno molecular en la capa atmosférica (Román, 2010).

- **Aerosoles:** Son suspensiones de partículas líquidas y sólidas de la atmósfera, excluyendo nubes y precipitaciones. Los tamaños de partículas de aerosol son desde 10^{-4} a $10\mu\text{m}$. La gama visual puede variar de algunos metros a 200km, dependiendo de la proximidad de las fuentes y condiciones atmosféricas. Los aerosoles dispersan y absorben la radiación solar. Las emisiones antropogénicas globales de sulfatos, compuestos orgánicos y carbón negro que incluso superan las fuentes, una de las perturbaciones más grande de carga global de aerosoles es debido a las actividades humanas que puede modificar significativamente los climas globales (Fu, 2015).
- **Nubes:** Las nubes son masas formadas por pequeñas gotas de agua o cristales de hielo suspendidos en el aire. La radiación solar que incide sobre las nubes sufre el fenómeno de dispersión de Mie. A diferencia de la dispersión de Rayleigh, la dispersión de Mie es independiente de la longitud de onda, por lo que dispersa luz blanca en el rango visible. Este efecto se produce para partículas de mayor tamaño que en el caso de Rayleigh, y su fundamento también reside en las leyes de Maxwell. La luz dispersada toma las direcciones señaladas, variando según el tamaño de la partícula en la que incide. Por lo tanto, la atenuación de radiación causada por las nubes se debe a este fenómeno (Román, 2010). Las nubes cubren regularmente alrededor del 65% de la tierra, son de varios tipos. Algunos como los cirros en los trópicos y estratos cerca de las zonas costeras y en el ártico son climatológicamente persistente. Al igual que los aerosoles, las nubes muestran variaciones temporales. Las nubes son el regulador más importante de la radiación solar (Fu, 2015).

- **Albedo:** Definido como la relación de la radiación reflejada sobre la radiación entrante, depende de la naturaleza de la superficie, el ángulo zenital solar y la longitud de onda. Para una superficie de agua el albedo es aproximadamente 0.06, mientras para nieve el albedo es aproximadamente 0.6-0.8. El albedo en el hielo es alrededor de 0.4. Dado que grandes áreas de tierra están cubiertas por agua, nieve y hielo, los cambios en la capa de nieve y hielo marino pueden tener impactos significativos en el albedo global. Las superficies de tierra desnudas tienen albedo de superficie típico de 0.1-0.35, con el valor más alto para la arena del desierto. El albedo en superficies de vegetación, caen en el rango de 0.1-0.25 (Fu, 2015). Sin embargo, la nieve fresca refleja alrededor de un 80% de los rayos UV, la arena también refleja alrededor de un 25% la radiación UV. Se destaca que la radiación UV reflejada es de las principales fuentes de exposición al ojo. Efectos agudos, tales como ceguera de nieve; fotoqueratitis mientras se broncea en la playa (Quiñones, 2012).
- **Masa óptica:** La densidad de la atmósfera multiplicada por la trayectoria longitudinal representa la masa de una sustancia en una columna para una determinada sección transversal. A esta definición se le denomina comúnmente como la masa óptica (Román, 2010).

2.10 CONSTANTE SOLAR

El conocimiento del valor de la constante solar es fundamental para medir la cantidad de radiación solar que llega a la frontera exterior que limite la atmósfera. Se conoce como constante solar a la cantidad de radiación solar incluidas todas las longitudes de onda, por unidad de área y tiempo, sobre una superficie

perpendicular a los rayos solares localizada fuera de la atmosfera terrestre a la distancia media entre el sol y la tierra.

La potencia total radiada por el sol es igual a la emitida, multiplicada por la superficie, lo que se muestra en la ecuación (2.8):

$$P_s = 4\pi R_s^2 \sigma T^4 \dots\dots\dots(2.8)$$

Dónde: R_s es el radio del sol, T la temperatura del sol y σ es la constante de Stefan-Boltzman.

La radiación solar llega a la tierra distribuida uniformemente sobre una superficie esférica centrada en el sol de radio r_0 que indica la distancia media entre la tierra y el sol. La constante solar I_{sc} depende de la potencia que llega a la tierra y el área de la superficie esférica (Delgado y Orellana, 2015) y se muestra en la ecuación (2.9):

$$I_{sc} = \frac{P_s}{4\pi r_0^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

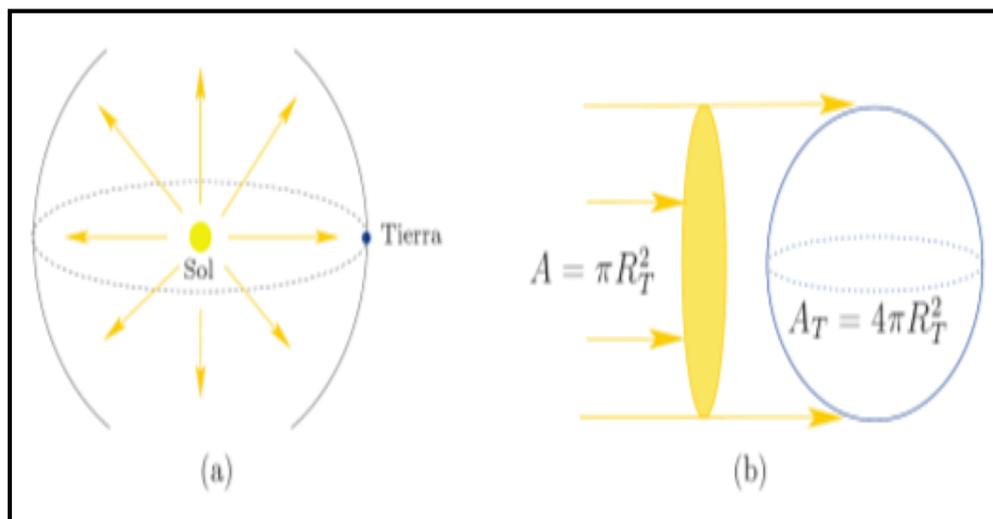


Figura 10. Distribución de la radiación solar.

Fuente: (Delgado y Orellana, 2015).

En la Figura 10, (a) muestra la radiación solar distribuida uniformemente sobre la esfera de radio igual a la distancia media del sol y la tierra y (b) los rayos solares que llegan a la Tierra paralelamente y se distribuyen sobre la superficie A_T que es cuatro veces mayor que la sección transversal.

El valor promedio de la constante solar se encuentra en $1367\text{W}/\text{m}^2 \pm 7\text{W}/\text{m}^2$, sin embargo puede aumentar a $1397\text{W}/\text{m}^2$ en el perihelio y disminuir a $1308\text{W}/\text{m}^2$ en el afelio (Delgado y Orellana, 2015).

2.11 RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

La radiación que llega al tope de la atmósfera procedente del sol se denomina radiación solar extraterrestre (Antón, 2007). La energía recibida por unidad de área y unidad de tiempo sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de los rayos solares situadas inmediatamente fuera de la atmósfera, o radiación extraterrestre, se encuentra realmente sometida a dos fuentes de variación.

A partir del análisis de datos se observa que el espectro solar está sujeto a fluctuaciones continuas debidas a la actividad solar, encontrándose variaciones en la radiación total emitida por orden de $\pm 1,5\%$. Por otro lado, las variaciones en las distancias tierra-sol son otra fuente de variación de la radiación extraterrestre, que no es ya despreciable (Castro, 1986).

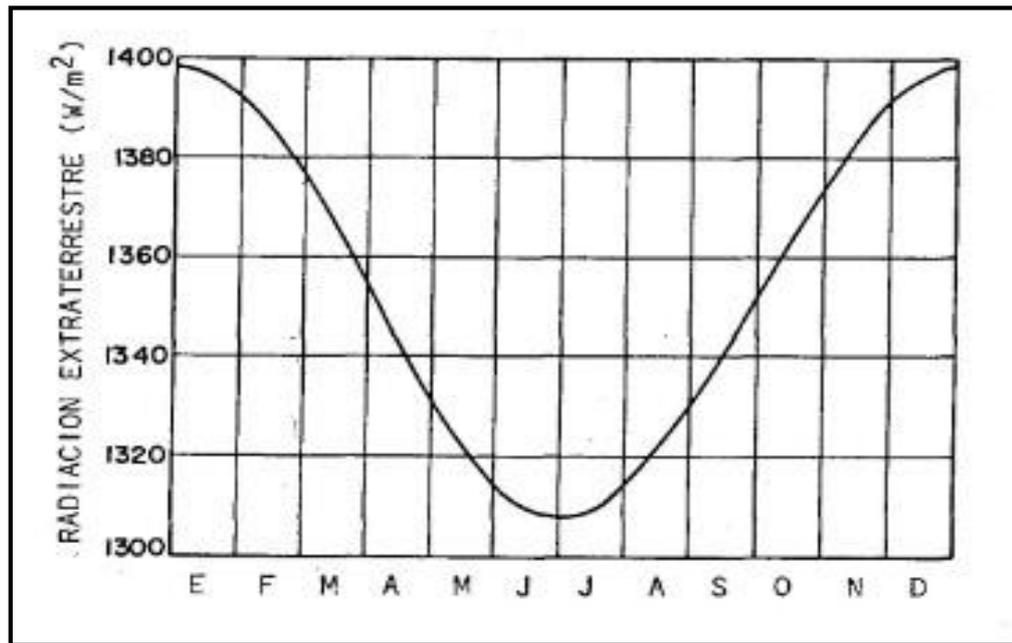


Figura 11. Variación de la radiación extraterrestre a lo largo del año.
Fuente: (Castro, 1986).

El cálculo de la radiación solar extraterrestre es indispensable para determinar la radiación solar global diaria con cualquier modelo que se desee emplear, necesariamente para poder estimar se requiere conocer el valor de la constante solar (Delgado y Orellana, 2015). La radiación solar extraterrestre se puede expresar en función de la distribución espectral, como se muestra en la ecuación (2.10):

$$I_0 = \int I'_{0\lambda} \cdot d\lambda \dots\dots\dots(2.10)$$

Dónde:

I'_0 : Distribución espectral de la radiación solar

λ : Longitud de onda espectral

Si la potencia emitida por el sol la designamos por P_s y nombramos r a la distancia tierra-sol, se tiene la ecuación (2.11):

$$I_0' = \frac{P_s}{4\pi r^2} \dots\dots\dots(2.11)$$

Puesto que la potencia emitida por el sol la consideramos constante, entonces se tiene la ecuación (2.12):

$$I_{cs} \cdot r_0^2 = I_0' \cdot r^2 \dots\dots\dots(2.12)$$

Despejando, se obtiene la ecuación (2.13):

$$I_0' = E_0 \cdot I_{cs} \dots\dots\dots(2.13)$$

Siendo: $E_0 = \frac{r_0^2}{r^2}$, valor en el que se tiene en cuenta las variaciones de la radiación extraterrestre a lo largo del año.

Para una superficie horizontal que forma un ángulo θ_z con la dirección de propagación de los rayos solares, el flujo de radiación recibido por unidad de área o irradiación extraterrestre sobre una superficie horizontal esta dado en la ecuación (2.14):

$$I_0 = I_0' \cdot \cos\theta_z = I_0' \cdot \text{sen}\alpha \dots\dots\dots(2.14)$$

Queda claro que al referirse a una superficie receptora se habla de irradiancia como energía recibida por unidad de tiempo (o flujo recibido) y unidad de superficie y se mide en el S.I., que es el que se usará en W/m^2 .

La integral respecto al tiempo de la irradiancia se denomina irradiación y su unidad es el J/m^2 o KWh/m^2 , sustituyendo en la ecuación (2.14) el valor de $\text{sen}\alpha$ dado por la ecuación (2.3) y teniendo en cuenta la ecuación (2.13), se tiene la ecuación (2.15):

$$I_0 = E_0 \cdot I_{cs} (\text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{cos}\omega) \dots \dots \dots (2.15)$$

Es también muy importante, pues frecuentemente se necesita para diversas aplicaciones de energía solar estudiar el valor de la irradiación solar global diario sobre una superficie horizontal, es decir, la energía solar diario recibida en una superficie horizontal de área unidad en el tope de la atmosfera. Esto se obtiene fácilmente sin más que integrar la ecuación (2.15) sobre el periodo del tiempo comprendido entre el orto y el ocaso, es decir:

$$R_e = \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} E_0 \cdot I_{cs} (\text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{cos}\omega) dt \dots \dots \dots (2.16)$$

De la ecuación (2.16) se obtiene la ecuación (2.17):

$$R_e = \frac{24(3600)}{\pi} \cdot E_0 \cdot I_{cs} (\text{cos}\varphi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega + \frac{\pi}{180} \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta \cdot \omega) \dots \dots \dots (2.17)$$

La radiación solar extraterrestre R_e fue calculada según la relación propuesta por Duffie y Beckman (2013), como muestra la ecuación (2.18):

$$R_e = \frac{24(60)}{\pi} \cdot E_0 \cdot I_{cs} (\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega) \dots \dots \dots (2.18)$$

Dónde: I_{cs} = constante solar ($0,082 [MJm^{-2} dia^{-1}]$).

2.12 RADIACIÓN SOLAR GLOBAL

La radiación solar global que incluye la radiación solar directa y radiación solar difusa constituye la energía solar más importante, la primera es la energía que llega a la tierra directamente sufriendo alteración en el camino por la diferencia de densidad en la atmósfera, y la segunda es toda radiación dispersada por la

atmósfera debido a la presencia de diversas partículas (Da Silva *et al.*, 2014). cuya medición es hecha comúnmente a través de Piranómetros (Teixera, 2007).

Se conoce que la atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación solar, por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. En cambio en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable, las nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, gran parte de radiación solar se refleje al espacio exterior; la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa (Álvarez *et al.*, 2014).

La variación de la radiación solar global es influenciada en mayor o menor medida por la ubicación, geografía, datos astronómicos, físicos y parámetros meteorológicos (Cañada, 1988). También, para estimar la radiación solar global es preciso las condiciones ambientales como las temperaturas, presión, velocidad del viento, etc. (Zhang, 2014); así mismo, se observa que el número promedio de días de lluvias puede utilizarse para predecir la radiación solar global (Sendanayake *et al.*, 2015).

La radiación solar que llega a la tierra a través de la atmósfera a la tierra se analiza y cuantifica bien sea en potencia, que se denomina irradiancia, o bien en energía integrada en intervalos de tiempo dados, frecuentemente diarios y horarios, a la que se denomina radiación o irradiación indistintamente (Díaz, 2013).

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 muestra en la Figura 12.

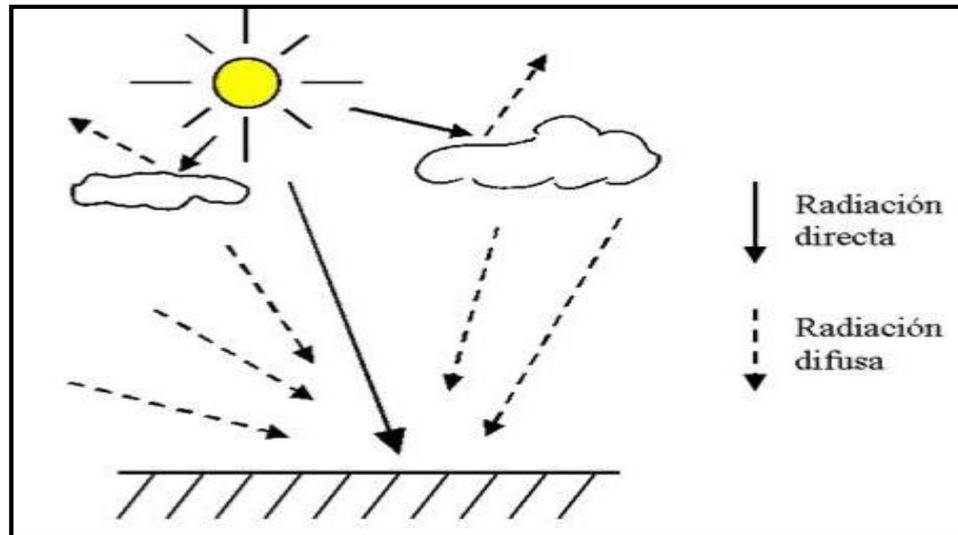


Figura 12. Radiación solar directa y difusa.

Fuente: (Camayo *et al.*, 2015).

Según los antecedentes mencionados anteriormente, el comportamiento de la radiación solar global sobre la superficie terrestre estaría determinado a través de la ecuación (2.19):

$$R_g = R_{dir} + R_{dif} \dots \dots \dots (2.19)$$

Si bien, 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 periodos de tiempo. Sin embargo, 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 (Iqbal, 1983).

Los parámetros para encontrar la radiación solar global, son los modelos empíricos basados en temperaturas y radiación solar extraterrestre (Marzo *et al.*, 2017), esenciales en las aplicaciones de la agricultura (Steinmetz *et al.*, 2013), así mismo tener en cuenta las condiciones climáticas y geográficas (Belaid y Mellit, 2016).

La disminución de la radiación solar global se debe a la creciente nubosidad. Esta información es futuro para el modelo climático para evaluar mejor los cambios de radiación solar (Ohunakin *et al.*, 2015).

2.13 TRANSMITANCIA DE LA ATMÓSFERA (K_t)

La transmitancia de la atmósfera K_t representa la fracción de energía solar que ingresa a la superficie terrestre después que el haz de pequeñas partículas atraviesa la unidad de espesor del medio atmosférico (Iqbal, 1983). La interpretación Física de la transmitancia atmosférica se refiere al grado de claridad del cielo, se ha sugerido diferentes bandas de (Yousif *et al.*, 2013) como muestra el Cuadro 2.

Cuadro 2.Escala de transmitancia atmosférica.

TIPO DE DÍA	TRANSMITANCIA ATMOSFÉRICA
Nublado	$0 < K_t < 0.2$
Parcialmente nublado	$0.2 < K_t < 0.6$
Soleado	$0.6 < K_t < 0.75$
Muy soleado	$0.75 < K_t < 1$

Fuente: (Yousif *et al.*, 2013).

Aunque esta división es arbitraria puede ser considerada para definir el tipo de día según el estado de su atmósfera. Además, la distribución de probabilidad de la transmitancia atmosférica es esencial para la predicción de la energía de la radiación solar global (Ayodele y Ogunjuyigbe, 2015).

Cuando el cielo está limpio, la radiación directa corresponde de 60 a 87% de la radiación global. En presencia de nubosidad la radiación solar disminuye, pues la nubosidad y la elevación del sol son factores de primer orden en la variación de la radiación incidente (Lopes, 2015).

Las nubes que cubren en medida de 40 a 60% de la superficie de la tierra desempeñan un papel fundamental en el balance de energía en el planeta, también en la variación de la radiación solar global (Echer *et al.*, 2001).

2.14 MODELOS DE ESTIMACIÓN

Los métodos para estimar la radiación solar global diaria basados en observaciones meteorológicas, pueden calcularse mejor con modelos empíricos (Ocampo y Rivas, 2013), en base al rango de temperatura, duración diaria del sol, nubosidad, humedad relativa, precipitación y pueden utilizarse como predictores en cualquier caso (Oesterle, 2001)..

Las escalas temporales intrínsecas e incompletas de la variabilidad de la radiación solar global superficial se abordan por medio de modelos empíricos (Bengulescu *et al.*, 2016; Rojas *et al.*, 2016).

Se ha realizado un gran número de modelos de estimación de radiación solar incidente con el uso de diferentes variables meteorológicas. Entre las más habituales se encuentran:

2.14.1 Temperatura

Los modelos que utilizan temperatura para estimar la radiación solar son muy utilizados alrededor del mundo por su fácil disponibilidad de datos, además se caracteriza porque su medida es simple y robusta.

Entre los modelos más conocidos se encuentra los desarrollados por Hargreaves y Samani (1982), Bristow y Campbell (1983), Allen (2002), entre otros (Delgado y Orellana, 2015). Además, la radiación solar global y la temperatura se encuentran en fase, es decir están estrechamente relacionadas (Rojas *et al.*, 2016; Chang *et al.*, 2017).

2.15 MODELO DE BRISTOW Y CAMPBELL

El modelo de Bristow y Campbell es uno de los más utilizados para estimar la radiación solar global, por su facilidad de encontrar variables muy comunes en todos los lugares donde existen estaciones meteorológicas.

Se considera el modelo Bristow y Campbell (1984), que explica la relación entre la diferencia de las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire con calor sensible y calor latente. El calor latente depende de la radiación solar diaria y es el responsable de la temperaturas máximas del aire; además, el calor sensible al anochecer debido a la inercia térmica gradualmente se pierde en el espacio como radiación de onda larga y otros flujos radiantes, resultando en el decrecimiento de la temperatura hasta alcanzar su temperatura mínima justo antes del amanecer (Baigorria *et al.*, 2004).

Cuando la radiación solar llega a la superficie de la tierra, una parte se refleja y el otro es absorbido. Por otra parte el suelo se calienta, emite radiación de onda

larga que hace que caliente el aire adyacente, contribuyendo a cambiar su temperatura. En base a este argumento Bristow y Campbell (1984) construyeron un modelo físico empírico para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas máximas y mínimas (Queiroz *et al.*, 2000), como se muestra en la ecuación (2.20).

$$\frac{R_g}{R_e} = A \left[1 - e^{-B(T_{max} - T_{min})^C} \right] \dots\dots\dots (2.20)$$

Dónde:

R_g : Radiación solar global [KWh/m²]

R_e : Radiación solar extraterrestre [KWh/m²]

T_{max} : Temperatura máxima [°C]

T_{min} : Temperatura mínima [°C]

A: Transmitancia atmosférica máxima.

B: Constante específica de la región (Depende de C)

C: Constante específica de la región (Depende de la amplitud térmica y latitud)

Dónde A, B y C son constantes empíricas, con significado físico. El coeficiente A representa la transmitancia atmosférica máxima, que es característica del área de estudio, y depende de la contaminación y elevación de la zona. Los coeficientes $B(^{\circ}C^{-1})$ y C determinan el efecto del incremento en la amplitud térmica ΔT en los máximos valores de transmitancia atmosférica (K_t) (Mesa y Varas, 2000).

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciados por la topografía, latitud y altitud, y entre otros factores, los coeficientes B y C propuestos pueden ser aplicados solo en áreas bajo similares condiciones de régimen térmico. Se desarrollaron las ecuaciones empíricas (2.21) y (2.22) para determinar el valor de los coeficientes (Camayo *et al.*, 2015).

$$C=2.116-0.072(T_{\max}-T_{\min})+57.574e^{\varphi} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dónde: φ es Latitud

$$B=0.107C^{-2.6485} \dots\dots\dots(2.22)$$

Se ha utilizado el modelo Bristow y Campbell para numerosos estudios y se han encontrado mejoras en la radiación solar global; también en la simplicidad de datos (Almorox *et al.*, 2013).

Inicialmente este modelo fue empleado en las localidades de Pullman, Great Falls y Tacoma de los Estados Unidos, en donde se mostró que el desempeño del modelo fue capaz de explicar entre un 70% y 90% de la variación de la radiación solar. En el modelo se empleó la amplitud térmica ΔT durante el día. De acuerdo a los estudios, los valores para los coeficientes A, B y C son 0.7; entre 0.004 y 0.010; y 2.4 respectivamente (Bristow y Campbell, 1984).

El modelo Bristow y Campbell (1984) tiene mejor desempeño en la estimación de radiación solar global (Conceição, 2010). Durante los periodos seco (abril-octubre) y húmedo (noviembre-marzo) en mato grosso, Brasil (Pacheco *et al.*, 2017).

Cuadro 3. Coeficientes del modelo Bristow y Campbell por estación

Estación meteorológica	a_B	b_B (°C-1)	c_B	Número de datos	Error (%)
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	0,80	2 033	12,6
Weberbauer	0,75	0,04	1,28	1 607	3,2
Cosmos	0,70	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	0,20	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	0,60	0,06	1,21	2 346	4,1
Bellavista	0,70	0,06	1,22	1 038	2,3

Fuente: (Atlas solar del Perú, 2003)

En el Cuadro 3 se muestra los coeficientes del modelo Bristow y Campbell encontrados para cada estación así como su error promedio. Es necesario recalcar que el coeficiente A corresponde a la sumatoria de los coeficientes **a** y **b** encontrados para el modelo angstrom-Prescott mostrados debido a que tienen el mismo significado físico (Queiroz *et al.*, 2000).

2.16 VARIABLES E INDICADORES DE LA INVESTIGACIÓN

2.16.1 Variable independiente

X: Temperaturas máximas y mínimas

2.16.2 Indicadores

x_1 : Temperatura máxima x_4 : Día juliano

x_2 : Temperatura mínima

x_3 : Latitud

2.16.3 Variable dependiente

Y : Radiación solar global

Cuadro 4. Operacionalización de variables

VARIABLE	INDICADOR	INDICE	INSTRUMENTO DE MEDIDA
Variable independiente: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura 	x_1 = Temperatura máxima x_2 = Temperatura mínima	22°C 0°C	Sensor de temperatura Sensor de temperatura
Variable dependiente: <ul style="list-style-type: none"> • Radiación solar global 	Y	$4 \text{ KWh}/\text{m}^2 \text{ a}$ $8 \text{ KWh}/\text{m}^2$	Sensor de radiación.

2.16.4 Modelos empíricos

Los métodos empíricos consisten en relacionar variables experimentales entre sí, y ajustarlas a funciones que obtengan una alta correlación. Los ajustes empíricos suelen ser sencillos, obviando distintas variables influyentes, y proporcionan muy buenos resultados locales (en la región donde se han medido los datos utilizados para configurar el modelo). Algunos inconvenientes de los modelos empíricos es que no poseen validez universal (solo valido localmente), o deben ser recalibrados para distintas localidades,

además en ocasiones carecen de sentido Físico, aunque los resultados sean buenos (Antón, 2007).

2.17 DIAGRAMA DE FLUJO

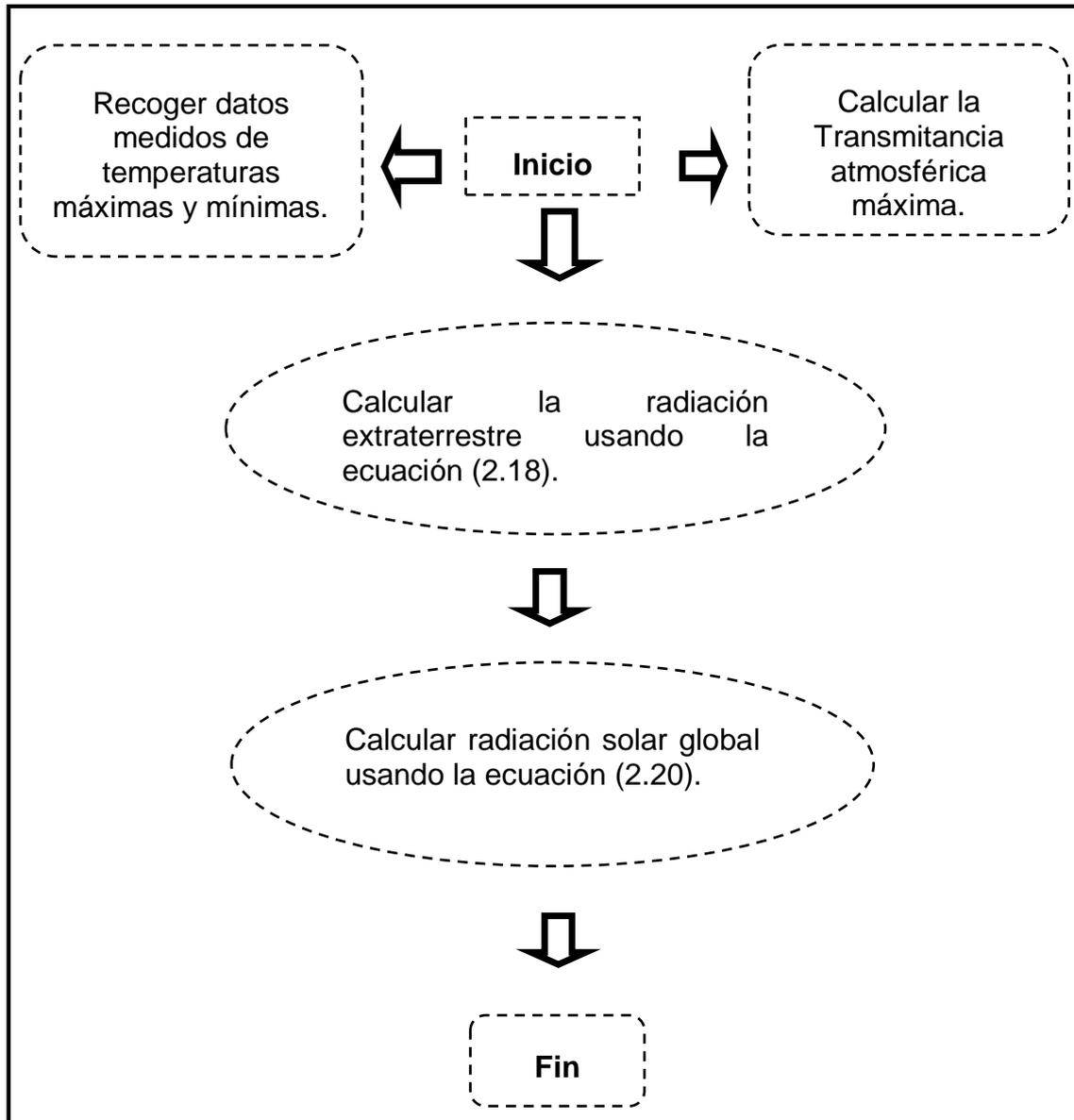


Figura 13. Diagrama de flujo que representa el procedimiento general.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó en el altiplano de Puno, ubicado a más de 3810 m.s.n.m. en zonas ecológicas mencionadas por (Flores y Flores, 2011), tales como Circunlacustre (Puno, Juli, Capachica, Moho, Yunguyo), Puna Húmedo (Azángaro, Crucero, Desaguadero Huancané, Ilave, Puntina), y clima de alturas (Ananea, Capaso y Masocruz).

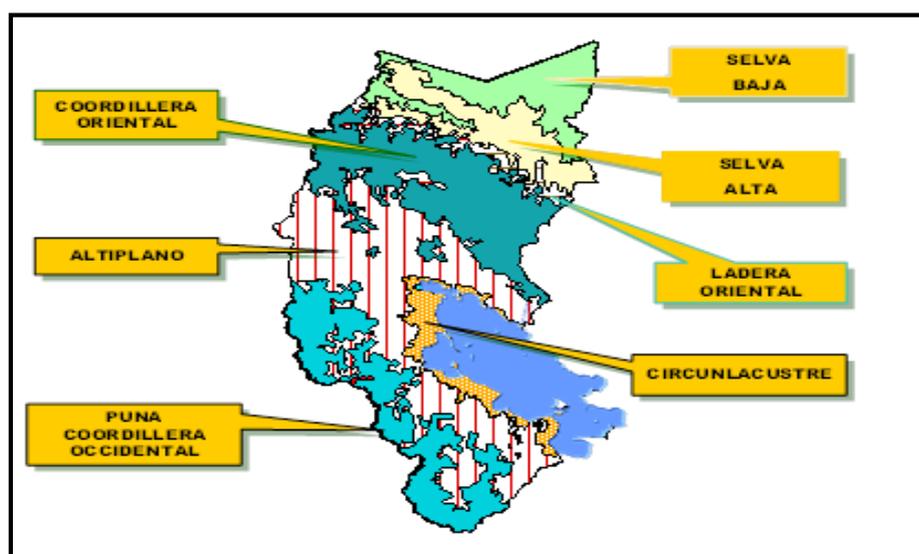


Figura 14. Área de estudio.

Fuente: (Gobierno Regional, 2018).

3.2 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.2.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo correlacional, teórico y experimental.

- Es correlacional puesto que se mide el grado de intensidad entre variables (Flores, 2017). Se espera obtener la correlación lineal entre las radiaciones solares globales estimadas y medidas de los años 2014, 2015 y 2017 en el área de estudio.
- Es teórico puesto que la investigación se basa en un modelo empírico como el de Bristow y Campbell. La estimación de la radiación solar global diaria puede ser calculada aplicando el modelo empírico Bristow y Campbell con datos de entrada de temperaturas máximas, temperaturas mínimas, día juliano y latitud (Camayo *et al.*, 2015).
- Es experimental puesto que se va usar datos medidos de radiación solar global y temperaturas máximos y mínimos por las estaciones meteorológicas para estimar la radiación solar global.

A continuación se muestra el procedimiento para estimar la radiación solar global diaria en la hoja de cálculo de Excel:

- **Factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre (E_0):**

Se aplicó la ecuación (3.1), donde d_n es el día juliano:

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \dots\dots\dots (3.1)$$

- **Ángulo declinación (δ):** Para determinar el ángulo de declinación recurrimos a la ecuación (3.2):

$$\delta = 0,409 \sin \left[\frac{2\pi d_n}{365} - 1,39 \right] \dots\dots\dots(3.2)$$

- **Ángulo horario (ω):** Para el cálculo del ángulo horario utilizamos la ecuación (3.3) donde ϕ es la latitud de la zona de estudio:

$$\omega = \cos^{-1}(-tg\phi tg\delta) \dots\dots\dots(3.3)$$

- **Radiación solar global extraterrestre (R_e):** Para el cálculo de la Radiación solar extraterrestre recurrimos a la ecuación (3.4):

$$R_e = \frac{24(60)}{\pi} \cdot E_0 \cdot I_{cs} (\omega \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}\omega) \dots\dots\dots(3.4)$$

- **Radiación solar global (R_g):** Para encontrar la radiación solar global, primeramente, calculamos los parámetros empíricas A, B y C mencionadas en (Baigorria, 2004).

Finalmente reemplazando los datos obtenidos en el modelo propuesta por (Bristow y Campbell, 1984).

$$R_g = AR_e \left(1 - e^{-B(T_{\max} - T_{\min})^C} \right) \dots\dots\dots(3.5)$$

3.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación sobre el cual se trabaja, es de tipo descriptivo, experimental e interpretativo.

3.4 TÉCNICAS Y ESTRATEGIAS

3.4.1 Técnica

La técnica que se utiliza en el presente proyecto es básicamente lectura analítica, técnica que consiste en leer un libro en forma pausada y reflexiva con el propósito de entender e interpretar los resultados científicos.

3.4.2 Estrategia

Las estrategias usadas en este trabajo son:

- Búsqueda de información de la materia objeto de investigación.
- Revisión de los saberes previos necesarios bibliográficos o de internet que facilite en la comprensión e interpretación que se va encarar.
- Consultas al asesor y otros entendidos en la materia para consolidar las ideas desarrolladas.

3.4.3 Requerimientos

Para el desarrollo de la investigación los requerimientos mínimos de hardware y software son:

- Laptop i5.
- Memoria RAM 4GB.
- Disco duro 500GB
- Sistema operativo Windows 8.
- Weatherlink.
- Microcal Origin 6.0.
- Procesador de hojas de cálculo Excel.

3.5 CORRELACIÓN

En la evaluación de la calidad y la aplicabilidad de los modelos, se utilizarán los indicadores estadísticos sugeridos por Iqbal (1983).

- **La suma residual cuadrática compuesta (CRSS)** es utilizada para cuantificar la calidad de las correlaciones predichas en comparación con las mediciones experimentales, expresada en la ecuación (3.6).

$$CRSS = \sum_{i=1}^N (Y_c - Y_m)^2 \dots\dots\dots(3.6)$$

Dónde: Y_c y Y_m representan, respectivamente, los valores calculados y medidos de la radiación solar global diario, N es el número total de observaciones.

- **El error medio absoluto (MAB)** es un indicador de la desviación media absoluta entre el modelo y los valores medidos, definido en la ecuación (3.7).

$$MAB = \sum_{i=1}^N \frac{ABS(Y_c - Y_m)}{N} \dots\dots\dots(3.7)$$

- **El error medio de la raíz cuadrática (RMSE)** es un indicador de las variaciones de los valores calculados alrededor de los valores medidos.

Se define en la ecuación (3.8):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_c - Y_m)^2}{N}} \dots\dots\dots(3.8)$$

- **El coeficiente de correlación (r)** es una medición de la relación lineal entre los valores calculados por el modelo respectivo y los valores medidos. Se define en la ecuación (3.9):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (y_c - \bar{y}_c)(y_m - \bar{y}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_c - \bar{y}_c)^2 \sum_{i=1}^N (y_m - \bar{y}_m)^2}} \dots\dots\dots(3.9)$$

Dónde: y_c es el valor calculado y y_m valor medido, \bar{y}_c valor promedio calculado y \bar{y}_m valor promedio medido, N cantidad de datos.

3.6 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

3.6.1 Primera etapa

Esta etapa de investigación consistió en la recopilación de información teórica y conceptual de trabajos y prácticas, artículos indexados, realizados a nivel regional, nacional e internacional respecto a la evaluación de la radiación solar, así mismo se recopiló información sobre diseño metodológico, estrategias y procedimientos de evaluación.

3.6.2 Segunda etapa

Con este banco de información se planteó una metodología para la evaluación de los datos de temperaturas máximas, temperaturas mínimas, transmitancia atmosférica máxima y radiación solar global, así mismo se propuso el modelo Bristow y Campbell.

3.6.3 Tercera etapa

Se determinó el tipo de método de acuerdo al tipo de estudio que es el esquema o marco estratégico que le da coherencia y sentido práctico a todas las actividades que se emprenden para buscar respuesta al problema y objetivos planteados. Así también se clasificó esta investigación teniendo como resultado una investigación cuantitativa.

3.7 MEDICIÓN

Para obtener los resultados de la radiación solar global estimada se ha seguido los procedimientos de las ecuaciones expuestos en el segundo capítulo.

La estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS está ubicada en plano horizontal de la azotea del pabellón nuevo de la E.P. de ingeniería civil dentro del campus de la Universidad Nacional del Altiplano, la cual cuenta con certificado de calibración. Así mismo, las estaciones meteorológicas de SENAMHI están ubicadas en la región de Puno, específicamente en la zona altiplánica. Cabe destacar que entre las dos estaciones distan de 500m.

3.7.1 Técnicas de procesamiento

Se realizó una selección y representación por variables.

- **Temperaturas extremas:**

ESTACION METEOROLÓGICA DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS, los datos diarios de temperaturas extremas se registraron a partir de las 00:15 horas hasta las 23:45 horas en la estación meteorológica de la E.P. de Ciencias Físico Matemáticas, todas ellas distribuidas dentro de la zona de estudio en este caso la ciudad de Puno.

ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE SENAMHI, los datos de temperaturas extremas se registraron desde 01 de enero del 2007 hasta 31 de diciembre del 2013 en el altiplano de Puno, así consta en sus registros históricos.

- **Radiación solar global medida:** Los datos de radiación solar global real registradas en la estación meteorológica Vaisala de SENAMHI-Puno fue del 01 de enero hasta el 31 de diciembre de los años 2014, 2015 y 2017. Se encontró el promedio de la radiación solar global mensual y anual de los años en estudio.
- **Transmitancia atmosférica máxima:** Los datos de transmitancia atmosférica máxima se estimaron desde 01 de setiembre hasta 31 de diciembre del 2015 y 01 de enero hasta el 31 de diciembre del 2016 y 2017 con datos registrados de temperaturas extremas y radiación solar global por la estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS.
- **Radiación solar global estimada:** Para determinar la radiación solar global estimada se utilizaron los datos de temperaturas extremas registradas por SENAMHI desde el 01 de enero del 2007 hasta 31 de diciembre del 2017 y los datos de transmitancia atmosférica máxima estimados con datos registrados de temperaturas extremas y radiación solar global por la estación DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS y estas aplicados al modelo Bristow y Campbell, se realizó el respectivo cálculo en la hoja de cálculo Excel, para los gráficos se utilizó microcal origin 6. En la validación se utilizó el coeficiente de correlación r de Pearson para comprobar la relación entre la radiación solar global real y radiación solar global estimada.

3.8 EQUIPO ESTACIÓN METEOROLÓGICA VAISALA

El MAWS301 es un sistema compacto, robusto y fácil de usar que provee datos de calidad controlada para aplicaciones que incluyen climatología, observación sinóptica, meteorología, hidrología y meteorología para aviación, incluso simultáneamente. Es una elección óptima para institutos nacionales de meteorología que desean modernizar sus redes de mediciones, para institutos hidrológicos, plantas de energía nuclear, parques de energía eólica y estaciones de TV para apoyar las necesidades críticas de sus misiones. Además el MAWS301 está especialmente diseñado para operaciones no atendidas en sitios remotos que requieren alta fiabilidad con bajo consumo de energía con máxima capacidad de expansión.

Características

- Estación meteorológica automática compacta, robusta y fácil de usar
- Fácil y económica de instalar, mantener y actualizar
- Confiabilidad y precisión comprobadas en campo en entornos rigurosos
- Bajo consumo de energía para extensas operaciones remotas
- Amplia selección de opciones de sensores y telemetría, incluyendo conectividad TCP/IP integrada
- Gran capacidad de cálculo y registro de datos
- Diseño abierto y modular que permite un alto grado de personalización
- Bajo costo total de ciclo de vida



Figura 15. Estación meteorológica Vaisala.

Fuente: (SENAMHI, 2018).

3.9 EQUIPO ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS

El diseño de la estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO 2 PLUS destaca por su aceptable precisión. Es resistente a la corrosión y a todas las inclemencias del tiempo desde inviernos helados e intensas tormentas primaverales y hasta calurosos veranos y fuertes vientos otoñales. El protector solar brinda una excelente protección contra la radiación solar y otras fuentes de calor radiado y reflejado.



Figura 16. Estación meteorológica Davis.

Fuente: (Laboratorio de Física UNAP, 2018).

3.10 COMPONENTES DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

3.10.1 Consola

La consola exhibe y registra los datos meteorológicos, proporciona gráficos y funciones de alarma, se interconecta a la computadora utilizando el software Weatherlink.

Características de la consola

- **Teclado y pantalla:** El teclado permite ver los datos actuales y los históricos, establecer y borrar alarmas, cambiar los modelos de estaciones

El teclado consiste en 12 botones de comando ubicado al lado de la pantalla, y cuatro botones de navegación ubicados debajo de los botones de comando.

Weatherlink software

El software weatherlink es mucho más que una base de datos de registro y ofrece un gran número de sofisticadas características, incluyendo la capacidad de ejecutar en tiempo real la presentación de informes en un sitio web. El programa este hecho de manera profesional y robusta.

A continuación, una imagen de pantalla compuesta y un resumen de las características clave de Weatherlink.

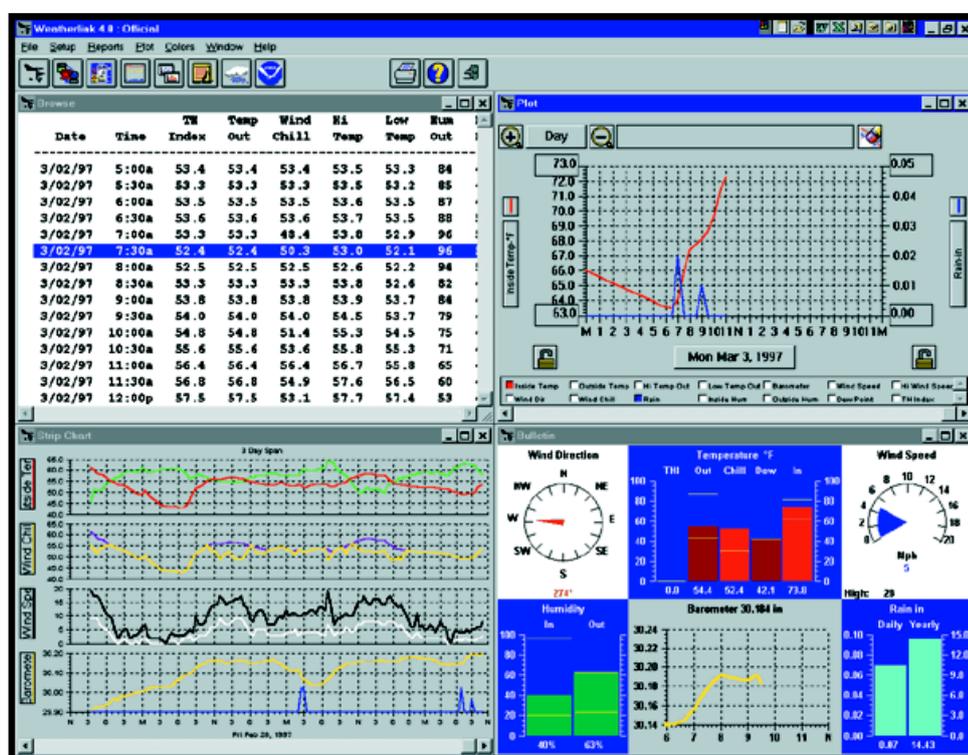


Figura 18. Weatherlink Software.
Fuente: (Blogspot, 2011).

La Figura 18 muestra cuatro de las ventanas de inicio de weatherlink: Browse, plot, stripcharts y bulletin de una imagen compuesta de secciones. Cada una de estas ventanas y otros pueden verse individualmente y aparecen en pantalla completa para mayor claridad.

Características

- Los datos detallados del tiempo se almacenan en archivos de base de datos a lo largo del tiempo en el disco duro del PC, datos de un mes por cada archivo.
- En el modo Visualizar se pueden mostrar y editar un texto con el listado de todos los registros almacenados.
- El Boletín ofrece un modo de auto-actualización instantánea de todas las lecturas principales del tiempo en la pantalla con gráficos en color.
- Strip Charts (Franja de modo Gráficas) proporciona una herramienta gráfica para el control de la tendencia de varios parámetros casi en tiempo real.
- El modo de Plot es un módulo completo de gráficos para la presentación y la comparación detallada de todos los datos almacenados.
- La ventana Sumario se ofrece un resumen de texto actualizado automáticamente de todas las condiciones con altas y bajas, etc.
- Informes en texto proporcionan resúmenes mensuales y anuales con las correspondientes estadísticas calculadas;
- Weatherlink proporciona características integrales para el funcionamiento automático de un sitio web de información meteorológica, ya sea para su uso local (Intranet) o público (Internet), con páginas web.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

Después de haber realizado las comparaciones de la radiación solar global entre los valores experimentales y los valores estimados a través del modelo Bristow y Campbell, se llega a los siguientes resultados:

4.1.1 Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones experimentales realizadas para diferentes días y tiempos climatológicos. Las condiciones de cielo para estos días fueron: muy soleado, soleado, parcialmente nublado y nublado.

4.1.2 Modelo

En esta sección se analiza la radiación solar global en el altiplano de Puno en los pisos ecológicos Circunlacustre (Puno, Capachica, Moho, Yunguyo, Juli), Puna Húmeda (Azángaro, Crucero, Desaguadero, Huancané, Ilave, Putina) y Clima de altura (Ananea, Capaso, Masacruz) durante el periodo

2007 al 2013 aplicando el modelo Bristow y Campbell, a excepción de Puno que se aplicó durante el periodo 2007 al 2017.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA:

La ubicación geográfica de la medición in situ nos proporciona SENAMHI Regional Puno.

Cuadro 5. Estaciones meteorológicas SENAMHI-Puno

ESTACIÓN	PROVINCIA	DISTRITO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	PISO ECOLÓGICO
ANANEA	San Antonio de Putina	Ananea	14°40'42,4"	69°32'03,3"	4650	Clima de altura
CAPASO	El Collao	Ilave	17°11'15,8"	69°44'07,8"	4530	Clima de altura
MASOCRUZ	Chucuito	Masacruz	16°44'24,4"	69°42'21,9"	4100	Clima de altura
AZÁNGARO	Azángaro	Azángaro	14°54'51,7"	70°11'26,7"	3863	Puna húmeda
CRUCERO	Carabaya	Crucero	14°21'44,4"	70°01'27,7"	4100	Puna húmeda
DESAGUADERO	Chucuito	Desaguadero	16°34'06,6"	69°02'24,4"	3860	Puna húmeda
HUANCANÉ	Huancané	Huancané	15°12'05,4"	69°45'12,8"	3890	Puna húmeda
ILAVE	El Collao	Ilave	16°05'17,7"	69°38'42,0"	3880	Puna húmeda
PUTINA	San Antonio	Putina	14°54'52,6"	69°52'03,9"	3878	Puna húmeda
CAPACHICA	Puno	Capachica	15°36'56"	69°50'38,4"	3933	Circunlacustre
JULI	Chucuito	Juli	16°12'13,6"	69°27'35,7"	3812	Circunlacustre
MOHO	Moho	Moho	15°23'17,8"	69°29'03,4"	3890	Circunlacustre
PUNO	Puno	Puno	15°49'34,5"	70°00'43,5"	3812	Circunlacustre
YUNGUYO	Yunguyo	Yunguyo	16°18'28,2"	69°04'29,0"	3890	Circunlacustre

ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE SENAMHI

Los resultados de la determinación de la radiación solar global diaria estimada empleando la información real de las estaciones de SENAMHI Puno, como se muestra en el Cuadro 5, permitió analizar el comportamiento de la radiación solar global diaria, mensual y anual a lo largo de los años de estudio en el altiplano de Puno.

4.1.3 Valores medidos diarios

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

A continuación, como ejemplo se muestra el procedimiento de cálculo de la estimación de la radiación solar global para el día **15 de diciembre del 2017** la ciudad de Puno. Los resultados se muestran en el Cuadro 6.

a. Factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre:

Se aplicó la ecuación (2.2).

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

Reemplazando el día juliano $d_n = 315$ se tiene:

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2 \times 3,1416 \times 349}{365}\right)$$

De lo que se obtiene:

$$E_0 = 1,0318$$

b. Ángulo de declinación:

Para determinar el ángulo de declinación se recurre a la ecuación (2.5):

$$\delta = 0,409 \sin\left[\frac{2\pi d_n}{365} - 1,39\right]$$

Dónde: $d_n=349$ es el día juliano, en este caso para el 15 de diciembre del 2018, reemplazando datos se obtiene:

$$\delta = 0,409 \operatorname{sen}\left[\frac{2 \times 3,1416 \times 349}{365} - 1,39\right]$$

$$\delta = -0,4072 \operatorname{rad}.$$

c. Ángulo horario:

Para el cálculo del ángulo horario utilizó la ecuación (2.7), en la cual se reemplaza el resultado obtenido por la ecuación (2.5); es decir el ángulo de declinación solar.

$$\omega = \cos^{-1}(-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta)$$

$$\omega = \cos^{-1}(-\operatorname{tg}(-0,2763) \operatorname{tg}(-0,4072))$$

$$\omega = \cos^{-1}(-(-0,2836)(-0,4313))$$

Se obtiene:

$$\omega = 1,6934 \operatorname{rad}$$

d. Radiación solar global extraterrestre:

Para el cálculo de la Radiación solar extraterrestre se recurre a la ecuación (2.26).

$$R_e = \frac{24(60)}{\pi} \cdot E_0 \cdot I_{cs} (\omega \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \text{sen}\omega).$$

En la cual se reemplaza los resultados de las ecuaciones (2.2), (2.5) y (2.7); es decir, el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, el ángulo de declinación solar y el ángulo horario respectivamente.

$$R_e = \frac{24 \times 60 \times 0,082 \times E_0}{\pi} [\omega \text{sen}\varphi \text{sen}\delta + \cos\varphi \cos\delta \text{sen}\omega]$$

$$R_e = \frac{24 \times 60 \times 0,082 \times 1,0318}{3,1416} \left[1,6934 \text{sen}(-0,2763) \text{sen}(-0,4072) + \right. \\ \left. \cos(-0,2763) \cos(-0,4072) \text{sen}(1,6934) \right]$$

$$R_e = 41,0956 \text{MJ/m}^2 \left(\frac{1 \text{KWh/m}^2}{3,6 \text{MJ/m}^2} \right)$$

$$R_e = 13,6985 \text{KWh/m}^2$$

e. Radiación solar global:

Para encontrar la radiación solar global, primero se calcula las constantes empíricas B y C expuestas en las ecuaciones (2.21) y (2.22).

Para la obtención del coeficiente empírico C utilizamos la ecuación (2.22), reemplazando las temperaturas máxima y mínima diaria y la latitud de la ciudad de Puno.

$$C = 2,116 - 0,072(T_{\max} - T_{\min}) + 57,574e^{\varphi}$$

$$C = 2,116 - 0,072(10.5) + 57,574e^{-15.83}$$

Obtenemos, la constante empírica C:

$$C = 1,3600$$

Para la obtención del coeficiente empírico B, se reemplaza el resultado del coeficiente empírico C en la ecuación (2.21).

$$B = 0,107 C^{-2,6485}$$

$$B = 0,107(1,3600)^{-2,6485}$$

Se obtiene, la constante empírica B:

$$B = 0,0174$$

Finalmente reemplazando los datos obtenidos con las ecuaciones (2.18), (2.21) y (2.22) en la ecuación (2.20) se obtiene el valor de la radiación solar global para la ciudad de Puno del 15 de diciembre del 2017, día juliano 349, como se muestra en el Cuadro 6.

$$R_g = AR_e \left(1 - e^{-B(T_{\max} - T_{\min})^C} \right)$$

$$R_g = 0,820(13,6985) \left(1 - e^{-0,0419(10,5)^{1,4248}} \right)$$

$$R_g = 6,4211 \text{ KWh}/m^2$$

Además, en el Cuadro 6, se muestra el comportamiento correspondiente de los datos estimados de la radiación solar global diarios con datos de entrada de la estación meteorológicas de SENAMHI en la ciudad de Puno, como ejemplo para el mes de diciembre del 2017.

Cuadro 6. Radiación solar global diario en el mes de diciembre del 2017 Puno.

FECHA	Cte A	Dia juliano Dn	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Latitud φ	Factor de correccion Eo	Declinacion δ	Angulo horario ω	Radiacion extraterrestre Re (MJ/m ²)	C (cte)	B (cte)	Radiacion solar global Rg (KWh/m ²)
01-dic	0.797	335	18.8	6.1	-0.2763	1.0287	-0.3862	1.6863	40.9282	1.2016	0.0658	6.8147
02-dic	0.819	336	18.9	5.5	-0.2763	1.0290	-0.3884	1.6871	40.9449	1.1512	0.0737	7.1589
03-dic	0.814	337	18.9	5.5	-0.2763	1.0292	-0.3906	1.6878	40.9608	1.1512	0.0737	7.1122
04-dic	0.812	338	17.9	6.3	-0.2763	1.0295	-0.3926	1.6885	40.9759	1.2808	0.0556	6.6792
05-dic	0.825	339	17.9	5.9	-0.2763	1.0297	-0.3945	1.6891	40.9902	1.2520	0.0590	6.8952
06-dic	0.824	340	17.6	6.4	-0.2763	1.0300	-0.3963	1.6897	41.0038	1.3096	0.0524	6.6649
07-dic	0.933	341	17.7	6.4	-0.2763	1.0302	-0.3980	1.6903	41.0167	1.3024	0.0531	7.5828
08-dic	0.745	342	17.7	5.1	-0.2763	1.0304	-0.3996	1.6908	41.0288	1.2088	0.0648	6.3649
09-dic	0.754	343	17.4	5.1	-0.2763	1.0307	-0.4010	1.6913	41.0403	1.2304	0.0618	6.3783
10-dic	0.844	344	19	3.2	-0.2763	1.0309	-0.4023	1.6918	41.0511	0.9784	0.1134	7.8441
11-dic	0.788	345	19	3.2	-0.2763	1.0311	-0.4035	1.6922	41.0613	0.9784	0.1134	7.3254
12-dic	0.815	346	18.4	6.3	-0.2763	1.0313	-0.4046	1.6925	41.0708	1.2448	0.0599	6.8531
13-dic	0.915	347	19	6.5	-0.2763	1.0314	-0.4056	1.6929	41.0797	1.2160	0.0637	7.7981
14-dic	0.947	348	19	6.5	-0.2763	1.0316	-0.4064	1.6931	41.0880	1.2160	0.0637	8.0783
15-dic	0.820	349	18.4	7.9	-0.2763	1.0318	-0.4072	1.6934	41.0956	1.3600	0.0474	6.4267
16-dic	0.923	350	17.8	6.8	-0.2763	1.0319	-0.4078	1.6936	41.1026	1.3240	0.0509	7.4211
17-dic	0.787	351	17.8	6.8	-0.2763	1.0320	-0.4083	1.6938	41.1091	1.3240	0.0509	6.3236
18-dic	0.693	352	16.4	5.7	-0.2763	1.0322	-0.4086	1.6939	41.1149	1.3456	0.0487	5.4932
19-dic	0.731	353	16.4	5.7	-0.2763	1.0323	-0.4089	1.6940	41.1202	1.3456	0.0487	5.7898
20-dic	0.660	354	17.6	6.9	-0.2763	1.0324	-0.4090	1.6940	41.1248	1.3456	0.0487	5.2331
21-dic	0.642	355	17.6	6.7	-0.2763	1.0325	-0.4090	1.6940	41.1289	1.3312	0.0502	5.1361
22-dic	0.660	356	17.7	6.6	-0.2763	1.0326	-0.4089	1.6940	41.1324	1.3168	0.0516	5.3304
23-dic	0.809	357	19.1	6.6	-0.2763	1.0327	-0.4086	1.6939	41.1352	1.2160	0.0637	6.9066
24-dic	0.759	358	19.1	6.6	-0.2763	1.0328	-0.4083	1.6938	41.1375	1.2160	0.0637	6.4801
25-dic	0.795	359	19	6.1	-0.2763	1.0328	-0.4078	1.6936	41.1392	1.1872	0.0679	6.8790
26-dic	0.720	360	17.7	5.7	-0.2763	1.0329	-0.4072	1.6934	41.1403	1.2520	0.0590	6.0369
27-dic	0.772	361	17.7	5.7	-0.2763	1.0329	-0.4064	1.6931	41.1407	1.2520	0.0590	6.4731
28-dic	0.872	362	16.3	6.3	-0.2763	1.0330	-0.4056	1.6929	41.1405	1.3960	0.0442	6.6503
29-dic	0.775	363	16.3	5.4	-0.2763	1.0330	-0.4046	1.6925	41.1397	1.3312	0.0502	6.2049
31-dic	0.867	365	17.8	5.1	-0.2763	1.0330	-0.4023	1.6917	41.1361	1.2016	0.0658	7.4509
	0.797											6.6595

Si se desea determinar el grado de confiabilidad y aplicabilidad del modelo, se utilizaron los indicadores estadísticos dados en las ecuaciones (3.6), (3.7), (3.8) y (3.9) definidos en el capítulo III.

Cuadro 7. Indicadores estadísticos

$(y_c - \bar{y}_c)$	$(y_m - \bar{y}_m)$	$(y_c - \bar{y}_c)^2$	$(y_m - \bar{y}_m)^2$	$(y_c - \bar{y}_c)(y_m - \bar{y}_m)$	$(y_c - y_m)^2$	$(y_c - y_m)$
0.1981	0.0362	0.0392	0.0013	0.0072	0.0862	0.2937
0.5424	0.8118	0.2942	0.6590	0.4403	0.0441	0.2101
0.4956	0.4908	0.2456	0.2409	0.2432	0.0041	0.0642
0.0626	0.2292	0.0039	0.0525	0.0144	0.1233	0.3512
0.2786	0.1342	0.0776	0.0180	0.0374	0.2230	0.4722
0.0483	0.1802	0.0023	0.0325	0.0087	0.0829	0.2879
0.9662	0.9438	0.9335	0.8907	0.9119	0.0067	0.0818
0.2517	0.2402	0.0633	0.0577	0.0605	0.0023	0.0479
0.2383	0.0592	0.0568	0.0035	0.0141	0.0143	0.1197
1.2275	0.7378	1.5067	0.5443	0.9056	0.3015	0.5491
0.7088	1.3438	0.5025	1.8058	0.9525	0.3313	0.5756
0.2365	0.0528	0.0559	0.0028	0.0125	0.0591	0.2431
1.1816	0.7018	1.3961	0.4925	0.8292	0.2907	0.5391
1.4617	1.3688	2.1365	1.8736	2.0008	0.0232	0.1523
0.1898	0.0742	0.0360	0.0055	0.0141	0.0032	0.0563
0.8045	1.1068	0.6472	1.2250	0.8904	0.0590	0.2429
0.2930	0.4592	0.0858	0.2109	0.1345	0.0509	0.2256
1.1233	0.6192	1.2619	0.3834	0.6956	0.1978	0.4448
0.8268	1.1612	0.6836	1.3484	0.9601	0.1551	0.3938
1.3835	0.8602	1.9142	0.7400	1.1901	0.2152	0.4639
1.4805	1.2422	2.1920	1.5431	1.8391	0.0320	0.1789
1.2862	0.9612	1.6542	0.9239	1.2363	0.0705	0.2656
0.2900	0.1202	0.0841	0.0144	0.0349	0.2205	0.4696
0.1365	0.2502	0.0186	0.0626	0.0342	0.0300	0.1731
0.2624	0.3078	0.0689	0.0947	0.0808	0.0002	0.0140
0.5797	0.7558	0.3361	0.5712	0.4381	0.0554	0.2355
0.1434	0.2878	0.0206	0.0828	0.0413	0.1383	0.3719
0.0337	0.2702	0.0011	0.0730	0.0091	0.1320	0.3633
0.4117	0.1432	0.1695	0.0205	0.0590	0.0437	0.2091
1.2883	1.1462	1.6597	1.3138	1.4767	0.0068	0.0827
0.8343	0.7888	0.6960	0.6222	0.6581	0.0110	0.1049
	SUMATORIA	18.8438	15.9107	16.2304	3.0144	8.2835

Con los resultados del Cuadro 7 y usando las ecuaciones mencionadas se tiene los siguientes resultados:

- **La suma residual cuadrática compuesta (CRSS)**

$$CRSS = \sum_{i=1}^N (Y_c - Y_m)^2 = 3.0144$$

- **El error medio absoluto (MAB)**

$$MAB = \sum_{i=1}^N \frac{ABS(Y_c - Y_m)}{N} = 0.2672$$

- **El error medio de la raíz cuadrática (RMSE)**

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_c - Y_m)^2}{N}} = 0.5169$$

- **El coeficiente de correlación (R)**

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (y_c - \bar{y}_c)(y_m - \bar{y}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_c - \bar{y}_c)^2 \sum_{i=1}^N (y_m - \bar{y}_m)^2}} = 0.9373$$

Cuadro 8. Resultados del análisis estadístico

SUMA RESIDUAL CUADRÁTICA COMPUESTA	CRRSS	3.0144
ERROR MEDIO ABSOLUTO	MAB	0.2672
ERROR MEDIO DE LA RAÍZ CUADRÁTICA	RMSE	0.5169
COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	R	0.9373

En la Figura 19 se muestra el comportamiento correspondiente de los datos estimados de la radiación solar global y la amplitud térmica diarios, como ejemplo del año 2013 para la estación de Yunguyo.

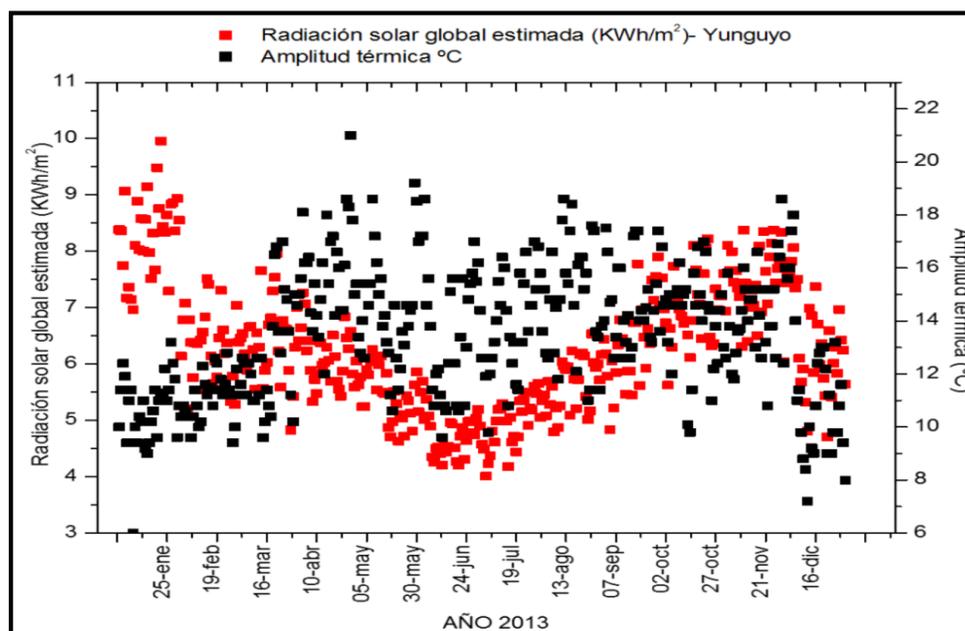


Figura 19. Radiación solar global diaria estimada y amplitud térmica en Yunguyo año 2013.

Observaciones de la Figura 19:

- Se muestra la relación estrecha entre las temperaturas máximas, mínimas y la radiación solar. La amplitud térmica es $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ que representa el rango de temperatura durante un día, la máxima se da durante el día entre las 11:00 am a 2:00 pm y la mínima en el amanecer a eso de las 4:00am a 5:00am (debido a las ondas cortas y largas de la radiación solar durante un día las 24 horas).
- En los extremos la amplitud térmica es menor debido a que los días presentan nubosidad, precipitación y estas hacen que las temperaturas desciendan. Por otro lado en el centro de la figura la amplitud térmica es alta debido a que las temperaturas descienden en la noche o en la sombra. Así mismo durante el día debido a los cielos despejados donde las temperaturas ascienden y ocasiona que la diferencia de temperaturas sean altas.

En la Figura 20 se muestra el comportamiento correspondiente de los datos estimados de la radiación solar global y la amplitud térmica diarios, como ejemplo para la estación de Juli del año 2007 al 2013.

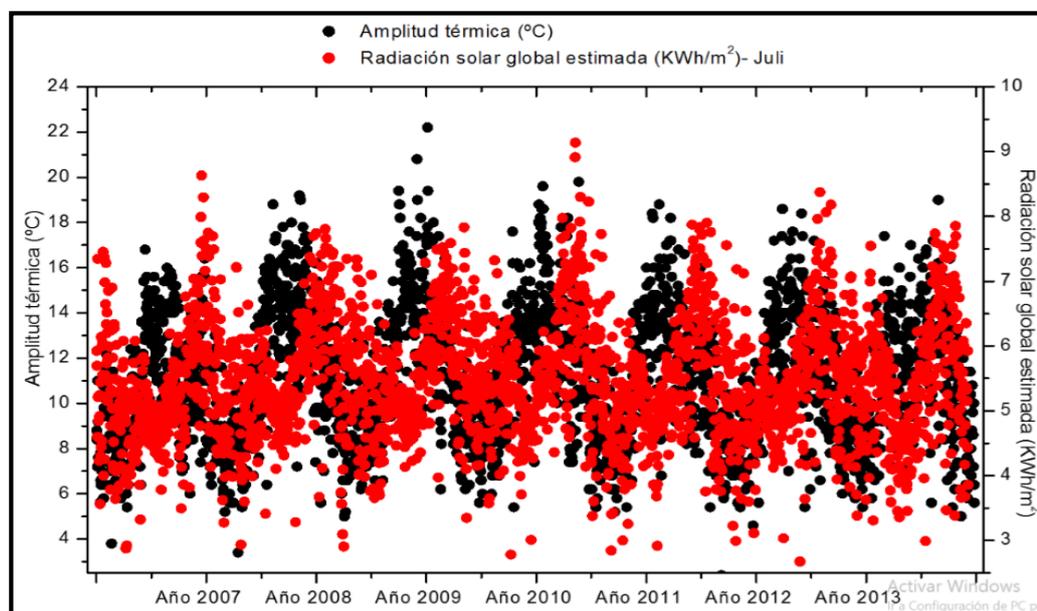


Figura 20. Radiación solar global estimada diaria y amplitud térmica en Juli del 2007 al 2013.

Observaciones de la Figura 20:

- Se muestra la relación estrecha entre las temperaturas máximas, mínimas y la radiación solar en la estación de Juli desde el 2007 hasta el 2013. Se cumple el Modelo propuesto por Bristow y Campbell. La amplitud térmica es $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ que representa el rango de temperatura durante un día, la máxima se da durante el día entre las 11:00 am a 2:00 pm y la mínima en el amanecer a eso de las 4:00am a 5:00am. Además la radiación solar global y la amplitud térmica es oscilatorio durante los años de estudio, debido a los fenómenos de afelio y perihelio.

En la Figura 21 se muestra el comportamiento correspondiente de los datos estimados y medidos de la radiación solar global diarios de la estación de la ciudad de Puno perteneciente al SENAMHI.

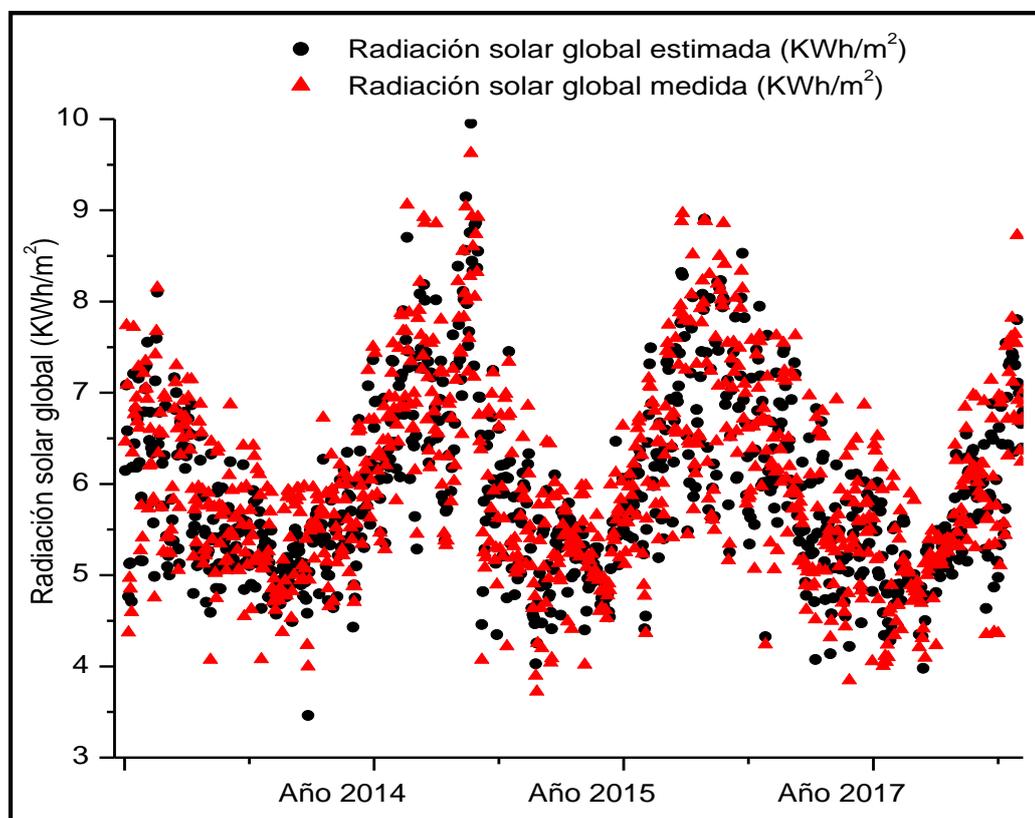


Figura 21. Radiación solar global diaria estimada y medida en la ciudad de Puno en los años 2014, 2015 y 2017.

Observaciones de la Figura 21:

- Se muestran los datos de radiación solar global diaria estimadas y medidas durante los años 2014, 2015 y 2017 de la ciudad de Puno, como se observa los datos estimados y medidos son similares, obteniéndose la correlación de Pearson un valor de 0.94, lo cual indica un alto valor de confianza.
- Se observa también de forma clara los fenómenos de afelio y perihelio durante los años de estudio.

En la Figura 22, se muestra la relación correspondiente de los datos estimados y medidos de la radiación solar global diarios de la estación de SENAMHI en la ciudad de Puno.

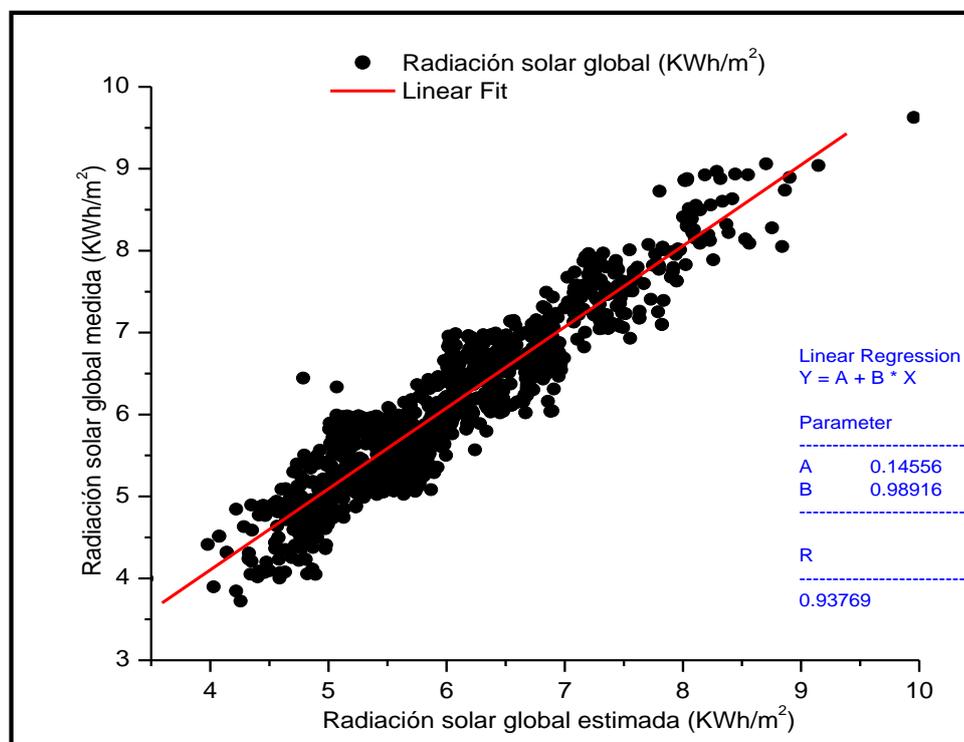


Figura 22. Correlación de Pearson de la Radiación solar global estimada y medida del 2014, 2015 y 2017.

Observaciones de la Figura 22:

- Se muestra la correlación lineal de Pearson con un valor de $r = 0.93769$ de la relación de los datos de radiación solar global diaria estimadas y medidas, durante los años 2014, 2015 y 2017 en la estación de Puno del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI el cual indica un alto valor de confianza al 93%.

El Cuadro 9 muestra los valores de radiación solar global promedios mensuales estimadas y medidas durante el año 2013 de las estaciones meteorológicas de SENAMHI en el Altiplano de Puno.

Cuadro 9. Radiación solar global estimada mensual en el año 2013 en el altiplano de Puno y rentabilidad

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	REN
ANANEA	5.9858	5.2965	5.7971	5.826	5.3292	5.0694	5.1928	5.849	6.7587	6.8585	7.3139	6.119	SI
CAPASO	7.1778	7.0715	7.2668	7.0563	6.0664	5.3232	5.727	6.6409	7.7529	8.2683	9.0918	7.5928	SI
MASOCRUZ	7.2303	6.9803	7.533	4.8372	6.4877	5.8117	6.0565	6.6264	8.3157	8.2329	9.1106	7.4829	SI
AZÁNGARO	6.5024	5.7845	6.1297	6.1593	5.8094	5.3608	5.7745	6.354	7.4101	7.2483	7.7443	6.4782	SI
CRUCERO	6.9439	6.388	6.3994	6.2324	5.9916	5.5747	6.0816	6.6279	7.7332	7.0508	7.7064	6.4998	SI
DESAGUADERO	5.7691	5.1686	5.7018	5.7464	5.0072	4.6489	4.7941	5.6154	6.495	6.7358	7.1278	5.9829	SI
HUANCANÉ	5.5293	5.648	5.1223	5.8053	5.7243	5.3738	5.4805	6.1293	6.803	6.9497	7.3716	6.2179	SI
ILAVE	7.6753	5.2957	6.0702	6.1827	5.4728	5.1555	5.2671	6.0394	6.889	6.8499	7.2557	6.2126	SI
PUTINA	6.7505	6.2792	6.5281	6.3774	6.0279	5.7365	5.9531	6.4846	7.5405	7.3625	8.0259	6.8801	SI
CAPACHICA	5.9858	5.2963	5.7971	5.826	5.3292	5.0694	5.1928	5.8492	6.7587	6.8585	7.3139	6.119	SI
JULI	5.7472	5.0704	5.4334	5.5947	4.986	4.523	4.6628	5.2865	6.1861	6.2052	6.2768	5.1928	SI
MOHO	6.144	5.5993	6.0883	5.9665	5.3853	5.0423	5.1447	5.7716	6.7854	6.7058	7.2059	6.001	SI
YUNGUYO	6.4338	6.2685	6.4389	6.1489	5.4854	4.7926	4.9804	5.6769	6.4425	7.0187	7.4467	6.3878	SI

Observaciones del Cuadro 9:

- Se muestra los valores obtenidos de radiación solar global en las estaciones meteorológicas en el altiplano de Puno con valores mayores a 4 KWh/m^2 , los cuales indican la alta rentabilidad en las aplicaciones de la energía solar en el altiplano de Puno en las zonas circunlacustre, Puna húmeda y clima de altura.

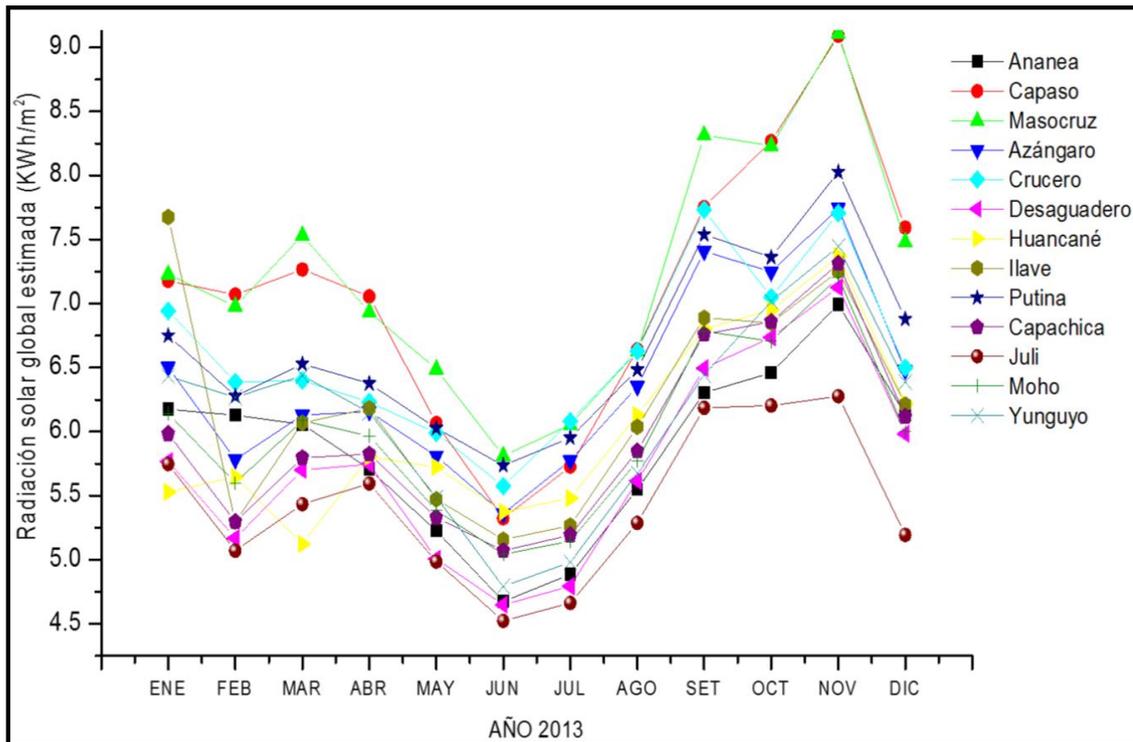


Figura 23. Radiación solar global promedio mensual en el Altiplano de Puno durante el año 2013.

Observaciones de la Figura 23:

- Se muestran los datos de radiación solar global promedios mensuales estimadas durante el año 2013 de las estaciones de SENAMHI en el altiplano de Puno, como era de esperarse para los meses de enero, febrero, marzo y abril los valores son altos debido al fenómeno del afelio la distancia más corta entre la tierra y el sol.
- En los meses mayo, junio, julio y agosto la radiación solar global disminuye debido al fenómeno perihelio la distancia más corta entre la tierra y el sol.

La Figura 24 muestra el comportamiento diario de la Transmitancia Atmosférica máxima diaria durante un año, para ello se utilizaron datos medidos de la estación meteorológica Davis de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano Puno. Además, los valores obtenidos de la transmitancia atmosférica máxima son mayores a 0.6 y menores a 1, los cuales indican que en su mayoría de los días durante el año son despejados, según las escalas mostradas por (Yousif *et al.*, 2013).

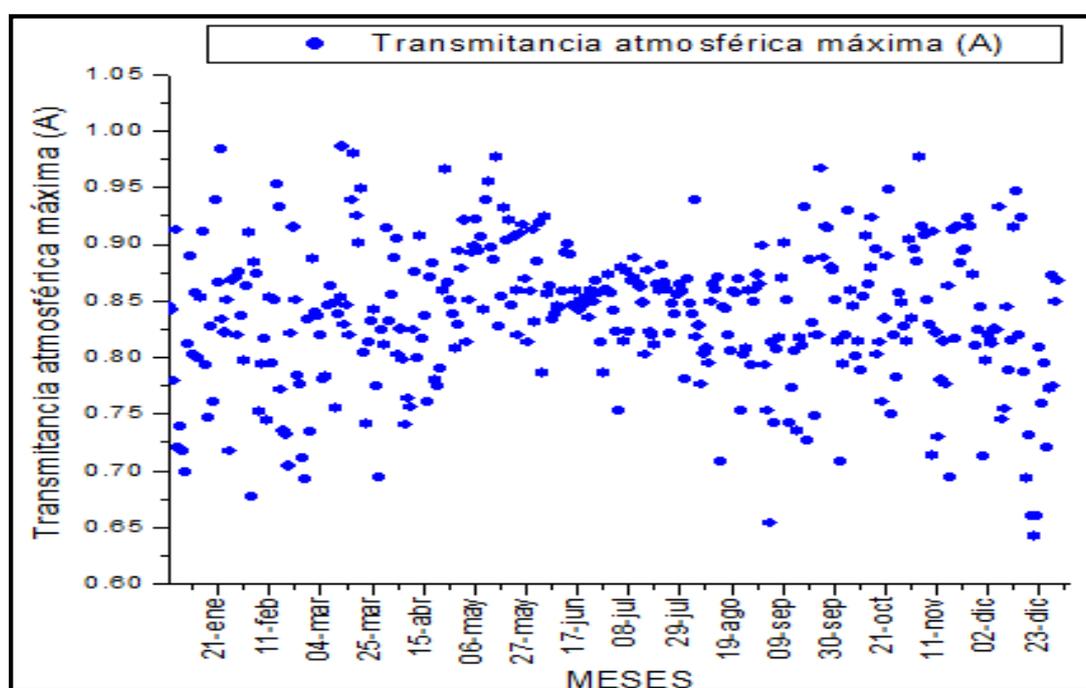


Figura 24. Promedio de la Transmitancia atmosférica máxima del 2015, 2016 y 2017.

Observaciones de la Figura 24:

- Se muestra el comportamiento de la transmitancia atmosférica máxima, notándose más disperso en los extremos debido a la presencia de días nublados y las precipitaciones que se dan entre los meses enero, febrero, marzo y abril; además de las que se dan entre los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

- Mientras que en el centro es menos disperso debido a la temporada de sequía, friaje o heladas, donde los días son despejados y se da entre los meses de mayo, junio, julio y agosto.
- Los valores de transmitancia atmosférica máxima promedio mensual obtenidos para Puno de enero hasta diciembre son 0.83, 0.81, 0.84, 0.83, 0.89, 0.86, 0.85, 0.83, 0.83, 0.84, 0.85 y 0.80 respectivamente, con promedio anual de 0.84, cabe mencionar en el año 2003 el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología realizó estudios de transmitancia atmosférica máxima obteniendo un valor de 0.82 anual (Atlas solar del Perú, 2003); por lo que comparando con el resultado de esta investigación se generó un error porcentual de 2.38% por lo que el resultado es confiable para realizar futuras investigaciones relacionadas a la determinación de la radiación solar global.

En el Cuadro 10 se muestra el promedio anual de la radiación solar global estimada en el altiplano de Puno desde el 2007 hasta el 2013, en la cual se puede observar la rentabilidad que estas poseen para las aplicaciones de la energía solar.

Observaciones del Cuadro 10:

- Se puede observar que en la zona clima de altura en donde se encuentran Capaso y Masacruz en la cual se obtuvo un promedio de los años de estudio de 7.0598 y 7.2984 KWh/m² respectivamente, siendo esta última que cuanta con mayor radiación solar global a excepto de Ananea.

- En la zona Puna húmeda en donde se encuentran Azángaro, crucero, desaguadero, Huancané, llave y putina se obtuvo un promedio anual de 6.5514, 6.7444, 5.9079, 6.3401, 6.2282 y 6.7831 KWh/m² los años de estudio respectivamente, siendo Putina con mayor radiación solar global.
- En la zona Circunlacustre en donde se encuentran Capachica, Juli, Moho, Puno y Yunguyo se obtuvo un promedio de los años de estudio de 5.9825, 5.4806, 6.0710, 5.9968 y 6.3424 KWh/m² respectivamente, siendo Yunguyo con mayor radiación solar global.

Cuadro 10. Radiación solar global promedio anual estimada en el altiplano de Puno.

RADIACIÓN SOLAR GLOBAL ESTIMADA PROMEDIO ANUAL (KWh/m ²)								
ESTACIÓN	ALTITUD	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
ANANEA	4650	6.1634	5.9033	6.0203	6.0362	5.7705	5.8357	5.8865
CAPASO	4530	7.0052	7.2918	7.2317	7.2399	7.06	6.5211	7.0691
MASOCRUZ	4100	7.2948	7.6202	7.4145	7.2823	7.1452	7.1209	7.2109
CRUCERO	4100	6.6209	6.7555	6.7803	6.8126	6.7538	6.8384	6.6492
CAPACHICA	3933	6.0647	6.0686	5.9948	6.0882	5.8862	5.8168	5.9581
HUANCANÉ	3890	6.1914	6.39	6.4406	6.5436	6.4068	6.3769	6.0317
MOHO	3890	5.9664	6.0802	6.1116	6.1894	6.1965	5.9529	6.0003
ILAVE	3880	6.3148	6.5326	6.4934	6.3633	5.949	5.7326	6.2118
PUTINA	3878	6.6341	6.8805	6.821	6.8182	6.7838	6.8513	6.6927
AZÁNGARO	3863	6.4672	6.707	6.6034	6.751	6.3782	6.5256	6.4275
DESAGUADERO	3860	5.9439	6.1011	6.1051	6.0703	5.7919	5.6301	5.7132
PUNO	3827	5.9514	5.9514	6.0719	6.0564	6.1206	5.8292	no
JULI	3812	5.3172	5.4894	5.5555	5.603	5.4162	5.3784	5.6046
YUNGUYO	3812	no	6.2656	6.3679	6.5978	6.4395	6.1150	6.2683

- En la Figura 25 se muestra los valores de radiación solar global promedios mensuales estimadas y medidas desde el 2007 al 2013 de las estaciones meteorológicas de SENAMHI en el Altiplano de Puno.

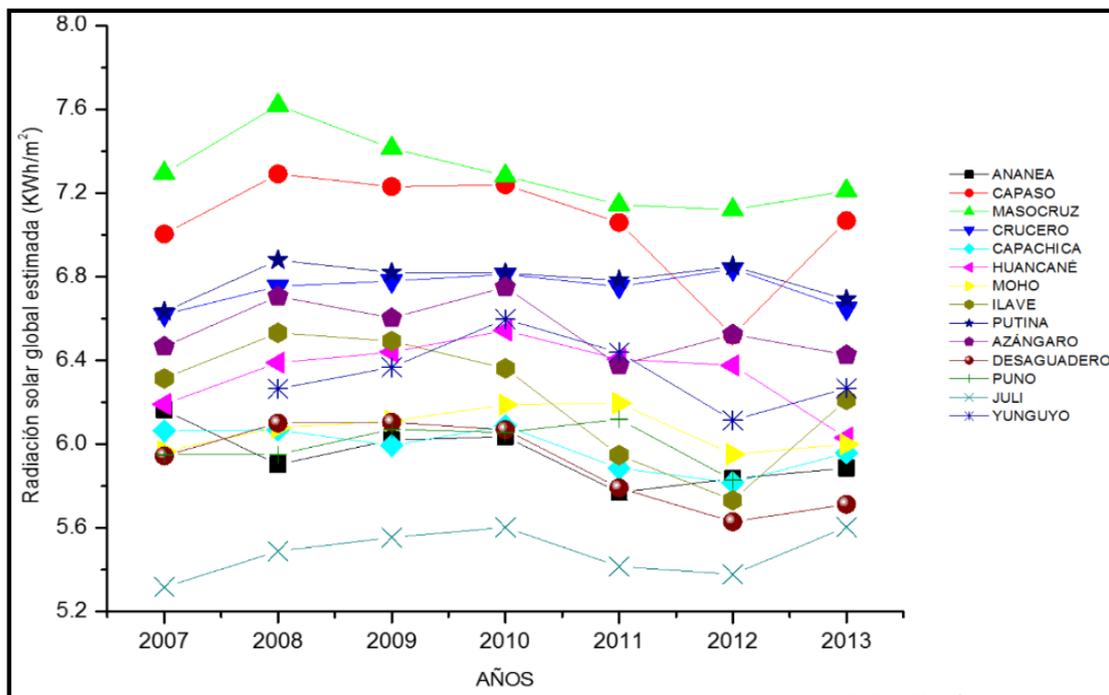


Figura 25. Promedio anual de la radiación solar global del 2007 al 2013.

Observaciones de la Figura 25:

- Se puede observar que en la zona clima de altura en donde se encuentra la estación Masocruz a 4100 m.s.n.m. es en la cual se obtuvo un promedio más alto de radiación solar global y el mínimo valor en la estación de Juli ubicada a 3812 m.s.n.m.
- De la Física Atmosférica se sabe que a medida que aumente la altura, la atmosfera se hace más tenue, por lo que el valor de la radiación solar debe ser mayor que en sitios menos altos, lo cual nos indica (Iqbal, 1983), lo que se cumple en el altiplano de Puno.
- De los años estudiados del 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013, se puede observar en la Figura 25 que en el año 2012 se dio las

radiaciones solares mas bajas, a pesar de ello los valores obtenidos son muy alentadores para las aplicaciones de las energias limpias y verdes.

En la Figura 26, se muestra el comportamiento correspondiente de los datos estimados a partir del 2007 al 2017 y medidos del 2015 al 2017 de la radiación solar global diarios de la estación de Puno perteneciente al SENAMHI. Cabe mencionar que esta entidad realiza mediciones de radiación solar global a partir del año 2014, así mismo los años 2015 y 2017, a excepto del año 2016 que no se tienen datos registrados. Con respecto a la amplitud térmica se tienen datos registrados a partir del 1964. Con tales datos se reconstruirá la radiación solar global de los años pasados, así conocer su evolución espacio temporal en el Altiplano de Puno para posteriores estudios y aplicaciones.

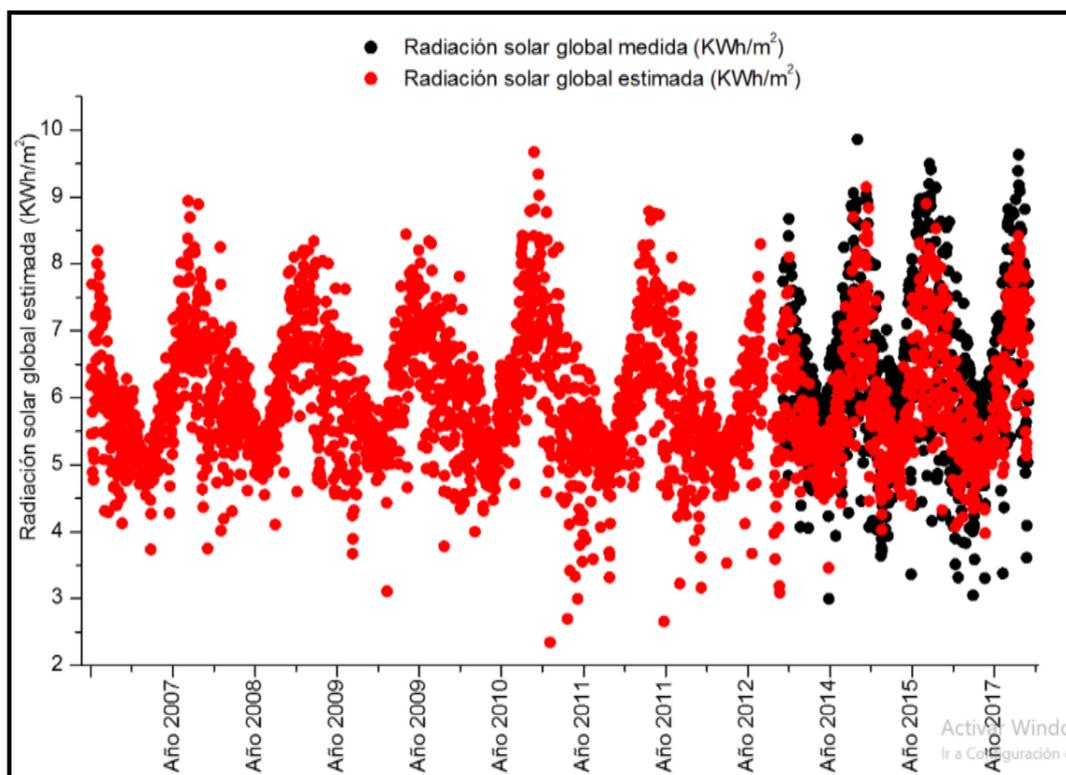


Figura 26. Radiación solar global estimada y medida en Puno.

Observaciones de la Figura 26:

- Se puede observar la evolución temporal de la radiación solar global diaria a partir del 2007 al 2017 en la ciudad de Puno en la cual se observa la similitud de sus valores durante los años 2014, 2015 y 2017.
- También se observa los fenómenos de afelio y perihelio durante los años de estudio, además la relación estrecha entre la radiación solar global, amplitud térmica y la transmitancia atmosférica máxima.

CONCLUSIONES

- El modelo empírico Bristow y Campbell permite determinar la radiación solar global diaria confiablemente en el altiplano de Puno en las zonas circunlacustre, puna húmeda y clima de altura con datos de entrada de temperaturas máximas y mínimas con coeficiente de correlación $r=0.9376$; además, existe una influencia directa de los elementos climáticos de amplitud térmica y latitud de la zona de estudio en relación a la radiación solar global.
- Se ha realizado estimaciones de radiación solar global diaria en el altiplano de Puno, durante los años 2007 al 2013 con datos de entrada de SENAMHI Puno obteniéndose un máximo valor promedio de los años estudiados de 7.2984KWh/m^2 en la estación de Masacruz ubicada en la zona clima de altura y un mínimo valor promedio de los años estudiados de 5.4806KWh/m^2 en la estación de Juli ubicada en la zona circunlacustre.
- Así mismo estos resultados obtenidos mayores a 4KWh/m^2 son muy rentables para las aplicaciones en energía solar, según la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía Solar), tales como colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos, viviendas bioclimatizadas, etc.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda tener información sobre la esfera celeste, radiación solar, el programa Excel, Microcal Origin 6.0 y data estudio, para así entender este trabajo sin dificultad.
- Al tener el altiplano de Puno un potencial de radiación solar global mayores a 4KWh/m^2 - día que es considerado muy rentable por la OLADE, esta información obtenida se recomienda divulgar para captar la atención de inversionistas y público general hacia las fuentes de energías renovables y el desarrollo de las tecnologías para obtener calor y electricidad mediante el uso de colectores solares térmicos y módulos fotovoltaicos.
- Para reducir el error de correlación de Pearson en la radiación solar global estimada se recomienda calcular para cada día juliano, de esta manera se disminuye la variabilidad de los valores en los días atípicos

BIBLIOGRAFÍA

- Aburto Schweitzer, C. A. (2013). *Elaboración de un Modelo de Estimación de la Distribución Espacial de la Radiación Solar Global Mensual para Chile Central*. Journal of Chemical Information and Modeling. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Almorox, J., Benito, M., & Hontoria, C. (2008). Estimación da radiação solar global em Venezuela. *Interciencia*, 33(4), 280–283. <https://doi.org/10.1007/BF02246653>.
- Álvarez Hernández, O., & Montaña Peralta, T. (2014). La radiación solar global en la provincia de Loja , evaluación preliminar utilizando el método de Hottel. *Ingenius*, 11, 25–31.
- Antón, M., Román, R., Sanchez-lorenzo, A., Calbó, J., & Vaquero, J. M. (2017). Variability analysis of the reconstructed daily global solar radiation under all-sky and cloud-free conditions in Madrid during the period 1887 – 1950. *Atmospheric Research*, 191, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.03.013>.
- Anton Martinez, M. (2007). *Modelos empíricos para la estimación de la irradiancia solar ultravioleta*. universidad de extremadura. Tesis doctoral.
- Ayodele, T. R., & Ogunjuyigbe, A. S. O. (2015). Prediction of monthly average global solar radiation based on statistical distribution of clearness index. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.137>
- Baigorria, G. A., Villegas, E. B., Trebejo, I., Carlos, J. F., & Quiroz, R. (2004). Atmospheric transmissivity: Distribution and empirical estimation around the central Andes. *International Journal of Climatology*, 24(9), 1121–1136. <https://doi.org/10.1002/joc.1060>
- Barros, V. (2005). *El Cambio Climatico Global*. (Libros el Zorzal, Ed.) (2da edición). Buenos Aires.
- Belaid, S., & Mellit, A. (2016). Prediction of daily and mean monthly global solar radiation using support vector machine in an arid climate. *Energy Conversion*

- and Management*, 118, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.082>
- Bengulescu, M., Blanc, P., & Wald, L. (2016). Characterizing temporal variability in measurements of surface solar radiation and its dependence on climate. *Energy Procedia*, 97, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.045>
- Beruski, G. C., Pereira, A. B., & Sentelhas, P. C. (2015). Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em ponta grossa, PR. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(2), 205–213. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130097>.
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(427), 159–166.
- Camayo Lapa, F. B., Massipe Hernandez, R. J., Pomachagua Paucar, E. J., Torres-Ten, A., & Quispe-Flores, M. (2017). Validación y aplicación del modelo Bristow Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junín. *Tecnología Química*, XXXVII, núm. 3, 2017, pp. 621–637.
- Camayo Lapa, F. B., Massipe Hernandez, R. J., Pomachagua Paucar, E. J., Torres-Ten, A., Quispe-Flores, M. O., & Oswaldo, M. (2015). Desarrollo del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global de la Región de Junin , Perú.
- Cañada, J. (1988). Global solar radiation in Valencia using sunshine hours and meteorological data. *Solar and Wind Technology*, 5(6), 597–599. [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(88\)90055-0](https://doi.org/10.1016/0741-983X(88)90055-0).
- Casal Bejarano, C. (2010). *Caracterización de la radiación ultravioleta en la provincia de Huelva e incidencia en la productividad y el valor biotecnológico de cultivos de interés comercial*. Historia. Universidad de Huelva. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Castro Diez, Y. (1986). *Determinación y estudio de las características de la radiación solar una contribución a su predicción climatológica mediante modelos*. Universidad de Granada. Tesis doctoral.
- Chang, T., Liu, F., Ko, H., & Huang, M. (2017). Oscillation characteristic study of wind speed , global solar radiation and air temperature using wavelet analysis. *Applied Energy*, 190, 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.149>
- Conceição, M. (2010). Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow-Campbell. *Eng. Agric., Jaboticabal*, 30(4), 619–626.
- Da Silva Martins, P. A., Santos Querino, C. A., Marques Pavão, V., Albuquerque da Silva Querino, J. K., & Gomes Machado, Nadja; Sacardi Biudes, M. (2014). Verificação da turbidez atmosférica em Humaitá-Am, XII, 86–98.
- Da Silva Martins, P. A., Santos Querino, C. A., Marques Pavão, V., Albuquerque da Silva Querino, J. K., & Gomes Machado, Nadja; Sacardi Biudes, M.

- (2014). Verificação da turbidez atmosférica em Humaitá-Am, *XII*, 86–98.
- Delgado Orellana, G. J., & Orellana Samaniego, M. L. (2015a). *Estimación de la radiación solar global diaria en el cantón cuenca mediante la aplicación del modelo Bristow & Campbell*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Díaz Reyes, F. (2013). *Modelo numérico para la generación de mapas de radiación solar y su aplicación al aprovechamiento de energía solar fotovoltaica y termoeléctrica*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Tesis Doctoral.
- Díaz Rodríguez, A. M. (2005). *Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias*. Tesis doctoral.
- Duffie, J. a., & Beckman, W. a. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes. Journal of Solar Energy Engineering* (Fourth edi, Vol. 116). <https://doi.org/10.1115/1.2930068>.
- Dumas, A., Andrisani, A., Bonnici, M., Graditi, G., Leanza, G., Madonia, M., & Trancossi, M. (2015). A new correlation between global solar energy radiation and daily temperature variations. *Solar Energy*, 116, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.002>.
- Echer, E., Souza, M. P., & Schuch, N. J. (2001). A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23(3), 276–283.
- El Mghouchi, Y., El Bouardi, A., Choulli, Z., & Ajzoul, T. (2016). Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.044>
- Falcón, Nelson; Peña, F.; Mavo, H.; Muñoz, R. (2001). Irradiación solar global en la ciudad de Valencia. *Revista Ingeniería UC*, 8(2), 0.
- Flores Condori, E. (2017). *Metodología de la investigación científica para ingenieros* (1ra. edición). Puno.
- Flores Condori, E., & Flores Quispe, E. L. (2011). *Caracterización agroclimática en función de los elementos meteorológicos en el altiplano del Peru (2010-2011)*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Fu, Q. (2015). Radiación transfer in the Atmosphere. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2nd editio, Vol. 5, pp. 37–44). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00444-8>.
- Hartmann, D. L. (2016). *Global Physical Climatology*. (Elsevier, Ed.) (Second edition). USA.
- Hassan, G. E., Youssef, M. E., Mohamed, Z. E., Ali, M. A., & Hanafy, A. A. (2016). New Temperature-based Models for Predicting Global Solar Radiation. *Applied Energy*, 179, 437–450. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.006>.

- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto, New York, London.
- Izquierdo Belmonte, P. (2010). *Evaluación de la energía solar global, difusa y directa en España. Atlas de radiación solar*. Universidade da Vigo. <https://doi.org/10.1174/021435502753511268>.
- Li, D. H. W., Lou, S. W., & Lam, J. C. (2015). An Analysis of Global , Direct and Diffuse Solar Radiation. *Energy Procedia*, 75, 388–393. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.399>
- Linacre, E. (2005). *Climate data and resources: a reference and guide*.
- Liou, K.L. (1976). On the absorption, reflection and transmission of solar radiation in cloudy atmosphere. *Journal of Atmospheric Science*, 33, 798–850. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033<0798:OTARAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<0798:OTARAT>2.0.CO;2).
- Liou, K. N. (2002). *An introduction to Atmospheric Radiation* (2nd edition). London, California: Elsevier Science.
- Lopes de Lima, F. J. (2015). *Previsão de irradiação solar no nordeste do Brasil empregando o modelo WRF ajustado por Redes Neurais Artificiais (RNAs)*. Inpe.
- López Velázquez, J. E. (2013). *Modelos empíricos para la estimación de la radiación solar difusa en Xalapa , Veracruz*. Universidad de Veracruz.
- Manzano, A. M., Martín, L., Valero, F., & Armenta, C. (2015). A single method to estimate the daily global solar radiation from monthly data. *Atmospheric Research*, 166, 70–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.017>.
- Marzo, A., Trigo, M., Alonso-Montesinos, J., Martínez-Durbán, M., López, G., Ferrada, P., Batlles, F. J. (2017). Daily global solar radiation estimation in desert areas using daily extreme temperatures and extraterrestrial radiation. *Renewable Energy*, 113, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.061>.
- Ming, T., Richter, R. De, Liu, W., & Caillol, S. (2014). Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 792–834. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.032>.
- Muñoz, J., Calbó, J., González, J., Sanchez-lorenzo, A., & Sanchez-romero, A. (2013). Reconstrucción y análisis de la serie de radiación solar de Girona (1990-2013), 35–44.
- Ocampo, Dora; Rivas, R. (2013). Estimación de la radiación neta diaria a partir de modelos de regresión lineal múltiple. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 19(2), 263–271. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.04.031>.
- Oesterle, H. (2001). Reconstruction of Daily Global Radiation for Past Years for use in Agricultural Models. *Phys. Chem. Earth (B)*, 26(3), 253–256.

- Ohunakin, O. S., Adaramola, M. S., Oyewola, O. M., Matthew, O. J., & Fagbenle, R. O. (2015). The effect of climate change on solar radiation in Nigeria. *Solar Energy*, 116, 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.027>.
- Oliveira, G. Q. De, Biscaro, G. A., Lopes, A. S., Jung, L. H., & Schwerz, F. (2014). Comparison between global solar radiation models in Aquidauana, Alto Pantanal region, Brazil. *Comunicata Scientiae*, 5 (November 2012), 222–228.
- Pacheco de Souza, A., Carvalho da Silva, A., Tanaka Aki, A., Uliana Morgan, E., Terra de Almeida, F., Evaldo Klar, A., & Almeida Gomes, A. W. (2017). Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(4), 215–227. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000400001>.
- Pomares, L. M. (2012). *Análisis y predicción de series temporales de irradiancia solar global mediante modelos estadísticos*. Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral.
- Quej, V. H., Almorox, J., Ibrakhimov, M., & Saito, L. (2016). Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán. *Energy Conversion and Management*, 110, 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.050>
- Querino, C. A. S., Moura, M. A. L., Lyra, R. F. da F., & Mariano, G. L. (2006). Avaliação E Comparação De Radiação Solar Global E Albedo Com Ângulo Zênital Na Região Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 42–49.
- Quiñones Juárez, L. A. (2012). *Modelo preliminar de la irradiación UV en el D.F.* Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría.
- Rodríguez Jiménez, R. M.; Benito Capa, Á., & Portela Lozano, A. (2004). *Meteorología y Climatología*. <https://doi.org/M-XXXXX-2004>.
- Rojas Serrano, J., Vásquez Vega, A., García Acevedo, F., Parra Peñaranda, D., & Castro Becerra, E. (2016). Estimating missing data in historic series of global radiation through neural network algorithms. *Sistemas & Telemática*, 14(37), 9–22. <https://doi.org/10.18046/syt.v14i37.2239>.
- Román, R., Bilbao, J., & De Miguel, A. (2014). Reconstruction of six decades of daily total solar shortwave irradiation in the Iberian Peninsula using sunshine duration records. *Atmospheric Environment Journal*, 99, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.052>.
- Román Diez, R. (2010). *Efectos de los componentes atmosféricos sobre la radiación eritemática y modelo propuesto para la reconstrucción de series*. Universidad de Valladolid. Retrieved from <http://www5.uva.es/renova/esp/Roman2010.pdf>.
- Sendanayake, S., Miguntanna, N. P., & Jayasinghe, M. T. R. (2015). Predicting solar radiation for tropical islands from rainfall data. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 9(2), 109–118. <https://doi.org/10.4090/juee.2015.v9n2.109118>.

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). (2003). Atlas de Energía Solar del Perú. Lima, Perú.
- Silva, V. J. da, Silva, C. R. da, Finzi, R. R., & Dias, N. da S. (2012). Métodos para estimar radiación solar na região noroeste de Minas Gerais. *Ciência Rural*, 42(2), 276–282.
- Steinmetz, S., Nunes Deibler, A., & Baptista da Silva, J. (2013). Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiación solar global e da temperatura mínima do ar. *Ciência Rural*, 43(2), 206–211. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000200003>.
- Teixera da Silva, P. R. (2007). *Radiación solar global mensal para o estado de Alagoas – Mapeamento*. Universidade Federal de Alagoas. Tesis de maestría.
- Velasco Herrera, V. M., Mendoza, B., & Velasco Herrera, G. (2015). Reconstruction and prediction of the total solar irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st century. *New Astronomy*, 34, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009>.
- Velázquez de Castro González, F. (2005). Cambio climático y protocolo de Kioto. Ciencia y estrategias. Compromisos para España. *Rev Esp Salud Pública*, 79, 191–201.
- Wild, M. (2012). Enlightening Global Dimming and Brightening. *American Meteorological Society*, 14(July 2011), 7927. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00074.1>.
- Yao, W., Li, Z., Wang, Y., Jiang, F., & Hu, L. (2014). Evaluation of global solar radiation models for Shanghai , China. *Energy Conversion and Management*, 84, 597–612. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.017>
- Yousif, C., Oña Quecedo, G., & Bilbao Santos, J. (2013). Comparison of solar radiation in Marsaxlokk. *Renewable Energy*, 49(June), 203–206. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.031>.
- Zhang, X. (2014). A statistical approach for sub-hourly solar radiation reconstruction. *Renewable Energy*, 71, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.038>.

<http://www.davisweather.com>



ANEXOS

Anexo 1. Radiación solar global en el altiplano de Puno desde 2007 al 2013.

Determinación de la Radiación Solar Global estimada desde el 2007 hasta el 2013 de las estaciones meteorológicas de SENAMHI Puno ubicadas en el Altiplano de Puno.

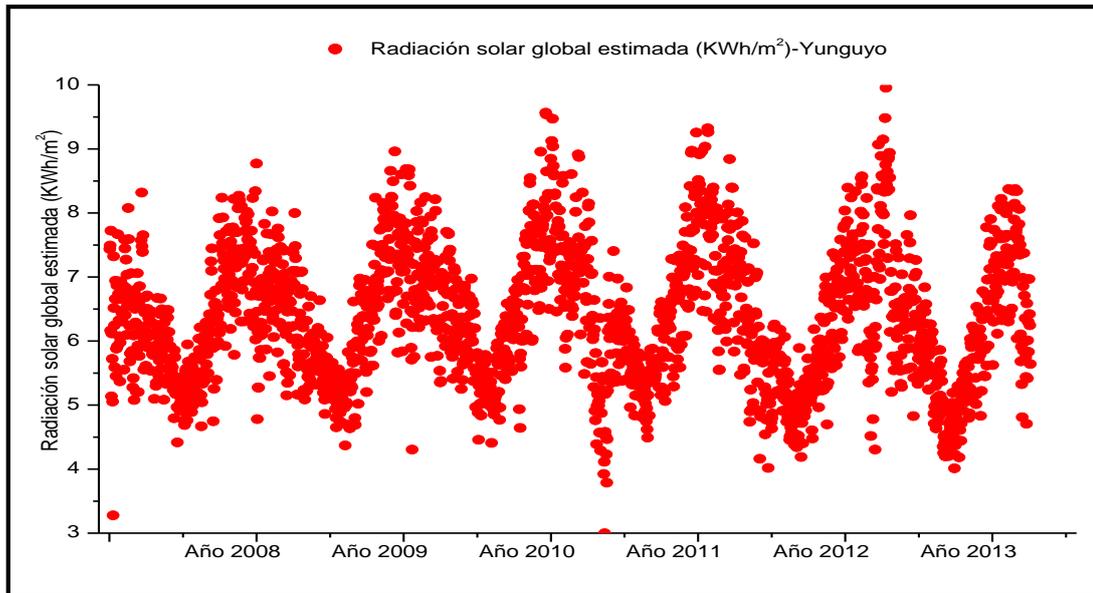


Figura 27. Radiación solar global estimada desde 2008 al 2013 en Yunguyo.

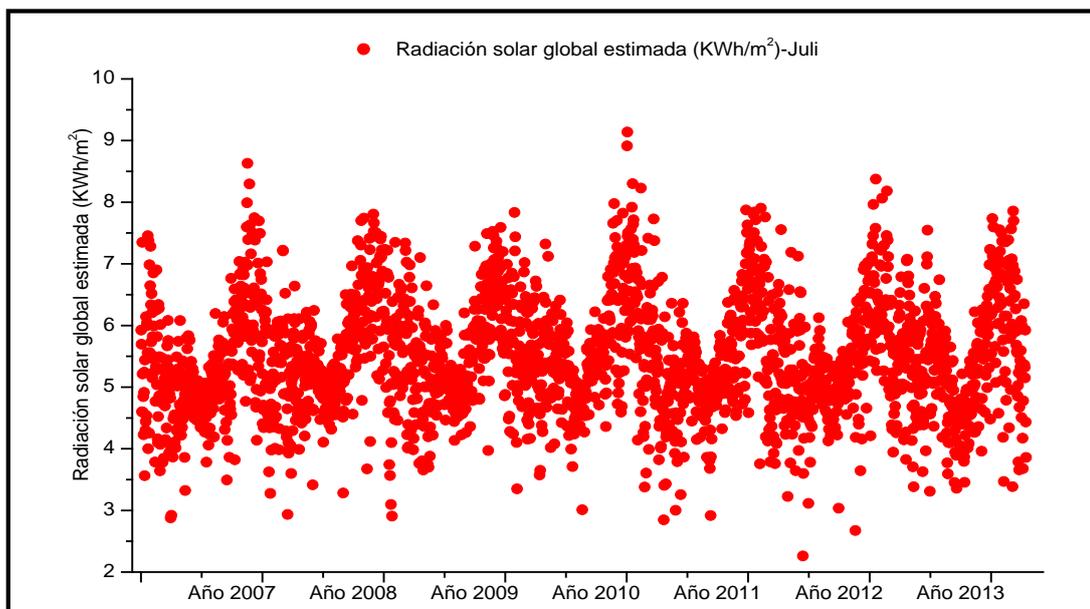


Figura 28. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Juli.

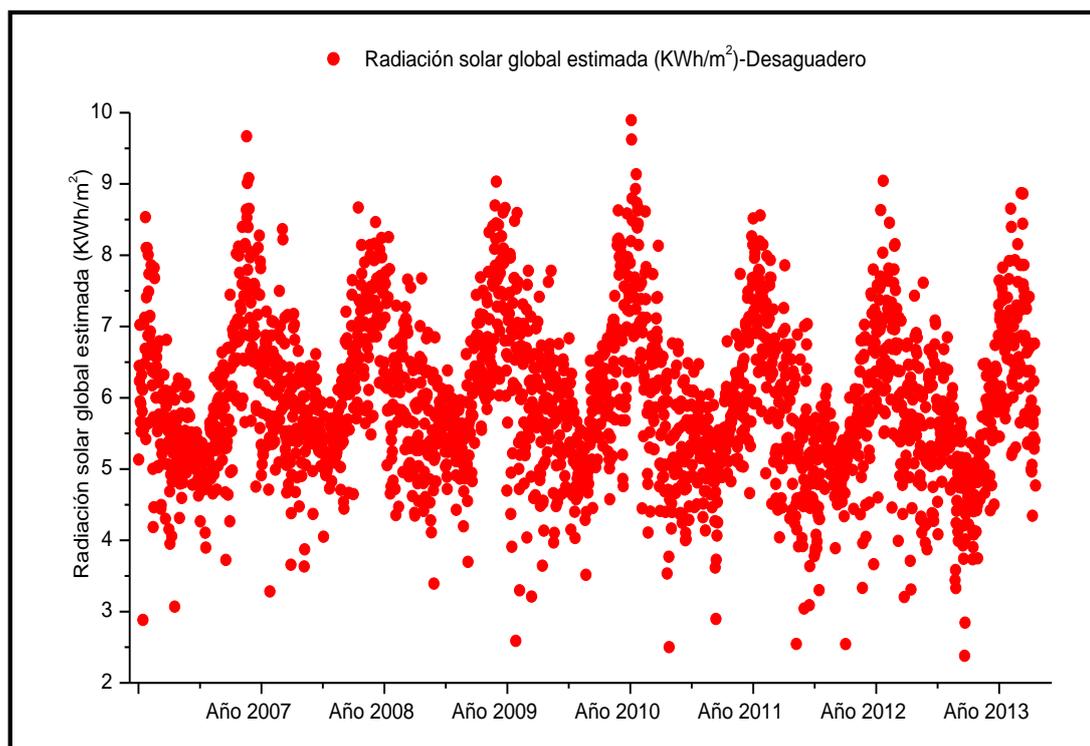


Figura 29. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Desaguadero.

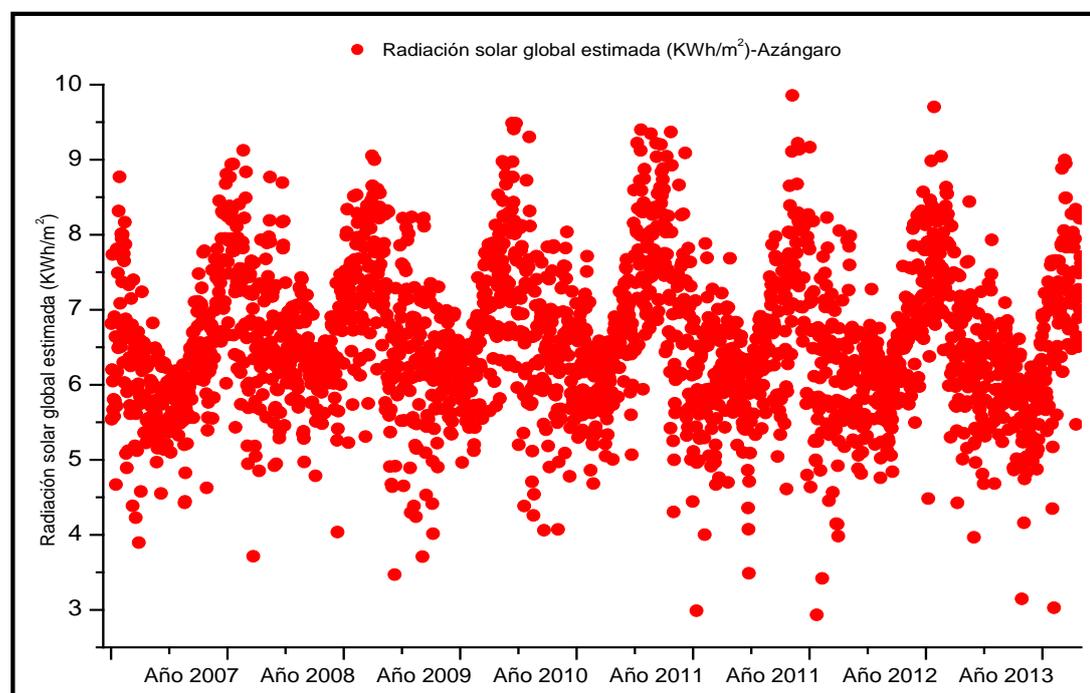


Figura 30. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Azángaro.

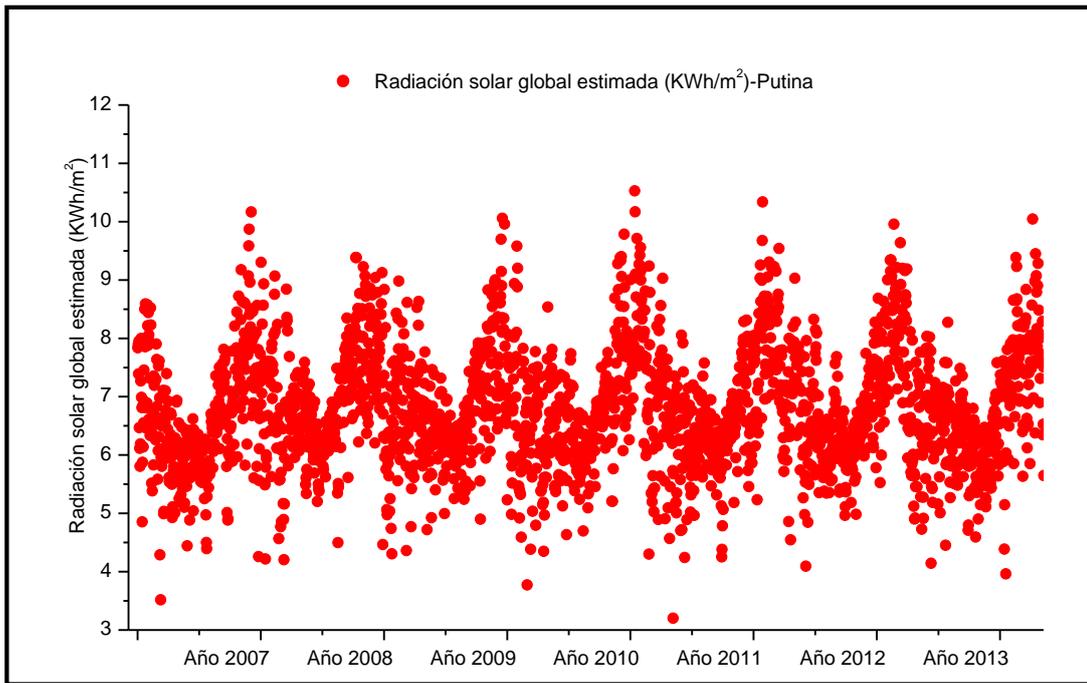


Figura 31. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Putina.

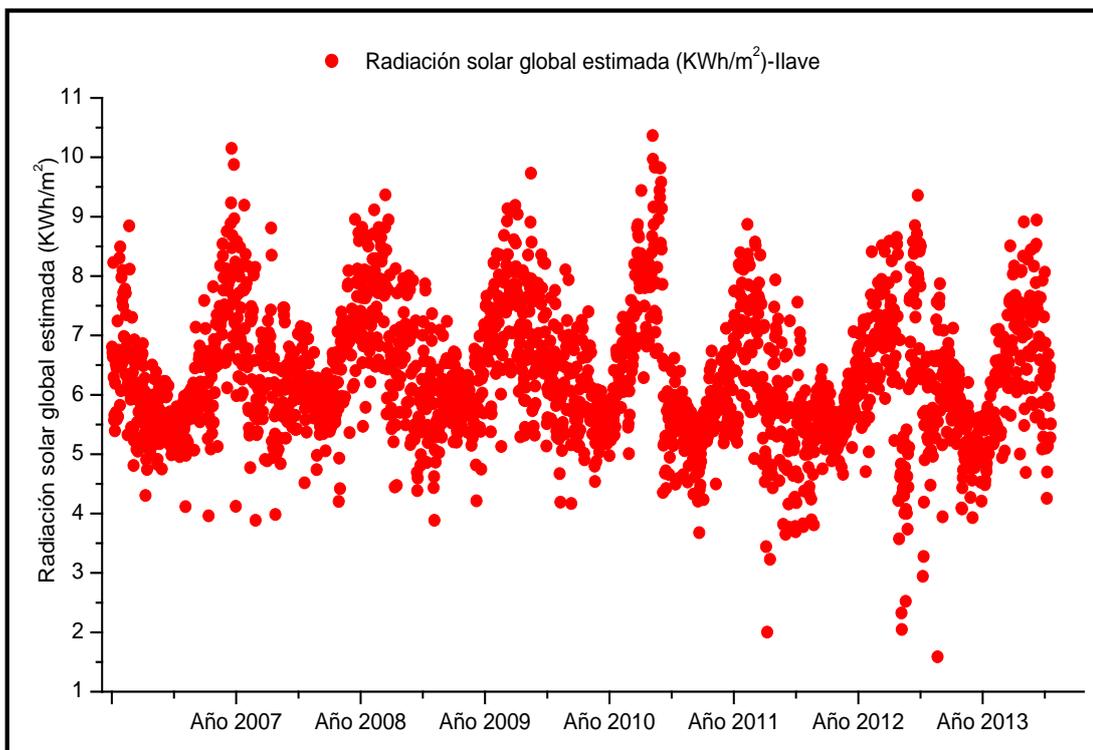


Figura 32. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Ilave.

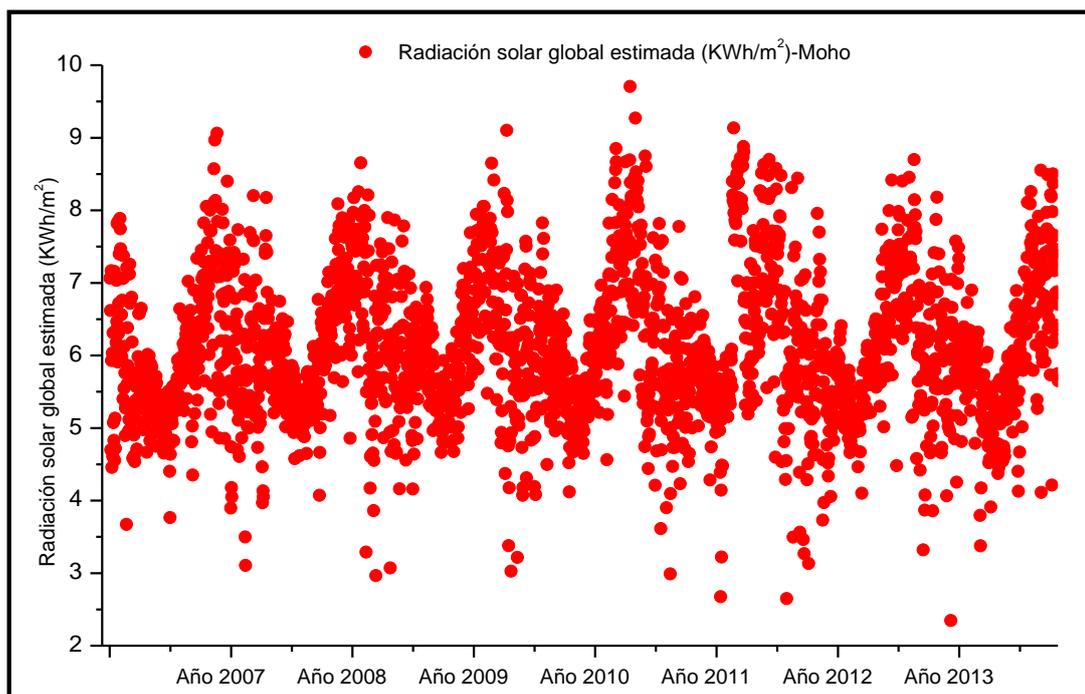


Figura 33. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Moho.

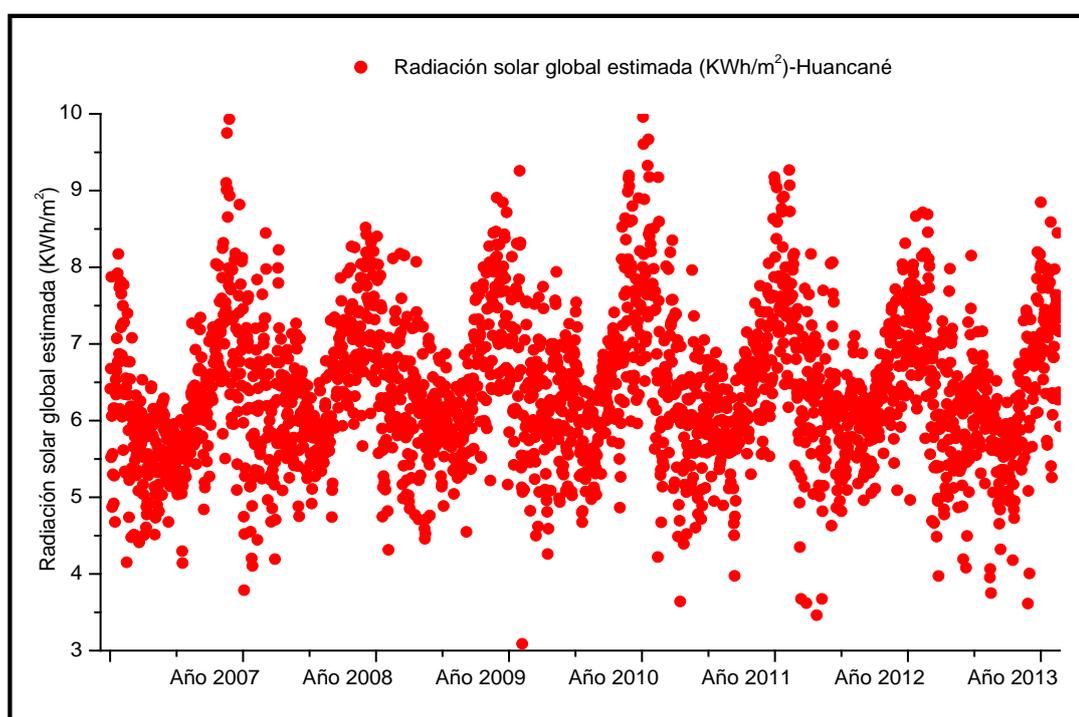


Figura 34. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Huancané.

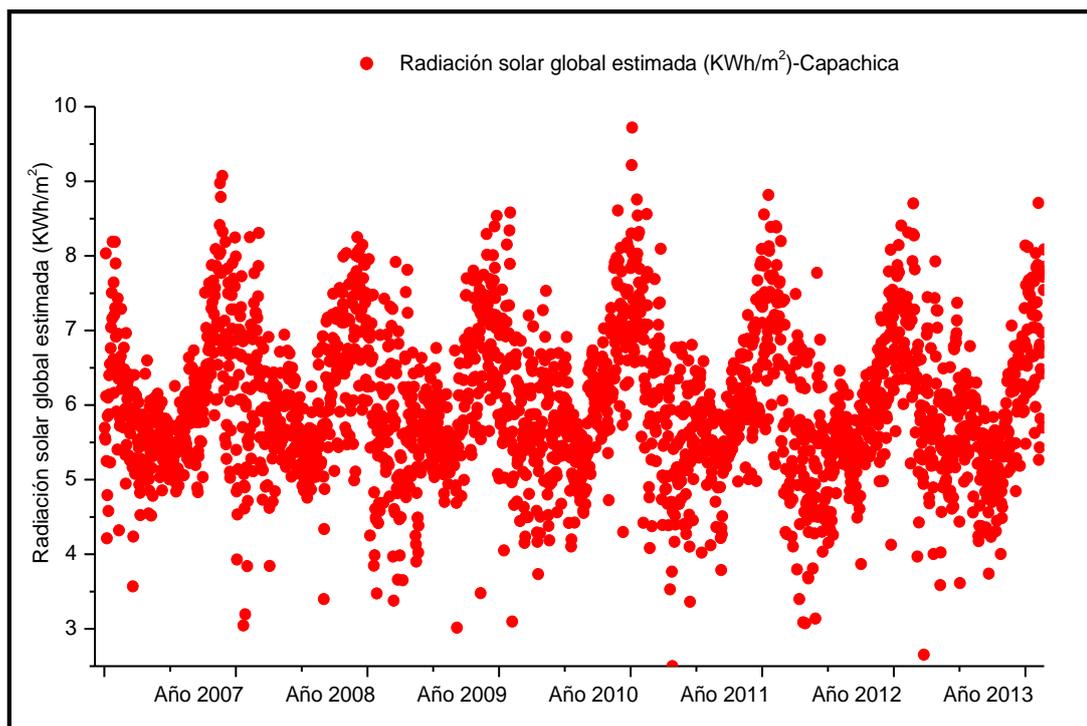


Figura 35. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Capachica.

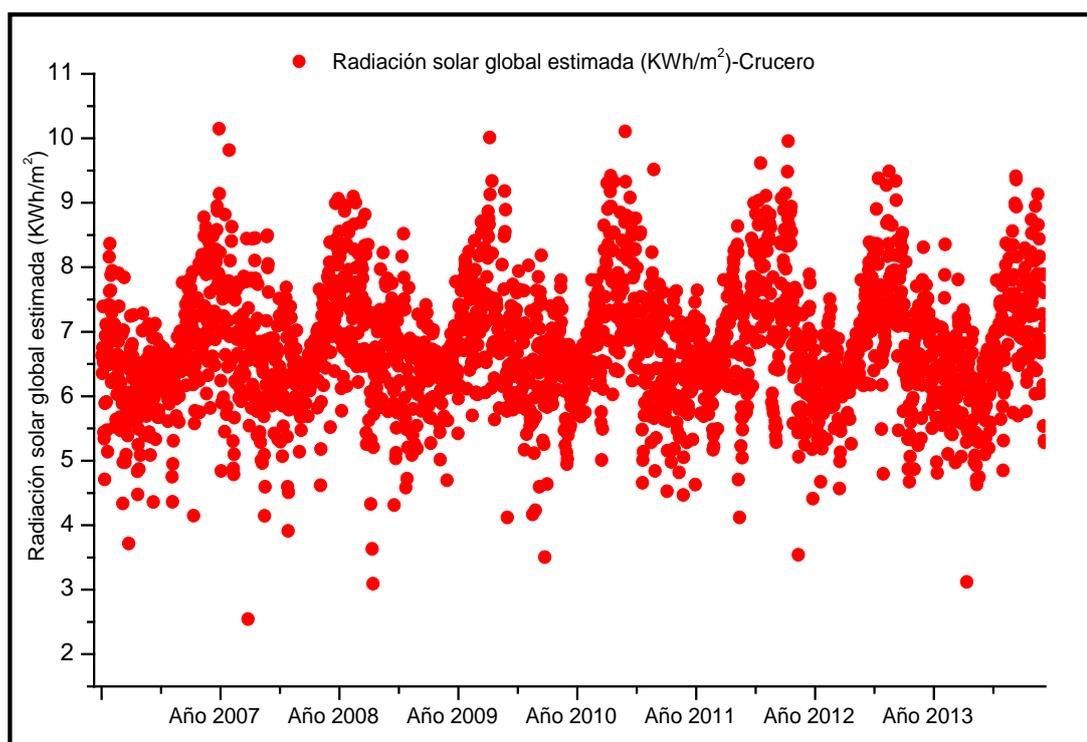


Figura 36. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Crucero.

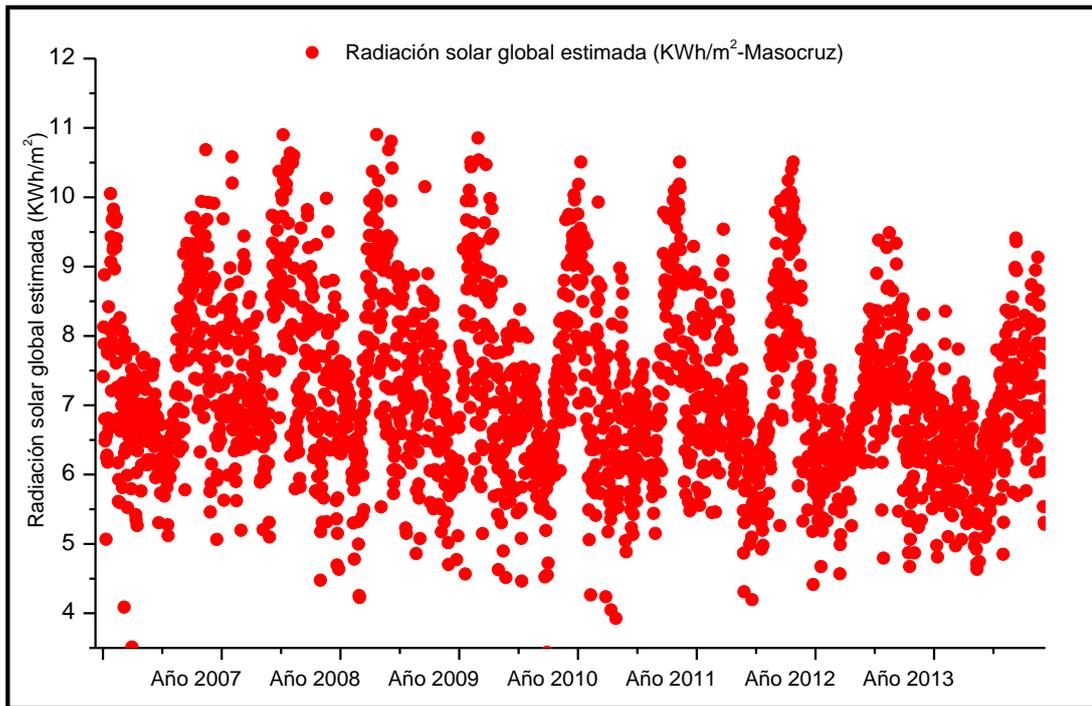


Figura 37. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Masacruz.

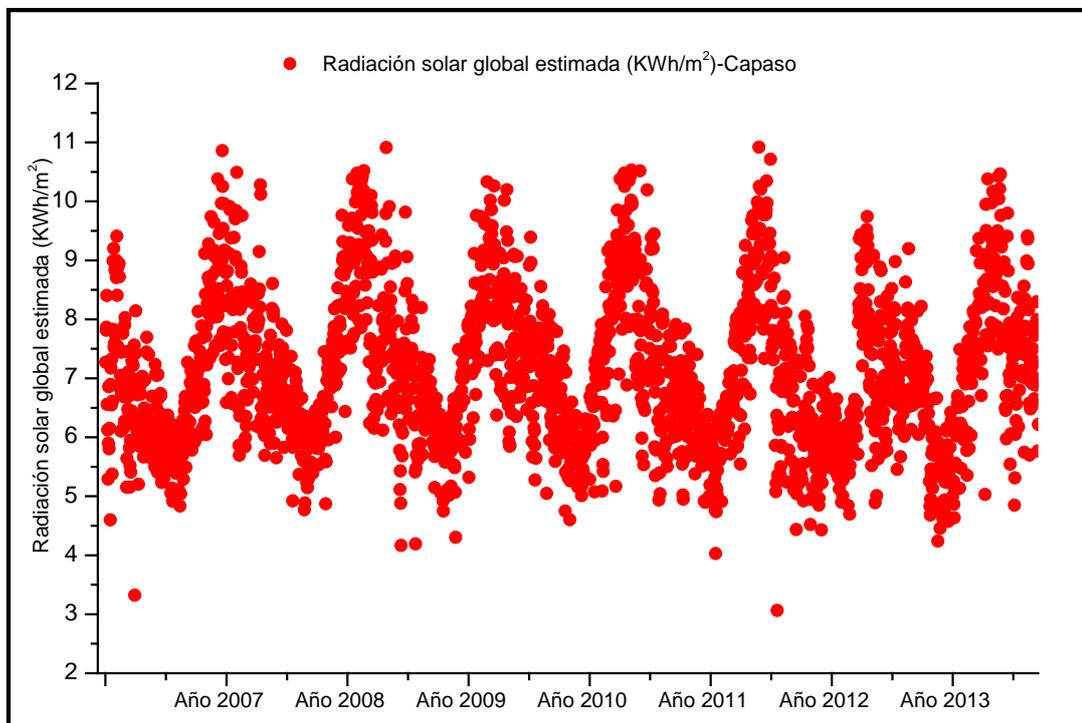


Figura 38. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Capaso.

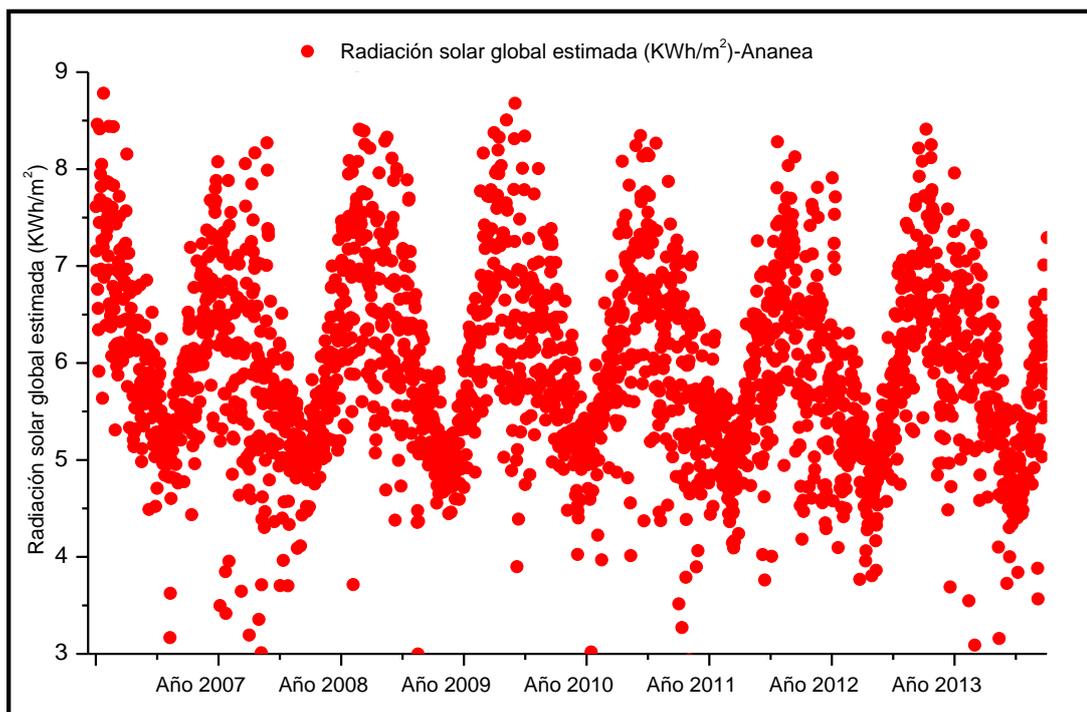


Figura 39. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Ananea.

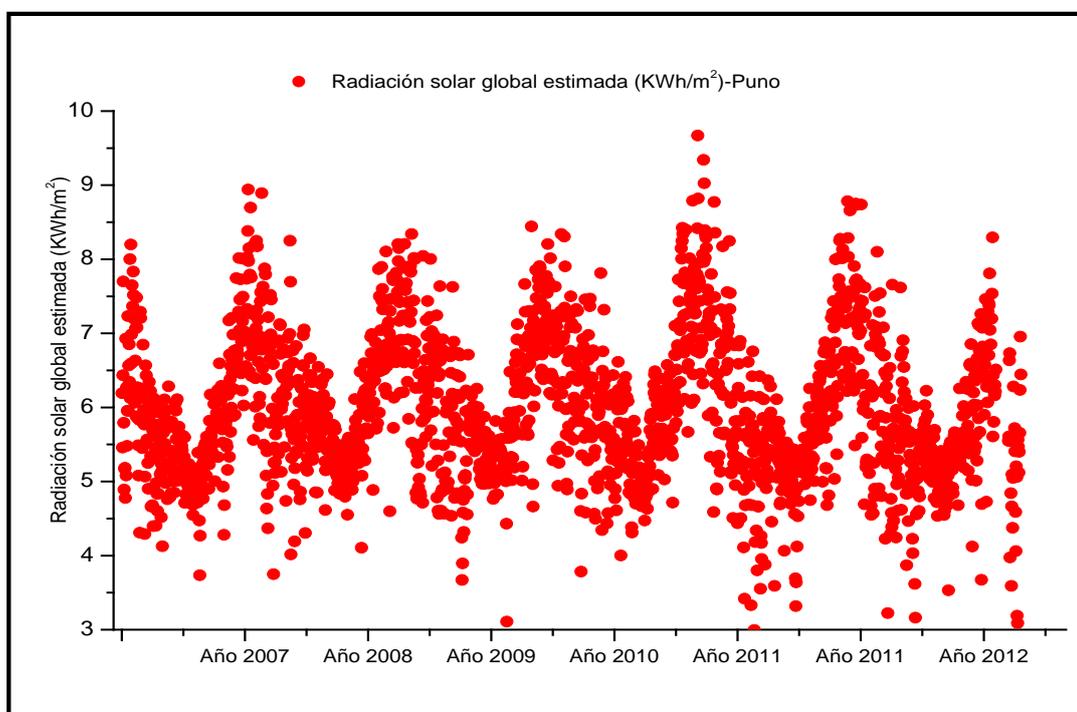


Figura 40. Radiación solar global estimada desde 2007 al 2013 en Puno.

Anexo 2: Programa Wolfram Mathematica 10

Wolfram Mathematica tiene la ventaja de poder observar, analizar y/o resolver el comportamiento de un fenómeno matemático complejo con pocas líneas de código, ya que es un lenguaje de programación de alto nivel pensado precisamente para facilitar la implementación de modelos matemáticos. Al igual que otras plataformas de programación, Mathematica puede ayudarnos a crear aplicaciones complejas muy útiles que cumplan con los estándares de calidad que se manejen y las exigencias requeridas por la problemática a resolver.

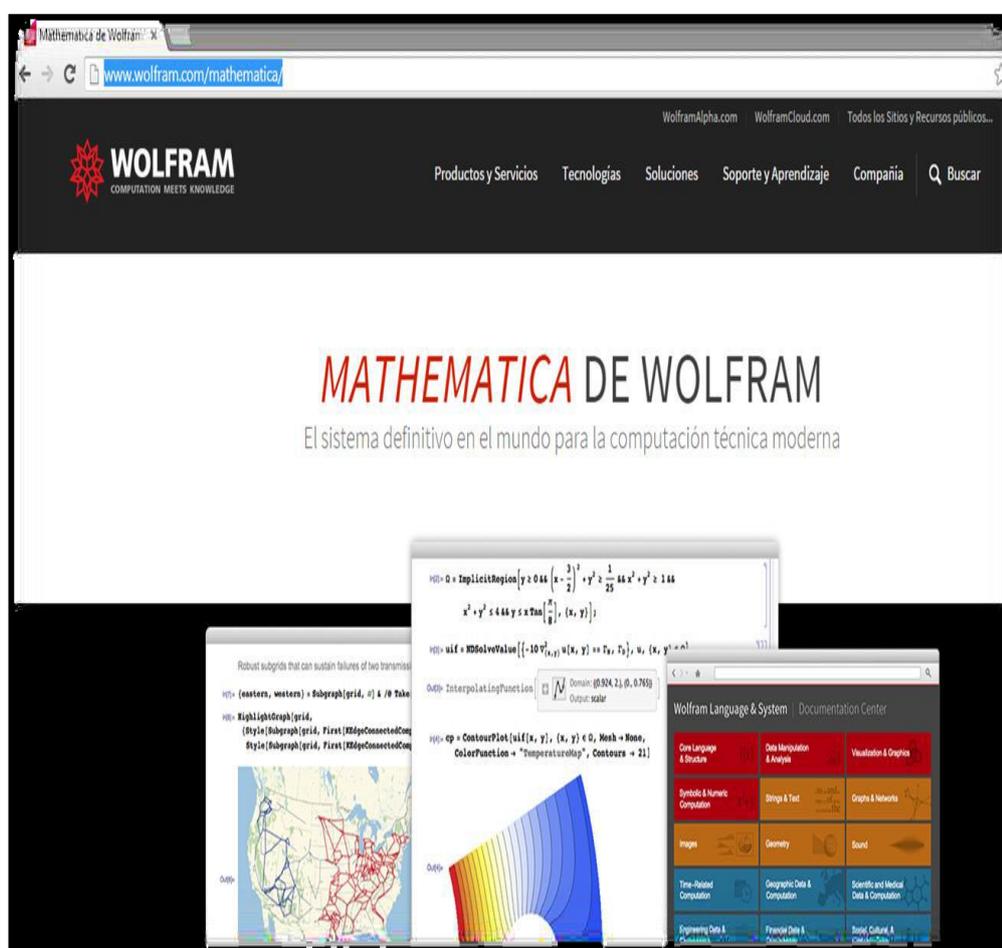


Figura 41: Programa Wolfram Mathematica

Anexo 3: Ajuste del Modelo Bristow y Campbell en Wolfram Mathematica

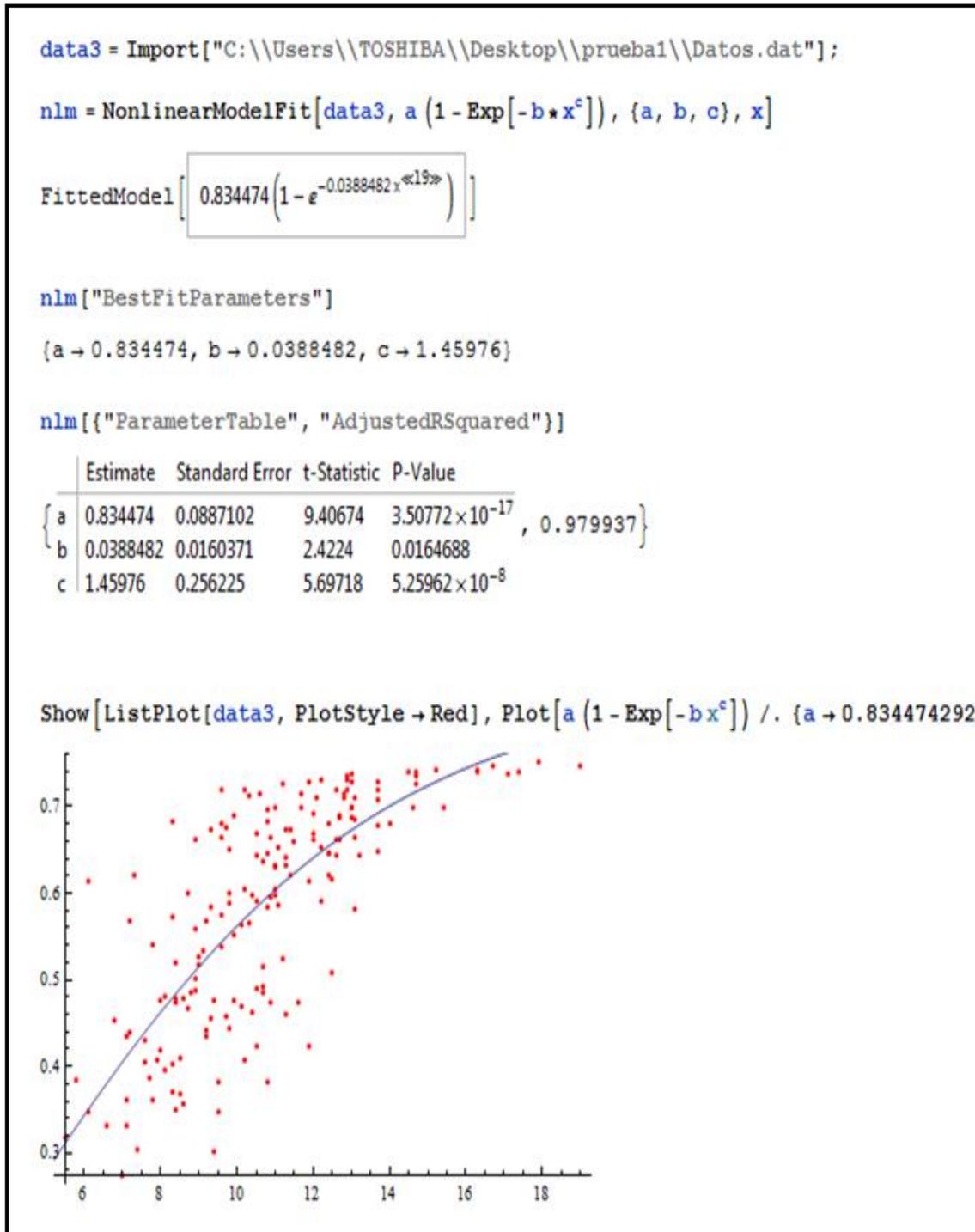


Figura 42: Ajuste del Modelo Bristow y Campbell.

Anexo 4: Fotografías



Figura 43: Estación Meteorológica Vaisala SENAMHI- PUNO 2018.



Figura 44: Piranómetro Kipp Zonen.