

ESTIMACIÓN DE LA PLATAFORMA ENERGÉTICA SOLAR DISPONIBLE EN LA REGIÓN DE LOS ANDES VENEZOLANOS

Data de aceite: 01/09/2023

Uxmal Amezquita

Escuela de Ingeniería Mecánica,
Universidad Central de Venezuela
Caracas - Venezuela

Julio Alvares

Tesistas del Instituto Universitario de
Tecnología del Oeste Mariscal Sucre
(IUTOMS)

Yesika Hurtado

Tesistas del Instituto Universitario de
Tecnología del Oeste Mariscal Sucre
(IUTOMS)

Carlos Ulloa

Tesistas del Instituto Universitario de
Tecnología del Oeste Mariscal Sucre
(IUTOMS)

María Varela

Tesistas del Instituto Universitario de
Tecnología del Oeste Mariscal Sucre
(IUTOMS)

RESUMEN: El objetivo de estimar la plataforma energética solar disponible de la Región de los Andes Venezolanos, la cual esta conformada por los Estados Mérida, Táchira y Trujillo, fue obtener valores procesados de radiación solar global (H), directa (Rdir) y difusa (Rdif) a

fin de conocer su comportamiento para usos de tecnologías solares. Se procesaron los datos promedios diarios de H para un periodo de 5 años por cada una de las 3 estaciones meteorológicas pertenecientes a zonas bioclimáticas distintas de los Estados mencionados y se determinaron los valores de Rdif y Rdir por dos modelos (Erbs y Collares Pereira Rabl). Se analizaron las gráficas de comportamiento de las radiaciones con base a los promedios mensuales. Entre las conclusiones están: La mayor H por Estado fue 15,89MJ/m² (Trujillo), 16,11MJ/m² (Táchira) y la mayor por región 20,96MJ/m² (Merida) y la mayor Rdir (ERBS) por Estado fue 11,33MJ/m² (Táchira), 11,37MJ/m² (Merida) y la mayor por región 11,45MJ/m² (Trujillo).

PALABRAS-CLAVE: Análisis energético, Radiación global, Radiación difusa

ABSTRACT: The objective of estimating the available solar energy platform of the Venezuelan Andes Region, which is made up of the States of Mérida, Táchira and Trujillo, was to obtain processed values of global solar radiation (H), direct (Rdir) and diffuse (Rdif) in order to know its behavior for uses of solar technologies. The daily average H data for a period of 5 years were

processed for each of the 3 meteorological stations belonging to different bioclimatic zones of the mentioned States and the values of R_{dif} and R_{dir} were determined by two models (Erbs and Collares Pereira Rabl) . Radiation performance graphs were analyzed based on monthly averages. Among the conclusions are: The highest H per State was 15.89MJ/m² (Trujillo), 16.11MJ/m² (Táchira) and the highest per region 20.96MJ/m² (Merida) and the highest R_{dif} (ERBS) per State It was 11.33MJ/m² (Táchira), 11.37MJ/m² (Merida) and the highest by region 11.45MJ/m² (Trujillo).

KEYWORDS: Energy analysis, Global radiation, Diffuse radiation

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversas tecnologías para la captación y aprovechamiento de energía solar y entre las más usadas se encuentran: la tecnología fotovoltaica, los colectores solares, los concentradores solares, la tecnología solar pasiva (alumbrado, enfriamiento y calefacción de edificios) entre otras. Para ser factibles las tecnologías antes mencionadas, dependen del equipo y de los costos de operación, del porcentaje de radiación solar que puede convertirse en el producto de energía deseado y de la cantidad de radiación solar disponible en el sitio de colocación, y es por ello que resulta fundamental en primera instancia, tener acceso a datos precisos de la radiación solar ya que mientras se conozcan los recursos de energía solar con más exactitud, tanto más se podrá perfeccionar los sistemas de energía solar y su selección. Por lo tanto, la obtención de los datos en forma exhaustiva, bien detallados sobre radiación solar, así como su forma de procesamiento es un factor esencial en el diseño de sistemas de energía solar. De lo anterior se infiere que la simulación del comportamiento dinámico de esos sistemas de energía solar a lo largo del tiempo es altamente necesaria para establecer su eficiencia, su desempeño y su confiabilidad. Para ello se requiere, entre otras variables que intervienen en un estudio de esa naturaleza tanto del conocimiento riguroso, como la contribución de las componentes directa y difusa de la radiación solar global medida en la superficie de la tierra.

Sobre la atmósfera se recibe un promedio de radiación solar (constante solar) de 1367 W/m², valor establecido por la Organización Mundial de Meteorología, pero a nivel del suelo la radiación varía entre 0 a 1000 W/m². Esta atenuación de los valores de radiación y su variabilidad en el tiempo se debe a varios factores, como son los efectos de absorción y difusión de la atmósfera, los astronómicos, los meteorológicos y el tipo de vegetación. Es por ello que para dos lugares que presenten las mismas características astronómicas (solo variando la longitud), no deberían presentar los mismos niveles de radiación solar global, directa y difusa.

El presente trabajo analiza el comportamiento en el tiempo de la radiación solar global, directa y difusa (usando herramientas de cálculo y estadísticas) de 3 estaciones meteorológicas diseminadas a lo largo y ancho de la región de los Andes Venezolanos, cuya zonas bioclimáticas predominantes son variadas tales como: bosques de altura

tropofitos, bosques tropofitos húmedos, sabanas de altura entre otros y están distribuidas estratégicamente entre los Estados: Mérida, Táchira y Trujillo (ver Fig.1); todo con el fin de determinar y comparar el potencial energético solar de cada Estado y con base a lo anterior, tratar de estimar (por fusión de datos) el potencial o plataforma energética solar de todo la región de los Andes Venezolanos.

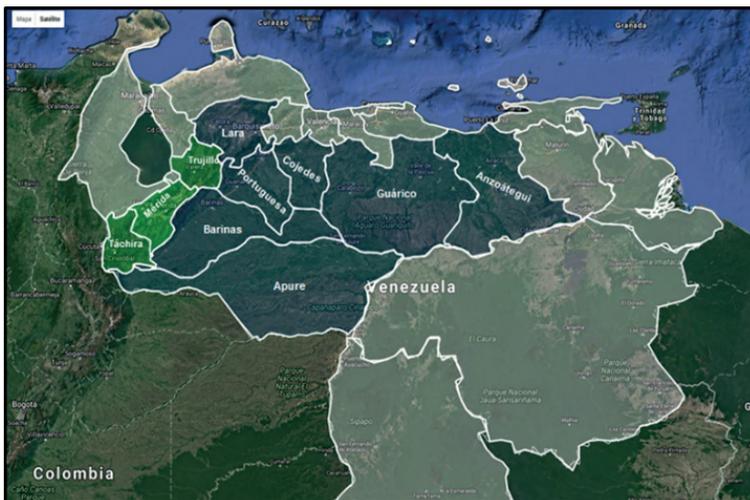


Fig 1. Estados de la Región de los Andes de Venezuela (verde claro)

MARCO METODOLOGICO

Definición de los Datos y Zonas de Estudio

De las Estaciones Meteorológicas pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) diseminadas a lo largo y vasto de la region de los Andes en Venezuela, se seleccionaron 3 de ellas por cumplir con los requerimientos para este estudio (insignes del instituto, registro de por lo menos 5 años consecutivos en cada Estación, datos confiables y certificados, gran número de variables meteorológicas, ubicación en zonas bioclimaticas representativas de cada Estado), las cuales fueron las siguientes:

Del Estado Mérida:

Mérida (latitud $8^{\circ}36'0''$, longitud $-71^{\circ}9'0''$, 1870 m.s.n.m, 1967-1971)

La Zona Bioclimatica (Koppen) predominante en este Estado es: Sabanas herbazales y bosques de altura tropofitos. Clima templado de altura

Del Estado Táchira:

Bramon Escuela (latitud $7^{\circ}39'22''$, longitud $-72^{\circ}56'4''$, 1105 m.s.n.m, 1982- 1986)

Zona Bioclimatica (Koppen) predominante: Sabanas herbazales, bosques tropofitos

humedos en combinación de suelos aridos con vegetacion xerofila con montes espinosos.

Del Estado Trujillo:

La Ceiba (latitud 9°28'21'', longitud -71°9'00'', 2 m.s.n.m, 1990- 1994)

Zona Bioclimatica (Koppen) predominante: Sabanas herbazales y bosques de altura tropofitos.

INAMEH suministró los datos promedios diarios de la radiación solar global (H) de los periodos mencionados de cada una de las estaciones seleccionadas (5070 datos en total).

Del Procesamiento de los Datos

Se construyó una base de datos bajo plataforma Microsoft Excel 2007 for Windows con los datos promedios diarios de la radiación solar global (H) suministrados y se ordenaron secuencialmente bajo un esquema diario por mes, por año, por Estacion Meteorologica (esquema fecha calendario). Los datos faltantes (7.4% del total) fueron completados por el promedio aritmetico de la familia de datos de igual fecha calendario del dato faltante.

A partir de la latitud de cada Estación Meteorológica se calculó para cada uno de los 365 días del año el valor de la radiación solar extraterrestre (Ho) (Duffie y Beckman, 1991) y se asoció a cada valor de H con su valor respectivo de Ho según el esquema de fecha calendario. Se determinó el índice de claridad diario (kt) (Duffie y Beckman, 1991) asociado a cada valor de H y de Ho de cada zona, bajo el esquema de fechas calendario. Después se calculó la radiación solar difusa (Rdif) y directa (Rdir) diarias para cada valor de H y kt de cada Estacion Meteorologica, según dos modelos de la referencia internacional el modelo de Erbs (con $ws > 81.4^\circ$) (Erbs, Klein y Duffie, 1982) y el modelo de Collares – Pereira – Ralb (CPR) (Collares-Pereira y Ralb, 1979). Realizado lo anterior y con la base de datos conformada por los campos H, kt, Ho, Rdif-Erbs, Rdir-Erbs, Rdif-CPR y Rdir-CPR de cada Estaciones Meteorologicas para cada Estado en estudio (268275 datos totales), se procedio con el mismo software (Microsoft Excel 2007 for Windows) a determinar los parametros clásicos estadísticos (promedio aritmético, mediana, moda y desviación típica) en tres diferentes niveles de tiempo base de procesamiento de cada campo por Estación.

El procesamiento de los datos se realizo en tres diferentes bases de tiempo configurados en promedio diario (bajo el esquema de fecha calendario), en promedio mensual y promedio anual para cada uno de los campos, obteniendose el perfil energético solar del área de cada Estacion Meteorológica; luego se fusionaron los datos de todas las Estaciones correspondientes a un Estado, dando como resultado lo que se denomino zona ficticia del Estado en evaluacion, cuyo fin es el de tener una aproximación al comportamiento macro en cada campo como si fuera el comportamiento real del Estado, de aqui se define la plataforma energetica solar de cada Estado de la Region de los Andes Venezolanos.

Por ultimo para definir la plataforma energética solar de la Región de los Andes

Venezolanos como un todo, se realizó un procedimiento similar al efectuado en cada Estado, de fusión de datos por campo de todas las Estaciones Meteorológicas bajo el esquema de procesamiento de tres diferentes bases de tiempo.

Como resultado de lo descrito anteriormente, se obtuvo tablas de estadísticos por cada campo mencionado, según el tiempo base de procesamiento en cada Estación Meteorológica de cada Estado y por fusión de datos para la Región de los Andes en general, esquemas de distribución por frecuencias promedio mensual de los campos de estudio y gráficas de comportamiento mensual.

Para el presente artículo y por razones de extensión del mismo, solo se presentan las tablas y gráficas de todos los Estados estudiados y además la Región de los Andes en general, a manera ilustrativa del comportamiento mensual de las variables o campos. No se expresaron ecuaciones en este artículo, ya que pueden ser ubicadas en la referencia bibliográfica.

RESULTADOS

Del Estado Mérida

Valores Promedios Mensuales del Comportamiento de la Radiación Solar Extraterrestre, Solar Global, Directa y Difusa (Erbs, Collares-Pereire-Ralb) e Índice de Claridad							
Estado: Mérida			Unidad de Radiación: MJ/m ²				
Mes	Rad. Extraterrestre	Rad. Global	Rad. Directa (Erbs)	Rad. Difusa (Erbs)	Rad. Directa (CPR)	Rad. Difusa (CRP)	Ind. Claridad
Enero	32,634	18,01	8,98	9,03	9,24	8,77	0,552
Febrero	34,912	19,99	10,57	9,42	10,88	9,11	0,572
Marzo	37,031	20,96	10,79	10,17	11,14	9,82	0,566
Abril	37,772	16,68	5,31	11,37	5,27	11,41	0,442
Mayo	37,193	18,23	7,03	11,21	7,11	11,13	0,490
Junio	36,544	16,65	5,49	11,16	5,45	11,20	0,456
Julio	36,708	17,94	6,86	11,08	6,93	11,00	0,489
Agosto	37,299	18,88	7,81	11,07	7,96	10,92	0,506
Septiembre	37,072	19,51	8,62	10,90	8,84	10,68	0,526
Octubre	35,365	17,55	7,01	10,54	7,13	10,42	0,496
Noviembre	33,027	16,63	6,80	9,83	6,92	9,71	0,504
Diciembre	31,771	17,33	8,24	9,08	8,50	8,82	0,545

Tabla 1. Valores promedios mensuales de radiación solar extraterrestre, global, directa y difusa e índice de claridad del Estado Mérida

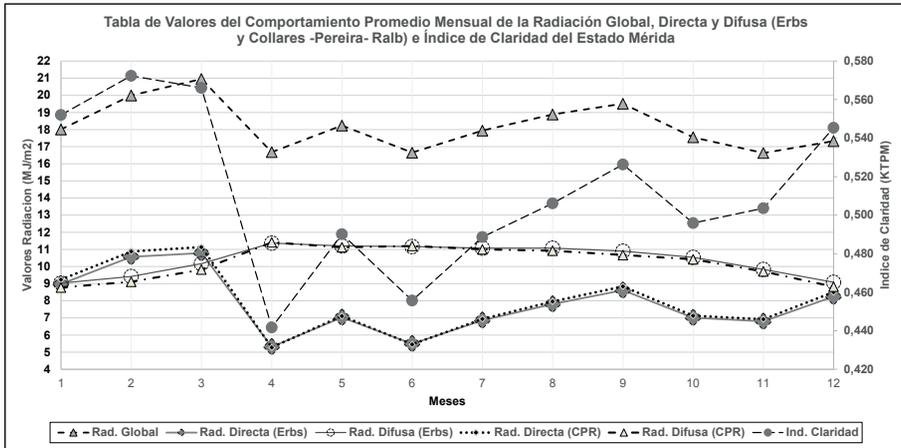


Fig 2. Gráfica de promedios mensuales de radiación solar global, directa y difusa e índice de claridad del Estado Mérida.

Del Estado Táchira

Valores Promedios Mensuales del Comportamiento de la Radiación Solar Extraterrestre, Solar Global, Directa y Difusa (Erbs, Collares-Pereira-Ralb) e Índice de Claridad							
Estado: Táchira				Unidad de Radiación: MJ/m2			
Mes	Rad. Extraterrestre	Rad. Global	Rad. Directa (Erbs)	Rad. Difusa (Erbs)	Rad. Directa (CPR)	Rad. Difusa (CRP)	Ind. Claridad
Enero	33,060	12,932	3,117	9,815	2,987	9,945	0,391
Febrero	35,221	13,934	3,539	10,395	3,425	10,510	0,396
Marzo	37,159	14,185	3,266	10,919	3,123	11,062	0,382
Abril	37,698	13,588	2,765	10,823	2,616	10,973	0,360
Mayo	36,961	14,978	3,953	11,025	3,835	11,143	0,405
Junio	36,243	14,117	3,333	10,784	3,183	10,934	0,389
Julio	36,439	14,818	3,851	10,967	3,716	11,102	0,407
Agosto	37,161	16,058	4,766	11,292	4,676	11,382	0,432
Septiembre	37,126	16,109	4,779	11,331	4,682	11,428	0,434
Octubre	35,615	14,460	3,707	10,753	3,565	10,895	0,406
Noviembre	33,423	12,820	2,907	9,913	2,763	10,057	0,383
Diciembre	32,228	11,882	2,508	9,373	2,377	9,505	0,369

Tabla 2. Valores promedios mensuales de radiación solar extraterrestre, global, directa y difusa e índice de claridad del Estado Táchira

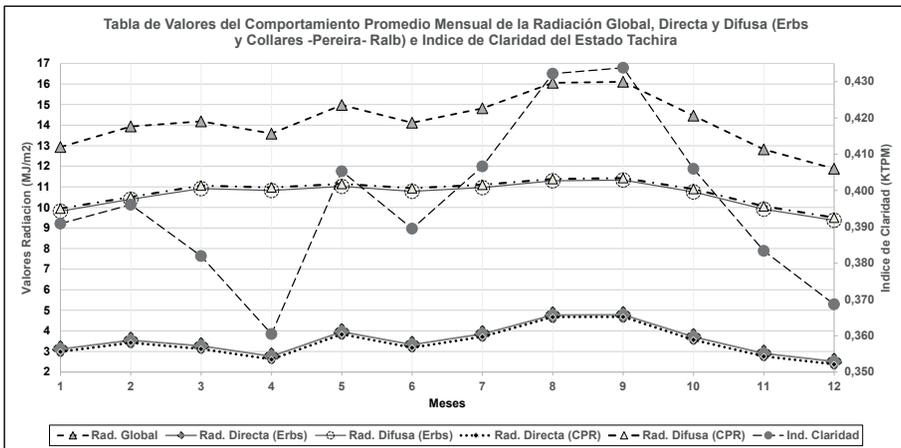


Fig 3. Gráfica de promedios mensuales de radiación solar global, directa y difusa e índice de claridad del Estado Táchira.

Del Estado Trujillo

Valores Promedios Mensuales del Comportamiento de la Radiación Solar Extraterrestre, Solar Global, Directa y Difusa (Erbs, Collares-Pereira-Ralb) e Índice de Claridad							
Estado: Trujillo			Unidad de Radiación: MJ/m ²				
Mes	Rad. Extraterrestre	Rad. Global	Rad. Directa (Erbs)	Rad. Difusa (Erbs)	Rad. Directa (CPR)	Rad. Difusa (CRP)	Ind. Claridad
Enero	32,23	14,55	4,62	9,93	4,55	9,99	0,451
Febrero	34,62	15,77	5,11	10,66	5,06	10,71	0,455
Marzo	36,90	14,47	3,43	11,04	3,27	11,20	0,392
Abril	37,83	13,86	2,84	11,02	2,67	11,19	0,366
Mayo	37,40	14,29	3,27	11,03	3,11	11,18	0,382
Junio	36,82	14,87	3,80	11,07	3,66	11,21	0,404
Julio	36,95	15,69	4,44	11,25	4,32	11,37	0,425
Agosto	37,42	15,89	4,44	11,45	4,31	11,58	0,425
Septiembre	37,01	15,08	3,89	11,19	3,74	11,34	0,407
Octubre	35,12	14,00	3,40	10,60	3,25	10,76	0,399
Noviembre	32,65	13,05	3,22	9,84	3,08	9,98	0,400
Diciembre	31,34	12,63	3,17	9,46	3,04	9,59	0,403

Tabla 3. Valores promedios mensuales de radiación solar extraterrestre, global, directa y difusa e índice de claridad del Estado Trujillo

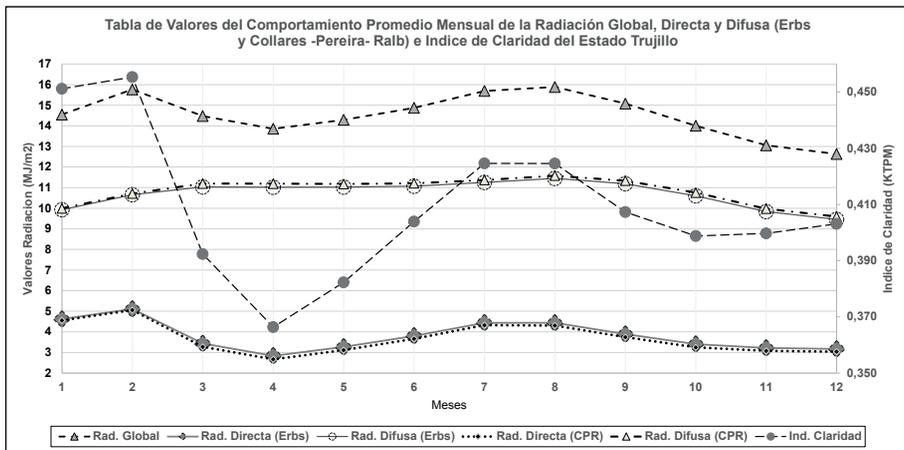


Fig 4. Gráfica de promedios mensuales de radiación solar global, directa y difusa e índice de claridad del Estado Trujillo.

De la Región de los Andes

Valores Promedios Mensuales del Comportamiento de la Radiación Solar Extraterrestre, Solar Global, Directa y Difusa (Erbs, Collares-Pereira-Ralb) e Índice de Claridad							
Región: los Andes			Unidad de Radiación: MJ/m ²				
Mes	Rad. Extraterrestre	Rad. Global	Rad. Directa (Erbs)	Rad. Difusa (Erbs)	Rad. Directa (CPR)	Rad. Difusa (CRP)	Ind. Claridad
Enero	32,64	15,16	5,57	9,59	5,59	9,57	0,465
Febrero	34,92	16,56	6,41	10,16	6,45	10,11	0,475
Marzo	37,03	16,54	5,83	10,71	5,84	10,69	0,447
Abril	37,77	14,71	3,64	11,07	3,52	11,19	0,390
Mayo	37,18	15,83	4,75	11,09	4,69	11,15	0,426
Junio	36,53	15,21	4,21	11,01	4,10	11,12	0,416
Julio	36,70	16,15	5,05	11,10	4,99	11,16	0,440
Agosto	37,29	16,94	5,67	11,27	5,65	11,29	0,454
Septiembre	37,07	16,90	5,76	11,14	5,75	11,15	0,456
Octubre	35,37	15,34	4,71	10,63	4,65	10,69	0,434
Noviembre	33,03	14,17	4,31	9,86	4,25	9,91	0,429
Diciembre	31,78	13,95	4,64	9,31	4,64	9,31	0,439

Tabla 4. Valores promedios mensuales de radiación solar extraterrestre, global, directa y difusa e índice de claridad de la Región de los Andes

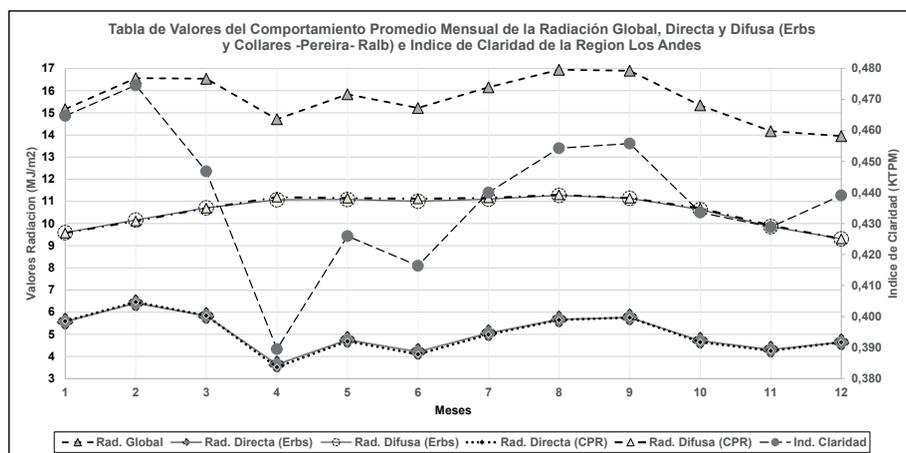


Fig 5. Gráfica de promedios mensuales de radiación solar global, directa y difusa e índice de claridad de la Región de los Andes

CONCLUSIONES

- La diferencia porcentual de la radiación solar difusa promedio mensual calculada bajo el modelo de Erbs y bajo el modelo CPR no supera el 3% en el caso mas desfavorable y mantienen una tendencia general del 1,3% en todos los Estados estudiados. Esto indica que por la proximidad de los resultados es indiferente usar uno u otro modelo para el cálculo de la radiacion difusa.
- Las curvas de la variación anual de la radiación solar extraterrestre entre 7° y 9° de Latitud Norte pertenecientes a los Estados de la Region de los Andes, no presentan variaciones significativas entre ellas, por ende se puede aproximar a una curva promedio.
- Las curvas de la variación anual de la radiación solar difusa pertenecientes a cada Estado de la Region de los Andes (entre 7° y 9° de Latitud Norte), no presentan variaciones significativas entre ellas, por ende se puede aproximar a

una curva promedio.

- No se detectó variaciones notables por efecto estacional en las curvas de variación anual de la radiación difusa de las zonas en estudio.
- El Estado con mayor radiación global de la región de los Andes se encontró en el Estado Mérida con 20,96MJ/m²
- El Estado con menor radiación global de la región de los Andes se encontró en el Estado Táchira con 11,88MJ/m²
- El Estado con mayor radiación directa (ERBS) de la región de los Andes se encontró en el Estado Mérida con 10,79MJ/m²
- El Estado con menor radiación directa (ERBS) de la región de los Andes se encontró en el Estado Táchira con 2,508MJ/m²
- El Estado con mayor radiación difusa (ERBS) de la región de los Andes se encontró en el Estado Trujillo con 11,45MJ/m²
- El Estado con menor radiación difusa (ERBS) de la región de los Andes se encontró en el Estado Mérida con 9,03MJ/m²
- Se detectó cambios por efecto estacional en las curvas de variación anual de la radiación global y directa de las zonas en estudio.
- La Región de los Andes Venezolanos (fusión de datos) posee un pico máximo de radiación solar global de 16,90MJ/m² y un mínimo de 13,95MJ/m²
- La Región de los Andes Venezolanos (fusión de datos) posee un pico máximo de radiación solar directa (ERBS) de 6,41MJ/m² y un mínimo de 3,64MJ/m²
- La Región de los Andes Venezolanos (fusión de datos) posee un pico máximo de radiación solar difusa (ERBS) de 11,27MJ/m² y un mínimo de 9,31MJ/m²

REFERENCIAS

Alvares J., Hurtado Y., Ulloa C. y Varela M. (2018). "Comportamiento de la Radiación Global, Directa y Difusa en la Región de los Llanos y Andes Venezolanos, partiendo del uso del Índice de Claridad". Trabajo de Pregrado de Ingeniería. Instituto Universitario de Tecnología del Oeste Mariscal Sucre. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Amézquita Z, U. (2005). "Estudio Estadístico de la Radiación Solar Global en el Estado Bolívar y la Influencia de las Variables Meteorológicas en el Índice de Claridad". Trabajo de Grado de Maestría. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Collares-Pereira, M. and Rabl, A. (1979). "The Average Distribution of Solar Radiation Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values", *Solar Energy*. Vol 22. pp. 155- 164.

Duffie J.A. and Beckman W.A. (1991) *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. pp. 1-87. Wiley Interscience, New York.

Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, J.A. 1982. "Estimation of The Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly – Average Global Radiation", *Solar Energy*. Vol 28. N° 4. pp. 293- 302.