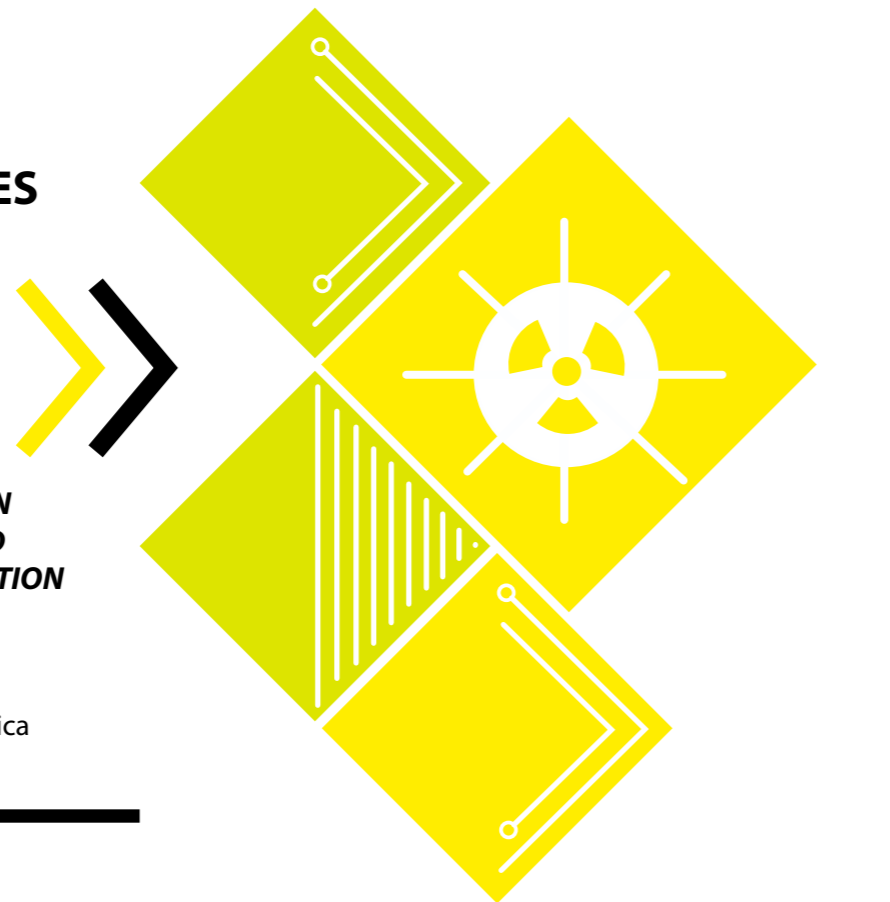


MODELO DE ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES E INCLINADAS EN EL CDITI PARA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS.

MODEL OF SOLAR RADIATION ESTIMATION INCIDENT ON HORIZONTAL AND INCLINED SURFACES IN THE CDITI FOR IMPLEMENTATION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEMS.

Tecnólogo John Daniel Grajales Henao
SENA, Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial Colombia
jdgrajales@sena.edu.co



Resumen

El presente documento expone el proceso de validación de diferentes modelos de estimación de la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal a partir de datos de radiación solar sobre una superficie horizontal y cálculo de ángulos de incidencia solar, medidos en el Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI) del Municipio de Dosquebradas, departamento de Risaralda, como parte de los procesos de investigación aplicada en torno a la integración y masificación de la energía solar fotovoltaica en los sistemas eléctricos convencionales del SENA. En él se describen los principales factores de la incidencia solar, se presentan datos de radiación solar medidos en sitio para el mes de Junio del 2018, se realiza una simulación de la radiación solar incidente mensual para la latitud del CDITI, se realiza cálculos para la simulación de la radiación incidente difusa y finalmente se realiza la simulación de la radiación solar sobre las superficies óptimamente inclinadas en el CDITI a partir de la radiación mensual simulada y la radiación solar medida para el mes de Junio del 2018.

Palabras clave: Radiación extraterrestre, brillo solar, radiación difusa.

Abstrac

This document presents the validation process of different models for estimating incident solar radiation on a horizontal surface from solar radiation data on a horizontal surface and

calculation of solar incidence angles, measured at the Center for Design and Technological Innovation Industrial (CDITI) of the Municipality of Dosquebradas, department of Risaralda, as part of the applied research processes around the integration and massification of photovoltaic solar energy in the conventional electrical systems of SENA. It describes the main factors of solar incidence, solar radiation data measured on site for the month of June 2018, a simulation of the incident solar radiation monthly for the latitude of the CDITI is performed, calculations are made for the Simulation of the diffuse incident radiation and finally the simulation of the solar radiation on the optimally inclined surfaces in the CDITI is made from the simulated monthly radiation and the solar radiation measured for the month of June 2018.

Keywords: Extraterrestrial radiation, solar brightness, diffuse radiation.

Introducción

La radiación solar incidente se presenta como la principal fuente de energía renovable disponible en nuestro planeta y es responsable de numerosos procesos físicos, químicos y biológicos. Su estimación permite cuantificar la energía que es utilizada en los diferentes procesos a nivel de superficie terrestre (Ocampo & Rivas, 2013), y constituye una herramienta valiosa para el planteamiento y dimensionamiento de sistemas solares destinados al abastecimiento de energía

(Ambiente, n.d.). Se han desarrollado numerosos modelos de estimación de la radiación solar incidente a partir GC-F-005 V. 01 de datos de radiación global horizontal medidos por estaciones meteorológicas y modelos teóricos de radiación extraterrestre para la evaluación de radiación incidente sobre una superficie horizontal para cualquier época y lugar del año utilizando datos de declinación terrestre y latitud (Duffie, Beckman, & Worek, 2003), al igual que se han desarrollado diversos modelos lineales, exponenciales, logarítmicos, estocásticos y redes neuronales multicapa con algoritmos de Backpropagation (Sayago, Bocco, Ovando, & Willington, 2011). Angstrom- Prescott desarrolló un modelo matemático de regresión que relaciona la radiación promedio mensual con niveles de radiación de día claro de una ubicación específica, siendo modificado por Page (1964) para basarlo en términos de radiación extraterrestre, la relación promedios de brillo solar y de constantes del sistema de clasificación climática de Twartha (1954-1961) y el sistema de clasificación de vegetación de Kuchler (Duffie et al., 2003).

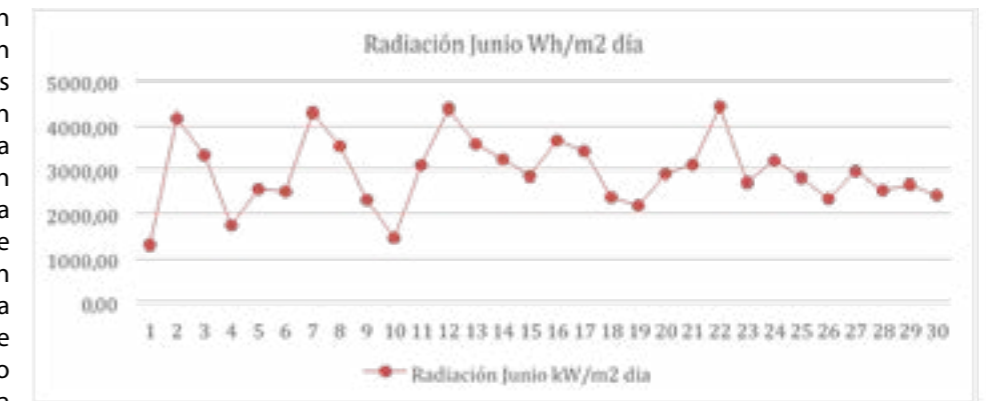
Por otro lado, Benford y Bock (1939) proponen el cálculo de la relación geométrica que presenta una superficie con cualquier orientación relativa a la tierra y el haz de radiación proveniente del sol, que describen en términos de varios ángulos, estos ángulos están derivados de la latitud, la declinación terrestre, la inclinación de la superficie estudiada y posición azimutal de la superficie y ángulos que definen la posición del sol en el cielo. Esta relación geométrica determina la fracción de la radiación total horizontal que incide sobre la superficie colectora inclinada. (Duffie et al., 2003). De igual forma la radiación solar incidente en la superficie de la tierra está expuesta a fenómenos de atenuación atmosférica con respecto a la radiación extraterrestre, derivada de la dispersión atmosférica por moléculas de agua, aire y polvo y por la absorción atmosférica de 3 y 2 (Iqbal, 1983) encontrándose así una relación de la atenuación de la radiación con la masa de aire, la humedad, y la cantidad de partículas de polvo que se encuentran en la atmosfera dependiente del estado del tiempo y la ubicación, esta relación de atenuación determina la fracción de la radiación incidente que es difusa (Duffie et al., 2003).

Derivado de lo anterior actualmente para los procesos de investigación en torno a la implementación de energía solar fotovoltaica que ese llevan a cabo en CDITI se considera de fundamental interés e importancia validar modelos de estimación de la radiación solar incidente en superficies inclinadas y de la fracción difusa a partir de datos disponibles de radiación solar global horizontal medidos en sitio, con el objetivo de evaluar las condiciones de radiación incidente en la planta solar fotovoltaica del CDITI y desarrollar metodologías de cálculo para garantizar condiciones óptimas de dimensionamiento de generadores solares fotovoltaicos para su introducción en los procesos formativos a fines en el centro de formación, buscando promover el la investigación, el desarrollo y utilización de Fuentes No Convencionales de energía principalmente las de carácter renovable, en pro del desarrollo económico sostenible del país, la reducción de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento

energético de acuerdo a lo planteado en los artículo 1,2 de la ley 1715 del 13 de mayo del 2014 y los compromisos adoptados por Colombia en el marco del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) mediante la ley 1665 de 2013 en materia de integración de energías renovables, mitigación del cambio climático y eficiencia energética. (Congreso de Colombia, 2014), (UPME, 2016).

Mediciones, Modelos usados y Resultados.

Para del desarrollo del presente trabajo se tomó como base datos de radiación solar global horizontal registrados por una estación meteorológica Davis Vantage Pro2 para todos los días del mes de junio del año 2018 y se analizaron y registraron promedios mensuales de radiación solar para la Ubicación del CDITI, disponibles en el atlas de radiación y brillo solar desarrollado por el IDEAM. A partir de los datos tomados de se determinó el promedio de radiación solar global diaria y el promedio de radiación incidente mensual, presentando un promedio mensual medido de 2.93 kWh/m² día, el comportamiento diario se describe a continuación:



Grafica 1. Distribución de la radiación global incidente en el CDITI para los días del mes de Julio. Fuente: Autor.

Estimación de radiación solar incidente mensual.

Inicialmente se realiza una validación del cálculo de la declinación terrestre utilizando el modelo presentado por Spencer (1971) la cual presenta un mejor grado de precisión matemática (error < 0.035°) y los días promedios determinados por Klein (1977) (Duffie et al., 2003). Se realiza el cálculo de la radiación promedio mensual con base al siguiente modelo matemático propuesto por Page (1964) derivado del modelo de regresión lineal de Angstrom.

Donde:

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a + b \frac{\bar{n}}{N}$$

- H = Radiación global horizontal incidente estimada.
- H₀ = Radiación extraterrestre mensual para la ubicación del CDITI.
- a = Coeficiente de clasificación climática basado en el mapa de Koppen-Trewartha.
- b = Coeficiente de clasificación de la vegetación de Kuchler.
- \bar{n} = promedio mensual diario de brillo solar.
- N = duración promedio del día.

La clasificación climática encontrada para el municipio



de Dosquebradas es Af de acuerdo a los mapas de Koppen-Trewartha (1954, 1967) y pertenece a la clasificación G de acuerdo a la clasificación de la vegetación propuesta por Kuchler (1966). Los datos promedio diario de brillo solar fueron extraídos de las bases de datos del IDEAM. La radiación Extraterrestre mensual del CDITI se calculó con base al modelo matemático propuesto por Duffie & Beckman (2003).

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot (n - 1)}{365}\right) \cdot \left(\cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \omega + \frac{\pi \cdot \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta}{180}\right)$$

Ecuación 2. Modelo matemático propuesto por Duffie & Beckman (2003).

El día promedio solar se calculó a partir de la expresión

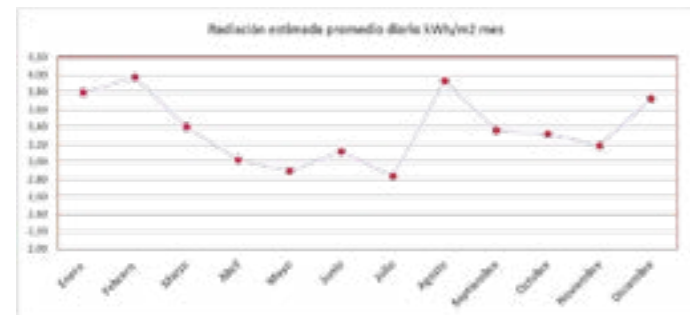
$$N = \frac{1}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1.6.11)$$

Se obtuvieron los siguientes datos estimados de radiación solar incidente para cada uno de los días del año en la ubicación del CDITI.

Día del año promedio	Declina	ws	Ho	Ho kW/m2	n	N	a	b	H	H	
Enero	17	-20,9	88,15	34,2 9	9,52	6	11,75	0,28	0,53	13,65	3,79
Febrero	47	-13	88,88	36,1 9	10,05	6	11,85	0,28	0,5	14,29	3,97
Marzo	75	-2,4	89,8	37,5 6	10,43	5	11,97	0,28	0,5	12,23	3,4
Abril	105	9,4	90,8	37,4 8	10,41	4,5	12,11	0,28	0,5	10,87	3,02
Mayo	135	18,8	91,65	36,2 5	10,07	4,5	12,22	0,28	0,5	10,41	2,89
Junio	162	23,1	92,07	35,3 1	9,81	5	12,28	0,28	0,5	11,22	3,12
Julio	198	21,2	91	35,5 8	9,88	4,5	12,25	0,28	0,5	10,19	2,83
Agosto	228	13,5	91,16	36,7 2	10,2	6	12,16	0,28	0,5	14,14	3,93
Septiemb	258	2,2	90,19	37,2 9	10,36	5	12,02	0,28	0,5	12,1	3,36
Octubre	288	-9,6	89,18	36,4 0	10,11	5	11,89	0,28	0,5	11,94	3,32
Noviembre	318	-18,9	88,34	34,6 1	9,62	5	11,78	0,28	0,5	11,46	3,18
Diciembre	344	-23	87,94	33,5 7	9,32	6	11,73	0,28	0,5	13,4	3,72

Tabla 1. Estimación de Radiación extraterrestre y radiación global incidente para las condiciones del CDITI.

Gráficamente el comportamiento obtenido de la radiación solar incidente estimado mediante el modelo matemático



Gráfica 1. Comportamiento diario de la radiación incidente mensual, estimado para las condiciones del CDITI.

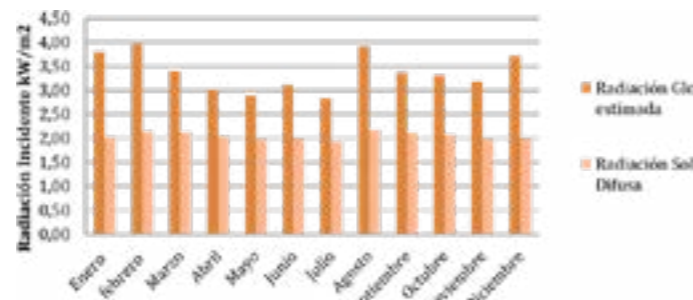
planteado es el siguiente:

Estimación de la fracción difusa de la radiación incidente.

Se utilizan los modelos planteados por Lui & Jordan (1960), Bendt (1981) y las correlaciones de Erbs (1982) para determinar la fracción difusa de la radiación estimada para todos los meses del año y la radiación medida para todos los días del

	Ho (MJ/m2)	Ho kW/m2	H	H kW/m2	Kt H/ Ho MJ/m2	ws	Hd/H	E difusa mensual	E difusa mensual kW/m2
Enero	34,29	9,52	13,65	3,79	0,398	88,15	0,536	7,32	2,03
febrero	36,19	10,05	14,29	3,97	0,395	88,88	0,54	7,72	2,14
Marzo	37,56	10,43	12,23	3,4	0,326	89,8	0,627	7,67	2,13
Abril	37,48	10,41	10,87	3,02	0,29	90,8	0,679	7,37	2,05
Mayo	36,25	10,07	10,41	2,89	0,287	91,65	0,683	7,11	1,97
Junio	35,31	9,81	11,22	3,12	0,318	92,07	0,638	7,16	1,99
Julio	35,58	9,88	10,19	2,83	0,287	91,88	0,684	6,97	1,94
Agosto	36,72	10,2	14,14	3,93	0,385	91,16	0,552	7,8	2,17
Septiembre	37,29	10,36	12,1	3,36	0,324	90,19	0,629	7,61	2,11
Octubre	36,4	10,11	11,94	3,32	0,328	89,18	0,624	7,45	2,07
Noviembre	34,61	9,62	11,46	3,18	0,331	88,34	0,62	7,11	1,97
Diciembre	33,57	9,32	13,4	3,72	0,399	87,94	0,535	7,17	1,99

Tabla 2. Estimación de la fracción promedio de radiación difusa incidente mensual. Fuente: Autor.



Gráfica 2. Comparación Radiación mensual estimada y fracción de radiación difusa. Fuente: Autor.

mes de junio en relación al índice de claridad de cada caso.

Estimación diaria de la radiación incidente en Las superficies inclinadas

Para la estimación de la radiación incidente sobre las superficies inclinadas, se recurre al modelo de estimación isotrópica propuesto por Lui y Jordan (1963), partiendo de los modelos propuestos por Hottel y Woertz (1942) donde se asume la incidencia de la radiación difusa y reflejada del suelo como isotrópicas; de igual forma presentan un modelo matemático para el análisis horario de la radiación incidente sobre una superficie inclinada, (Basunia, Yoshiob, & Abec, 2012) presentan un modelo de estimación para la radiación incidente diaria y mensual adaptado de Lui y Jordan (1963), y valorado sobre las condiciones de Matsuyama, Japón el cual se retoma en el presente trabajo para su estudio en las condiciones del CDITI.

La ecuación utilizada en la estimación del promedio de radiación incidente diaria en las superficies inclinadas óptimas

$$H_T = (H - Hd) \cdot R_{dm} + Hd \cdot \left(1 + \frac{\cos \beta}{2}\right) + Hpr \cdot \left(1 - \frac{\cos \beta}{2}\right)$$

del CDITI es:

El modelo matemático contempla el cálculo del factor teniendo en cuenta el ángulo del atardecer (ω_s) del día medio

$$R_{Dms} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega_s \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \omega_s \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta}$$

del mes propuesto por Klein.

El cálculo del ángulo ω_s se realiza a través de la expresión

$$\omega_m = \min \left[\begin{matrix} \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan \delta) \end{matrix} \right]$$

Donde la expresión "min" indica que para ω_m se tomará el valor mínimo calculado.

Tomando lo anterior, el comportamiento simulado de la radiación incidente sobre la superficie inclinada para el CDITI de acuerdo a datos de medidos de radiación horizontal



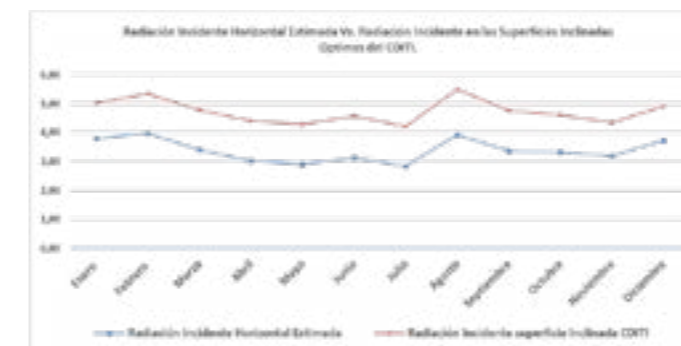
incidente en el mes de Junio, se detalla en la siguiente gráfica.
Estimación Mensual de la radiación incidente en las superficies inclinadas

La radiación incidente mensual sobre las superficies inclinadas del CDITI, se calcula apropiando el modelo matemático de radiación isotrópica propuesto por Lui y Jordan (1963), el cual es retomado por Klein (1977). Este método matemático es ampliamente utilizado y aplicado en diferentes procesos de ingeniería solar.(Basunia et al., 2012), en él se asume que el comportamiento de la radiación difusa y reflejada son isotrópicas, la ecuación que describe el modelo matemático

$$H_{Tm} = H_m \left(1 - \frac{H_{dm}}{H_m}\right) R_{dm} + H_{dm} \left(1 + \frac{\cos \beta}{2}\right) + H_m \cdot pr \cdot \left(1 - \frac{\cos \beta}{2}\right)$$

aplicado es:

Para las condiciones de inclinación óptima y latitud del CDITI y valores de la declinación terrestre de los días medios de cada mes, la simulación del comportamiento del promedio mensual de radiación incidente en las superficies inclinadas



es el siguiente:

Conclusiones

El modelo matemático adoptado para la simulación de la radiación incidente mensual y la radiación diaria y mensual en las superficies inclinadas óptimas se desarrolló basado en modelos teóricos base evaluados en diferentes partes del planeta observándose confiables en la aplicación a las condiciones del CDITI. Los valores de promedios de radiación medidos se compararon con promedios de radiación simulados donde se observan valores razonablemente coherentes.

El promedio de radiación incidente sobre la superficie horizontal medido para el mes de junio presenta un valor de 2,93 kWh/m2 día, el promedio simulado de radiación incidente sobre la superficie horizontal 3,12 kWh/m2 día, mientras el promedio simulado de radiación solar incidente sobre la superficie óptimamente inclinada en el CDITI para el mismo mes es de 4,14 kWh/m2 día, de lo cual se analiza la importancia del cálculo del ángulo de inclinación óptima en cada latitud específica para la optimización del recurso solar disponible en una superficie captadora. Se encontró el valor de inclinación óptima para paneles solares en el CDITI aproximado en 7.03° con respecto al plano horizontal.

De manera estadística se analizaron los valores medidos de radiación solar incidente horizontal del mes de junio de 2018 y los valores simulados de radiación solar incidente en la superficie horizontal mediante la aplicación de la prueba de Fisher (Gutiérrez Pulido, 2008) donde se determina la suficiente evidencia estadística para determinar que las muestras tienen varianzas iguales para un nivel de confianza del 95%.

Referencias Bibliográficas

- Ambiente, M. De. (n.d.). Atlas de Radiación Solar de Colombia.
- Basunia, M. A., Yoshiob, H., & Abec, T. (2012). Simulation of solar radiation incident on horizontal and inclined surfaces. Journal of Engineering Research, 9(2), 27–35. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol9iss2pp27-35>
- Congreso de Colombia. (2014). Ley N° 1715 del 13 de mayo de 2014. Upme, (May), 26. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Duffie, J. a., Beckman, W. a., & Worek, W. M. (2003). Solar Engineering of Thermal Processes, 4nd ed. Journal of Solar Energy Engineering (Vol. 116). <https://doi.org/10.1115/1.2930068>
- Gutiérrez Pulido, H. (2008). Análisis y diseño de experimentos. Retrieved from http://gc.initelabs.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimontos.pdf
- Iqbal, M. (1983). An introduction to the solar energy.
- Ocampo, D., & Rivas, R. (2013). ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA DIARIA A PARTIR DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE ESTIMATING DAILY NET RADIATION FROM MULTIPLE



LINEAR
REGRESSION MODELS. <https://doi.org/10.5154/rchscfa.2012.04.031>

Sayago, S., Bocco, M., Ovando, G., & Willington, E. (2011).
RADIACIÓN SOLAR
HORARIA: MODELOS DE ESTIMACIÓN A PARTIR DE VARIABLES
METEOROLÓGICAS BÁSICAS. Retrieved from

<https://www.researchgate.net/publication/264850041>
UPME. (2016). PLAN DE ACCIÓN INDICATIVO DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA 2017-2022. Ministerio de Minas y Energía, Unidad
de Planeación Minero Energética UPME, 157. Retrieved from
[http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/
MarcoNormatividad/PAI_PROU_RE_2017-2022.pdf](http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROU_RE_2017-2022.pdf)

CRÉDITOS

COMITÉ EVALUADOR

Eliana Mirledy Toro Ocampo, PhD
Universidad Tecnológica de Pereira - UTP

Estephany Osorio Arroyave, MSc(c)
Universidad Nacional de Colombia - UNAL

Germán Andrés Holguín Londoño, PhD(c)
Universidad Tecnológica de Pereira - UTP

Luis Enrique Olaya Domínguez, MSc
Tecnoacademia Risaralda
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Martha Elizabeth Cortés Rico, MsC(c)
Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial - CDITI
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Paula Andrea Abad Giraldo, MsC
Universidad del Quindío - UQ

Oscar Alberto Henao Gallo, PhD
Universidad Tecnológica de Pereira - UTP

DISEÑO EDITORIAL

Arte gráfico

María Camila Soto Londoño
Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial - CDITI
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

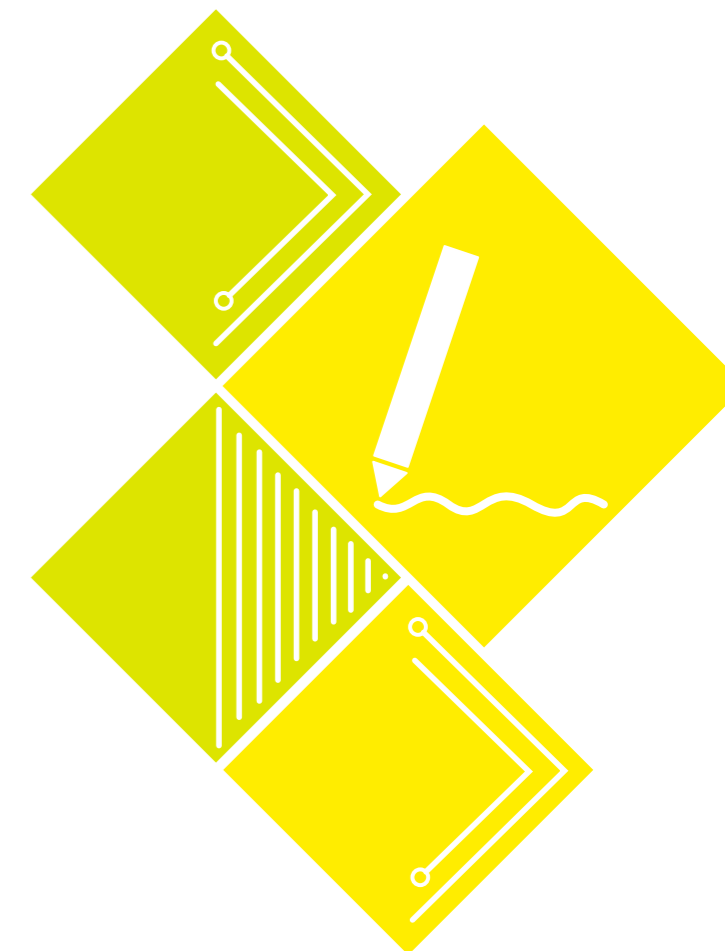
Diseño gráfico - Diagramación

Santiago Cardona Marín
Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial - CDITI
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Miguel Camilo Fisgativa Abendaño
Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial - CDITI
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA

Fotografía

Mayra Tatiana Pascuas García
Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial - CDITI
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA



COMITÉ EDITORIAL

Director General
Carlos Mario Estrada Molina, MSc
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Director Regional Risaralda
Andrés Aurelio Alarcón
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Coordinador SENNOVA
Emilio Eliécer Navia Z' Òiga
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Subdirector de Centro de Diseño e Innovación Tecnológica
Industrial - CDITI
Jhon Freddy Amaya Taborda, MSc
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA

Editora
Daniela Ospina Toro, MSc
Líder SENNOVA - Centro de Diseño e Innovación Tecnológica
Industrial
Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
Investigadora, Universidad Tecnológica de Pereira