



Cálculo de las radiaciones total, directa y difusa a través de la transmisibilidad atmosférica en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena (Colombia)

Calculation of total, direct and difusse radiation, through the atmospheric transmissivity in the departments of Cesar, La Guajira and Magdalena (Colombia)

Marley VANEGAS Chamorro [1](#); Oscar CHURIO Silvera [2](#); Guillermo VALENCIA Ochoa [3](#); Eunice VILLICAÑA Ortiz [4](#); Adalberto OSPINO Castro [5](#)

Recibido: 24/08/16 • Aprobado: 18/09/2016

Contenido

- [1. Introducción](#)
- [2. Metodología](#)
- [3. Resultados](#)
- [4. Conclusiones](#)
- [Referencias](#)

RESUMEN:

En esta investigación se estudiaron registros meteorológicos de más de cinco años, suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambiental de Colombia (IDEAM) de diferentes estaciones meteorológicas ubicadas en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena; con el fin de cuantificar y caracterizar la radiación solar a través del modelo de Bird y Hulstrom con el que se obtuvieron valores promedio de radiación de 6,2 kWh/m²día, 6,3 kWh/m²día y de 6,0 kWh/m²día para los departamentos de Cesar, La Guajira y Magdalena, respectivamente; valores adecuados para implementar tecnologías solares de tipo fotovoltaica y de tipo térmica.
Palabras clave: Fuentes No Convencionales de Energía, Modelo de Bird y Hulstrom, Radiación solar, Tecnologías solares, transmisibilidad atmosférica.

ABSTRACT:

It is for this that in this research meteorological records studied of more than five years supplied by the Environmental Institute with Hydrology, Meteorology and Studies of Colombia (IDEAM) of different meteorological stations located in the departments of the Cesar, The Guajira and Magdalena; in order to quantify and to characterize the solar radiation across the model of Bird and Hulstrom with which values obtained average of radiation of 6,2 kWh/m²day, 6,3 kWh/m²day and of 6,0 kWh/m²day for the departments the Cesar, the Guajira and Magdalena respectively, values adapted to implement solar technologies of type photovoltaic and of type thermal.
Keywords: Not conventional sources of energy, Model of Bird and Hulstrom, solar radiation, solar technologies, atmospheric transmissivity.

1. Introducción

La principal preocupación ambiental a la cual se enfrenta el mundo en la actualidad, es al cambio climático, ya que sus consecuencias implican interacciones entre los procesos naturales, económicos, políticos, sociales y ambientales. Debido a la relevancia del tema, las políticas nacionales e internacionales deben enfocarse en la forma de generar, transportar y consumir los recursos energéticos con el fin de garantizar la estabilidad económica, mitigar el cambio climático a raíz de la producción de gases de efecto invernadero (GEI) y adaptarse al mismo, comprometiéndose en buscar nuevas alternativas de energía que sean económicas y que no deterioren el ambiente y además garanticen el suministro de ésta (International Energy Agency, 2014).

El nuevo escenario de precios del petróleo es una oportunidad para corregir las distorsiones y fallas que

aún subsisten en la matriz energética del país y preparar el camino para una transición hacia un sistema que apoye el crecimiento verde y sea más sostenible, permitiendo que nuestro país entre a formar parte de los países con sistemas energéticos más sofisticados, economías más productivas y sociedades más igualitarias (UPME, 2015) (UPME, 2015). Por lo tanto, el gobierno nacional ha visionado la integración al mercado eléctrico de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), en especial aquellas de carácter renovable, para garantizar la reducción de emisiones de GEI y la seguridad del abastecimiento (Universidad Nacional, Fundación Bariloche, & UPME, 2010), lo anterior ha sido plasmado en la Ley 1715 de mayo 13 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014), y respaldado a través del Plan Energético Nacional (PEN) en el cual se manifiesta que es necesario transformar la oferta de energía a través del uso de las FNCE (UPME & Ministerio de Minas y Energía, 2007), ya que el país reúne una variedad recursos renovables con potencial para ser transformados en energía útil (Castillo *et al.*, 2015); lo que sería de gran relevancia para subsanar la problemática energética que atraviesa el país en la actualidad.

Es por esto que esta investigación se encuentra enfocada en la determinación y caracterización del potencial solar a través del modelo de Bird y Hulstrom, para visualizar la tecnología solar que se puede implementar en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena; con el fin de contribuir a la visión del gobierno nacional de llegar a las zonas no interconectadas a través de la integración de las FNCER al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

2. Metodología

Para poder cuantificar y caracterizar la radiación solar de los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena; fue necesario primeramente el análisis de la zona de estudio, seguido del análisis del Modelo de Bird y Hulstrom, luego se realizó el análisis y organización de los datos que fueron suministrados por el IDEAM y finalmente se calcularon los parámetros que permitieron obtener los valores de la radiación incidente en la zona examinada con el fin de visualizar la mejor tecnología solar, susceptible de ser implementada en la región de estudio.

2.1. Análisis de la Zona de Estudio

Es importante el estudio de los departamentos a analizar, para determinar las condiciones geográficas y meteorológicas que inciden en el cálculo de la radiación; la zona analizada cuenta con 30 estaciones meteorológicas, cuya ubicación se presenta en la Figura 1.

Esta zona corresponde a los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena la cual cuenta con una extensión de 66.961 km² lo que representa el 5,8% del territorio nacional. La zona limita por el norte con el Mar Caribe, al este con el Mar Caribe, la República Bolivariana de Venezuela y el departamento de Norte de Santander, por el sur con los departamentos de Norte de Santander y Santander, y por el oeste con los departamentos de Atlántico y Bolívar. Es de resaltar que esta zona presenta una variedad de temperatura debido a que hay tierras en los distintos pisos térmicos, que van desde el cálido árido en la Alta Guajira, cálido ardiente y sofocante a orillas del río Magdalena, hasta glacial en las cumbres de la Sierra Nevada de Santa Marta y la serranía de los Motilones; la temperatura promedio de esta zona es de alrededor 29 °C (Martínez, 2005).

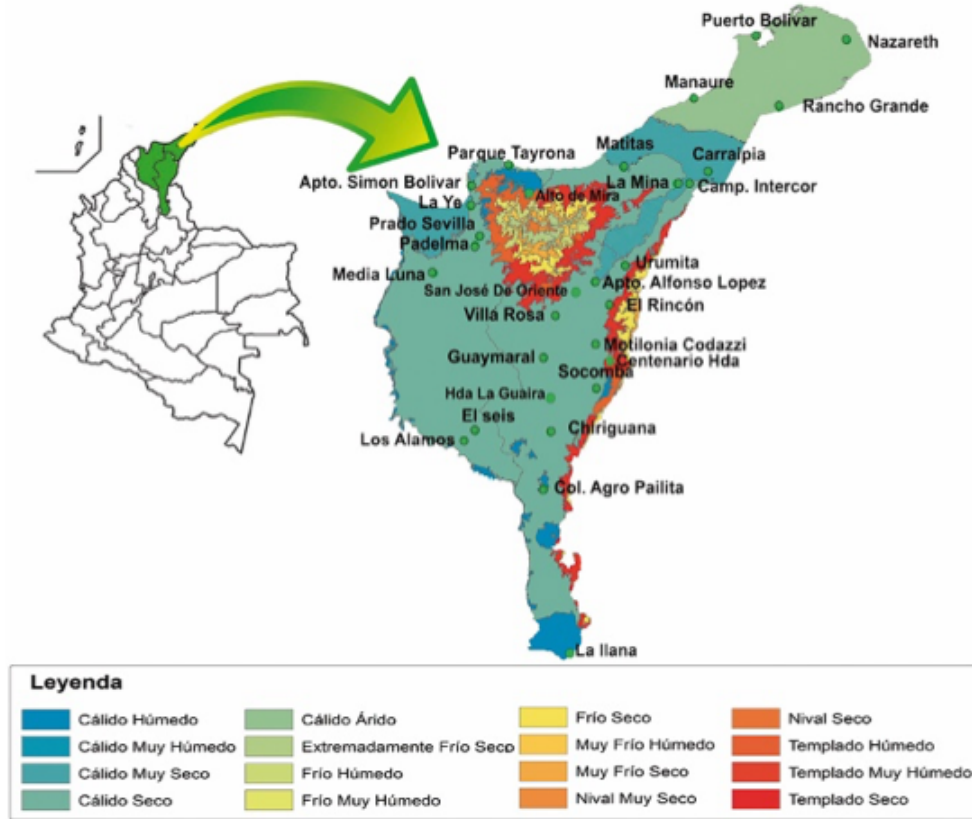


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

2.2. Análisis de la Zona de Estudio

En el año de 1981 Bird y Hulstrom formularon un modelo a partir del análisis y comparación de los modelos de radiación directa de Atwater y Ball (Atwater & Ball, 1980), de Hoyt (Hoyt, 1978), de Lacis y Hansen (Lacis & Hanses, 1973), de ASHRAE (Ashrae, 1972) y de Watt (Engineering, 1975), y de los modelos de radiación difusa de Atwater y Ball, de Davies y Hay (Davies, 1979), de Watt (Engineering, 1975), de Hoyt (Hoyt, 1978) y el de Lacis y Hansen (Lacis & Hanses, 1973). Este modelo aporta unos códigos espectrales rigurosos construidos para generar resultados de cálculos de radiaciones de banda ancha después de un proceso de integración a lo largo de todo el espectro (Bird & Hulstrom, 1981). El modelo permite determinar la radiación directa en superficie horizontal considerando diferentes índices de nubosidad como se muestra en la ecuación 1 (Villicaña, 2012).

$$I_{DH} = [0.9662 * C * \tau_{CTA}] Sen A \quad (W/m^2) \quad (1)$$

donde:

C: Constante solar en función del día juliano.

A: Es la altitud solar en grados

0.9662: Factor de corrección que se ajusta a las longitudes de onda de 0.3 a 3 μm del espectro solar.

τ_{CTA} : Es el coeficiente de transmisibilidad atmosférica, calculada a partir de τ_r , τ_o , τ_g , τ_w y τ_a que son las transmitancias por dispersión debido a moléculas de aire, ozono, gases miscibles, vapor de agua y aerosoles, respectivamente.

Para el modelo de Bird y Hulstrom el cálculo de la radiación difusa (I_{dH}) es de mayor complejidad, debido a que su evaluación requiere conocer la múltiple reflexión entre el suelo y la atmósfera y de observaciones meteorológicas (Villicaña E. , 2012), la radiación difusa sobre una superficie horizontal depende del índice de claridad del cielo (k_d). Lo anterior vendría dado por la ecuación 2.

$$I_{dH} = C * k_d * SenA \quad (2)$$

La radiación difusa, se hace igual a la suma de tres contribuciones diferentes: radiación difusa debida a la

existencia de moléculas de aire, radiación difusa debida a la existencia de partículas de polvo (aerosoles) y radiación difusa por múltiple reflexión entre el suelo y la atmósfera, expresadas en la ecuación 3 (Canales, 2010).

$$I_{dH} = I_{dr} + I_{da} + I_{dm} \quad (3)$$

donde:

I_{dH} : radiación difusa total sobre superficie horizontal.

I_{dr} : radiación difusa debida a la dispersión por moléculas de aire (difusión por Rayleigh).

I_{da} : radiación difusa debida a la presencia de aerosoles.

I_{dm} : radiación difusa debida a la reflexión de la superficie.

Donde cada radiación difusa se calcula a partir de las ecuaciones 4, 5 y 6:

$$I_{dr} = [0,79(C_r)(\tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa})(0,5)] \left[\frac{(1-\tau_r)}{(1-m_a+m_a^{1.02})} \right] SenA \quad (4)$$

$$I_{da} = [0,79(C_r)(\tau_o \tau_g \tau_w \tau_{aa})(F_c)] \left[\frac{(1-\tau_r)}{(1-m_a+m_a^{1.02})} \right] SenA \quad (5)$$

$$I_{dm} = [I_{DH} SenA + I_{dr} + I_{da}] \left[\frac{(\rho_g * \rho'a)}{(1-\rho_g * \rho'a)} \right] \quad (6)$$

Donde se utilizan parámetros como el de la transmitancias debida a la absorción de los aerosoles (taa) la cual es función de la masa de aire (ma) y de la transmitancia debida a aerosoles (ta) empleada para el cálculo de la radiación directa y se usan los coeficientes de reflexión de la superficie (rg), cuyo valor generalmente se encuentra tabulado y para esta investigación se empleó el valor de 0,15 (Villicaña E. , 2012). Del mismo modo, se requiere evaluar el albedo atmosférico, es decir, la múltiple reflexión entre el suelo y el cielo ($r'a$) el cual es función de F_c y la transmitancia debida exclusivamente a la difusión por aerosoles (Bosca, Pizano & Cañada, 1995).

Este modelo permite determinar la radiación total (ITH) como se observa en la ecuación 7, a partir de la suma de la radiación directa (I_{DH}) y la radiación difusa (I_{dH}) en superficie horizontal para toda la banda (Bosca, 1995)

$$(I_{TH}) = (I_{DH}) + (I_{dH}) \quad (7)$$

El modelo de Bird y Hulstrom a partir del coeficiente de turbiedad de Angström (Angström, 1961), parametriza la presencia de los aerosoles considerando parámetros tales como el tamaño medio de la partícula que se establece, según diversos estudios (Pinazo , 1995) (Bosca, Pizano & Cañada, 1995), en $1,3 \mu m \pm 0.2$ y una cantidad fija de aerosoles, que describe el grado de turbidez que presenta la atmósfera; este valor puede variar desde 0,0 para atmósferas extremadamente limpias, 0,1 para atmósferas limpias, 0,2 para atmósferas media, 0,3 para atmósferas turbias y 0,4 como límite máximo para atmósferas con una turbidez muy alta.

2.3. Adquisición y procesamiento de datos

A la hora de determinar el recurso solar de la zona de estudio a través del modelo de Bird y Hulstrom, es de gran relevancia analizar la transmisibilidad atmosférica de los departamentos de Cesar, La Guajira y Magdalena; mediante la lectura de series históricas de temperatura y humedad relativa sobre una base diaria, registrada a las 7, 13 y 19 horas durante el período comprendido entre 1983 y 2013 de 30 estaciones meteorológicas como se observa en la Tabla 1. Estos registros históricos fueron suministrados por el IDEAM y la lectura mínima de las estaciones fue de cinco años.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la Zona Operativa 05.

CESAR, LA GUAJIRA Y MADGALENA							
Nº	Código Id.	Nombre	Dpto.	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación (msnm)	Años de Medida
1	15075030	Manaure	La Guajira	11,46	72,28	1	1893-2013

2	15015050	Apto Simón Bolívar	Magdalena	11,07	74,13	4	1893-2013
3	15075060	Pto. Bolívar	La Guajira	12,13	71,59	10	1987-2013
4	29065030	Prado Sevilla	Magdalena	10,45	74,09	18	1893-2013
5	15015020	La ye	Magdalena	10,59	74,12	20	1893-2013
6	15045010	Matitas	La Guajira	11,15	73,01	20	1893-2013
7	29065020	Padelma	Magdalena	10,43	74,11	20	1893-2013
8	29065080	Media Luna	Magdalena	10,30	74,30	20	1985-2013
9	25025320	Los Álamos	Magdalena	9,18	74,16	25	1985-2013
10	15015100	Tayrona	Magdalena	11,17	73,54	30	1983-2011
11	25025250	Chiriguana	Cesar	9,21	73,35	40	1893-2013
12	28035040	Guaymaral	Cesar	9,54	73,38	50	1893-2013
13	25025300	El Seis	Magdalena	9,22	74,11	50	1985-2013
14	28045040	Hda. La Guaira	Cesar	9,37	73,48	50	1987-1993
15	25025330	Col Agro Pailitas	Cesar	8,57	73,38	50	1987-2013
16	15085040	Rancho Grande	La Guajira	11,41	71,49	50	1893-2013
17	28035010	Villa Rosa	Cesar	10,11	73,32	70	1985-2013
18	15065130	La Mina	La Guajira	11,08	72,36	80	1987-2013
19	15085020	Nazareth	La Guajira	12,10	71,17	85	1893-2013
20	28025090	Centenario Hda	Cesar	9,51	73,16	100	1983-2005
21	15085030	Carraipía	La Guajira	11,12	72,22	118	1893-2013
22	23195140	La Llana	Cesar	7,04	73,32	120	1985-1995
23	15065050	Camp. Intercor	La Guajira	11,07	72,31	122	1983-2011
24	28035030	Apto Alfonso López	Cesar	10,26	73,14	138	1893-2013
25	28025080	Socomba	Cesar	9,41	73,14	170	1984-2011
26	28025070	Motilonia Codazzi	Cesar	10,00	73,15	180	1893-2013
27	28015070	Urumita	La Guajira	10,33	73,00	255	1893-2013
28	28025020	El Rincón	Cesar	10,16	73,07	350	1893-2013
29	28025040	San José de Oriente	Cesar	10,21	73,32	850	1984-1997
30	15015110	Alto de Mira	Magdalena	11,05	73,55	1080	1987-2011

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la herramienta informática Matlab® se formuló un código en el que se realizó el procesamiento

de la información y se complementaron mediante un tratamiento matemático-estadístico en las diferentes series de tiempo, lapsos o períodos; este fue programado con el objetivo de agilizar el tratamiento de la información como se observa en la Figura 2. Esta etapa de la metodología fue necesaria debido a que de las 42 estaciones que se encuentran en la zona, algunas registraban las mismas mediciones para diferentes años, además en otras no se encontraban datos de muchos años y se hacía imposible un análisis adecuado, esto a raíz de la interrupción de las lecturas, fallos en los instrumentos de medida, errores asociados a cambios en las condiciones de medición, errores de transcripción, entre otras; ocasionado que se utilizaran los datos de tan solo 30 estaciones meteorológicas, las cuales si tenían registro de la lectura mínima para el estudio.

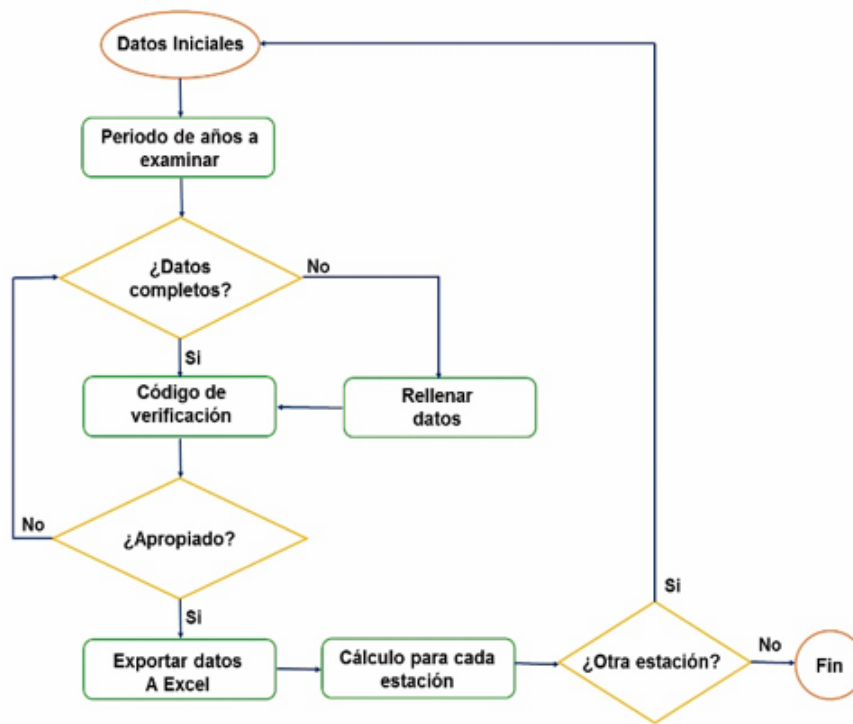


Figura 2. Algoritmo para el tratamiento de los datos meteorológicos suministrados por el IDEAM.
Fuente: Elaboración propia.

2.4. Construcción de los mapas

Luego de obtener los valores de las radiaciones directa, difusa y global para todas las estaciones estudiadas a partir de la adquisición de los datos suministrados por el IDEAM y empelando el Modelo de Bird y Hulstrom, se procedió a la elaboración de los mapas a través del software ArcGis®, para visualizar el potencial de la energía solar en la Zona de estudio.

3. Resultados

En la zona de estudio se han realizado estudios (IDEAM & UPME, 2015) que permiten determinar la disponibilidad de la energía solar, sin embargo, estas investigaciones no valoran las transmitancias responsables de la extinción de la radiación (Valencia, Vanegas, & Villicaña, 2016); es por ello que se hace necesario el análisis del Coeficiente de Transmisibilidad Atmosférica (CTA) con el fin de establecer la magnitud de los efectos atenuadores de la dispersión y absorción, que son función de la profundidad óptica y de la concentración y cantidad de sustancias presentes en la atmósfera; y a través del cual se puede valorar las componentes solares directa y difusa sobre la superficie horizontal.

3.1. Análisis de las transmitancias globales de la zona de estudio

Al ejecutar el análisis de las diferentes transmitancias para cada estación, se observó que al agruparlas por departamento las transmitancias debido a ozono y gases miscibles presentaban un comportamiento similar, mientras que las transmitancias debido a las moléculas de aire y vapor de agua registran una variación distinta para cada departamento, esto debido a que estas transmitancias depende de la presencia de precipitaciones que difiere de departamento en departamento y del lugar geográfico donde esté ubicada la estación.

En la Figura 3.a., se puede observar que al agrupar la transmitancias debida a la presencia de moléculas de aire por departamento se observa que para los meses de abril, agosto y septiembre la variación de la

radiación por moléculas de aire es mayor, de tal forma que podría considerarse que en este período será más pronunciada la dispersión de la radiación debida a moléculas de aire; mientras que la variación de la transmitancia debida a gases miscibles presenta valores semejantes entre los departamentos analizados, considerando que el clima de la zona de estudio es muy similar, además es notorio la similitud del comportamiento de esta transmitancias con la transmitancia debida a las moléculas de aire (Ver Figura 3.b.). Estos gases tienen mayor incidencia en la radiación de onda corta (UV) que en el espectro visible en donde se concentra el 96% de la energía de la radiación (Jaramillo, 1998).

Si se observa el comportamiento de la transmitancia debida al ozono (Ver Figura 3.c), se puede considerar que esta varía en la atmósfera según los meses del año y la latitud; donde hay un incremento de esta transmitancia para los primeros meses del año y luego se presenta una disminución al finalizar el año. En lo relativo a la transmitancia debida a la presencia del vapor de agua, esta sí presenta una mayor intensidad en la atenuación de la radiación (Villicaña, 2012). En la Figura 3.d., se observa que el departamento del Cesar sobresale en cuanto a la transmitancia debido al vapor de agua esto se debe a los niveles de humedad relativa (HR) que se presenta en el departamento, mientras que los departamentos de La Guajira y Magdalena presenta una variación de la transmitancia debido al vapor de agua muy similar esto es posible ya que el índice de evapotranspiración en la zona estudiada es muy parecido (Valencia, Vanegas, & Villicaña, 2016), finalmente el comportamiento que sufre la transmitancias debida a los aerosoles es un factor significativo en la radiación solar, debido a que define el grado de turbidez del cielo, dando lugar a formaciones de nubes a causa de mezcla heterogéneas de partículas sólidas suspendidas en un medio gaseoso. En la Figura 3.e., se observa el comportamiento debida a esta transmitancia, donde se detalla que para los meses de las etapas de estiaje como febrero, noviembre y diciembre el valor de esta atenuación disminuye, mientras que para los meses de abril, mayo, agosto y septiembre la atenuación es mayor.

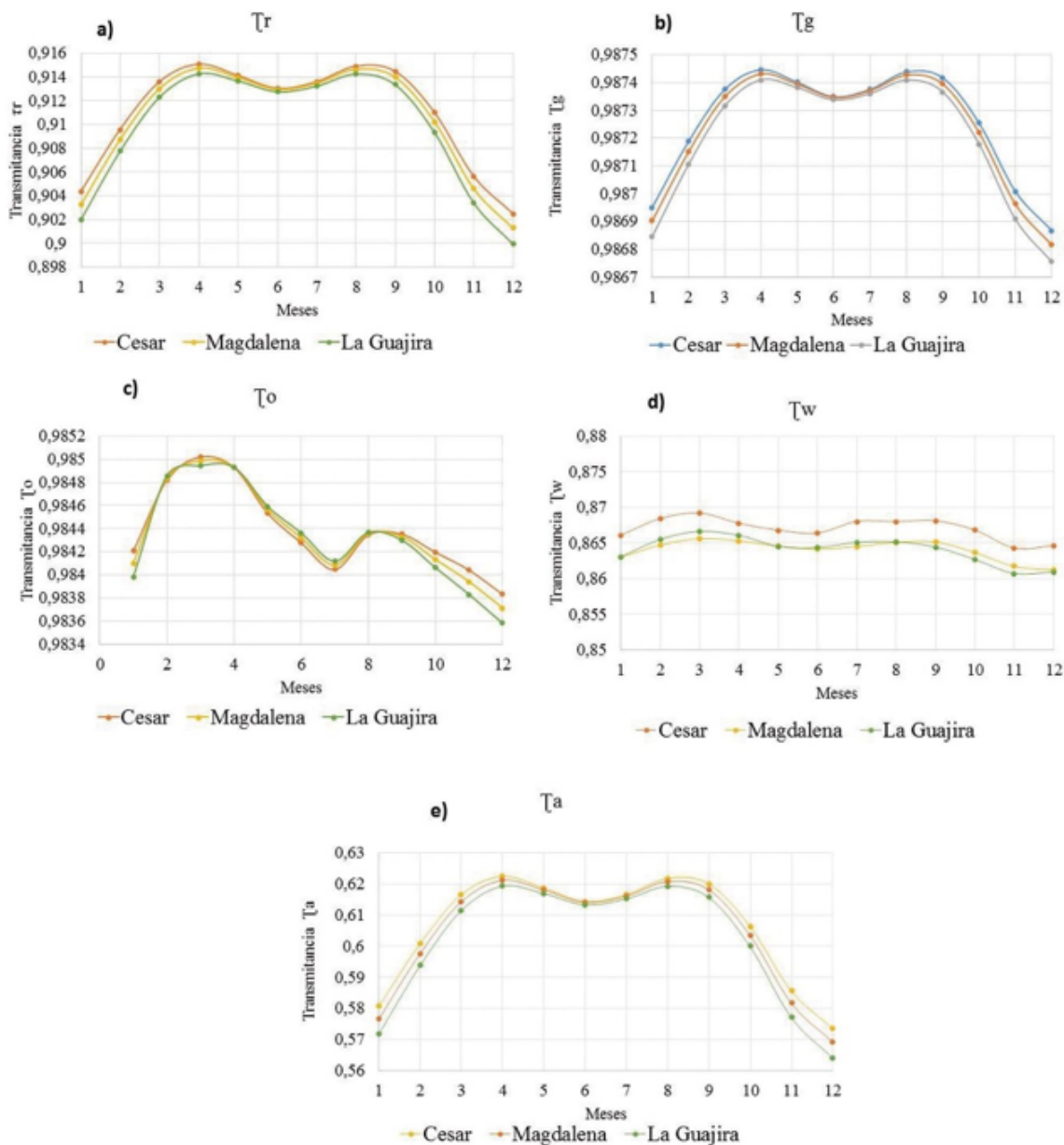


Figura 3. Comportamiento de la transmitancias debida a a) moléculas de aire b) gases miscibles c) ozono d) vapor de agua e) aerosoles en la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Radiación Solar de la zona de estudio

A partir del modelo de Bird y Hulstrom se obtuvieron los valores de radiación para cada una de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio, con estos resultados se determina el aporte por cada tipo de radiación estableciendo cinco hipotéticos estados que puede presentar la atmósfera; sin embargo, el análisis detallado de la radiación se realiza para la atmósfera turbia la cual se ajusta a la zona estudiada. Luego de realizar este cálculo y teniendo en cuenta los valores de brillo solar suministrados por el IDEAM se procedió a determinar las radiaciones global, directa y difusa para cada estación en unidades de kWh/m2día.

3.2.1. Radiación Solar Directa

Mediante la ecuación 2 se calculó la radiación directa; cuyo resultado se presenta en la Tabla 2. En general, los resultados calculados presentan una tendencia similar en cada tipo de atmósfera considerada, esto debido a las características climáticas similares que presenta la zona estudiada.

Tabla 2. Radiación solar directa promedio anual de la zona de estudio con diferentes tipos de atmósfera.

Departamento	ID _H (β=0,0) [W/m ²]	ID _H (β=0,1) [W/m ²]	ID _H (β=0,2) [W/m ²]	ID _H (β=0,3) [W/m ²]	ID _H (β=0,4) [W/m ²]
Cesar	944,53	797,87	678,01	580,04	499,94
La Guajira	933,22	786,89	667,59	570,29	490,93
Magdalena	935,54	788,40	668,49	570,77	491,11

Fuente: Elaboración propia

A manera de ejemplo y teniendo en cuenta el cálculo de la radiación en una atmósfera turbia (β=0,3), en la Figura 4 se presentan los datos históricos promedio de radiación directa de los departamentos ubicados en la zona de estudio para todos los meses del año. Los mayores valores de radiación se observan en los meses de marzo, abril, agosto y septiembre. En general, se observa una uniformidad en este parámetro en todos los departamentos.

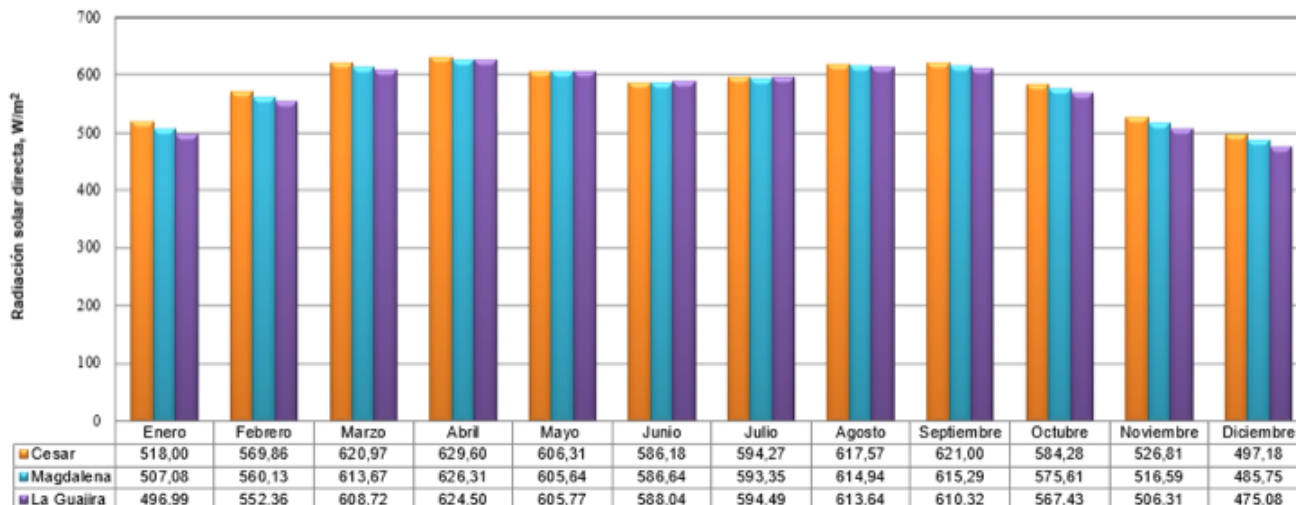


Figura 4. Promedio histórico mensual de la radiación solar directa de la zona de estudio teniendo en cuenta una atmósfera turbia (β=0,3).

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Radiación Solar Difusa

El cálculo de la radiación solar difusa se realiza a partir de las radiaciones difusas debidas a la presencia de moléculas de aire, partículas de polvo (aerosoles) y por múltiple reflexión entre el suelo y la atmósfera, cuyos valores se calculan a partir de las ecuaciones 4, 5 y 6, respectivamente; este cálculo se realizó para cada tipo de atmósfera y de igual forma que en la radiación directa los valores obtenidos fueron muy similares (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Radiación solar difusa promedio anual de la zona de estudio con diferentes tipos de atmósfera.

Departamento	$I_{dH} (\beta=0,0)$ [W/m ²]	$I_{dH} (\beta=0,1)$ [W/m ²]	$I_{dH} (\beta=0,2)$ [W/m ²]	$I_{dH} (\beta=0,3)$ [W/m ²]	$I_{dH} (\beta=0,4)$ [W/m ²]
Cesar	58,28	169,50	260,35	334,57	395,23
La Guajira	51,48	168,66	258,92	332,49	392,47
Magdalena	58,16	169,45	260,09	333,92	394,09

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5, se presenta la radiación difusa promedio para los departamentos a lo largo de un año, teniendo en cuenta una atmósfera turbia ($\beta=0,3$). Se observa que los mayores valores se presentan en los meses de marzo y septiembre donde se presentan atenuaciones nubosas en la mayoría de los departamentos. En los meses de diciembre y enero se observan los menores valores para este parámetro sobre todo en el Magdalena y La Guajira. Este comportamiento se encuentra acorde con el comportamiento que siguen las transmitancias por moléculas de aire, gases miscibles y aerosoles presentados en las Figuras 3.a, 3.b y 3.e.

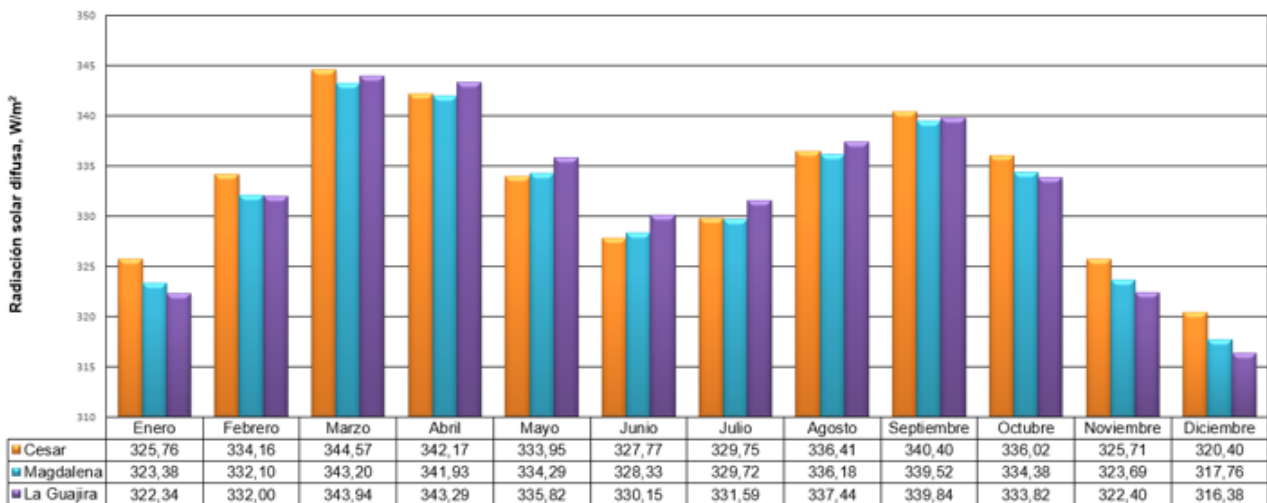


Figura 5. Promedio histórico mensual de la radiación solar difusa de la zona de estudio teniendo en cuenta una atmósfera turbia ($\beta=0,3$)

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Radiación Solar Total

Los valores de la radiación solar total promedio de los departamentos ubicados en la zona estudiada para cada tipo de atmósfera se puede observar en la Tabla 4, con el comportamiento de este valor es muy parecido en la zona estudiada.

Tabla 4. Radiación solar total promedio anual de la zona de estudio con diferentes tipos de atmósfera.

Departamento	$I_{TH} \beta=0,0$ [W/m ²]	$I_{TH} \beta=0,1$ [W/m ²]	$I_{TH} \beta=0,2$ [W/m ²]	$I_{TH} \beta=0,3$ [W/m ²]	$I_{TH} \beta=0,4$ [W/m ²]
Cesar	1002,8	967,4	938,4	914,6	895,2
La Guajira	984,7	955,6	926,5	902,8	883,4
Magdalena	993,7	957,9	928,6	904,7	885,2

Fuente: Elaboración propia

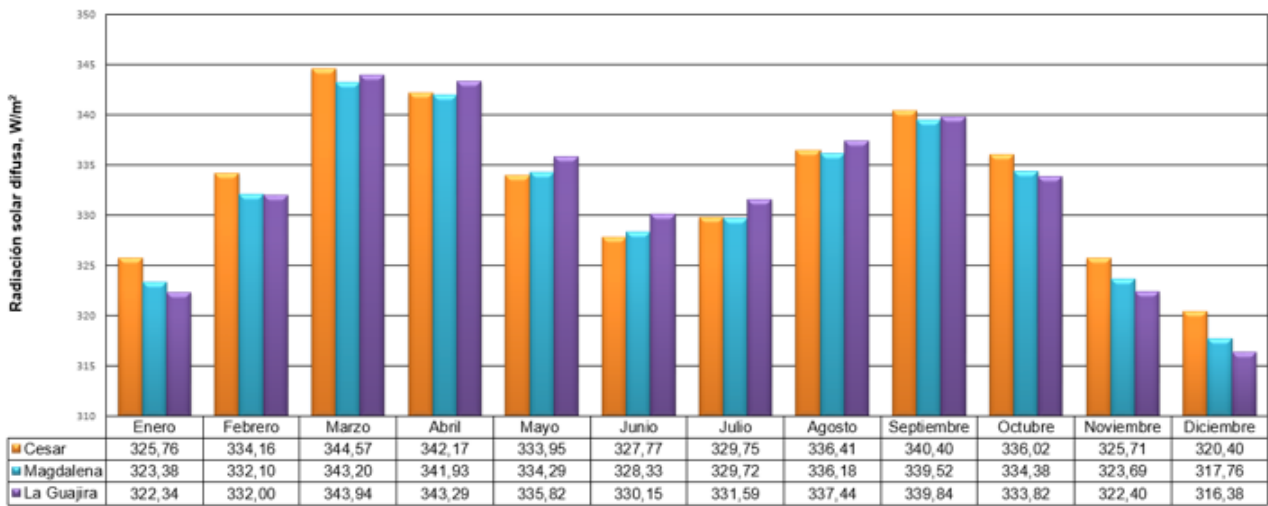


Figura 5. Promedio histórico mensual de la radiación solar difusa de la zona de estudio teniendo en cuenta una atmósfera turbia ($\beta=0,3$).
Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Radiación Solar Total

El aporte de la radiación directa y difusa en la radiación solar total para cada tipo de atmosfera se detalla en la Figura 6, donde se observa que a medida que la atmósfera es más turbia la radiación directa es menor debido a la presencia de partículas en la atmósfera que la atenúan. En general, la radiación incidente en los departamentos de la zona de estudio, teniendo en cuenta una atmósfera turbia, se encuentra demarcada por la época seca y húmeda, siendo los meses de marzo y septiembre los que presentan valores más elevados conforme al comportamiento que siguen los datos de transmitancia atmosférica discutidos con anterioridad (Ver Figura 3).

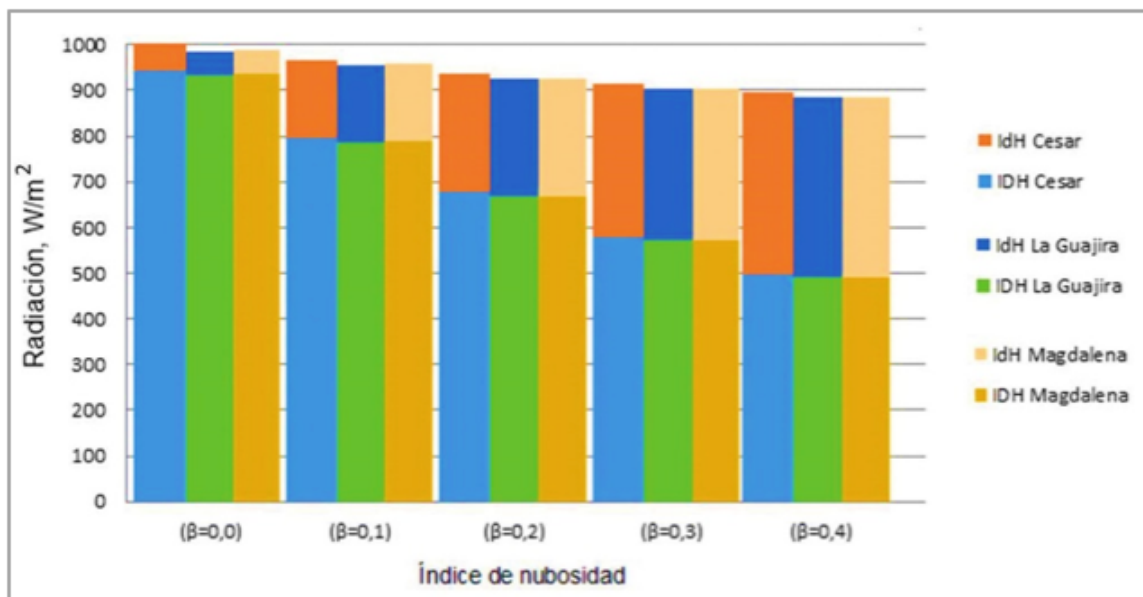


Figura6. Variación de los componentes solares de los diferentes departamentos en función del índice de nubosidad.
Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Brillo Solar

Para el cálculo de la radiación global en unidades de Wh/m²día fue necesario el análisis de las horas solares en la zona estudiada. El brillo solar es variable de acuerdo al clima de la región ya que depende de los factores meteorológicos; este no es más que el tiempo total que incide la luz solar de forma directa sobre la región, entre el alba y el ocaso (ETESA, 2005). En la Figura 7, se observa el promedio histórico mensual de horas solares en la zona estudiada donde se observa la tendencia que siguen estos datos, sobresaliendo el departamento de La Guajira con valores más elevados entre junio y septiembre, debido a que en la zona desértica se hace más intenso el segundo periodo de estiaje que la sufre la zona, lo que permite que se extiendan las horas solares en el departamento, mientras que el departamento del Cesar presenta los valores más altos entre diciembre y marzo, esto debido a que el departamento del Cesar presenta la más baja precipitación para ese periodo, respecto a los otros meses del año.

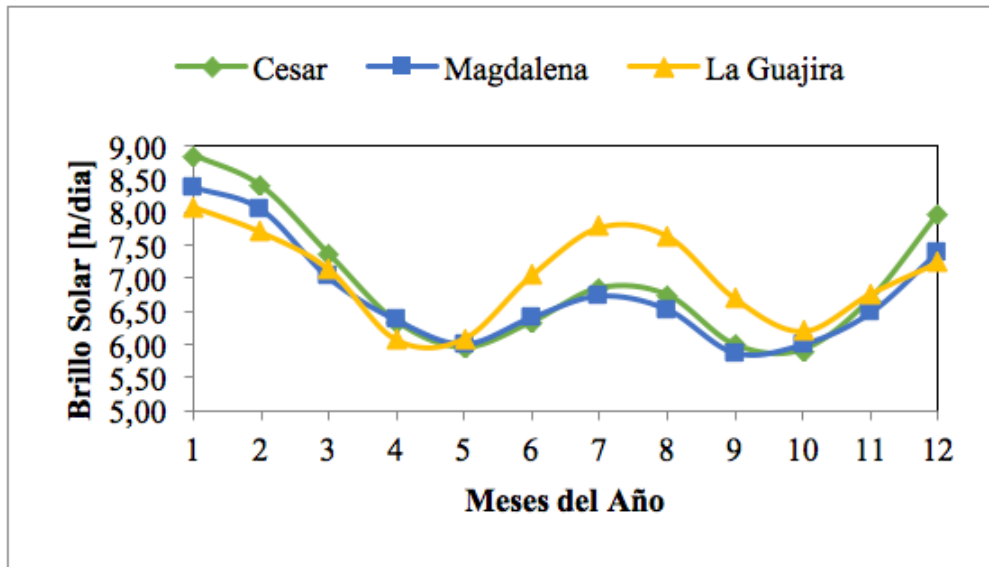


Figura 7. Brillo Solar promedio mensual en los departamentos del Cesar, Magdalena y La Guajira.
Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos de radiación solar directa en unidades de kWh/m²día en la zona de estudio son muy buenos considerando que el análisis es para una atmósfera turbia (Ver Figura 8.a.), donde los valores más altos se presentan en el departamento de La Guajira 4,5 kWh/m²día, especialmente en el área donde se encuentran las estaciones de Rancho Grande y Puerto Bolívar, dado principalmente por la menor presencia de vapor de agua que es la responsable de la absorción de la radiación solar; aunque de igual forma en la parte centro y sur del departamento del Cesar se registran valores de radiación solar directa de aproximadamente de 4,2 kWh/m²día y el departamento del Magdalena presenta ciertas áreas con valores de radiación solar directa de 3,6 kWh/m²día, especialmente la zona cercana a Santa Marta, a Pedraza, a Chibolo y a Tenerife, valores optimos para instalar sistemas térmicos de concentración de media temperatura (CSP) (Valencia, Vanegas, & Villicaña, 2016).

En la Figura 8.b., se observa que los valores de radiación solar difusa en unidades de kWh/m²día, se alcanzan con mayor medida en la zona norte de la península de La Guajira 2,6 kWh/m²día. Al considerarse el análisis realizado, se observa que esta región ofrece posibilidades para el desarrollo de instalaciones fotovoltaicas de tipo aislado y conectadas a red, y prácticamente en toda la región se aconseja el empleo de sistemas solares térmicos de baja temperatura para agua caliente sanitaria (ACS) y climatización de piscinas (Valencia, Vanegas, & Villicaña, 2016).

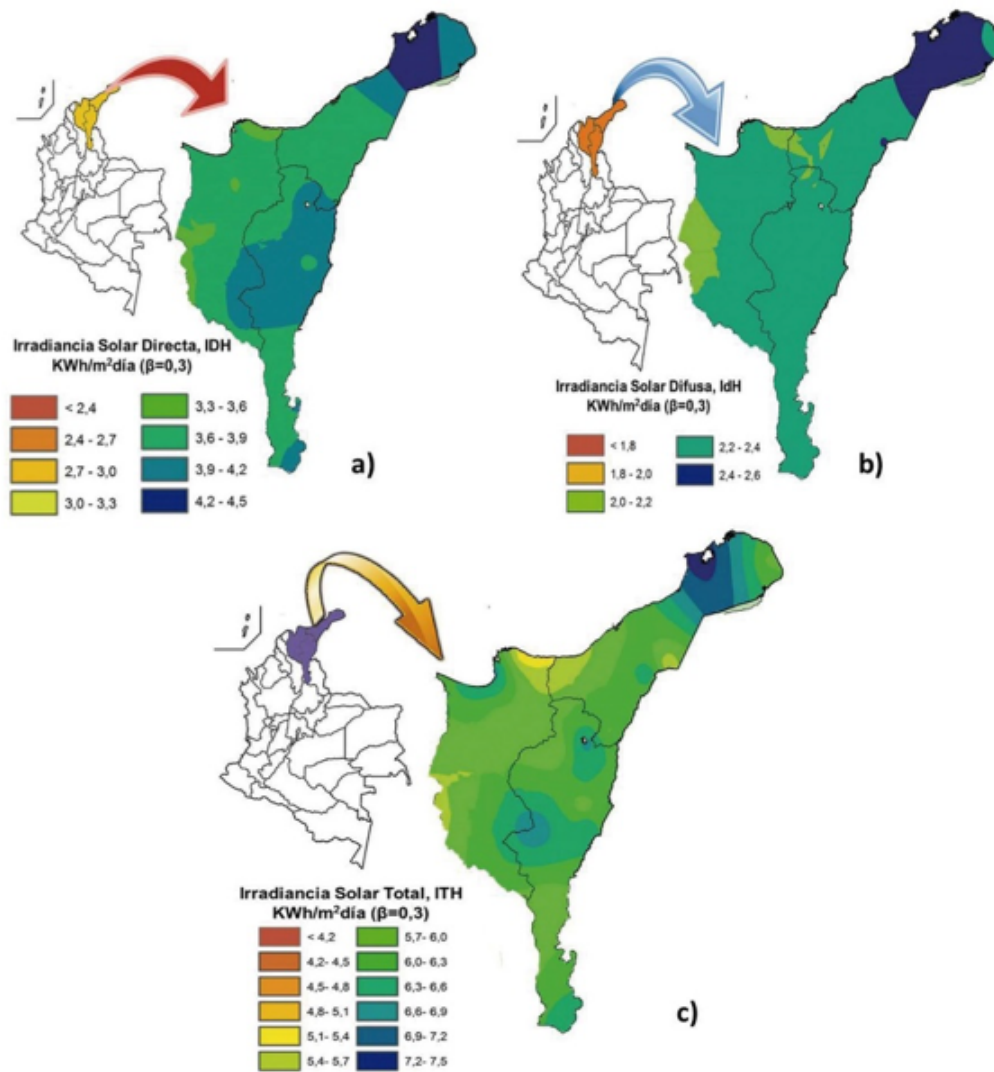


Figura 8. Mapa de Radiación Solar a) Directa b) Difusa c) Total (ITH KWh/m²día) promedio anual de la Zona de estudio para una atmósfera turbia (β=0,3)
Fuente: Elaboración propia

Al considerar una atmósfera turbia ($\beta=0,3$), la radiación difusa representa aproximadamente el 37% de la radiación total incidente en la superficie de la zona de estudio lo que podría disminuir la posibilidad de instalación de proyectos con tecnologías que requieran mucha radiación directa como en el caso de la generación de energía y calor a alta temperatura donde se requieren muchas horas de sol y radiación directa ya que se deben alcanzar temperaturas superiores a 400 °C.

En la Figura 8.c., se observa que los departamentos con mayor radiación total promedio anual son La Guajira y Cesar con valores promedio alrededor de 6,3 kWh/m²día y 6,2 kWh/m²día, respectivamente. Es importante resaltar, que hay zonas ubicadas en el desierto de La Guajira, donde se alcanzan niveles de radiación promedio multianual alrededor de 7,5 kWh/m²día. Estos valores se pueden considerar como un excelente recurso solar aun considerando una atmósfera turbia.

3.3. Validación del Modelo de Bird y Hulstrom

Para la validación de los valores obtenidos de radiación en la zona de estudio a través del modelo de Bird y Hulstrom, fue necesario comparar estos resultados con estaciones meteorológicas que aportan registros reales de mediciones de radiación; pero como ninguna de las estaciones meteorológicas que se analizaron a través del modelo presentaba registro de radiación, se optó por realizar la validación con la estación más cercana que tuviera dichos registros y que presentara las mismas condiciones climáticas; en la Figura 9, se observan las estaciones que se utilizaron para la validación del modelo y además las estaciones que presentan medidas de radiación. En la validación del modelo es de esperarse que se presente un margen de error entre los resultados obtenidos por el modelo y por los valores medidos, ya que los factores físicos y meteorológicos son de difícil predicción y al incluirlos dentro del modelo, no representan puntualmente las variaciones que tienen en condiciones reales. La validación del modelo se realizó para cada departamento, es decir que para el departamento del Cesar se validó el modelo con la estación Apto Alfonso López (10,26 N -73,14 W) y con la estación Fedearroz (10,27 N -73,15 W), al cual tenía las

mediciones directas de radiación, estas estaciones se encuentran ubicadas en la ciudad de Valledupar.



Figura 9. Ubicación de las estaciones para la validación del Modelo de Bird y Hulstrom.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10, se muestran los resultados obtenidos de radiación para cada tipo de atmósfera a lo largo del año de la estación Apto. Alfonso López, de igual forma se observa la variación de la radiación a través de estaciones automáticas y convencionales; además, se observa la similitud entre los valores reales (líneas continuas) con los obtenidos teóricamente (barras) identificando que se trata de una atmósfera turbia ($\beta=0.3$).

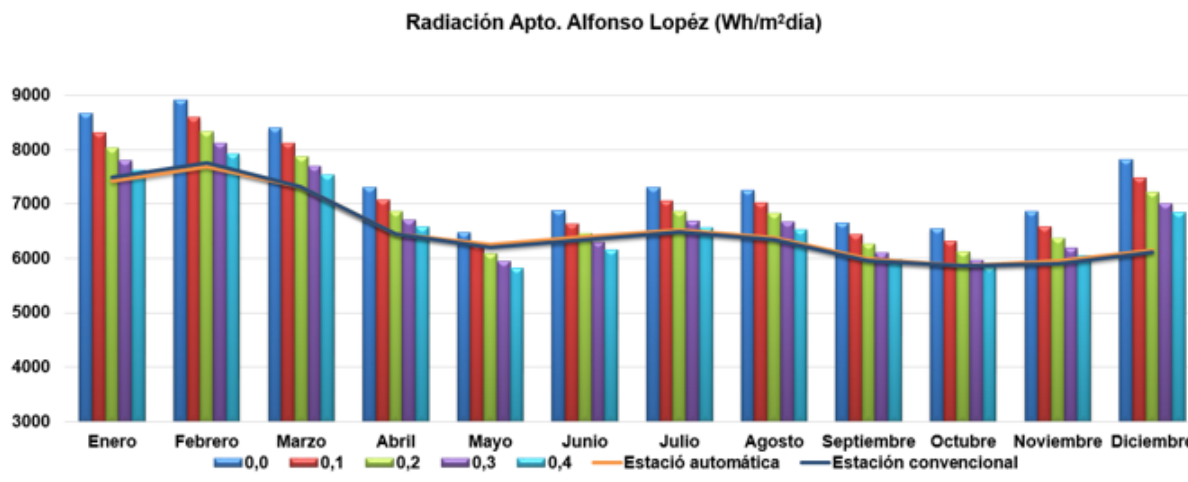


Figura 10. Comparación de la radiación calculada a través del modelo de Bird y Hulstrom con la medida a través de estaciones automáticas y convencionales de la estación Apto. Alfonso López (Valledupar, Cesar).
Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

De este trabajo de investigación se puede concluir que:

El Modelo de Bird y Hulstrom permitió evaluar la disponibilidad del recurso solar en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena de una forma sencilla con resultados óptimos y de calidad, teniendo en cuenta el grado de atenuación de la radiación.

Se logró determinar que el departamento que presenta el valor más alto de radiación global promedio anual es el departamento de la Guajira con un valor de 6,3 kWh/m²día, para una atmósfera turbia, de este valor de radiación el 36% pertenece a la radiación difusa y 64% a la radiación directa. Los departamentos del Cesar y Magdalena presentaron valores de radiación global de un valor de 6,2

kWh/m²día y 6,0 kWh/m²día respectivamente.

Las horas de brillo solar son diferente para cada uno de los departamentos y en promedio el departamento del Cesar presenta 6,9 horas de sol, mientras que el departamento de La Guajira tiene 7,1 horas de sol y el departamento del Magdalena 6,7 horas de sol.

En general los niveles de radiación de los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena son apropiados para implementar las instalaciones solares de tipo eléctricos como las fotovoltaicas, tecnologías de tipo ACS y de tipo térmico como la CSP.

Referencias

- Angström, A. (1961). Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *The Eppley Foundation for Research*.
- Ashrae. (1972). Handbook of fundamentals.
- Atwater, M., & Ball, J. (1980). A surface solar radiation model for cloudy atmosphere. *Monthly weather review*, 878-888.
- Bird, R., & Hulstrom, A. (1981). *A simplified clear sky model for direct and difusse insolation on horizontal surfaces*. Colorado: Solar Energy Research Institute.
- Bosca, J. (1995). *Contribución al estudio de la radiación solar y de la determinación de la turbiedad atmosférica. Aplicaciones a Valencia y Sevilla*. Valencia: Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Bosca, J., Pinazo, J., & Cañada, J. (19 de Febrero de 1983). *Obtención del Coeficiente de Turbiedad atmosférica de Angstrom de Valencia y Sevilla. Utilizando medidas de Radiación Solar*. Obtenido de Departamento de Termodinámica Aplicada. Universidad Politécnica de Valencia.: <http://www.vpclima.upv.es>
- Canales, R. (2010). *Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales (Tesis Doctoral)*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Davies, J. (1979). Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface. *Canadian Atmospheric Enviroment Service. First Canadian Solar Radiation Data Workshop*.
- Engineering, W. (1975). On the nature and distribution of solar radiation. *Department of Energy of EEUU*.
- ETESA. (2005). *Duración media de brillo solar u horas de sol*. Obtenido de de Transmisión Eléctrica, S.A: http://www.hidromet.com.pa/brillo_solar.php
- IDEAM, & UPME. (2015). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- Jaramillo, O. (1998). *Transporte de Energía Solar Concentrada a través de Fibras Ópticas: Acoplamiento Fibra-Concentrador y Estudio Térmico*. Morelos: Tesis de Maestría. UNAM.
- Lacis, A., & Hanses, A. (1973). A parametrization for the absorption in solar radiation in the Earth's Atmosphere. *Journal of the atmospheric sciences*, 118-133.
- Layton, D. (1990). Student laboratory practice and the history and philosophy of science. *The student laboratory and the science curriculum*, 37-59.
- Martínez, A. (2005). *Geografía de Colombia*. Obtenido de Toda Colombia: <http://www.todacolombia.com/geografia/geografiacolombiana.html>
- Pinazo , O. (1995). *Manual de climatización, Tomo II*. Valencia: Servicio de Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia.
- Universidad Nacional, Fundación Bariloche, & UPME. (2010). *Plan Energético Nacional 2010-2030 Informe Final*. Bogotá: Sello Editorial Unal.
- UPME. (Abril de 2015). *Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050*. Obtenido de UPME: <http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/noticias/plan-energetico-nacional-colombia-ideario-energetico-2050>
- UPME, & Ministerio de Minas y Energía. (2007). *Plan Energético Nacional 2006-2025, Contexto y Estrategias*. Bogotá.
- Valencia, G., Vanegas, M., & Villicaña, E. (2016). *Disponibilidad Geográfica y Temporal de la Energía Solar en la Costa Caribe Colombiana*. Barranquilla: Sello Editorial Universidad del Atlántico.
- Vanegas, M., Villicaña, E., & Arrieta, L. (2015). Quantification and characterization of solar radiation at the department of La Guajira-Colombia by calculating atmospheric transmissivity. *Prospect*, 54-63.
- Villicaña, E. (2012). *Método de evaluación de la radiación solar por transmisibilidad atmosférica. Tesis Doctoral*. Oviedo: Departamento de Energía, Universidad de Oviedo.
- Villicaña, E., Gutierrez, J., Predes, P., & Bernat, J. (2015). Solar energy potential in the coastal zone of the Gulf of Mexico. *Renewable Energy*, 534-542.
-

1. PhD. Tecnología, diversificación, calidad y ahorro energético, Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico. Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Kaí, Barranquilla, Colombia. marleyvanegas@mail.uniatlantico.edu.co
 2. Estudiante de Ingeniería Química. Universidad del Atlántico. Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Kaí, Barranquilla, Colombia. Churio38@gmail.com
 3. M.Sc. Ingeniería Mecánica, Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Kaí, Barranquilla, Colombia. guillermovalencia@mail.uniatlantico.edu.co
 4. PhD. Tecnología, diversificación, calidad y ahorro energético, Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Ingeniería y Tecnología, Lima, Perú. evillicana@utec.edu.pe
 5. PhD. Ingenierías, Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Costa, Grupo de investigación en optimización de la energía, GIOPEN, Barranquilla, Colombia. aospino8@cuc.edu.co
-

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 38 (Nº 07) Año 2017

[Índice]

[En caso de encontrar algún error en este website favor enviar email a webmaster]

©2017. revistaESPACIOS.com • Derechos Reservados