

**EVALUACIÓN DE LA CORRELACIÓN ENTRE VALORES EXPERIMENTALES PROMEDIOS MINUTO DE RADIACIÓN SOLAR DIFUSA A GLOBAL, EN EL SECTOR CENTRO-ORIENTE DE BOGOTÁ - COLOMBIA**

**Forero Ch. N.L.\*, Roa F.L.\*, Delgado M.A.\*\*, Flórez J.M.\***

\* Licenciatura en Física, Grupo de Investigación en Física del Medio Ambiente y Energía Solar - FMAES, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede Macarena B, Carrera 4A # 26D - 54, Bogotá, Colombia, fono/fax +57 1 3239300 Ext.3050, [nforero@udistrital.edu.co](mailto:nforero@udistrital.edu.co), [fmaes@udistrital.edu.co](mailto:fmaes@udistrital.edu.co)

\*\* Licenciatura en Química, Grupo de Investigación en Física del Medio Ambiente y Energía Solar - FMAES, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede Macarena B, Carrera 4A # 26D - 54, Bogotá, Colombia, fono/fax +57 1 3239300 Ext.3050, [fmaes@udistrital.edu.co](mailto:fmaes@udistrital.edu.co)

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.6109>

RESUMEN

Se presentan resultados de la evaluación sobre la correlación entre valores promedios minuto de medidas de radiación solar difusa a radiación solar global diarias, en el plano horizontal, para el sector centro - oriente de Bogotá, Colombia, durante el período 2012-2015. Los datos de radiación solar difusa, como los de global, se adquieren a partir de sistemas estructurados, desarrollados bajo el concepto de Instrumentación Virtual que emplea lenguaje de programación gráfica Lab-VIEW. Aunque en general los cambios en magnitud de la intensidad de radiación difusa siguen simultáneamente a los de global, sus diferencias se amplían en momentos de alta radiación. Los resultados arrojan un coeficiente de correlación entre radiación difusa a global  $f_d=0.639$ . Como complemento se presentan perfiles en el periodo establecido, con valores promedio día y mes/día. Estos aportes son necesarios para establecer características del potencial energético solar en áreas y regiones definidas, es decir, tener parámetros válidos para dimensionamiento, diseño e implementación de plantas y sistemas solares.

PALABRAS CLAVE: Irradiación solar difusa, Irradiación solar global, correlación.

ABSTRACT

This article presents the results of the evaluation on the correlation between minute mean values of measurements of diffuse solar radiation to global solar radiation daily, in the horizontal plane, for the central-eastern sector of Bogotá, Colombia, during the period 2012-2015. Diffuse solar radiation data, such as global data, are acquired from structured systems, developed under the concept of Virtual Instrumentation that uses the graphical programming language Lab-VIEW. Although in general the changes in magnitude of the intensity of diffuse radiation follow simultaneously to those of global, their differences widen at times of high radiation. The results show a correlation coefficient between diffuse radiation at global  $f_d = 0.639$ . As a complement, profiles are presented during the established period, with average day and month/day values. These contributions are necessary to establish characteristics of the solar energy potential in defined areas and regions, that is, to have valid parameters for dimensioning, design and implementation of solar plants and systems.

KEYWORDS: Diffuse solar irradiation, global solar irradiation, correlation

## INTRODUCCIÓN

En Colombia se cuenta mayormente con bases de datos de radiación solar global horizontal, mapas y atlas brindados por entidades gubernamentales, (IDEAM, 2019) e instituciones privadas; sin embargo, es escasa la información estadística representativa sobre el recurso solar en forma local, teniendo en cuenta que existen regiones con características climáticas espacio-temporales de alta variabilidad, como es el caso de la región en la que está ubicada la ciudad de Bogotá (IDEAM – UNAL, 2018) y en particular la franja oriental que bordea la cordillera oriental de los andes. La zona geográfica del sector centro-oriente de la ciudad está localizada a una altitud promedio de 2655 msnm y se encuentra bordeada por una cadena montañosa que sobrepasa en algunos casos los 3300 msnm, lo que genera que se tengan temperaturas promedio del orden de  $14.2^{\circ}\text{C}$ , lo que se contrasta con la zona limítrofe de la gran llanura oriental del continente suramericano, compartida entre otros países por Colombia, Venezuela y Brasil, que tiene una altitud promedio de 300 msnm. Situación bien conocida debido a la alta variabilidad climática y de irradiación solar, lo que impacta directamente el desempeño de sistemas solares, pero que con conocimiento de sus características, se definen estrategias óptimas de operación (Fernández, C. et al., 2018).

Interesados en evaluar el recurso solar en este sector geográfico del centro oriente de Bogotá- Colombia, se han desarrollado sistemas de adquisición de datos para la medida de variables atmosféricas, climáticas y parámetros solares, entre ellos los de radiación solar global, directa y difusa, ya que brindan información útil, no solo para aplicaciones del recurso energético, sino también para el análisis de las condiciones atmosféricas. En este trabajo, a partir de las bases de datos, se presentan resultados de la evaluación de la correlación estadística entre valores experimentales promedios minuto de radiación solar difusa a radiación solar global, complementado con la obtención de promedios horario, diario, diario/mensual, y la evaluación del comportamiento para el periodo 2012 a 2015. La estación de medición desarrollada por el grupo de investigación en Física del Medio Ambiente y Energía Solar – FMAES, está ubicada en el sector centro-oriente de Bogotá – Colombia, con coordenadas  $4.61^{\circ}$  de latitud Norte,  $74.06^{\circ}$  de longitud Oeste y una altitud de 2657 msnm, en la sede Macarena B de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Las bases están compuestas originalmente por valores promedio minuto, necesarios para el estudio del recurso solar, parámetro característico necesario para el dimensionamiento y aplicación en sistemas solares de conversión térmica o sistemas fotovoltaicos, y particularmente como elemento de estudio en la influencia que ejerce la contaminación atmosférica. Se pone de manifiesto que es necesario realizar previamente, y preferiblemente durante varios periodos anuales, mediciones en cada región, considerando sus condiciones climáticas y ambientales, generando bases de datos de medidas, que permitan antes de desarrollar cualquier proyecto de infraestructura de aplicación del recurso solar, tener análisis, estudios y caracterizaciones fundamentales, para evitar pérdidas o sobrecostos. Estos temas son de relevancia, ya que se busca el óptimo desempeño y eficiencia de los sistemas de captación y transformación energética. (Devrim, Zafer, & Olcay, 2015).

## ASPECTOS METODOLÓGICOS Y EXPERIMENTALES

### Sistemas de adquisición de datos e instrumentación virtual

El diseño y puesta en operación del sistema de adquisición de datos (SAD) para medida de la radiación solar global se dio durante el 2008. Por su parte, a mediados del 2012 entra en operación el sistema para adquirir, procesar y analizar la componente difusa de la radiación solar, que emplea un piranómetro Kipp & Zonen MP3 y una banda obstructora diseñada y acoplada bajo parámetros técnicos. Ambos sistemas de medición y monitoreo fueron diseñados y estructurados bajo el concepto de Instrumentación Virtual (IV) que emplea el lenguaje de programación gráfica Lab-VIEW. Cada instrumento virtual (IV) conforma un sistema de adquisición de datos (SAD) que posee como componentes hardware, módulos compact Field Point (cFP), un computador y los piranómetros citados como sensores. Tanto LabVIEW, como los cFP son desarrollados por la firma National Instruments. Los cFP están compuestos por un módulo compact Field Point-2020 (cFP-2020), que es un controlador de procesos de automatización programable y módulos I/O, cFP AI 100 y cFP TC 120, estos últimos para medir diferentes variables (señales) provenientes de los sensores utilizados.

El IV para radiación solar global posee como sensor un piranómetro tipo termopila Eppley ref. 8-48, Black & White, con sensibilidad de  $10.05\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ , tiempo de respuesta de 16.2 segundos y en conjunto posee una resolución de  $\pm 1.20\text{Wm}^{-2}$ ; análogamente, el IV para la medida de la radiación difusa emplea el piranómetro Kipp&Zonenn, tipo termopila, con sensibilidad de  $19.64\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$  y respuesta de 14.50 segundos, con resolución de  $\pm 1.22\text{Wm}^{-2}$ . Cada IV visualiza los resultados en una interfaz gráfica denominada panel frontal y exporta automáticamente los promedios minuto a un archivo .xlsx, cada día, con los que se obtienen los promedios hora-día y los promedios día que conforman las bases. Las medidas de cada uno de estos parámetros son útiles para determinar características relevantes del recurso solar en el lugar específico y para evaluar el desempeño de sistemas solares. (Ayompe y Duffy, 2013).

Metodología y tratamiento de datos.

Liu y Jordan fueron pioneros en analizar la correlación entre radiación difusa a global en una superficie horizontal (Liu y Jordan, 1960). Dichos análisis se enfocaron en la correlación entre valores promedios diarios, pero no se hizo con promedios horario o promedios minuto, con los que se demuestra la influencia de absorción, difusión y dispersión de la radiación solar con las componentes atmosféricas locales, evidenciándose a su vez factores de transmisión y claridad atmosférica.

Para facilitar los cálculos a partir de los datos registrados de los promedios minuto de radiación solar difusa, como global, se desarrolló un IV adicional que accede a cada archivo, denotado por la fecha en la forma  $d_i d_j / M_i M_j / A_i A_j A_k A_l$ .xlsx, (o, .dat), el que realiza autónoma y automáticamente en correspondencia la lectura de cada valor promedio minuto de radiación difusa  $D_i$ , el de radiación solar global  $G_i$ , realiza el cociente expresado en la Ec. (1) y guarda su resultado:

$$f_{D_i} = \frac{D_i}{G_i} \tag{1}$$

El IV permite además realizar otras operaciones entre otras; por ejemplo, determina cocientes entre promedios hora y detecta errores y valores atípicos dentro de las bases de datos.

El primer paso a seguir para establecer y validar la correlación entre la componente difusa  $D_i$  y la radiación solar global  $G_i$ , y que es parte del proceso de calibración anual de los sistemas, es contrastar y evidenciar el comportamiento de los dos instrumentos virtuales y en particular el de los dos piranómetros, sometiéndolos a las mismas condiciones de ambiente y temperatura. Para este fin, se desplaza completamente la banda obstructora que se superpone en el pirómetro Kipp & Zonen, dispuesto para la medida de radiación difusa, y se realizan medidas consecutivas hasta de un mes de radiación global  $G_i$ .

El primer proceso, sin embargo, se hizo durante seis meses a partir de enero de 2012. Ambos sistemas operaron simultáneamente y bajo las mismas condiciones en este periodo para el cual se obtuvo un coeficiente de correlación entre las dos medidas radiación solar global de 0.996. En la Figura 1., se presentan perfiles de radiación global  $G_i$ , para un día en particular al azar, como ejemplo del resultado de las mediciones obtenidas y superpuestas para determinar diferencias.

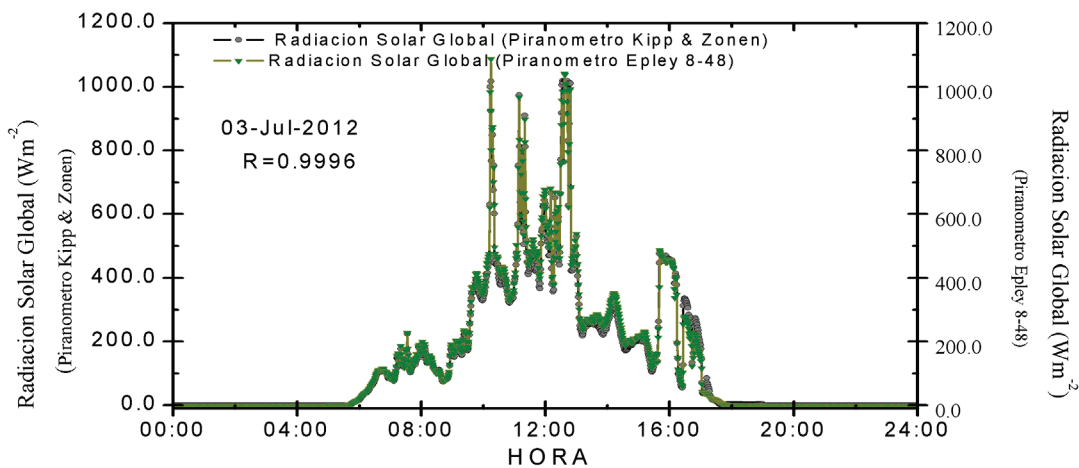


Fig. 1. Comportamiento de la irradiación solar difusa (negro) en relación a la irradiación solar global (verde), ambos en el plano horizontal, para el 04-08-2012 como día aleatorio de estudio.

Los resultados representados en color negro corresponden a medidas obtenidas mediante el piranómetro Kipp & Zonen, y los representados en color verde corresponden a las medidas obtenidas a partir del piranómetro Epley, Black & White. Los resultados de las medidas para este día en particular, 03 de julio del año 2012, revelan pequeñas diferencias al final del día, atribuidas presuntamente a la respuesta espectral y a diferencia de los tiempos de respuesta de los dos dispositivos. La desviación porcentual es del 0.04%, que se califica como un comportamiento óptimo para realizar las medidas con los dos sistemas bajo las mismas condiciones y en el caso del piranómetro Kipp & Zonen, dedicado a la medida de la radiación solar difusa.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Luego de instalado el piranómetro Kipp & Zonen y puesta la banda obstructora a partir del día 5 de julio de 2012, se inicia la medición de radiación difusa en complemento a la medida de radiación solar global, con ayuda del piranómetro Epley Blck & White. Se establecieron tres rangos para la medida del promedio diario de radiación solar global  $G$ , a fin de facilitar la clasificación y caracterizar cada día en términos del comportamiento en los niveles de radiación, según las expresiones (2), (3) y (4).

$$\text{Baja radiación: } 0 < \bar{G}_i \leq 200 \text{ Wm}^{-2} \tag{2}$$

$$\text{Media radiación: } 200 \text{ W/m}^2 < \bar{G}_i \leq 400 \text{ Wm}^{-2} \tag{3}$$

$$\text{Alta radiación: } 400 \text{ Wm}^{-2} < \bar{G}_i \tag{4}$$

Siguiendo estos criterios, la Figura 2., presenta un ejemplo para un día tomado al azar y caracterizado como de baja radiación, en este caso y para la región un día nublado, en el que la radiación solar global promedio diaria fue de  $185.6 \text{ Wm}^{-2}$  y la radiación difusa de  $132.4 \text{ Wm}^{-2}$ , en proporción del 71.3% respecto a la global.

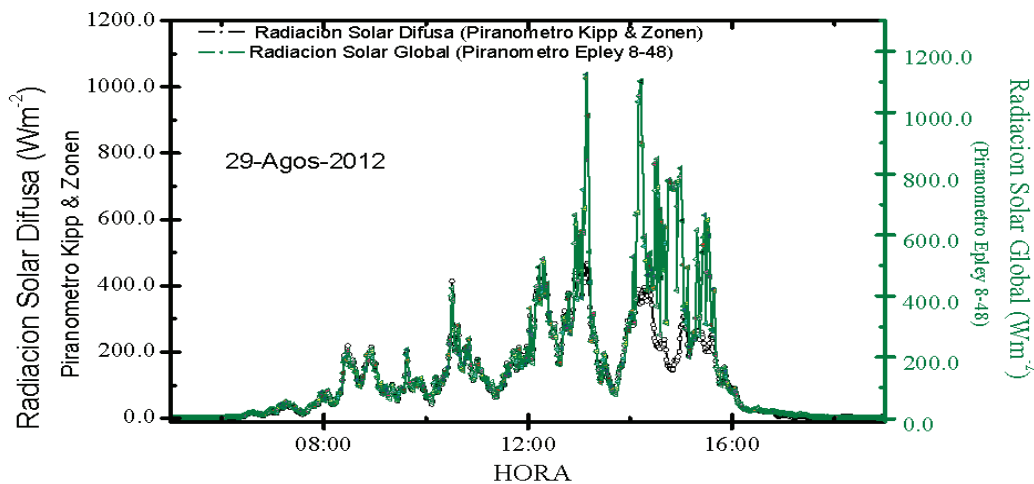


Fig. 2. Comportamiento de la radiación solar difusa  $D_i$  (negro) en contraste con la radiación solar Global  $G_i$  (verde) para el 29 de agosto, día caracterizado como de baja radiación solar.

Como se puede observar, se presenta coincidencia a lo largo de varias horas del día entre la componente difusa y la radiación solar global, exceptuando en ciertos momentos después de las 13:00 horas en los que la intermitencia de la nubosidad, permite la incidencia de radiación directa, representada en picos sobresalientes. Esto demuestra que para días con este comportamiento, la mayor parte de la radiación solar global, está compuesta por radiación solar difusa.

Por su parte, la Figura 3., muestra el comportamiento de la radiación solar difusa  $D_i$  en correlación con el comportamiento de la radiación solar Global  $G_i$  para el 11 de septiembre de 2012, también tomado al azar, día caracterizado de acuerdo a los criterios citados, de media radiación. Es un día con comportamiento similar al anterior, esto es, con presencia intermitente de nubes, pero con mayor contribución de franjas temporales de la componente directa. Se obtuvo una radiación solar global promedio de  $280.2 \text{ Wm}^{-2}$ , mientras que la radiación difusa fue de  $228.9 \text{ Wm}^{-2}$ , con una proporción del 81.6% de la global. Se puede notar igualmente que se presentan ciertos periodos en los que son coincidentes las dos medidas, es decir que la magnitud de la radiación global corresponde a la componente difusa, particularmente en las primeras horas del día y al atardecer.

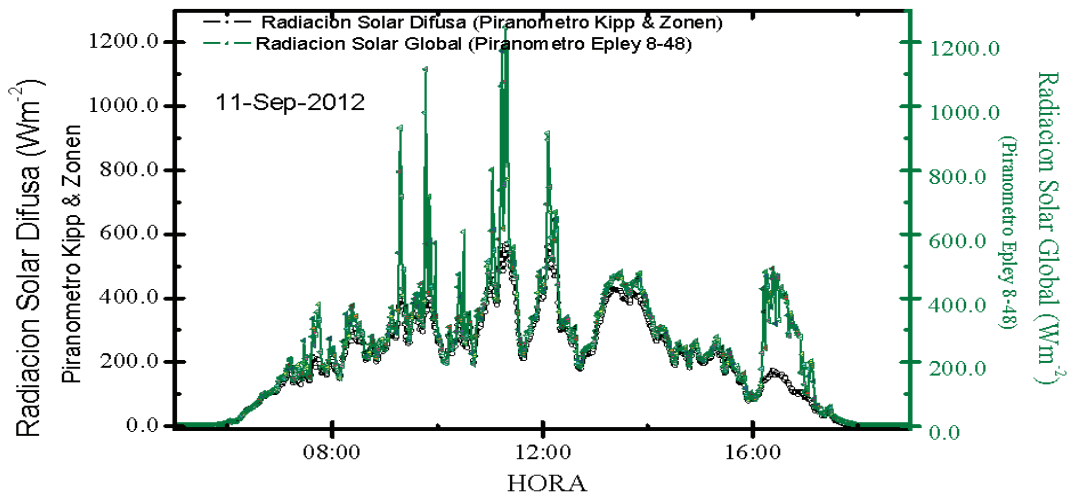


Fig. 3. Comportamiento de la irradiación solar difusa (negro) en relación a la irradiación solar global (verde), ambos en el plano horizontal, para el 11-09-2012 como un día aleatorio de estudio, calificado de media radiación.

Análogamente en la Figura 4., se presentan perfiles diarios de radiación solar difusa y global a partir de los promedios minuto, para un día calificado de alta radiación para el sector, con valor promedio/día de  $415.1 \text{ Wm}^{-2}$  de radiación global y de  $191.9 \text{ Wm}^{-2}$  de radiación difusa respectivamente.

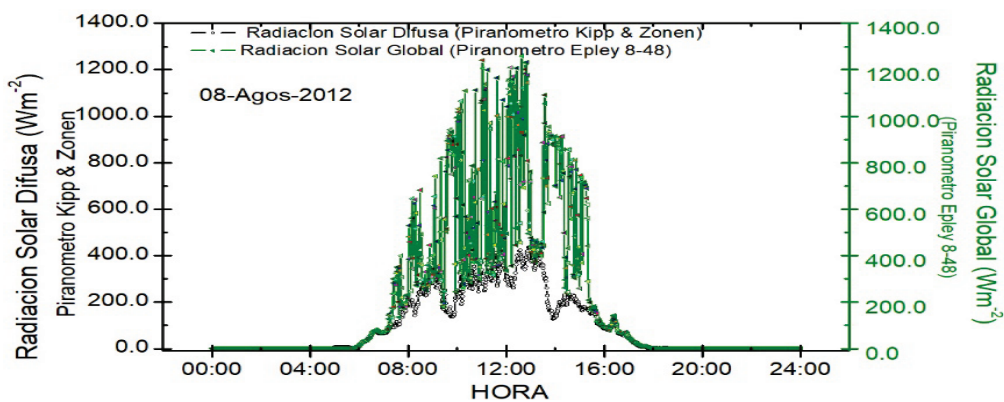


Fig. 4. Comportamiento de la irradiación solar difusa (negro) en relación a la irradiación solar global (verde), ambos en el plano horizontal, para el 08-08-2012 como un día aleatorio de estudio

Este día presentó una alta intermitencia por nubosidad como se puede observar. Este comportamiento es significativo, ya que se observa que la componente de la radiación difusa se mantiene relativamente estable, en contraste con la componente de radiación solar directa  $B_i$ , que corresponde en casos como este y en general a la diversidad de picos de radiación directa que presenta la radiación solar global, esto es, aquella porción de radiación que llega directamente del sol sin sufrir cambios en su dirección. Por su parte, la radiación difusa  $D_i$ , es producto de la interacción con la atmosfera, por reflexión, absorción por nubes, polvo atmosférico, montañas y múltiples factores. Simplemente se sabe que la otra componente de radiación corresponde a la reflejada o albedo que, sumada a las anteriores, establecen la radiación solar global  $G_i$ .

Aunque en general los cambios en magnitud de la intensidad de radiación difusa siguen simultáneamente a los de global, sus diferencias se amplían en los momentos en que se presenta alta radiación, es decir, en momentos de claridad y cielo despejado, en los que también y particularmente, se debe tener en cuenta la influencia de la contaminación atmosférica. Los resultados arrojan como ejemplo para este día un coeficiente de correlación entre radiación difusa a global con valor promedio/día  $\overline{f_d} = \frac{D_i}{G_i} = 0.635$  día en el que el mayor valor promedio horario para  $f_d$  se da entre las 16:00 a las 17:00 horas con 0.925, seguido por el de las 06:00 a las 07:00 horas, de 0.87. El menor valor promedio horario para  $f_d$ , se obtuvo entre las 14:00 y las 15:00 horas, como era de esperarse siguiendo el comportamiento de los perfiles de radiación de la Figura 4., equivalente a 0.296.

Como parte del análisis, la Figura 5., muestra un diagrama de dispersión de los datos de radiación solar difusa  $D_i$ ,

respecto a los datos, uno a uno, de las medidas de radiación global  $G_i$ , con los que se observa el grado de correlación entre las dos variables, para el periodo de la primera semana de agosto de 2012.

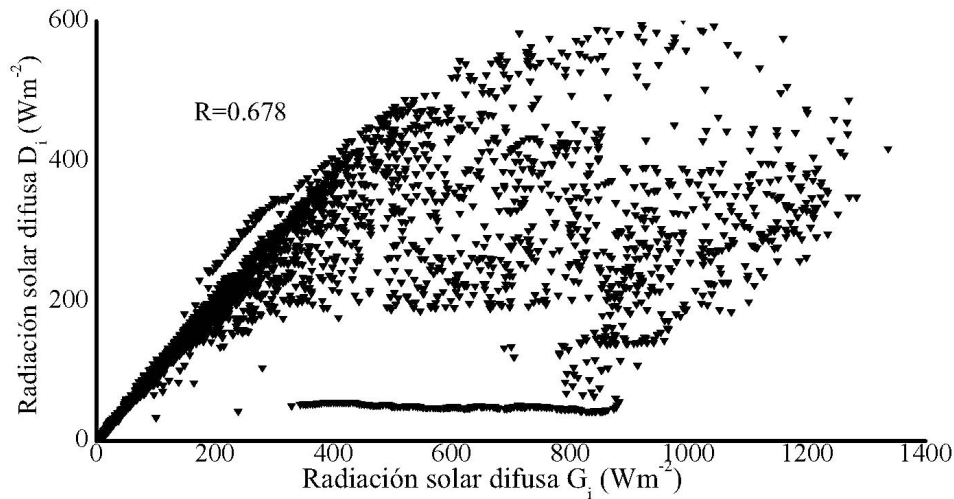


Fig. 5. Diagrama de dispersión de datos de valores promedio de radiación solar difusa  $D_i$  en contraste con los valores correspondientes de radiación solar global  $G_i$ , para la primera semana del mes de agosto de 2012.

El resultado obtenido para el coeficiente de correlación hallado es de 0.678, valor que se encuentra dentro de rangos de valores establecidos por otros autores, (Collares-Pereira and Rabl 1979), (Erbs, Klein, and Duffie 1982). Esto significa que la componente difusa de la radiación solar global corresponde a una fracción cercana a 2/3.

Como complemento, la Figura 6., presenta promedios diarios de radiación solar difusa en contraste con los de radiación solar global para el mes de agosto de 2012. Allí se observa que sólo dos días en el mes alcanzaron los 400.0  $Wm^{-2}$  y tres días con baja intensidad solar inferior a 200  $Wm^{-2}$ . Los días restantes alcanzaron niveles de media intensidad. El promedio diario mensual de radiación solar global fue de 281.2  $Wm^{-2}$ , mientras que el de radiación difusa fue de 199.1  $Wm^{-2}$ .

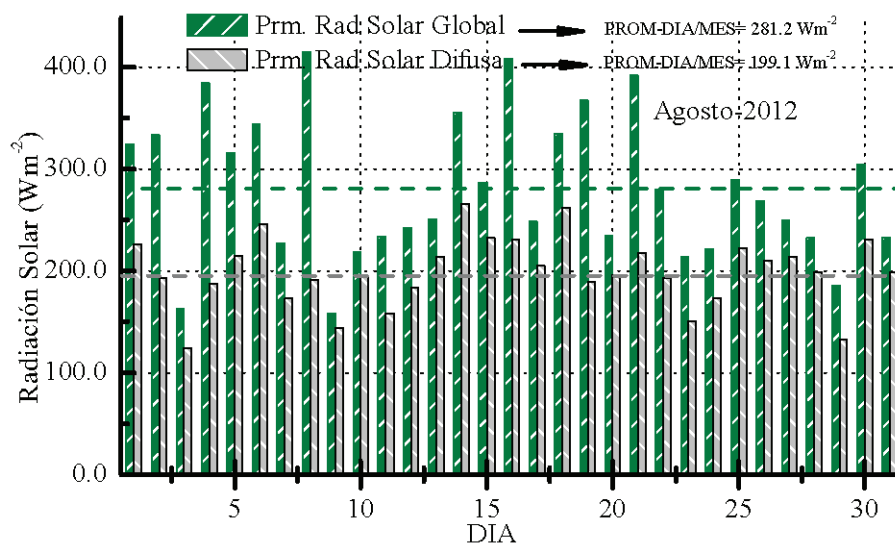


Fig. 6. Comportamiento de la radiación solar difusa  $D_i$  respecto a la radiación solar global  $G_i$  para el mes de agosto de 2012, a manera de ejemplo.

Estos aportes son necesarios para establecer características del potencial energético solar en áreas y regiones definidas, lo que significa tener parámetros válidos para dimensionamiento, diseño e implementación de plantas y sistemas solares, que posteriormente se traducen en eficiencia, calidad de servicio y reducción de costos. La Figura 7., representa los promedios día/mes de radiación solar global y su componente difusa, para cada uno de los meses

en estudio. A su vez se ilustran los promedios anuales dentro de cada periodo.

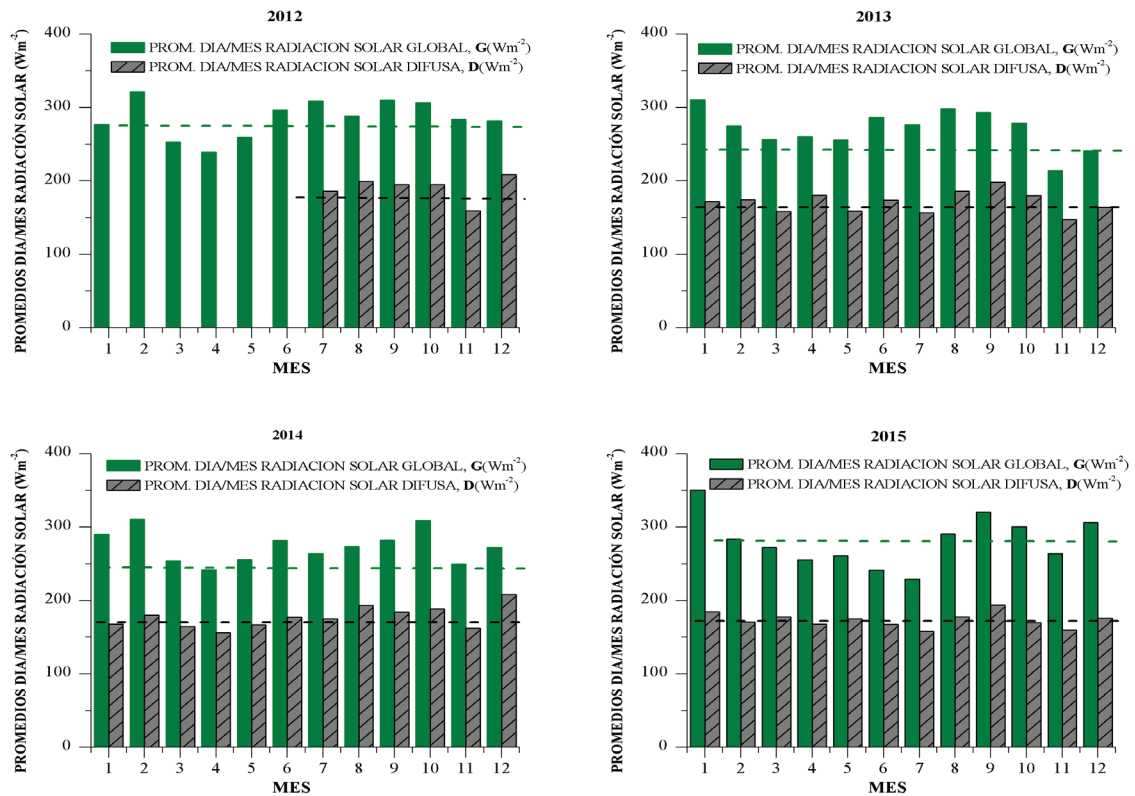


Fig. 7. Comportamiento de la irradiación solar difusa (negro) en relación a la irradiación solar global (verde), ambos en el plano horizontal, para el 04-08-2012 como un día aleatorio de estudio

La Tabla 1., presenta los promedios día/mes/año de radiación solar global y su componente difusa, correspondientes a la fracción del 2012 y de los periodos anuales 2013, 2014 y 2015. Igualmente, se obtiene el coeficiente de correlación  $f_{D_i} = \frac{D_i}{G_i}$ , para los mismos periodos, con lo que se reitera que la componente difusa de la radiación solar global corresponde a una fracción del orden de 0.639.

Tabla 1. Valores promedio día/mes correspondientes a la fracción de 2012 y a los periodos 2013 a 2015, y cálculo del coeficiente  $f_{D_i} = \frac{D_i}{G_i}$ .

	2012	2013	2014	2015
$D_i$ (W/m <sup>2</sup> )	190.6	170.9	177.2	173.3
$G_i$ (W/m <sup>2</sup> )	285.6	271.4	273.8	281.3
$f_{D_i} = \frac{D_i}{G_i}$	0.667	0.629	0.647	0.616

### CONCLUSIONES

Acorde con los análisis, la componente difusa en general para el sector centro-oriente de la ciudad de Bogotá D.C., en el cual se encuentran los sistemas de medición, refleja una fracción cercana a 0.639. A su vez la componente difusa, como es evidente, es la más estable, respecto a la componente directa y al albedo, en términos del coeficiente de dispersión obtenido. Esto significa que, para días claros, la variabilidad de la radiación solar global se debe exclusivamente a la componente directa. El análisis se hace para días caracterizados en tres intervalos: de baja, media y alta radiación solar global, obteniéndose que, en estos periodos de análisis, cerca del 90% de los días son de baja y media radiación, es decir, son días nublados o1 seminublados, de lo que se infiere que la componente de mayor contribución es la componente difusa.

### AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al centro de investigaciones y desarrollo científico – CIDC - de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá – Colombia, por el apoyo y gestión para el desarrollo de los proyectos del grupo FMAES.

## REFERENCIAS

- Ayompe, L., and Duffy, A. (2013). Analysis of the thermal performance of a solar water heating system with flat plate collectors in a temperate climate. *Applied Thermal Engineering*. 58. 447-454.
- 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*. V.22, Issue 2, 1979, 155-164.
- Devrim, A., Zafer, U., and Olcay, K. (2015). Thermal performance analysis of a solar energy sourced latent. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 50, 1213–1225.
- 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*. 28, Issue 4, 1982, 293-302.
- Fernández, C. et al. (2018). Probabilistic assessment of concentrated solar power plants yield: The EVA methodology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, vol. 91(C), pp 802-811.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM. (Octubre de 2019). Atlas de radiación solar. Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- IDEAM – UNAL. (2018). La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. Bogotá. Recuperado el septiembre de 2019, de consulta en <http://www.andi.com.co/Uploads/variabilidad.pdf>.
- Liu, B. Y. H., and Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*. 4(3), 1–19.