

Artículo original

## Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá – Colombia

### Estimation and forecast of solar radiation in the Aburrá Valley- Colombia

✉ Luisa M. Cano, M. Alejandra Carmona, ✉ J. Alejandro Martínez, ✉ Paola A. Arias

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

#### Resumen

El diagnóstico y pronóstico de la irradiancia solar en superficie son elementos importantes para el aprovechamiento del recurso solar. En este estudio se evaluó el desempeño del reanálisis ERA5, las estimaciones satelitales del GOES16 y los pronósticos del *Weather Research and Forecasting model* (WRF) mediante mediciones en un sitio en el Valle de Aburrá. El análisis se concentró en los ciclos diurnos, el comportamiento estacional y las variaciones interanuales de las estimaciones de irradiancia solar en superficie y energía acumulada diaria. En general, el reanálisis produjo estimaciones más cercanas a las observaciones que los datos derivados del GOES16. A escala diaria, el ERA5 presentó menores sesgos (entre 0,01 y 1,05 kWh/) que las estimaciones del GOES16 (entre -1,23 y 1,07 kWh/). Las estimaciones del ERA5 evidenciaron que la radiación solar fue mayor durante los eventos de El Niño, especialmente en la temporada de diciembre-enero-febrero, con un aumento promedio del 10 % con respecto a las condiciones neutrales o de La Niña. Por otra parte, los pronósticos del WRF exhibieron errores de sesgo medio (MBE) de alrededor del 20 % y errores cuadráticos medios (RMSE) de alrededor del 50 %, semejantes a los de otros estudios. Los análisis de correlaciones mostraron, además, que el WRF puede representar de forma adecuada las variaciones horarias y diarias de la radiación, con correlaciones entre 0,86 y 0,81, respectivamente. Tanto en las estimaciones para el diagnóstico del ERA5 y del GOES16, como en los pronósticos del WRF, los mayores errores se encontraron en días y temporadas de mayor nubosidad y lluvias.

**Palabras claves:** Recurso solar; Reanálisis ERA5; Satélite GOES16; Pronóstico; *Weather Research Forecasting* (WRF).

#### Abstract

The diagnostic and forecast of the surface solar irradiance are important elements for the harnessing of solar energy. By validating against in situ measurements, this study assessed the skill of the ERA5 reanalysis, the GOES16 satellite estimates, and the forecasts from the Weather Research and Forecasting model (WRF) for a site in the Aburrá Valley. The analysis focuses on the diurnal cycle, the seasonal behavior, and the inter-annual variations of the estimates of surface solar irradiance and daily accumulated energy. In general, the reanalysis yielded estimates closer to the observations compared to GOES16. At the daily scale, ERA5 exhibited smaller biases (0.01 to 1.05 kWh/) than the GOES16 estimates (-1.23 to 1.07 kWh/). The ERA5 estimates showed that the solar radiation was higher during El Niño events, especially during the December-January-February season, with an average increase of about 10% compared to the neutral and La Niña conditions. On the other hand, similar to other studies, the WRF forecasts exhibited mean bias errors (MBE) of around 20%, and root mean squared errors (RMSE) of about 50%. Furthermore, the correlation analysis showed that the WRF correctly represents the hourly and day to day variations of solar irradiance with correlation values of around 0.86 and 0.81, respectively. Both the diagnostic estimates from ERA5 and GOES16, as well as the WRF forecasts, showed the largest biases during cloudy and rainy days and seasons.

**Keywords:** Solar resource; ERA5 reanalysis; GOES-16 satellite; Forecasting; Weather Research and Forecasting model (WRF)

**Citación:** Cano LM, Carmona MA, Martínez JA, Arias PA. Estimación y pronóstico de radiación solar en el valle de Aburrá – Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 46(179):529-549, abril-junio de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1576>

**Editor:** José Daniel Pabón Caicedo

**\*Correspondencia:**

Luisa M. Cano Uribe;  
[luisa.canou@udea.edu.co](mailto:luisa.canou@udea.edu.co)

**Recibido:** 8 de noviembre de 2021

**Aceptado:** 2 de junio de 2022

**Publicado:** 28 de junio de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

## Introducción

La radiación solar, entendida como la energía emitida por el sol mediante ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz, determina la dinámica de procesos atmosféricos y climáticos a diferentes escalas espaciales y constituye una fuente alternativa para la generación de electricidad (**IDEAM**, s.f). En Colombia la disponibilidad del recurso solar tiene un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/ y en algunas zonas, como la península de La Guajira y la Orinoquia, puede alcanzar los 6,0 kWh/, valores superiores a los registrados en países referentes en la implementación de sistemas de energía fotovoltaica como Alemania y España (**Vanegas et al.**, 2015), lo que está determinado por la ubicación de Colombia en la región ecuatorial, donde los niveles de radiación son relativamente constantes a lo largo del año (**Checa & De la Cruz**, 2015).

Sin embargo, el sector eléctrico del país se basa principalmente en la generación hidroeléctrica y en el uso de recursos primarios de origen fósil, en tanto que la participación de las energías renovables no convencionales es mínima, pese al potencial que tiene el país en recurso solar y eólico (**Henao et al.**, 2019). Esta poca diversidad en la generación de energía fomenta, a su vez, la vulnerabilidad del sector eléctrico frente al carácter finito de los combustibles fósiles y a los periodos secos asociados con el fenómeno climático El Niño-Oscilación del Sur (*El Niño-Southern Oscillation*, ENSO) (**Henao et al.**, 2020). Otra debilidad del sector eléctrico de Colombia radica en que el 52 % del territorio del país pertenece a las zonas no interconectadas (ZNI), que no tienen acceso a un servicio de energía eléctrica constante y de calidad a través de un sistema interconectado debido a los costos y a los impactos ambientales que tendría la instalación de la infraestructura necesaria, pero que cuentan con soluciones locales, generalmente a partir de combustibles líquidos (**Superservicios**, 2017). Esto afecta directamente la calidad de vida de las personas, ya que se restringen las horas con acceso a energía con la consecuente disminución de las oportunidades de educación, la productividad y el acceso a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), lo que perpetúa, a su vez, la desigualdad regional en el país (**Bustos et al.**, 2014).

En este sentido, es necesario buscar alternativas que garanticen la generación, el transporte y el consumo de recursos energéticos, con el fin de asegurar la estabilidad económica, el suministro en la totalidad del territorio, la equidad social y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. En este contexto, en distintas zonas del país existe una variedad de recursos renovables con capacidad de ser transformados en energía, entre los cuales el recurso solar es de gran importancia, ya que la tecnología fotovoltaica para la producción de energía solar permite hacer instalaciones que alimentan sistemas alejados de la red de distribución, generan bajas emisiones de gases de efecto invernadero durante la operación y tienen costos de fabricación decrecientes con tecnología mejorada y eficiente (**UPME**, 2015, **Cuervo & Méndez**, 2011).

El recurso solar, sin embargo, se comporta de forma variable e impredecible (**Ren et al.**, 2019), por lo que su aprovechamiento en sistemas de energía renovable requiere de un conocimiento profundo de la distribución espaciotemporal, así como de los niveles de intensidad de la radiación solar sobre la superficie de un lugar determinado, lo que a su vez implica un reto, dada la escasez de información derivada de mediciones en superficie (**Lohmann et al.**, 2016). El pronóstico de la radiación solar es, asimismo, un elemento esencial en la gestión y planificación del recurso, necesario para mitigar el posible impacto de la variabilidad de la energía generada por radiación solar que provoca cambios en las plantas de producción y afecta la infraestructura eléctrica (**Aryaputera et al.**, 2015, **Urrego-Ortíz et al.**, 2019). En este sentido, contar con modelos adecuados para el pronóstico de la radiación solar a partir de los datos disponibles es de vital importancia para los estudios de planificación energética.

La poca disponibilidad de mediciones locales de radiación solar con coberturas temporales extensas y continuas ha hecho que el uso de datos derivados de reanálisis y satélites se consolide como una práctica común para la estimación del recurso solar. Son

varios los estudios en que se han empleado bases de datos derivadas de los reanálisis para estimar y evaluar la energía solar (**Boilley & Wald, 2015, Zhang et al., 2020, Ramírez-Camargo & Schimdt, 2020**). Se ha encontrado que las estimaciones de radiación solar provenientes del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF*) son de utilidad cuando no se dispone de series de tiempo más robustas como las provenientes de mediciones *in situ* o satélites (**Urraca et al., 2018**). No obstante, con el reanálisis se han observado sobreestimaciones, principalmente en condiciones de cielos nublados o en áreas con alta variabilidad de radiación solar superficial (**Babar et al., 2019, Sianturi et al., 2020, Urraca et al., 2018**). Por su parte, los datos satelitales geoestacionarios se emplean más en la evaluación de la energía solar, pues presentan resoluciones espacio-temporales más altas que permiten capturar la variabilidad de la radiación solar en superficie de forma más precisa que los reanálisis (**Ramírez-Camargo & Schimdt, 2020, Jiang et al., 2019**) mediante múltiples sensores que miden los parámetros que influyen en la cantidad de radiación solar en la superficie terrestre, entre ellos el ozono, el vapor de agua y los aerosoles (**Yeom et al., 2019**). Sin embargo, tienen cobertura espacial limitada como consecuencia de su localización sobre el ecuador y se pueden presentar errores considerables en cielos cubiertos (**Ameen et al., 2018, Laszlo et al., 2020, Xia et al., 2017**).

Se han elaborado diferentes modelos para la predicción de la radiación solar: los métodos estadísticos, los modelos numéricos de predicción meteorológica (*numerical weather prediction, NWP*), los modelos basados en imágenes satelitales y los híbridos que combinan diferentes modelos. Entre los NWP se encuentra el modelo de *Weather Research and Forecasting (WRF)*, el cual ha sido ampliamente utilizado para pronosticar las variables meteorológicas asociadas a la producción fotovoltaica con una antelación hasta de 72 horas (**Olarte, 2017**). Este modelo ha demostrado una capacidad considerable para el cálculo de la radiación solar, pero también una marcada dependencia de la cobertura de las nubes, pues entrega resultados más precisos para cielos despejados, lo que refleja su capacidad limitada para pronosticar adecuadamente las condiciones nubladas (**Lara et al., 2012**).

En Colombia se han venido adelantando investigaciones sobre el recurso solar. Por ejemplo, **Henaó et al. (2020)** analizan el nivel de complementariedad entre energías renovables en Colombia a escalas anuales e interanuales. Entre sus resultados se destaca cómo los recursos solares y eólicos en la Costa Caribe y las regiones de los Andes centrales pueden ser un complemento del sector eléctrico durante las estaciones secas del ciclo climatológico anual y durante los eventos ENSO, tanto en su fase cálida como en su fase fría. Por otra parte, en el Atlas de Radiación Solar de Colombia (**IDEAM, 2017**) se presentan datos, mapas y análisis sobre la radiación solar en las diferentes zonas del país que representan una herramienta esencial para determinar la energía solar disponible en el territorio, principalmente, en lugares alejados de las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Este estudio tuvo dos objetivos. En primer lugar, se estudió la estimación del recurso solar en el Valle de Aburrá a partir de diferentes bases de datos cuantificando las discrepancias entre los datos de los reanálisis y los satélites y las observaciones *in situ* en diferentes escalas temporales. El segundo objetivo consistió en estudiar el desempeño de un modelo de pronóstico meteorológico en la predicción de la radiación solar incidente en el Valle de Aburrá. A través de la evaluación sistemática de errores en la estimación y el pronóstico del recurso solar en un contexto concreto, se buscó contribuir con información y métodos relevantes a las tareas de dimensionamiento y gestión en la implementación de nuevos proyectos de energía solar.

## Datos y métodos

### Área de estudio

El área de estudio incluyó todo el Valle de Aburrá, el cual se localiza en la cordillera Central de Colombia entre las coordenadas 6°N y 6,5°N – 75,3°W y 75,6°W, específicamente en el

centro-sur del departamento de Antioquia. Este valle está conformado por 10 municipios: Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas, que, en total, cubren un área de 1.152 K, es decir, el 1,8 % de la extensión de Antioquia. Tiene una población de aproximadamente 3,72 millones de personas, es decir, el 62 % de la población del departamento (DANE, 2020).

El Valle de Aburrá es un valle estrecho de aproximadamente 64 km de longitud y el ancho de sus secciones oscila entre 3 km y 18,2 km, aproximadamente (Herrera-Mejía & Hoyos, 2019). Presenta una topografía compleja, con elevaciones que van desde los 1.300 m s.n.m. hasta aproximadamente los 3.000. Según estudios anteriores, el ciclo medio anual de la precipitación sobre la región andina colombiana, incluido el Valle de Aburrá, exhibe un comportamiento bimodal como consecuencia del doble paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre la región (Bedoya-Soto *et al.*, 2019; Mesa *et al.*, 2000; Poveda *et al.*, 2004). Los máximos de precipitación ocurren en abril-mayo y octubre-noviembre, cuando la ZCIT pasa por Colombia en su desplazamiento hacia sus posiciones más septentrional y meridional, respectivamente, en dirección al hemisferio que se encuentra en verano. El ciclo diario de la precipitación en el Valle de Aburrá tiene un carácter bimodal, cuyos máximos ocurren en las tardes y alrededor de la medianoche (Poveda *et al.*, 2005).

### Datos

Con el fin de analizar los comportamientos típicos y la variabilidad temporal del recurso solar en el Valle de Aburrá, se usaron tres conjuntos de datos correspondientes a las mediciones en superficie a través de piranómetros del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), a las estimaciones del reanálisis ERA5, y a los datos satelitales derivados del GOES16. Además, se estudiaron los pronósticos provenientes de simulaciones obtenidas con el modelo WRF. Para todos los conjuntos de datos se consideró la información de la radiación solar descendente en superficie, que comprende tanto la componente directa como la difusa.

### Mediciones *in situ*

Se emplearon los datos *in situ* de la radiación solar en superficie expresada en unidades de W/ provenientes del SIATA. Actualmente el SIATA cuenta con una red de sensores en superficie que integra cinco piranómetros ubicados en las estaciones Torre SIATA (Medellín), Concejo de Itagüí (Itagüí), Institución Educativa Joaquín Vallejo (Medellín), Parque de las Aguas (Barbosa) y AMVA (Medellín). Los datos se encuentran disponibles en el portal de Internet de la institución (<https://siata.gov.co/>), con una resolución temporal de un (1) minuto. En el presente estudio se seleccionó el piranómetro de la estación Torre SIATA, ubicado en la latitud 6,2593° y la longitud -75,5887°, ya que tiene información disponible desde el 9 de marzo del 2017 hasta el presente y es la serie de tiempo más extensa de radiación solar (Tabla 1) (Anexo). Se estudiaron los datos de cuatro años calendario comprendidos entre el 1 de enero del 2017 y el 31 de diciembre del 2020 para caracterizar el recurso solar y evaluar el desempeño del reanálisis ERA5. Para la comparación con las estimaciones del GOES16, se usaron los datos desde enero del 2018, fecha de inicio de las estimaciones del satélite. Para la evaluación del modelo WRF se emplearon los datos entre marzo del 2019 y enero del 2021.

**Tabla 1.** Detalles de la resolución temporal y periodos de estudio empleados para la evaluación de cada conjunto de datos

Conjunto de datos	Resolución temporal	Horario de cobertura (LT)	Periodo de estudio
ERA5	1 hora	7:00 - 18:00	2017-2020 1979-2020
GOES16	1 hora	8:00 - 16:00	2018- 2020
WRF	15 minutos	6:00 - 18:00	2019 2020-2021

### **Producto ABI L2 + DSR del GOES16**

El producto ABI L2 + DSR del GOES16 proporciona datos sobre la radiación solar de onda corta descendente (*downward shortwave radiation*, DSR) en la superficie terrestre y representa los flujos instantáneos de dicha variable en un tiempo de observación dado. Los datos de este producto se generan con una frecuencia temporal horaria y una resolución espacial que depende del dominio seleccionado (FD, CONUS o MESO). En este estudio se emplearon los datos de DSR para el dominio de disco completo (FD), los cuales tienen una cobertura casi completa del hemisferio occidental, con una resolución espacial de 50 km (Laszlo *et al.*, 2020).

Laszlo *et al.* (2020) plantean que la calidad de los datos de este producto depende de la ubicación y de si la medición se realiza bajo condiciones de cielo cubierto o despejado. No obstante, la calidad general es aceptable y para su uso operativo se dispuso de los datos desde el 23 de octubre de 2018, incluyendo la información desde enero del 2018 hasta el presente. Estas mediciones se encuentran disponibles, principalmente, para el rango horario comprendido entre las 8:00 hora local (LT) y las 16:00 LT. Los datos se descargan a través de CLASS (<https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/welcome>) y AIRS (<https://www.ncdc.noaa.gov/airs-web/search>), dos plataformas que permiten el acceso directo a los datos del Centro Nacional de Información Ambiental (*National Centers for Environmental Information*, NCEI) de la NOAA. Para evaluar el desempeño del producto ABI L2 + DSR de GOES16, se empleó información desde el inicio de las estimaciones del GOES16, en enero del 2018, hasta diciembre del 2020.

### **Reanálisis ERA5**

El conjunto de datos del reanálisis ERA5 (Hershbach *et al.*, 2020) abarca el período desde 1950 hasta el presente, aclarándose que la información entre 1950 y 1978 es una extensión posterior y que, a partir de 1979, los datos corresponden a una versión final con un mayor uso de observaciones. La información se encuentra disponible en el servidor de *Climate Data Store* (<https://cds.climate.copernicus.eu>), con una frecuencia temporal de 1 hora y un rango espacial de 0,25° x 0,25°. En este estudio se emplearon datos de la variable de flujo promedio de radiación de onda corta descendente en superficie expresada en unidades de W/. Para la evaluación del desempeño del reanálisis en la representación de la radiación solar, se descargaron promedios horarios desde enero del 2017 hasta diciembre del 2020, así como los datos de los ciclos diurnos mensuales entre 1979 y el 2020, con el fin de analizar algunos aspectos climatológicos de la radiación solar en superficie y los posibles efectos de los eventos ENSO en ella.

### **Simulaciones con el WRF**

Para la evaluación del uso del modelo WRF en el pronóstico de irradiancia solar en superficie, se utilizaron pronósticos para un dominio exterior que incluía todo el territorio de Colombia, con un tamaño de celda de 12 km, y para uno interior que incluía el departamento de Antioquia, con un tamaño de celda de 4 km (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>). Los datos evaluados corresponden a los resultados del dominio interno almacenados con una frecuencia de 15 minutos. Para el estudio se emplearon simulaciones con horizontes de 24 y 48 horas. El periodo de estudio comprendió 138 días de simulaciones de 24 horas entre marzo y noviembre del 2019. Estos pronósticos comenzaban a las 6 UTC (1:00 hora local (LT)) y terminaban a las 6 UTC del día siguiente; se evaluaron los datos correspondientes al periodo entre las 6:00 LT y las 18:00 LT (es decir, con un *spin-up* de 6 horas). Las simulaciones mencionadas se compararon con un modelo de persistencia, es decir, la suposición de que los valores para el día siguiente corresponden a los valores del presente. Todos los datos utilizados para el modelo de persistencia se tomaron del piranómetro de Torre SIATA. Debido a la cantidad de datos faltantes no fue posible estudiar la persistencia en los 138 días de simulaciones sino en 124.

Por otra parte, se estudiaron 294 pronósticos de 48 horas realizados para días diferentes entre marzo del 2020 y enero del 2021. Los pronósticos iniciaban a la 00 UTC (19:00 LT del día anterior) y corrían por 54 horas; como los pronósticos de radiación se consideraron desde las 7:00 LT, el *spin-up* del modelo fue de 12 horas. La diferencia de tiempo del *spin-up* entre ambos conjuntos de simulaciones (6 horas *Vs.* 12 horas) permitió hacer algunas inferencias cualitativas sobre el papel del tiempo de inicialización en el pronóstico de la radiación. El estudio de las simulaciones de 48 horas se dividió en dos partes: se analizaron primero las horas de sol del primer día (D1-WRF) y por separado se estudiaron las horas de sol del segundo día pronosticado (D2-WRF). Las simulaciones de 48 horas también se compararon con modelos de persistencia. Las horas de sol del primer día se compararon con un modelo de persistencia que también suponía que la irradiancia del presente correspondía a la de las 24 horas anteriores (Persistencia D1), en tanto que las horas de sol del segundo día se compararon con un modelo de persistencia que suponía que la irradiancia del presente correspondía a la de las 48 horas previas (Persistencia D2).

### **Procesamiento de los datos**

El procesamiento de los datos derivados del piranómetro de la estación Torre SIATA se inició con un control de calidad consistente en reemplazar con un valor faltante aquellos datos de calidad inválida o dudosa siguiendo los criterios de validación de los datos del SIATA. Teniendo en cuenta que la resolución temporal de las mediciones de Torre SIATA difiere de las correspondientes a los conjuntos de datos provenientes de las simulaciones de WRF, del reanálisis ERA5 y del satélite GOES16, todos los conjuntos de datos se llevaron a una misma resolución temporal de 1 hora para una adecuada comparación. Cabe destacar que cuando el porcentaje de datos faltantes del SIATA excedía el 10 %, el promedio para esa hora se definía como un valor faltante. Según la disponibilidad de los datos, se estableció un rango horario y un periodo de estudio para cada conjunto, como se ve en la **tabla 1**. Es importante destacar que para la validación de las estimaciones del GOES16 entre el 2018 y el 2020, los datos del SIATA se llevaron a escala horaria al ponderar los primeros 10 minutos de cada hora, siguiendo los tiempos de cobertura proporcionados por los metadatos de los archivos de radiación solar derivados del satélite. Para efectos prácticos, los datos del SIATA usados para la evaluación del GOES16 se denotan en adelante como “SIATA 10-min”.

En primera instancia se seleccionó la cuadrícula que contenía la ubicación del piranómetro empleado y se encontró que para el ERA5, esta correspondía al píxel con centroide en la longitud  $-75,5^\circ$  y la latitud  $6,25^\circ$ , en tanto que para el GOES16, el píxel se centraba en la longitud  $-75,75^\circ$  y la latitud  $6,25^\circ$ . Con los datos del GOES16 se realizó, además, el procedimiento explicado con detalle en el estudio de **Robledo-Delgado (2020)**, que consiste en controlar la calidad de los datos al reemplazar por un valor faltante aquellos de calidad degradada o inválida, los cuales correspondían a un 8,85 % del total de los datos del período de estudio.

### **Métricas de error**

Se usaron tres métricas de error: la desviación media del error (MBE), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) que, como se mencionó anteriormente, son métricas comúnmente usadas en estudios de evaluación del recurso solar.

#### **Error de sesgo medio (MBE)**

Es el promedio de la diferencia entre lo pronosticado por el modelo WRF y lo observado en los registros del SIATA, de modo que los valores positivos de la métrica representan sobreestimaciones de las observaciones medidas, en tanto que los valores negativos representan su subestimación (**Porrini, 2017**):

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (I_{MODELO,i} - I_{SIATA,i}) \quad \frac{W}{m^2}, \quad \text{Ec.1}$$

donde,  $n$  es el número de datos,  $I_{MODELO}$  es el valor estimado de irradiancia y  $I_{SIATA}$  corresponde al valor observado de irradiancia. Para comparar el tamaño del MBE con respecto al valor típico de las observaciones también se cuantificó el MBE normalizado (nMBE):

$$nMBE = \frac{MBE}{\bar{I}_{SIATA}} \quad \% \quad \text{Ec.2.}$$

**Error cuadrático medio (RMSE)**

El error cuadrático medio es la raíz cuadrada de las diferencias cuadráticas entre los valores estimados por el modelo WRF y los valores medidos *in situ* del SIATA. Esta medida es sensible a valores extremos, lo que permite detectar claramente los cambios repentinos de la radiación en las series de tiempo evaluadas; además, es una medida usada frecuentemente para evaluar la precisión de los pronósticos (Porrini, 2017).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (I_{MODELO,i} - I_{SIATA,i})^2} \quad W/m^2 \quad \text{Ec.3.}$$

Para comparar el tamaño del RMSE con respecto al valor típico de las observaciones, se calculó el valor de RMSE normalizado:

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{I}_{SIATA}} \quad \% \quad \text{Ec.4.}$$

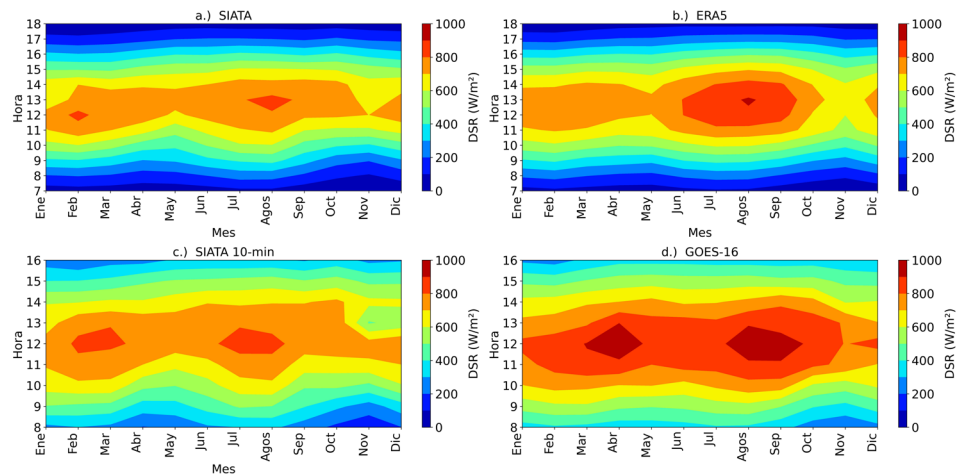
**Coficiente de correlación de Pearson (r)**

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) mide el grado de covariación entre dos variables (Wilks, 2006); se obtiene dividiendo la covarianza de las dos variables por el producto de sus desviaciones estándar. El coeficiente de correlación se empleó en este estudio para cuantificar la covarianza entre los valores horarios de las observaciones del SIATA y los pronósticos (WRF y persistencia), con el fin de evaluar el desempeño del modelo en la representación de las variaciones de la radiación durante el día. Análogamente, se cuantificó el coeficiente de correlación de promedios diarios de la radiación del SIATA y de los pronósticos (WRF y persistencia) para evaluar el desempeño del modelo al representar variaciones entre diferentes días.

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(I_{MODELO,i} - \bar{I}_{MODELO})(I_{SIATA,i} - \bar{I}_{SIATA,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{MODELO,i} - \bar{I}_{MODELO})^2 \sum_{i=1}^n (I_{SIATA,i} - \bar{I}_{SIATA,i})^2}} \quad \text{Ec.5.}$$

**Análisis de información observacional, satelital y de reanálisis**

*Análisis del ciclo diurno.* La **figura 1a** muestra la evolución mensual del ciclo diurno promedio de irradiancia solar en superficie obtenido a partir de los valores registrados por el piranómetro de la estación Torre SIATA entre el 2017 y el 2020. A escala mensual, se observa que los valores de radiación solar en el lugar de estudio exhibieron un comportamiento bimodal marcado a lo largo del año, caracterizado por dos temporadas de valores altos correspondientes a los trimestres de diciembre-enero-febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA), y por dos temporadas de valores bajos en los trimestres de marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON). Además, se observa que los meses que en promedio registraron mayores valores de irradiancia solar fueron febrero (469,28 W/m<sup>2</sup>), julio (467,59 W/m<sup>2</sup>) y agosto (472,44 W/m<sup>2</sup>), en tanto que los meses con menores promedios multianuales fueron abril (406,96 W/m<sup>2</sup>), mayo (398,21 W/m<sup>2</sup>) y noviembre (393,89 W/m<sup>2</sup>). A escala diurna, en la **figura 1-a** se observa que los valores promedios máximos de radiación solar horaria se presentaron al mediodía, alcanzando las mayores magnitudes en febrero (823 W/m<sup>2</sup>), julio (792 W/m<sup>2</sup>) y agosto (826 W/m<sup>2</sup>). En términos generales, se ve que a lo largo del año los valores de irradiancia solar se extendieron de forma más o menos simétrica alrededor del mediodía, formando una franja aproximadamente uniforme para las horas de insolación comprendida entre las 7:00 LT y las 18:00 LT. Aunque la franja horaria de insolación no varió abruptamente durante el año, pues el Valle de Aburrá se encuentra ubicado en la región tropical y su estacionalidad es leve en comparación con las zonas externas a los trópicos, es posible evidenciar ciertos



**Figura 1.** Evolución de la irradiancia solar en superficie en el Valle de Aburrá entre 2017 y 2020 según los registros de la estación Torre SIATA. **a)** Ciclo anual. **b)** Ciclo diario

cambios en el número de horas de sol y en su intensidad. Por ejemplo, en los períodos de abril-mayo y octubre-noviembre se observa una menor cantidad de horas de sol y una radiación solar en superficie que tiende hacia magnitudes más bajas.

Por otra parte, los ciclos diarios de radiación solar para cada mes del año obtenidos a partir del reanálisis ERA5 (**Figura 1-b**) muestran que este captó, en términos generales, la variabilidad diaria de la radiación solar en el área de estudio al registrar los crecimientos y decrecimientos, así como las franjas horarias de máxima radiación, como lo muestran las observaciones obtenidas para el mismo periodo (**Figura 1-a**). Sin embargo, según el reanálisis, las magnitudes de la radiación solar fueron frecuentemente mayores que las obtenidas a partir de los registros del SIATA, principalmente en la temporada de valores altos de JJA, que se extiende hasta septiembre. Por otra parte, se destaca que el ERA5 representó adecuadamente la disminución en las magnitudes de la radiación, así como las horas de sol para los períodos de abril-mayo y octubre-noviembre, al exhibir un estrechamiento de la banda de máximas magnitudes al mediodía, así como valores bajos en las mañanas y al finalizar la tarde. Los errores correspondientes al ERA5 (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>) evidencian que en el rango horario comprendido entre las 9:00 LT y las 16:00 LT, la mayor parte de los valores del RMSE para las temporadas secas representaron porcentajes mayores al 25 % e inferiores al 50 %, en tanto que para los meses correspondientes a las temporadas húmedas, los errores oscilaron entre el 30 % y el 57 % para la misma franja horaria. En las horas restantes, los valores del nRSME generalmente fueron mayores al 60 % e, incluso, alcanzaron magnitudes superiores al 100 %.

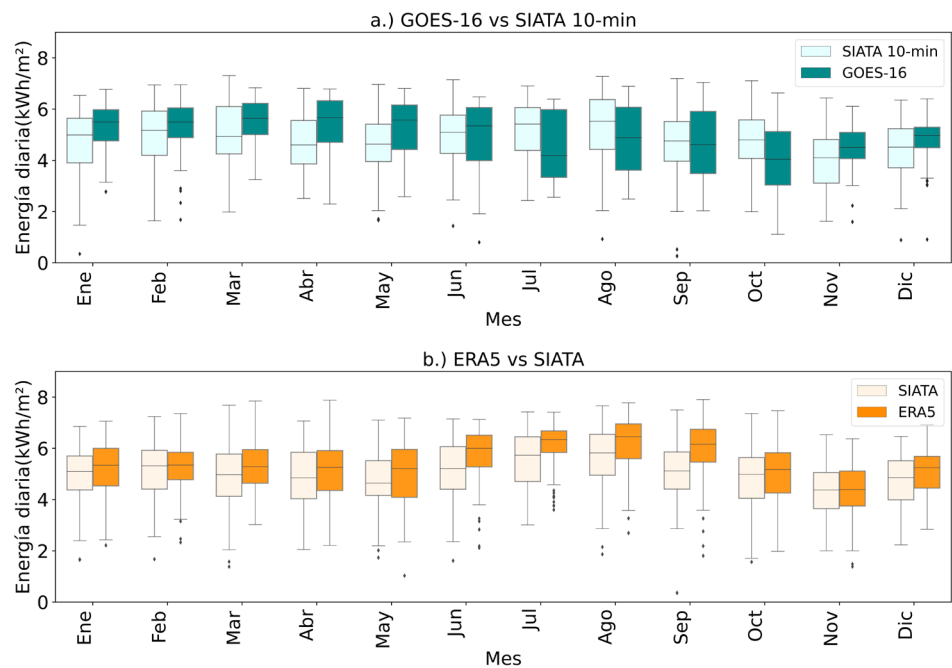
Al comparar los ciclos diarios de radiación solar derivados del satélite GOES16 (**Figura 1d**) con las observaciones del SIATA para el mismo periodo (**Figura 1-c**), un primer contraste notable fue la diferencia en las magnitudes entre las franjas de las horas de mayor radiación solar (entre las 10:00 LT y las 14:00 LT), puesto que en las observaciones los valores máximos de radiación solar en el día oscilaron entre 600 W/ y 900 W/, en tanto que según el GOES16 las horas de mayor radiación solar en el día presentaron, primordialmente, magnitudes entre 700 W/ y 1.000 W/. Por otra parte, se observó que la banda de magnitudes altas alrededor del mediodía según el GOES16 fue bastante uniforme, sin exhibir los estrechamientos que se presentaron en los registros del SIATA 10-min entre marzo-abril y octubre-noviembre-diciembre. Además, en las observaciones (**Figura 1-c**), los picos máximos de radiación solar por hora se presentaron, típicamente, en febrero, marzo, julio y agosto al mediodía, mientras que con el GOES16 (**Figura 1-d**) se obtuvieron los picos máximos de radiación solar por hora en marzo, abril, agosto y



septiembre, es decir, que los datos satelitales exhibieron un retraso de aproximadamente un mes con respecto a los registros del SIATA 10-min. Al analizar los errores del satélite (**Figura 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>), se encontró que para el trimestre DEF, los ciclos diurnos mostraron valores de nRMSE entre el 20 % y el 60 %, aproximadamente. Por su parte, la primera temporada de lluvias del año (MAM) presentó ciclos diurnos de nRMSE con valores mínimos cercanos al 30 %, en tanto que los valores máximos de nRMSE tuvieron magnitudes aproximadas del 70 % para marzo, 105 % para abril y 92 % para mayo. En el trimestre JJA se observó que los ciclos diurnos de nRMSE tuvieron valores en el rango entre el 20 % y el 55 %, aproximadamente. En SON, correspondiente al segundo pico de precipitaciones de la región de estudio, los ciclos diurnos del nRMSE exhibieron valores mínimos entre el 25 % y el 35 %, en tanto que los valores máximos oscilaron entre el 75 % y el 98 %. Se destaca que en la mayoría de los meses los porcentajes de RMSE más altos se presentaron en las tardes, lo cual se explicaría considerando el supuesto de que el GOES16 tiene limitaciones para representar la radiación solar en superficie bajo condiciones de alta nubosidad, puesto que el ciclo diurno de precipitaciones en el Valle de Aburrá se caracteriza por presentar eventos de lluvia convectiva de alta intensidad y de corta duración en las tardes (14:00 LT - 17:00 LT) y precipitaciones estratiformes poco intensas pero de alta duración en las madrugadas (00:00 LT - 04:00 LT), en tanto que en las mañanas se presentan los mínimos de precipitación (**Poveda et al., 2005**).

**Evaluación de la energía media diaria**

Las distribuciones mensuales de los promedios diarios de energía obtenidos a partir del GOES16 y de las mediciones *in situ* de SIATA 10-min se representaron con los diagramas de cajas y bigotes de la **figura 2a**. La primera diferencia notable entre los valores diarios de energía provenientes del satélite y de las observaciones fue la prevalencia de magnitudes altas para las medianas del GOES16 con respecto al SIATA 10-min en el periodo comprendido entre enero y junio, en el cual los valores de energía para el satélite se centraron en magnitudes superiores a 5,3 kWh/m<sup>2</sup>, en tanto que los valores centrales de la energía en el



**Figura 2.** Distribución mensual de los valores medios diarios de energía solar. **a)** GOES16 *Vs.* SIATA. **b)** ERA5 *Vs.* SIATA

SIATA 10-min oscilaron entre 4,60 kWh/m<sup>2</sup> y 5,18 kWh/m<sup>2</sup> (**Tabla 2**). Específicamente, se observó que en la primera temporada húmeda del año las diferencias en los valores centrales de las distribuciones del satélite y las observaciones fueron más marcadas que en los meses restantes debido a que en MAM las medianas correspondientes a las estimaciones del GOES16 tuvieron valores de 5,65 kWh/m<sup>2</sup>, 5,67 kWh/m<sup>2</sup>, y 5,58 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente, en tanto que las medianas del SIATA 10-min fueron de 4,93 kWh/m<sup>2</sup>, 4,60 kWh/m<sup>2</sup>, y 4,63 kWh/m<sup>2</sup>. Este comportamiento no se observó en la segunda temporada de lluvias del año, pues para septiembre y octubre las magnitudes de las medianas correspondientes al SIATA 10-min fueron mayores que las del GOES16. Esto estaría relacionado con diferencias en la estructura de los sistemas convectivos de ambas temporadas y es posible que en SON la conjugación del paso de la ZCIT con la dinámica del chorro del Chocó y el paso de ondas tropicales del este sobre la región genere sistemas convectivos de gran extensión (**Bedoya-Soto et al., 2019; Poveda, 2004; Poveda & Mesa, 1999**), cuyos efectos sobre la extinción de la radiación pueden ser captados y sobredimensionados por el satélite. En contraste, en MAM pueden ser comunes los cielos con presencia de nubes, cuya extensión es considerablemente menor a la resolución de las estimaciones del satélite, por lo que su influencia en el comportamiento de la radiación solar no es percibida completamente. No obstante, se plantea como consideración futura el estudio detallado del comportamiento y la variabilidad del tamaño de los sistemas convectivos en el Valle de Aburrá, con el fin de establecer con mayor precisión su efecto en la energía solar disponible.

Además, en la **figura 2a** se puede observar que el producto ABI del satélite GOES16 tuvo limitaciones para representar la variabilidad de la energía solar en el área de estudio. Las distribuciones mensuales para meses como enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre evidencian que aproximadamente el 75 % de los datos de energía estimados a partir del GOES16 tuvieron magnitudes mayores a las medianas correspondientes a las distribuciones de la energía según el SIATA 10-min. Asimismo, se observa que en junio, julio y agosto las distribuciones de la energía derivadas del SIATA 10-min se concentraron hacia mayores magnitudes, en tanto que las distribuciones relativas a la energía del GOES16 presentaron una mayor concentración hacia menores magnitudes y un rango intercuartil más amplio.

Según se observa en la **figura 2b** y la **tabla 2**, las distribuciones de la energía diaria del ERA5 se centraron en valores superiores a los asociados al SIATA, encontrándose que esta diferencia entre las medianas fue menor en noviembre, puesto que se registraron valores

**Tabla 2.** Medianas de la energía media diaria de cada mes en el Valle de Aburrá obtenidas a partir de las observaciones de SIATA y las estimaciones del GOES16 y el reanálisis ERA5

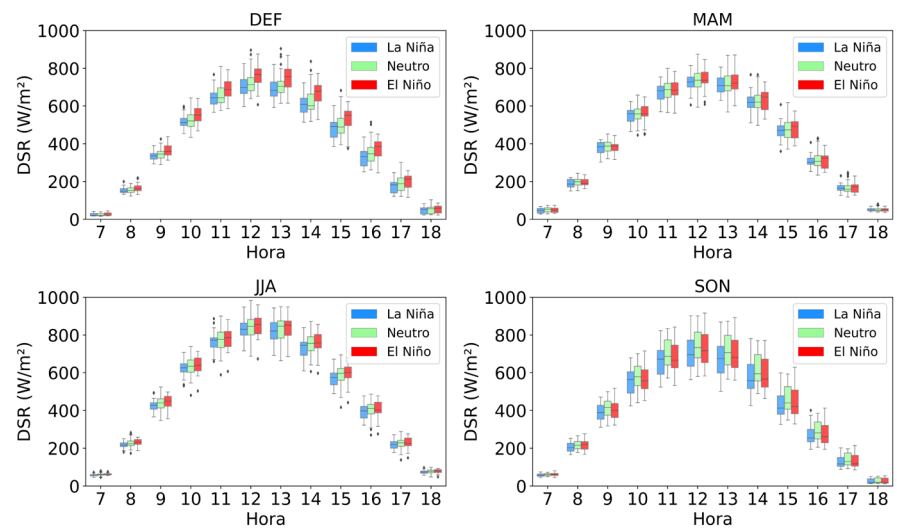
Mediana de energía diaria (kWh/-día)				
Mes	GOES-16	SIATA 10-min	ERA5	SIATA
Enero	5,49	4,99	5,34	5,09
Febrero	5,5	5,18	5,35	5,32
Marzo	5,65	4,93	5,29	4,97
Abril	5,67	4,6	5,27	4,85
Mayo	5,58	4,63	5,21	4,65
Junio	5,35	5,1	6	5,21
Julio	4,19	5,42	6,34	5,74
Agosto	4,89	5,53	6,45	5,82
Septiembre	4,62	4,76	6,17	5,12
Octubre	4,05	4,8	5,17	4,98
Noviembre	4,51	4,1	4,39	4,38
Diciembre	4,97	4,52	5,24	4,86

de 4,39 kWh/m<sup>2</sup> con el ERA5 y de 4,38 kWh/m<sup>2</sup> con el SIATA, y en febrero, al obtenerse medianas de 5,35 kWh/m<sup>2</sup> con el ERA5 y 5,32 kWh/m<sup>2</sup> con el SIATA. En noviembre también se destaca que el ERA5 y el SIATA presentaron concentraciones similares para el 50 % de los valores de energía más cercanos a la medianas (es decir, los valores que comprenden la caja); asimismo, la longitud de los bigotes no divergió de forma importante, exceptuando que el ERA5 registró valores atípicos con magnitudes cercanas a 1 kWh/m<sup>2</sup>. Además, se observa que en junio, julio, agosto y septiembre, el reanálisis sobreestimó de forma importante los valores de energía, pues aproximadamente el 75 % de los datos de energía diaria provenientes de este presentaron magnitudes superiores a las medianas correspondientes a las distribuciones asociadas con el SIATA. Se observa, asimismo, que los bigotes inferiores son más cortos que los obtenidos para las distribuciones del SIATA en dichos meses, lo que indica que el 25 % de los valores más bajos de energía correspondientes al ERA5 registraron magnitudes superiores y menor variabilidad con respecto a las observaciones. En marzo se observa que las distribuciones de la energía según el ERA5 se concentraron hacia valores más altos que las observaciones, y que los valores mínimos según el ERA5 alcanzaron valores ligeramente inferiores a 3 kWh/m<sup>2</sup> en tanto que los valores mínimos según el SIATA fueron menores a 2 kWh/m<sup>2</sup>. En abril también se observa una distribución según el ERA5 concentrada hacia valores más altos que los del SIATA, y que la energía derivada del reanálisis alcanzó valores máximos cercanos a 8 kWh/m<sup>2</sup>, en tanto que los valores máximos según el SIATA alcanzaron magnitudes cercanas a 7 kWh/m<sup>2</sup>.

#### ***Ciclos diurnos de radiación solar derivada del ERA5 en el período 1979-2020***

Después de constatar las bondades y limitaciones de las estimaciones de la radiación del ERA5 (ver sección anterior), aprovechamos el largo periodo de registro de esta base de datos para estudiar la variabilidad de la radiación solar en el Valle de Aburrá durante las diferentes fases del fenómeno ENSO. En este caso, se empleó información horaria promedio para el periodo 1979-2020. Específicamente, se estudiaron los valores de radiación durante los años de El Niño (14 eventos), La Niña (15 eventos) y los neutros. Este tipo de análisis no sería posible con los datos originales *in situ* o con las estimaciones del GOES debido a sus cortos períodos de registro.

Los ciclos diurnos de cada temporada del año se presentan en la **figura 3** y se analizan de forma conjunta con los valores medios de radiación solar presentados en la **tabla 3**. En general, las distribuciones (**Figura 3**) muestran que la mayor dispersión de los datos se presentó alrededor del mediodía y en las tardes, en tanto que entre las 7:00 LT y las 9:00 LT y desde las 17:00 LT hasta las 18:00 LT, el rango de variabilidad de los promedios horarios fue más bajo. En cuanto a las distribuciones de los ciclos diurnos durante los eventos de La Niña, se observa que el rango intercuartil para todas las horas y todas las estaciones se ubicó entre los valores inferiores comparado con las condiciones neutras, principalmente a partir de las 12:00 LT. Asimismo, los valores medios de radiación solar (**Tabla 3**) correspondientes a los eventos de La Niña fueron inferiores que los obtenidos para las condiciones neutras del ENSO, siendo mayor la diferencia en SON. Por otra parte, el rango intercuartil de las distribuciones de los ciclos diurnos durante los eventos de El Niño (**Figura 3**), se centró en valores más altos que los de las condiciones neutras en todas las horas de los trimestres DEF y JJA, siendo más pronunciadas las altas magnitudes durante DEF, cuando se observó que entre las 7:00 LT y las 15:00 LT el cuartil 0,25 de las distribuciones para los eventos de El Niño fue mayor que la mediana de las condiciones neutras. En MAM se observa que entre las 7:00 LT y las 12:00 LT las distribuciones durante El Niño se centraron en valores cercanos o inferiores a las medianas correspondientes a las condiciones neutras, en tanto que en las tardes las distribuciones durante El Niño generalmente tuvieron asimetrías negativas y medianas mayores que en las condiciones neutras (**Tabla 3**). En SON el rango intercuartil en los eventos de ENSO en sus dos fases estuvieron comprendidos entre valores de menor magnitud para casi todas las horas, lo que sugiere que en este trimestre la radiación solar en superficie en el Valle de Aburrá presenta, típicamente, valores inferiores durante La Niña y El Niño comparados con las condiciones neutras.



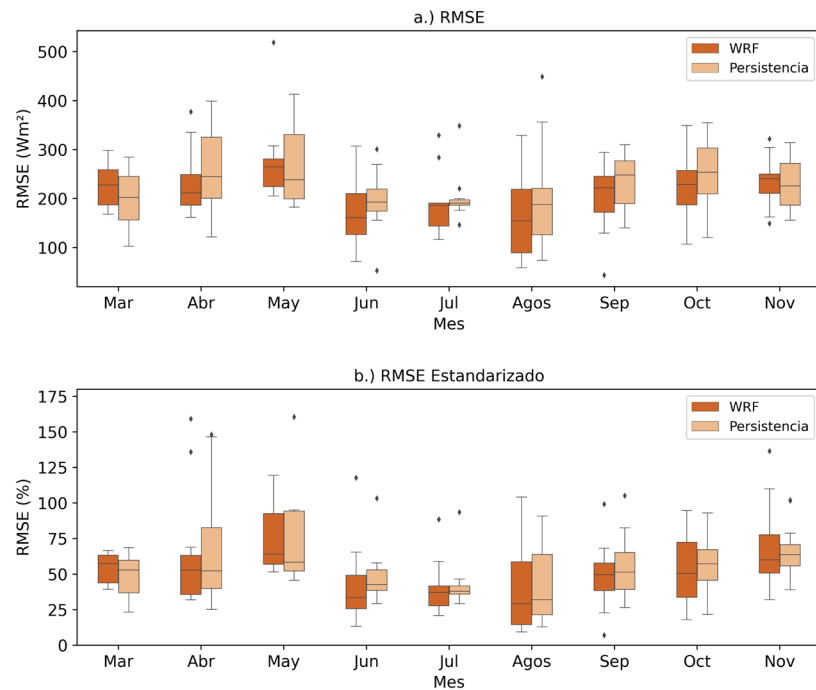
**Figura 3.** Distribución trimestral de los ciclos diurnos de radiación solar en superficie derivada del ERA5 durante el periodo 1979-2020 en el Valle de Aburrá. Los diagramas azules corresponden a los valores de radiación solar superficial durante la fase fría del ENSO (La Niña). Los diagramas verdes corresponden a los valores de radiación solar superficial en condiciones neutras del ENSO. Los diagramas rojos corresponden a los valores de radiación superficial en la fase cálida del ENSO (El Niño).

**Tabla 3.** Valores medios trimestrales de radiación solar en superficie durante eventos ENSO

Trimestre	Fase ENSO	Radiación (W/)
DEF	La Niña	393,75
DEF	Neutro	405,89
DEF	El Niño	427,54
MAM	La Niña	407,44
MAM	Neutro	414,20
MAM	El Niño	415,11
JJA	La Niña	478,12
JJA	Neutro	487,72
JJA	El Niño	494,68
SON	La Niña	390,97
SON	Neutro	415,93
SON	El Niño	404,69

**Evaluación de simulaciones del modelo WRF**

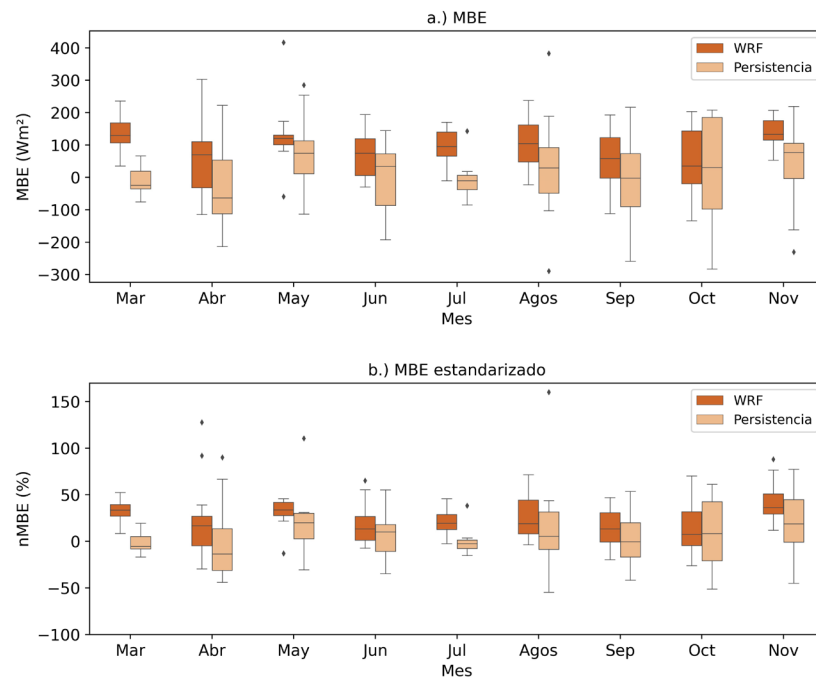
*Horizonte de 24 horas.* En la **figura 4** se observan los diagramas de cajas y bigotes para los errores RMSE y nRMSE de los valores horarios de irradiancia solar obtenidos de la comparación estadística entre los modelos WRF y de persistencia y las mediciones *in situ* del SIATA. El RMSE es un indicador de desempeño que permite comparar las desviaciones reales entre los valores calculados y los medidos, pero este error no distingue sobreestimaciones o subestimaciones del modelo, por lo tanto, todos los valores observados en la **figura 4** están por encima de cero. En la **figura 4a** se observa que los meses en los que el WRF obtuvo valores de RMSE más altos fueron marzo, abril, mayo, octubre y noviembre, los cuales hacen parte de la temporada lluviosa de la región. Por otra parte,



**Figura 4.** Diagramas de caja y bigotes para los errores de los valores horarios de irradiancia solar. **a)** RMSE. **b)** RMSE estandarizado

los valores de RMSE más bajos se registraron en junio, julio y agosto, que son meses de temporada seca en el Valle de Aburrá. Esto podría indicar que el rendimiento del modelo disminuye sustancialmente a medida que aumenta la nubosidad. La **figura 4c** muestra que, en general, la mayoría de los errores (nRMSE) de WRF se ubicaron por debajo del 100 %, con excepción de algunos días de abril, mayo y noviembre. Mayo fue el mes que reportó mayores valores de nRMSE, superando en su totalidad errores del 50 % e, inclusive, llegando a tener errores de aproximadamente el 350 %. Por su parte, junio y julio fueron los meses con menores porcentajes de nRMSE: junio registró la menor mediana (33,60 %) y julio la menor variabilidad, con un valor máximo de 43,33 %, sin tener en cuenta el dato atípico, y un valor mínimo de 20,92 %. Por otra parte, las **figuras 4b y 4d** muestran que el modelo de persistencia, al igual que el WRF, obtuvo mejor rendimiento para los meses de temporada seca. En comparación con el WRF, el de persistencia obtuvo menores medianas de RMSE para los meses de marzo, mayo y noviembre y menores medianas de nRMSE para marzo, abril y mayo, en tanto que en los demás meses, el WRF obtuvo medianas menores. Aun así, según los diagramas de caja y bigotes del RMSE en meses como abril y mayo, el modelo de persistencia, en general, presentó un peor rendimiento que el WRF, ya que alcanzó valores por encima de los  $320 W/m^2$ , pero en meses como marzo y agosto los modelos presentaron rendimientos muy similares, inclusive con un mejor desempeño para el de persistencia.

En la **figura 5** se observan los diagramas de caja y bigotes de los errores MBE y nMBE de los valores horarios de irradiancia solar obtenidos de la comparación estadística entre los modelos WRF y de persistencia y las mediciones *in situ* del SIATA. Los valores positivos de MBE y nMBE indican sobreestimación de las observaciones medias, en tanto que los valores negativos representan su subestimación. Teniendo esto en cuenta, en gran parte del periodo de estudio el modelo WRF sobreestimó la radiación solar, aunque en algunos días de abril, septiembre y octubre la subestimó. En la **figura 5a** se destacan marzo, mayo y noviembre por ser los meses donde el WRF obtuvo las medianas más altas de MBE, con valores de  $129,30 W/m^2$ ,  $120,80 W/m^2$  y  $133,04 W/m^2$ , respectivamente. Por el contrario,



**Figura 5.** Diagramas de caja y bigotes para los errores de los valores horarios de irradiancia solar. **a)** MBE. **b)** MBE estandarizado

octubre exhibió la mediana más pequeña ( $35,244 W/m^2$ ), aunque con una alta variabilidad. La **figura 5c** muestra que la gran mayoría de errores obtenidos del WRF estuvieron, en general, por debajo del 50 % y las medianas no superaron el 20 %, exceptuando algunos meses como marzo, mayo y noviembre, que presentaron las medianas más altas, 33,56%, 33,95% y 36,28%, respectivamente. Por su parte, octubre, junio y julio presentaron las menores medianas, con valores de 7,61%, 13,40% y 19,45%, respectivamente. Aun así, no se evidenció una inclinación a mayores sobreestimaciones en los meses de la temporada lluviosa, puesto que, según el tamaño de los diagramas, los meses de temporada seca como agosto y junio registraron valores de MBE mayores que mayo, septiembre y octubre, que son meses de temporada lluviosa. En general, el WRF exhibió errores positivos con magnitudes mayores que los del modelo de persistencia, aunque presentó errores negativos más pequeños en magnitud, alcanzando como máximo  $-133,84 W/m^2$ , en tanto que el modelo de persistencia llegó a tener errores cercanos a los  $-300 W/m^2$ , es decir, no exhibió una inclinación a sobreestimar la irradiancia solar como el WRF.

En general, la magnitud de los errores del WRF concuerda con lo registrado en la literatura, sin tener en cuenta los días extremos que superan errores del 100 %. En algunos estudios en Turquía se han documentado valores de nMBE entre el 17 % y el 30 % para condiciones nubladas y del 10 % y el 18 % para condiciones despejadas y valores de nRMSE para condiciones nubladas entre el 41 % y el 70 %, y para condiciones despejadas entre el 20 % y el 39 % (Incecik *et al.*, 2019). Otros autores han encontrado magnitudes de errores más bajas, por ejemplo, en España, donde se encontraron valores de nMBE del 2 % para cielos despejados y del 18 % para condiciones nubladas y valores de nRMSE del 10 % en cielos despejados y del 50 % en condiciones nubladas (Lara-Fanego *et al.*, 2012). En la Isla Reunión, algunos autores encontraron valores de nRMSE de hasta 57,3 % y de nMBE hasta de 16,08 % (Diagne *et al.*, 2014).

*Horizonte de 48 horas.* En la **tabla 4** se presentan las correlaciones de los valores horarios de irradiancia solar entre los modelos D1, D2, persistencia D1 y persistencia D2 y las mediciones *in situ*. Todas las correlaciones en la **tabla 4** fueron significativas, con un

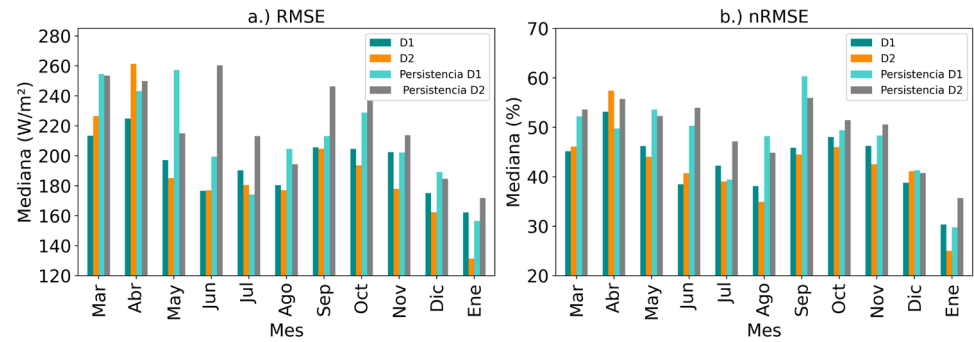
**Tabla 4.** Correlaciones de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2

Mes	Correlación			
	D1-WRF	D2-WRF	Persistencia D1	Persistencia D2
Marzo	0,78	0,74	0,63	0,61
Abril	0,74	0,68	0,71	0,68
Mayo	0,79	0,76	0,60	0,70
Junio	0,81	0,78	0,63	0,60
Julio	0,80	0,80	0,75	0,72
Agosto	0,84	0,80	0,76	0,77
Septiembre	0,78	0,79	0,64	0,67
Octubre	0,82	0,80	0,66	0,67
Noviembre	0,79	0,78	0,74	0,70
Diciembre	0,84	0,85	0,79	0,80
Enero	0,86	0,85	0,78	0,74

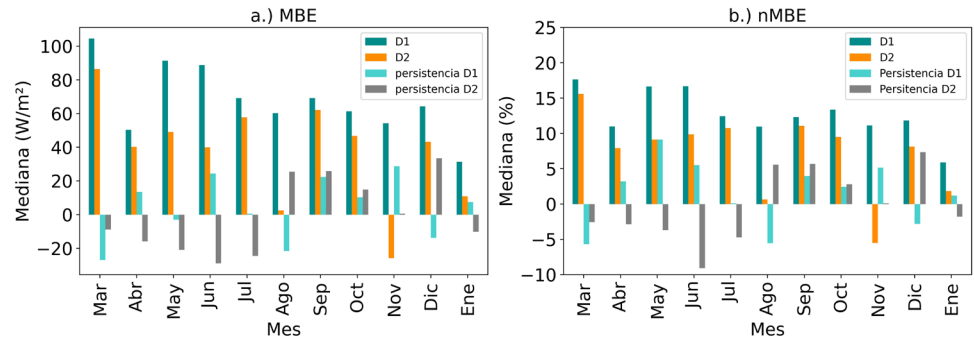
nivel de confianza de 0,05. En general, las correlaciones para el D1-WRF fueron mayores que para el D2-WRF, salvo en los meses de septiembre y diciembre, y fueron mayores que las correlaciones de ambos modelos de persistencia en todos los meses. El D2-WRF también presentó correlaciones más altas que los del respectivo modelo de persistencia. Por otra parte, al igual que el D1-WRF, el D2-WRF mostró correlaciones más altas en los meses de las temporadas secas de la región, exceptuando octubre. El modelo de persistencia D1 presentó correlaciones más altas (por encima de 0,70) para abril, julio, agosto, noviembre, diciembre y enero. El de persistencia D2 presentó las mayores correlaciones en mayo, julio, agosto, noviembre, diciembre y enero, lo que indica que, al igual que las simulaciones del WRF, el de persistencia para ambos días presentó las mayores correlaciones en los meses de temporada seca, salvo en abril (persistencia D1), mayo (persistencia D2) y noviembre (ambas persistencias), que son meses de temporada lluviosa en la región de estudio.

En la **figura 6** se muestran las medianas de los errores RMSE, los nRMSE, los valores horarios de irradiancia solar para el D1-WRF, el D2-WRF, el de persistencia D1 y de persistencia D2. En las **figura 6a y b** se aprecia que, en general, las persistencias presentaron medianas de RMSE y nRMSE más altas que las simulaciones del WRF. Por otra parte, las medianas del RMSE y del nRMSE en el WRF y de los modelos de persistencia siguen un comportamiento bimodal en el que las medianas más grandes se registraron en los meses de temporada lluviosa en la región de estudio, en tanto que en la temporada seca se apreciaron las más pequeñas. En el D1-WRF y el D2-WRF, los meses de temporada seca mostraron medianas de nRMSE entre el 25 % y el 40 % aproximadamente, es decir, que el 50 % de los errores estuvieron por debajo de estos valores, mientras que en los meses de temporada lluviosa las medianas de los errores estuvieron alrededor del 40 % y el 55 %. El D2-WRF presentó las menores medianas de RMSE y nRMSE en casi todos los meses, exceptuando marzo y abril para el RMSE y marzo, abril, junio y diciembre para el nRMSE, obteniéndose las menores medianas con el D1-WRF.

En la **figura 7a, b** se aprecia que, en general, el D1-WRF y el D2-WRF presentaron medianas positivas para los errores, con valores que oscilaron entre 0 W/m<sup>2</sup> y 100 W/m<sup>2</sup> para el MBE, y entre el 0 % y el 20 % para el nMBE, exceptuando noviembre en el D2-WRF, en el que las medianas presentaron valores negativos de aproximadamente -20 W/m<sup>2</sup> (RMSE) y -5 % (nRMSE). Esto evidencia la inclinación del WRF a sobreestimar la radiación solar en superficie tanto en el D1 como en el D2. En contraste, los modelos de persistencia no presentaron una tendencia tan marcada a la sobreestimación, pues la persistencia en el D1 presentó medianas negativas en 6 meses y en el D2 en 3 meses.



**Figura 6. a)** Medianas del error RMSE de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2. **b)** Medianas del error nRMSE de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2



**Figura 7. a)** Medianas del error MBE de los valores horarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2. **b)** Medianas del error nMBE de los valores de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2

Asimismo, el MBE presentó las magnitudes más bajas en las horas cercanas al mediodía; además, al estandarizarlo, se evidenciaron las mayores magnitudes de error en las horas de la tarde, notándose un pico generalmente a las 17:00 LT (**Figura 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>). Esto podría darse por lo mencionado anteriormente: en la tarde los valores de radiación son bajos, y al dividir el MBE por promedios de radiación bajos se incrementa el error (nMBE).

En la **tabla 5** se presentan las correlaciones entre los promedios diarios de irradiancia solar de los modelos (D1-WRF, D2-WRF, la persistencia D1, la persistencia D2) y los promedios diarios de las mediciones *in situ* del piranómetro de Torre SIATA. El D1 de simulaciones del WRF presentó correlaciones significativas para todos los meses, exceptuando abril y agosto. En general, el D2-WRF también exhibió correlaciones significativas, salvo para marzo y abril. Por el contrario, ambos modelos de persistencia presentaron correlaciones muy bajas, menos para julio (persistencia D1) y para septiembre (persistencia D2), es decir, que mostraron problemas para predecir el promedio diario de irradiancia solar, en tanto que el WRF mostró mejor capacidad para hacerlo. Se esperaba que el D1 presentara correlaciones más altas que el D2; aun así, el D2 presentó correlaciones más altas que el D1 para 6 de los 11 meses analizados. Por otra parte, las correlaciones de los valores diarios no presentaron valores más altos para las temporadas secas de la región, inclinación que sí mostraron las correlaciones de los valores horarios. Las correlaciones de los valores diarios las observamos en la tabla 5 y la de los valores horarios en la tabla 4.



**Tabla 5.** Correlaciones de los valores diarios de irradiancia solar para D1-WRF, D2-WRF, Persistencia D1 y Persistencia D2

Mes	Correlación			
	D1	D2	Persistencia D1	Persistencia D2
Marzo	<b>0,72</b>	0,47	0,08	-0,33
Abril	0,10	-0,28	0,06	0,01
Mayo	<b>0,47</b>	<b>0,49</b>	0,09	0,25
Junio	<b>0,69</b>	<b>0,40</b>	0,12	-0,01
Julio	<b>0,53</b>	<b>0,56</b>	<b>0,41</b>	-0,01
Agosto	0,26	<b>0,53</b>	0,26	0,08
Septiembre	<b>0,62</b>	<b>0,52</b>	0,01	<b>0,54</b>
Octubre	<b>0,71</b>	<b>0,81</b>	0,27	0,12
Noviembre	<b>0,67</b>	<b>0,57</b>	0,28	0,21
Diciembre	<b>0,45</b>	<b>0,54</b>	0,05	0,11
Enero	<b>0,42</b>	<b>0,56</b>	0,24	-0,02

## Conclusiones

La caracterización y la comprensión del recurso solar en un lugar determinado son fundamentales para plantear e implementar nuevos proyectos de energía solar, para lo cual es de vital importancia disponer de estimaciones de irradiancia solar continuas y a largo plazo, y contar con pronósticos confiables para la operación de la red. En el Valle de Aburrá solo se tienen mediciones en superficie para un periodo corto y frecuentemente hay valores faltantes, aunque la situación es mucho mejor que la del resto del país, pues gran parte del territorio no cuenta con redes de medición *in situ*. Dada la escasez de datos locales, los conjuntos de datos derivados de reanálisis, estimaciones de satélites y pronósticos meteorológicos constituyen una fuente de información alterna, pero la evaluación de su desempeño entraña la necesidad de determinar su utilidad en los diferentes campos de aplicación. En este estudio se usaron mediciones en superficie del SIATA para evaluar el desempeño de los datos derivados del reanálisis ERA5 y del satélite GOES16, con el fin de dimensionar el recurso solar en el Valle de Aburrá. Específicamente, se evaluó la capacidad del ERA5 y el GOES16 para representar el comportamiento típico y la variabilidad de la radiación solar en el lugar de estudio. Por último, se evaluó el modelo atmosférico WRF para el pronóstico de la irradiancia solar en el Valle de Aburrá, con horizontes de 24 y 48 horas de antelación (D1 y D2, respectivamente).

Los resultados de la evaluación de las estimaciones de la radiación solar provenientes del producto ABI L2 del GOES16 sugieren un mejor desempeño del ABI L2 + DSR bajo condiciones de cielo despejado, en tanto que los mayores errores se notaron en las tardes y en las temporadas de lluvia, lo que indica que la presencia de nubes genera dificultades en la representatividad de la variabilidad de la radiación solar por parte del satélite. Los estudios de evaluación del recurso solar con datos derivados del GOES16 son limitados, por lo tanto, no fue posible establecer si los errores encontrados eran típicos, mayores con respecto a otras regiones, o si se debían a la ubicación geográfica y la complejidad de la topografía del territorio de estudio. Por su parte, la evaluación del desempeño del reanálisis ERA5 mostró que este conjunto representa bien la estacionalidad de la irradiancia solar sobre la superficie del Valle de Aburrá, puesto que exhibió los períodos de aumento y disminución de la variable a lo largo del año. No obstante, presentó limitaciones para estimar las magnitudes de la irradiancia solar y los valores diarios de energía y, en general, tuvieron distribuciones concentradas hacia valores mayores que las observaciones, siendo más altos los sesgos para el trimestre JJA. En estudios previos se ha evidenciado que el desempeño

del ERA5 es bajo en áreas con altas precipitaciones, lo que indica que el reanálisis tiene dificultades para interpretar las propiedades de las nubes y sus efectos sobre la radiación en la superficie (Babar *et al.*, 2019; Jiang *et al.*, 2020; Salazar *et al.*, 2020). En general, las estimaciones de irradiancia solar en superficie para el Valle de Aburrá derivados del reanálisis ERA5 presentaron menores valores de RMSE que el GOES16. Además, el ERA5 cuenta con estimaciones disponibles para un período más extenso que los datos satelitales y cobertura para todo el dominio espacial de Colombia. En ese sentido, el ERA5 puede representar una mejor alternativa que los datos satelitales para dar una primera estimación del recurso solar en el Valle de Aburrá y en otras regiones de Colombia donde no se disponga de instrumentos para la medición *in situ* de la radiación solar en superficie.

Por otra parte, la climatología de la radiación solar en superficie obtenida a partir de los ciclos diurnos mensuales del ERA5 entre 1979 y 2020 evidenció que los datos derivados del reanálisis sugerían un aumento de por lo menos 10 % en los valores de radiación incidente sobre la superficie terrestre del Valle de Aburrá en DEF durante los eventos ENSO en su fase cálida (El Niño) con respecto a las condiciones neutras. Sin embargo, para las temporadas restantes y para la interpretación de la variabilidad de la irradiancia solar durante los eventos de La Niña, la señal de las estimaciones del reanálisis no fue clara.

Los resultados de la evaluación del modelo WRF mostraron que, en general, todas las simulaciones presentaron errores nMBE con medianas por debajo del 20 % aproximadamente. Según el comportamiento de este error, el WRF tendió a sobreestimar la radiación solar en todos los meses de estudio, tanto en las simulaciones de 24 horas como en el D1 y el D2 de las simulaciones de 48 horas. Al contrario de lo encontrado en estudios anteriores, la sobreestimación no fue dependiente de la temporada, es decir, los meses de lluvia no siempre mostraron mayores valores de MBE positivos que los meses de temporada seca. En cuanto al nRMSE, el modelo presentó porcentajes de error más altos, pero la mayoría de las medianas estuvieron por debajo del 50 %. Al contrario del MBE, el RMSE presentó dependencia estacional, es decir, los errores más altos se registraron en los meses de temporada lluviosa, lo que podría relacionarse con limitaciones para simular las nubes, puesto que en estudios anteriores se ha encontrado que el modelo se caracteriza por presentar mayores errores en días nublados. A esto se sumó el hecho de que las correlaciones horarias entre el WRF y las mediciones *in situ* fueron casi en su totalidad más altas en los meses de temporada seca, lo que indica que el modelo presenta pronósticos más precisos para estos meses.

Las simulaciones del WRF presentaron, en general, mejor rendimiento que el modelo más simple de predicción de irradiancia solar (la persistencia), ya que fueron más los meses en los que presentó errores RMSE menores a la persistencia. Aun así, hubo meses en que los modelos obtuvieron errores muy similares. Asimismo, la persistencia obtuvo MBE positivos similares, pero los negativos fueron de magnitud mucho mayor. Además, los promedios horarios y diarios del WRF mostraron correlaciones más altas con las mediciones *in situ* que las presentadas por el modelo de persistencia. El WRF mostró correlaciones horarias cercanas a 0,80 y diarias alrededor de 0,60, mientras que la persistencia presentó correlaciones horarias próximas a 0,70 y diarias cercanas a 0,2.

Contrario a lo que se esperaba, el rendimiento del modelo no disminuyó con el horizonte de tiempo, ya que las simulaciones del D2-WRF presentaron medianas de MBE y nMBE menores en magnitud a las del D1-WRF; además, este último alcanzó medianas positivas hasta  $45 \text{ W/m}^2$  más altas que las del D2-WRF, aproximadamente. Asimismo, las medianas de RMSE y nRMSE fueron menores en el D2-WRF que en el D1-WRF, exceptuando marzo y abril para el RMSE, y marzo, abril, junio y diciembre para el nRMSE. Sin embargo, el D1-WRF representó de mejor manera otras propiedades, como las correlaciones horarias con las mediciones *in situ*, ya que 9 de los 11 meses analizados mostraron correlaciones más altas para el D1 que para el D2; en cuanto a las correlaciones diarias, el D2 presentó 6 meses con correlaciones más altas. En estudios anteriores (Lara-Fanego *et al.*, 2012) se reportaron resultados similares y se concluyó que los errores de pronóstico de simulaciones con horizontes más prolongados fueron similares o, en algunos casos,

menores a los de horizontes más cortos, probablemente porque el tiempo de evaluación del modelo fue relativamente corto, lo que podría explicar también que el rendimiento del modelo de persistencia estuviera cerca del rendimiento del modelo WRF en algunos periodos de estudio, tal como se evidenció en el nuestro.

En estudios anteriores se ha comprobado que Colombia depende extremadamente de los recursos hídricos para la generación de energía eléctrica, siendo particularmente vulnerable en los periodos de sequía que se presentan durante el fenómeno climático ENSO (Henaó *et al.*, 2019; Zapata *et al.*, 2018). Henaó *et al.* (2020) han señalado que durante El Niño la entrada de agua hacia los sistemas hidroeléctricos del país se reduce considerablemente, afectando la producción de energía eléctrica. En ese sentido, los resultados del presente estudio indican que los aumentos importantes en el recurso solar disponible en el Valle de Aburrá durante los eventos de El Niño, especialmente en DEF, pueden constituir una alternativa para complementar la energía hidroeléctrica en la región y reducir el riesgo en el suministro de energía. Asimismo, las simulaciones de WRF podrían ser una herramienta de importancia para ayudar a complementar el sistema, teniendo en cuenta que este modelo representó adecuadamente la radiación solar en superficie, especialmente en los meses de temporada seca, lo que podría garantizar una planificación adecuada del recurso precisamente en los meses de mayor incidencia de radiación solar en superficie.

## Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1576/3232>

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el programa “Colombia Científica” dentro del marco del proyecto “Ecosistema Científico” (Contrato No. FP44842-218-2018). Agradecemos al Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá por facilitar la información de piranómetros usada en este estudio.

## Contribución de los autores

PAA y JAM diseñaron y dirigieron la investigación; LMC y MAC procesaron la información y realizaron los análisis. Las simulaciones obtenidas a partir del modelo WRF fueron realizadas por JAM. El manuscrito fue elaborado por todos los autores.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

## Referencias

- Ameen, B., Balzter, H., Jarvis, C., Wey, E., Thomas, C., Marchand, M. (2018). Validation of Hourly Global Horizontal Irradiance for Two Satellite-Derived Datasets in Northeast Iraq. *Remote Sensing*, 10(10), 1651. <https://doi.org/10.3390/RS10101651>
- Aryaputera, A. W., Yang, D., Walsh, W. M. (2015). Day-Ahead Solar Irradiance Forecasting in a Tropical Environment. *Journal of Solar Energy Engineering*, 137(5), 051009. <https://doi.org/10.1115/1.4030231>
- Babar, B., Graversen, R., Boström, T. (2019). Solar radiation estimation at high latitudes: Assessment of the CMSAF databases, ASR and ERA5. *Solar Energy*, 182, 397-411. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.058>
- Bedoya-Soto, J. M., Aristizábal, E., Carmona, A. M., Poveda, G. (2019). Seasonal shift of the diurnal cycle of rainfall over Medellín's valley, Central Andes of Colombia (1998–2005). *Frontiers in Earth Science*, 7, 92. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00092>
- Bustos, J., Sepúlveda, A., Triviño, L. (2014). Zonas no interconectadas eléctricamente en Colombia: problemas y perspectiva (Non Electric Interconnection Zones in Colombia: Problems and Perspectives). *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.2603023>

- Boilley, A. & Wald, L.** (2015). Comparison between meteorological re-analyses from ERA-Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy*, 75, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.042>
- Checa, F.E. & De La Cruz, O.E.** (2015). Potencial natural para el desarrollo fotovoltaico en Colombia. *Libros Editorial UNIMAR*. Pasto, Colombia.
- Cuervo, R. & Mendez, J. M.** (2011). Energía solar fotovoltaica. FC Editorial. Madrid, España.
- DANE** (2020). Censo nacional de población y vivienda 2018 - Valle de Aburrá. Technical report, Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Fecha de consulta: agosto y diciembre de 2020. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190822-CNPV-presentacion-Antioquia-Valle-de-Aburra.pdf>
- Diagne, M., David, M., Boland, J., Schmutz, N., Lauret, P.** (2014). Post-processing of solar irradiance forecasts from WRF model at Reunion Island. *Solar Energy*, 105, 99-108.
- Henao, F., Rodríguez, Y., Viteri, J. P., Dyer, I.** (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81-92. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.07.099>
- Henao, F., Viteri, J. P., Rodríguez, Y., Gómez, J., Dyer, I.** (2020). Annual and interannual complementarities of renewable energy sources in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134(August). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110318>
- Herrera-Mejía, L. & Hoyos, C. D.** (2019). Characterization of the atmospheric boundary layer in a narrow tropical valley using remote-sensing and radiosonde observations and the WRF model: the Aburrá Valley case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(723), 2641-2665. <https://doi.org/10.1002/QJ.3583>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A.,... Thépaut, J-N.** (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- IDEAM & UPME.** (2017). Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia (p. 172). p. 172. Fecha de consulta: agosto y diciembre 2020. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IDEAM.** (s.f). Importancia de la radiación solar. Fecha de consulta: agosto a diciembre del 2020. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20nos%20proporciona,s%C3%ADntesis%20de%20los%20neurotransmisores%20cerebrales>
- Incecik, S., Sakarya, S., Tilev, S., Kahraman, A., Aksoy, B., Caliskan, E., ... Odman, M. T.** (2019). Evaluation of WRF parameterizations for global horizontal irradiation forecasts: A study for Turkey. *Atmósfera*, 32(2), 143-158.
- Jiang, H., Lu, N., Qin, J., Tang, W., Yao, L.** (2019). A deep learning algorithm to estimate hourly global solar radiation from geostationary satellite data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109327. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109327>
- Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., Tovar-Pescador, J.** (2012). Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (Southern Spain). *Solar Energy*, 86(8), 2200-2217.
- Laszlo, I., Liu, H., Kim, H. Y., Pinker, R. T.** (2020). Shortwave Radiation from ABI on the GOES-R Series. In *Shortwave Radiation from ABI on the GOES-R Series, 1979*, 179–191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00015-9>
- Lohmann, G. M., Monahan, A. H., Heinemann, D.** (2016). Local short-term variability in solar irradiance. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(10), 6365–6379. <https://doi.org/10.5194/acp-16-6365-2016>
- Mesa Sánchez, Ó. J., Poveda Jaramillo, G., Vélez Upegui, J. I., Mejía Valencia, J. F., Hoyos Ortiz, C. D., Mantilla Gutiérrez, R., Barco Mejía, O. J., Cuartas Pineda, L. A., Botero Hernández, B., Montoya, M. I.** (2000). *Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/12102>
- Olarte, M. S. T.** (2017). *Nuevos modelos de predicción a corto plazo de la generación eléctrica en plantas basadas en energía solar fotovoltaica*. Tesis doctoral, Universidad de La Rioja, España.
- Porrini, C.** (2017). *Evaluación del modelo regional WRF para pronósticos de radiación solar en superficie dentro del territorio uruguayo*. Tesis de grado, Universidad de la República, Uruguay.
- Poveda, G. & Mesa, O.** (1999). La corriente de chorro superficial del Oeste (“del Chocó”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 23(89), 517-528.

- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G., Álvarez, J. F.** (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. <https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>
- Ramírez-Camargo, L. & Schmidt, J.** (2020). Simulation of multi-annual time series of solar photovoltaic power: Is the ERA5-land reanalysis the next big step? *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100829. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100829>
- Ren, G., Wan, J., Liu, J., Yu, D.** (2019). Spatial and temporal assessments of complementarity for renewable energy resources in China. *Energy*, 177, 262-275. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.023>
- Robledo-Delgado, V.** (2020). Validación de datos satelitales de irradiancia solar de GOES-East sobre Medellín-Colombia. [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <http://hdl.handle.net/10495/15085>
- Salazar, G., Gueymard, C., Galdino, J. B., de Castro Vilela, O., Fraidenraich, N.** (2020). Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109478. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109478>
- Sianturi, Y., Marjuki, Sartika, K.** (2020). Evaluation of ERA5 and MERRA2 reanalyses to estimate solar irradiance using ground observations over Indonesia region. *AIP Conference Proceedings*, 2223 (1), 020002. <https://doi.org/10.1063/5.0000854>
- Superservicios.** (2017). ZONAS NO INTERCONECTADAS - ZNI Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2017. Recuperado de: <http://webdav.superservicios.gov.co:8080/Media/Imagenes/Destacados/ZNI-Diagnostico-de-la-prestacion-del-servicio-de-energia-electrica-2017>
- UPME.** (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Recuperado de: [http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf)
- Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martínez-de-Pison, F. J., Kaspar, F., Sanz-García, A.** (2018). Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. *Solar Energy*, 164, 339–354. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.02.059>
- Urrego-Ortiz, J., Alejandro Martínez, J., Arias, P. A., Jaramillo-Duque, Á.** (2019). Assessment and day-ahead forecasting of hourly solar radiation in Medellín, Colombia. *Energies*, 12 (22), 1–29. <https://doi.org/10.3390/en12224402>
- Vanegas-Chamorro, M., Villicaña-Ortiz, E., Arrieta-Viana, L.** (2015). Quantification and characterization of solar radiation at the department of La Guajira-Colombia by calculating atmospheric transmissivity. *Prospectiva*, 13 (2), 54-63.
- Wilks, D.S.** (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2nd Edition, Academic Press, London.
- Xia, S., Mestas-Núñez, A. M., Xie, H., Vega, R.** (2017). An Evaluation of Satellite Estimates of Solar Surface Irradiance Using Ground Observations in San Antonio, Texas, USA. *Remote Sensing*, 9(12), 1268. <https://doi.org/10.3390/RS9121268>
- Yeom, J.-M., Park, S., Chae, T., Kim, J.-Y., Lee, C. S.** (2019). Spatial Assessment of Solar Radiation by Machine Learning and Deep Neural Network Models Using Data Provided by the COMS MI Geostationary Satellite: A Case Study in South Korea. *Sensors*, 19(9), 2082. <https://doi.org/10.3390/S19092082>
- Zapata, S., Castañeda, M., Jiménez, M., Aristizábal, A. J., Franco, C. J., Dyner, I.** (2018). Long-term effects of 100% renewable generation on the Colombian power market. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30, 183–191. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2018.10.008>
- Zhang, X., Lu, N., Jiang, H., Yao, L.** (2020). Evaluation of Reanalysis Surface Incident Solar Radiation Data in China. *Scientific Reports*, 10(1), 1-20. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60460-1>