



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**VALIDACIÓN DE DATOS SATELITALES DE
IRRADIANCIA SOLAR DE GOES-EAST SOBRE
MEDELLÍN-COLOMBIA**

Autor(es)

Vanessa Robledo Delgado

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020



**VALIDACIÓN DE DATOS SATELITALES DE IRRADIANCIA SOLAR DE GOES-
EAST SOBRE MEDELLÍN-COLOMBIA.**

Vanessa Robledo Delgado

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Asesor.

John Alejandro Martínez Agudelo, PhD.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia
2020

Resumen

Los satélites ambientales proporcionan información de diferentes variables como la irradiancia solar. Esta información es utilizada en muchos lugares del planeta para investigar el comportamiento de la dinámica atmosférica y tiene múltiples aplicaciones en el sector de la salud, agrícola y energético. GOES-East es un satélite geoestacionario que tiene cubrimiento sobre América y los océanos Atlántico y Pacífico. En 2017, GOES lanzó su nuevo producto, ABI L2+DSR, que estima la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. En este trabajo se investiga el desempeño de ABI L2+DSR para el año 2018 con énfasis en la ciudad de Medellín-Colombia, por medio de una comparación directa con datos recuperados del sensor Torre SIATA, el cual hace parte de la red de mediciones de la ciudad. El análisis incluye series de tiempo y anomalías, y se hace en múltiples escalas, desde la horaria hasta la mensual, incluyendo el ciclo diurno. Además, creamos un Atlas de Irradiación Solar para Colombia utilizando este conjunto de datos satelitales y lo comparamos cualitativamente con el Atlas de Irradiación Solar para Colombia creado por el IDEAM. Los resultados de esta validación muestran que, debido a la baja resolución espacial del producto, este tiende a sobreestimar la irradiancia solar especialmente en condiciones de cielo con presencia de nubes. Los errores más significativos se presentan en la primera temporada de lluvias de la región, entre marzo, abril y mayo, en donde el error cuadrático medio supera valores de 250 W/m^2 . El producto sobreestima principalmente valores por debajo de 300 W/m^2 y subestima mediciones que se encuentren por encima de 900 W/m^2 . Respecto a las fluctuaciones se encuentra que el satélite no reproduce adecuadamente las variaciones del recurso solar. Tanto los valores atípicos de irradiancia solar como el signo de estas fluctuaciones capturadas por el sensor torre SIATA son pobremente representados por el satélite GOES. En cuanto a las correlaciones de anomalías diarias entre GOES y SIATA se encuentra que la correlación más alta se registra en febrero ($R=0.49$) y la más baja en junio ($R=0.07$). Sin embargo, el análisis de las correlaciones horarias indica que estas son menores para la primera temporada de lluvias que para la segunda temporada de lluvias de la ciudad. El desempeño del satélite mejora en áreas de extensas planicies como el Caribe, la Orinoquía y los valles interandinos, en donde las condiciones climáticas no son muy variables a lo largo del año y empeora en el Pacífico colombiano y la Amazonía, zonas conocidas por su alta nubosidad. Ampliar el periodo de estudio y la red de mediciones de superficie podría ser el camino para realizar una validación más rigurosa de productos satelitales y conocer mejor las potenciales bondades de ABI L2 + DSR.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi padres, hermanos y amigos por el apoyo recibido, el amor y la paciencia con la me impulsaron a creer en mis capacidades y por el interés que cada día demostraban por mi avance y desarrollo de este trabajo. Además, agradezco enormemente a mi asesor de trabajo, John Alejandro Martínez, por ser mi guía de apoyo, por sus consejos, preocupación y por todos los conocimientos que he adquirido a su lado y que me han ayudado no solo a culminar este trabajo de grado sino también a forjarme como profesional.

Contenido

1	Introducción	6
1.1	Objetivo General	9
1.2	Objetivos Específicos	9
1.3	Marco Teórico	10
2	Datos y Métodos	13
2.1	Área de estudio.	13
2.2	Piranómetro SIATA.	15
2.3	Producto ABI L2 + DSR de GOES-East.....	17
2.4	Procesamiento y validación de los datos.	18
2.4.1	Series de tiempo y Anomalías.	18
2.4.2	Ciclo diurno y horas solares pico	19
2.4.3	Métricas de error.....	19
2.5	Atlas de irradiación solar de Colombia.	21
3	Resultados y análisis	23
3.1	Ciclo anual de irradiancia solar	23
3.1.1	Serie de tiempo mensual de irradiancia solar	23
3.1.2	Validación de datos mensuales de irradiancia solar.	25
3.2	Escala diaria de la irradiancia solar.....	26
3.2.1	Serie de tiempo diaria de irradiancia solar	26
3.2.2	Validación de datos diarios de irradiancia solar.	30
3.2.3	Anomalías diarias de irradiancia solar.....	33
3.2.4	Coefficiente de correlación de Pearson	36
3.3	Serie horaria de la irradiancia solar.	37
3.3.1	Distribución de la irradiancia horaria.....	37
3.3.2	Ciclo diurno de irradiancia solar.....	40
3.3.3	Validación de datos horarios de irradiancia solar.....	43
3.3.4	Anomalías horarias de irradiancia solar	46
3.3.5	Coefficiente de correlación de Pearson.	48
3.4	Atlas de irradiación solar de Colombia.	50
3.4.1	Distribución espacial y temporal de la irradiación solar en Colombia suministrada por IDEAM	50
3.4.2	Generación de energía solar en Colombia.....	52
3.4.3	Distribución espacial y temporal de la irradiación solar en Colombia suministrada por GOES-East.	52
4	Conclusiones	62
5	Referencias bibliográficas	64
6	ANEXOS	67

1 Introducción

El 51% del territorio colombiano está categorizado como zonas no interconectadas (ZNI) (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). Es decir, zonas que no tienen acceso a la energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional; principalmente debido a que su posición geográfica es alejada de los centros urbanos, lo que conlleva a un difícil acceso a la infraestructura necesaria para brindar el servicio de energía las 24 horas del día (Gómez, 2011). Según el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE) “hay 1.710 localidades rurales en Colombia en donde se calcula que 128.587 personas solo acceden al servicio de energía eléctrica entre cuatro y doce horas al día”. El mantenimiento de las plantas de energía con aceite combustible para motores (ACPM) resulta ineficiente para los municipios debido a los altos costos asociados principalmente con el transporte y a las grandes cantidades de combustible necesarias para brindar el servicio.

La energía solar constituye la principal fuente, y la más apropiada, para el desarrollo de sistemas de autogeneración en sectores como el residencial, comercial, público e industrial (UPME, 2015). Para el caso del país, varias acciones legales se han llevado a cabo con el fin de impulsar la implementación de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable¹ (FNCER), como la ley 697 de 2001 la cual establece la voluntad del estado colombiano de promover el desarrollo de las FNCER en las ZNI; la ley 1715 de 2014 “por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”; y el Programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales (PROURE) establecido por el Ministerio de Minas y Energía a través de la adopción del Plan de acción indicativo 2010-2015, con el cual se proponen metas de participación de las FNCER en las ZNI del 20% para el año 2015 y del 30% para el año 2020, dando como primeros resultados una participación del 10,8% de las FNCER en las ZNI para el año 2014.

Colombia, ubicada entre los 4°S y los 13°N pertenece a la región tropical, la cual tiene la particularidad de disponer de los mayores valores promedio de radiación solar que recibe el planeta (IDEAM & UNAL, 2018). El parámetro más importante en la evaluación del potencial de energía solar en una región es la irradiancia solar, definida como la cantidad de energía que proviene del sol y llega a un área en un determinado tiempo (Liou, 2002). Varias fuentes de información indican que el país cuenta con una irradiancia promedio de 4,5 kWh/m²/d (IDEAM, 2005), valor que supera el promedio mundial (3,9 kWh/m²/d)

¹ De acuerdo con las definiciones establecidas por la Ley 1715 de 2014, las FNCER son aquellos recursos de energía disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la energía eólica, solar, geotérmica y los mares.

y el promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m²/d), considerado el país con el mayor uso de energía solar fotovoltaica a nivel mundial (UPME, 2015).

A medida que la radiación solar atraviesa la atmósfera interactúa con gases y aerosoles dando lugar a procesos de dispersión y absorción que contribuyen con la atenuación de ésta (Wallace & Hobbs, 2006), estos procesos determinan la irradiancia solar que llega finalmente a la superficie. Si el cielo no está despejado, una parte sustancial de la energía se pierde a través de la atmósfera debido a la presencia de las nubes. Al estar en la zona tropical, el territorio colombiano se encuentra en el área de influencia de la ZCIT (zona de convergencia intertropical), definida como "una estrecha banda zonal de vigorosa convección" en donde la cantidad de nubosidad y precipitación es máxima (Leon, Zea, & Eslava, 2000).

Una de las barreras que tiene el país en cuanto a la cuantificación del recurso solar es la ausencia de información respecto a la disponibilidad del mismo (UPME, 2015). Esta información, si bien puede ser obtenida de algunas estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y de algunas entidades de carácter regional (Cenicafé, Cenicaña, Fedearroz y las Corporaciones Autónomas Regionales), su cubrimiento espacio-temporal es deficiente para representar y explicar adecuadamente las variaciones geográficas de la irradiancia solar (Polo, Zarzalejo, & Ramírez, 2008). La estimación de ésta mediante datos de estaciones próximas únicamente es válida si se trata de un terreno llano y la distancia entre estaciones es menor a 10 km. En caso de terrenos complejos o distancias superiores, el estudio de estos datos para cuantificar la radiación solar incidente puede resultar completamente inadecuados (Zarzalejo, Ramírez, Polo, Martín, & Espinar, 2006).

Las imágenes satelitales, por otro lado, pueden suplir algunas de las carencias que tienen las mediciones en tierra. Zelenka, Perez, Seals, & Renné (1999) han demostrado que la irradiancia horaria derivada de los satélites es más precisa que la interpolación de los datos de estaciones superficiales con más de 25 km de distancia entre ellas, por lo tanto, pueden tener una mejor representación espacio-temporal. La capacidad para delinear con precisión las variaciones de la atmósfera entre las ubicaciones vecinas puede no ser exacta pero su capacidad para caracterizar la distribución espacial de la radiación solar está ampliamente aceptada como la herramienta más útil para este fin (Perez et al., 2002; Zarzalejo et al., 2006).

Los satélites geoestacionarios como GOES están posicionados sobre el ecuador, rotan alrededor de la tierra a la misma velocidad de ésta y, por lo tanto, recolectan imágenes y datos de la misma porción de tierra todo el tiempo. Su resolución espacial y temporal puede llegar a ser de 1km y 15 minutos respectivamente y debido a que están ubicados a 36000 km sobre el ecuador, la resolución espacial disminuye a medida que aumenta la latitud (60-70 grados norte o sur) (Polo et al., 2008).

En particular el satélite GOES-16, hace parte de la serie de los 4 satélites de última generación GOES-R que serán puestos en órbita de aquí al 2030 por la NASA en colaboración de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Lanzado en 2016, GOES-16 es el primer satélite meteorológico de esta generación que entra en operación y que envía imágenes continuas del hemisferio occidental de la Tierra. Su posición alrededor de 75.2° W, le proporciona un cubrimiento de los Estados Unidos, Centro América, Sur América, los océanos Atlántico y Pacífico y el sur de Canadá (Mandt, 2015). Desde 2017, GOES-16 es operacionalmente el nuevo GOES-East, el cual proporciona imágenes de alta resolución espacial y temporal utilizando el instrumento a bordo ABI (Advanced Baseline Imager). ABI recupera datos que describen la composición de la atmósfera y las propiedades de albedo terrestre, para ser utilizados por un algoritmo que finalmente calcula la radiación de onda corta en superficie o DSR, por sus siglas en inglés (NOAA, 2012). El producto resultante se puede encontrar en las bases de datos de NOAA como ABI L2+DSR. En este estudio se busca analizar los datos de irradiancia solar del año 2018 derivados del satélite geoestacionario GOES-16 (i.e. el nuevo GOES-East) comparándolos con mediciones en tierra disponibles para la ciudad de Medellín-Colombia. Esto se realizará mediante la aplicación de métricas de cálculo de error (error de sesgo medio, el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación las cuales darán un panorama de qué tan alejados se encuentran los datos satelitales de la radiación solar que llega a la superficie medida in situ. Si los datos descargados del satélite representan adecuadamente la irradiancia obtenida por las mediciones piranómetro en el área de estudio, entonces los análisis de los campos de irradiancia presentados en este estudio podría ser una herramienta para el futuro análisis del potencial energético en regiones de Colombia donde no hay una red de mediciones en superficie disponible y donde los estudios de potencial energético solar son limitados (Pillot, Muselli, Poggi, & Dias, 2015).

1.1 Objetivo General

Validar los datos generados por el satélite GOES-East con mediciones superficiales de irradiancia solar en Medellín-Colombia, buscando generar información relevante del recurso para el sector energético del país.

1.2 Objetivos Específicos

- Descargar y procesar los datos de irradiancia solar derivados del satélite GOES-East.
- Descargar y procesar los datos de irradiancia solar observados (SIATA) para el área de Medellín, Colombia.
- Comparar los datos de GOES-East con los datos en superficie en términos de tres métricas para el cálculo de errores: Mean Bias Error (MBE), Root Mean Squared Error (RMSE) y Coeficiente de Correlación(R).
- Realizar mapas de irradiación solar a partir de los datos satelitales del GOES-East para Colombia.

1.3 Marco Teórico

La radiación electromagnética es el proceso responsable de la transferencia de energía por medio de ondas electromagnéticas las cuales viajan a la velocidad de la luz (Liou, 2002). En el caso del sistema tierra-atmósfera hay dos cuerpos radiantes que intervienen en la transferencia de energía, el Sol y la superficie de la Tierra. La radiación electromagnética está compuesta por diferentes tipos de ondas electromagnéticas conocidas como espectro electromagnético, el cual se encuentra dividido en dos grandes grupos: radiación de onda corta (cuya longitud de onda es menor a $4 \mu\text{m}$) y radiación de onda larga (cuya longitud de onda es mayor a $4 \mu\text{m}$). La primera es asociada con la energía emitida por el Sol, como los rayos X, los rayos gama, la radiación ultravioleta, la luz visible e infrarrojo cercano (esta última, con un rango de longitudes de onda que se extiende desde 0.7 a $3.5 \mu\text{m}$); y las segundas, asociadas a la radiación emitida por la Tierra, como el infrarrojo y la microonda (Wallace & Hobbs, 2006).

La radiación que llega al tope de la atmósfera es una cantidad relativamente constante en el tiempo, pero la radiación que alcanza la superficie terrestre está condicionada por varios procesos (Badescu, 2018). A medida que ésta atraviesa la atmósfera, los fotones del haz de luz interactúan con gases y aerosoles, dando como resultado procesos de dispersión y de absorción. Las propiedades de absorción y retrodispersión de las nubes y de los gases atmosféricos reducen considerablemente la cantidad de radiación de onda corta que incide en la superficie terrestre. A esta energía incidente dividida por la unidad de tiempo y la unidad de área, se le conoce como irradiancia solar y se mide en W/m^2 (UCAR/COMET, s.f). Las nubes gruesas pueden reflejar hasta un 70% de la radiación solar y absorber hasta un 20% adicional, mientras que en los días despejados estos procesos podrían extinguir alrededor del 25% de la radiación solar incidente total (Shuttleworth, 2012).

Al ser uno de los componentes del balance de energía en la superficie, el estudio y conocimiento de la irradiancia solar es importante para un amplio rango de aplicaciones. En ciencias como la meteorología, se utiliza para correr modelos de predicción climática, modelos de circulación oceánica y demás estudios climáticos; en las ciencias agrícolas es utilizada para el modelado de cultivos, el cálculo de la evapotranspiración, irrigación y requerimiento de agua de los mismos; en hidrología se utiliza para el análisis de cuencas hidrográficas lo cual es importante para determinar riesgos de inundación y monitoreo de presas; también se usa para la investigación de cáncer de piel, el diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica y los sistemas de calefacción y enfriamiento (GOES & NASA, s.f).

Para el estudio de la irradiancia y el posterior aprovechamiento de la energía solar como recurso, se han desarrollado diferentes métodos e instrumentos. La radiación solar que alcanza la superficie terrestre tiene dos componentes: DNI

o irradiancia normal directa, que es aquella que no sufre ninguna interacción con la atmósfera, y la irradiancia difusa que se define como aquella que alcanza la superficie luego de sufrir procesos de dispersión. La suma de ambas componentes es lo que se denomina como irradiancia global o irradiancia total. Instrumentos que conforman las redes de medición en la superficie como piranómetros y actinógrafos miden la irradiancia global, mientras que otros, como los pirheliómetros, miden la DNI (Calvo, Morales, & Polo, 2018).

La necesidad de tener datos de irradiancia solar con mejor precisión espacio-temporal y el difícil mantenimiento de las redes de medición en la superficie, han llevado a desarrollar métodos y modelos para la estimación de las componentes de la irradiación solar, los cuales se alimentan de mediciones hechas por satélites meteorológicos. Éstos satélites observan y monitorean la tierra de manera continua, otorgan datos sobre las condiciones de la atmósfera y son capaces de captar el movimiento de las nubes, la aparición de incendios, huracanes y demás fenómenos del sistema terrestre. Esta información es utilizada en la comunidad científica como entrada no solo para correr modelos de transferencia radiativa o modelos de balance de energía, sino también modelos de circulación general, regional, entre otros (Calvo et al., 2018). El satélite geoestacionario GOES-East junto con su instrumento a bordo ABI, es capaz de recolectar información de la composición de la atmósfera a través de 16 bandas espectrales de longitudes de onda visible e infrarroja. Esta información junto con el albedo de la superficie, la profundidad óptica y altura de las nubes y la profundidad óptica de los aerosoles es utilizada por el algoritmo ABI Shortwave Radiation Budget (SRB) para calcular el Downward Shortwave Radiation (DSR), que incluye las componentes directa y difusa de la irradiancia solar y entrega el producto en unidades de W/m^2 . Cuando estos datos no se pueden recuperar por ABI SRB, el algoritmo utiliza una ruta indirecta para calcular el DSR y llenar los datos faltantes (NOAA, 2012). El producto del algoritmo (ABI L2+DSR) fue revisado en octubre de 2018 por el Panel de Validación y Revisión del Producto (PS-PVR), el cual declaró los datos generados por el satélite en "madurez provisional". Esto supone que hay errores y anomalías en el producto final del algoritmo por lo que las mejoras a éste aún se están realizando y se hace necesario inspeccionar los datos antes de usarlos. Aun así, el producto está listo para su uso operacional.

En cuanto al panorama mundial, países como Alemania son pioneros en el estudio y utilización del recurso solar para la generación de energía eléctrica. El Servicio Meteorológico Alemán (Deutscher Wetterdienst), ofrece a público mapas de 1 kilómetro de resolución de DSR mensual en KWh/m^2 para todo Alemania calculados a partir de datos satelitales y mediciones en superficie. La exactitud de estos mapas se determina mediante la comparación de los datos satelitales con las mediciones en superficie y ha dado como resultado una exactitud cercana a $5 W/m^2$ para los promedios mensuales (Deutscher

Wetterdienst, s,f). La fuerte inversión en investigación y desarrollo del recurso solar hace de Alemania uno de los 7 países líderes en capacidad de generación de energía solar (REN 21, 2016). Según el instituto de investigación alemán Fraunhofer ISE, "las plantas fotovoltaicas alemanas suministraron aproximadamente 45.7 TWh a la red pública en 2018", esto significa que la energía solar representa un 8,4% de la matriz energética del país.

Para el caso de Colombia varios avances se han hecho en el campo de las energías renovables; desde la adopción de políticas para la integración de estas energías a la matriz energética del país, hasta la construcción en el 2017 del Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono a partir de 240 sensores (piranómetros y actinógrafos), los cuales se encuentran en su mayoría en la región andina del país, por lo que para las demás regiones la precisión está condicionada por la distancia que hay entre las estaciones y el mantenimiento que se les realiza (IDEAM & UPME, 2017). Colombia es un país que tiene gran oferta del recurso debido a su ubicación geográfica y astronómica, pero la disponibilidad del mismo se ve obstaculizado por el acceso limitado a la infraestructura y al conocimiento necesario para el aprovechamiento eficiente de éste.

En este orden de ideas, el estudio de productos satelitales para Colombia abre una brecha de oportunidades para la investigación del recurso solar como variable asociada al comportamiento de la dinámica atmosférica, al desarrollo de cultivos agrícolas, como información para que las entidades de salud puedan mejorar sus programas de prevención asociados a los efectos nocivos de la exposición a la radiación solar, y como aporte al desarrollo del sector energético del país pues es importante la cuantificación del recurso en todas la regiones en donde la disponibilidad de sensores en superficie es limitada y donde urge dar soluciones energéticas a la población. El análisis de datos satelitales presenta grandes ventajas en cuanto a la reducción de errores que aparecen al analizar el comportamiento de los datos en superficie (Suárez, 2013). Así, este trabajo pretende contribuir al conocimiento de estos productos satelitales por medio de la validación de los mismos frente al sensor de superficie ubicado en la ciudad Medellín- Colombia.

2 Datos y Métodos

2.1 Área de estudio.

Para realizar la validación del producto ABI L2+DSR proveniente del satélite GOES-East, se utilizó el dominio de interés presentado en la **Figura 2.1**, el cual está comprendido entre los 82°W, 64°W y 15°N, 5°S; en donde se encuentra ubicada geográficamente Colombia y abarca una porción de los océanos Atlántico y Pacífico. Además, en la Figura 2-1 se encuentra remarcado dentro de un cuadro negro la ubicación de Medellín-Colombia, que para este

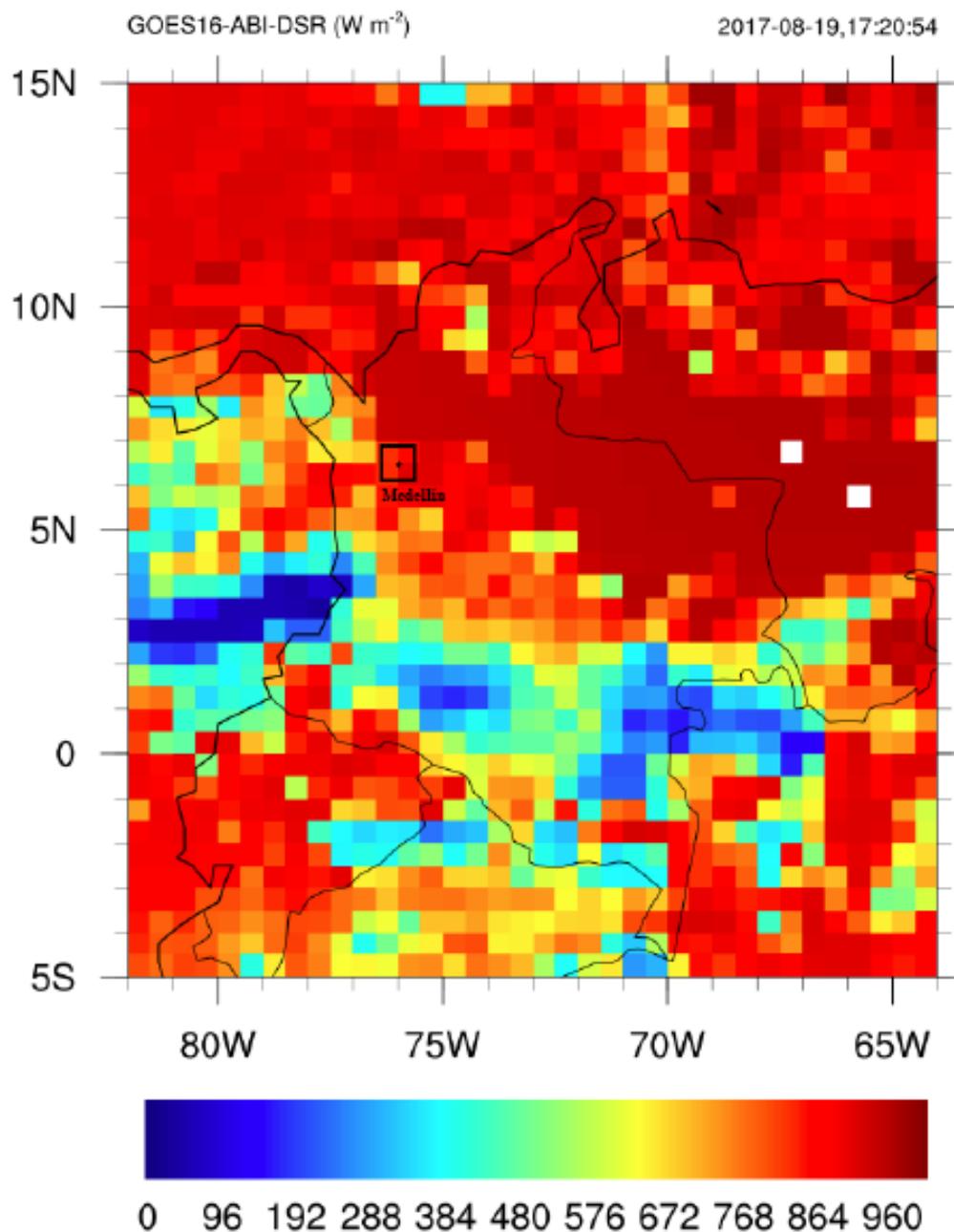


Figura 2.1. Dominio espacial con valores del estimado de irradiación solar (W/m^2) producido por GOES-16, para el 19 de agosto de 2017. En el recuadro interno se encuentra Medellín-Colombia.

trabajo constituye el área en donde se realizó la validación y estudio de los datos utilizados.

Como se mencionó en la Sección 1, Colombia se encuentra ubicada en la región ecuatorial bajo la influencia de la zona de convergencia intertropical ZCIT. Esta particular ubicación determina el clima y el tiempo del país, así como la cantidad de radiación que alcanza la superficie. La ZCIT tiene una influencia directa sobre el favorecimiento de la precipitación y el fortalecimiento de los vientos y chorros de bajo nivel, definidos como corrientes de aire con altas velocidades que transportan grandes cantidades de humedad. Así como también influye sobre el ascenso de vientos húmedos y posteriormente sobre el desarrollo de mecanismos de convección profunda y alta nubosidad. El comportamiento de la precipitación a lo largo del país tiene un característico patrón de distribución bimodal sobre la región Andina, con dos temporadas de lluvia y dos temporadas secas, un patrón monomodal sobre la Orinoquía y la Amazonía, y un patrón de precipitación constante sobre el Pacífico norte y central (Poveda, 2004). La influencia de la ZCIT, la orografía y el régimen de vientos que actúan sobre Colombia también generan zonas cuyo ambiente atmosférico es más propicio para la formación de sistemas convectivos de mesoescala SCM, es decir, "conjuntos organizados de tormentas que producen precipitación, con escalas espaciales del orden de 100 km en la horizontal" (Velasco y Fritsch, 1987). La costa pacífica colombiana, la región amazónica, el valle del río Magdalena y el norte de Antioquia son zonas en donde se presenta mayor cantidad de SCM, por el contrario, el norte de Colombia y las cordilleras de los Andes son zonas en donde se presenta menor ocurrencia de estos eventos (Poveda et al, 2004)

En cuanto a la ciudad Medellín, ubicada en la región andina, más específicamente en el departamento de Antioquia, es uno de los diez municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. La ciudad cuenta con un régimen bimodal de precipitación en donde la

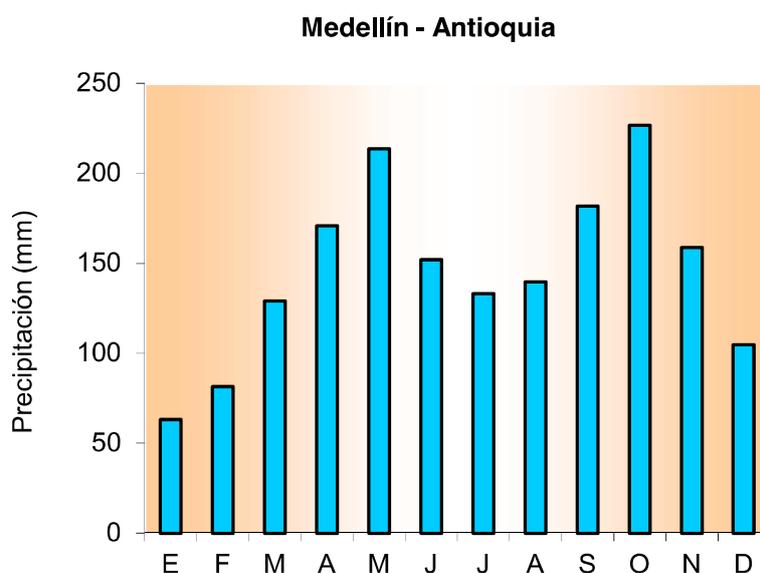


Figura 2-2. Ciclo anual de precipitación para Medellín-Colombia. Tomado de atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html.

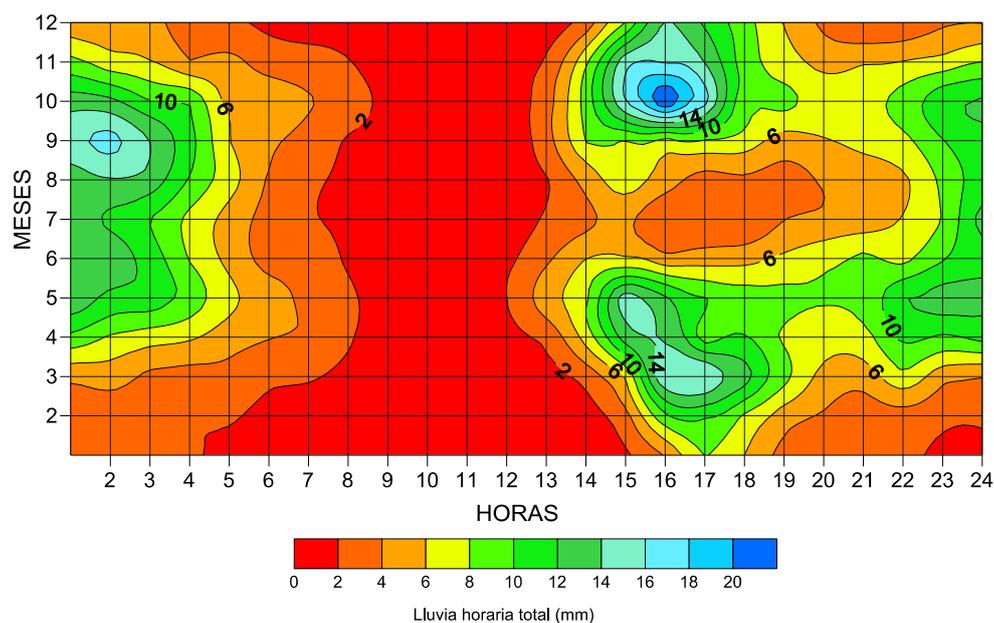


Figura 2.3. Variabilidad mensual del ciclo diario de precipitación multianual para Medellín-Colombia. Tomado de atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html

precipitación se reparte en dos temporadas secas y dos lluviosas. Las temporadas de lluvia se presentan desde finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre (ver **Figura 2.2**). El ciclo diario de precipitación para la ciudad indica que hay mayor ocurrencia de lluvias en las horas de la tarde, al anochecer y al amanecer (ver **Figura 2.3**). Según IDEAM (s.f), el sol brilla 4 horas diarias en los meses más lluviosos y 6 horas diarias en los meses más secos.

El dominio de interés y el área de estudio mostrados en la **Figura 2.1**, se utilizaron para realizar los mapas de irradiación solar para Colombia y la validación *in situ* respectivamente.

2.2 Piranómetro SIATA.

Un piranómetro con datos *in situ* de irradiancia solar se seleccionó (bajo las consideraciones hechas por Urrego, (2019)), de la red de sensores del SIATA (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá) para la validación del producto ABI L2+DSR.

Los piranómetros de SIATA miden la irradiancia global con una precisión de 1 W/m^2 y cuentan con mediciones desde marzo 9 de 2016 hasta la fecha. El piranómetro seleccionado Torre SIATA se encuentra localizado a 6.2595° latitud y 75.887° longitud en Medellín, Colombia (ver **Figura 2.2**). Dentro de las consideraciones tomadas en cuenta para la selección de un único piranómetro en tierra se encuentra la mejor representatividad temporal frente a los demás dispositivos que conforman la red de medición.

El año seleccionado para este trabajo fue el 2018. Los datos se descargaron gratuitamente para este año de



Figura 2-4. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. El círculo corresponde a la estación Torre SIATA. Imagen tomada de: https://siata.gov.co/siata_nuevo/index.php/mapa.

https://siata.gov.co/descarga_siata/index.php/Index2/, se pueden descargar en formato CSV y NetCDF y tienen una resolución temporal de 1 minuto por lo que suministran suficiente información sobre la variabilidad horaria, diaria y mensual del año seleccionado.

El preprocesamiento de los datos se realizó mediante la herramienta de computación Python. Se contabilizaron el número de datos faltantes para el periodo de estudio como se muestra en la **Tabla 2.1**, donde se aprecia que el 4% de los datos totales son datos faltantes. Este porcentaje es el conteo de los datos que fueron usados para la validación, es decir, los datos que faltan entre las ocho de la mañana y las cuatro de la tarde.

Dado que la resolución temporal de las mediciones de sensor torre SIATA (1 minuto) es diferente a la resolución del conjunto de datos obtenidos de GOES-East (1 hora), se transformaron para que ambos conjuntos de datos puedan ser comparados. Para esto, se tomó en cuenta el periodo de observación del algoritmo ABI Shortwave Radiation Budget que recoge datos por los primeros 10 minutos de cada hora y arroja un valor promedio final, así se promediaron los 10 primeros minutos de cada hora para las mediciones de SIATA, siendo este el nuevo valor de irradiancia global horaria con el que se compararía con GOES.

Total de datos	Valores Faltantes	Porcentaje de valores faltantes
175,568	7,382	4%

Tabla 2.1. Resultado del conteo de valores faltantes para el conjunto de datos de SIATA con resolución temporal de 1 minuto.

2.3 Producto ABI L2 + DSR de GOES-East.

El conjunto de datos provenientes del algoritmo ABI SRB para el año 2018 se descargaron gratuitamente en <https://www.bou.class.noaa.gov>. Los datos se encuentran en formato NetCDF a una resolución espacial y temporal de 50 km y 1 hora respectivamente para la escena Full Disk que cubre Sur América, gran parte de Norte América y los océanos Atlántico y Pacífico (ver **Figura 2.5**). Sin embargo, el producto cuenta mayormente con mediciones entre las 8:00 AM y las 4:00 PM para las coordenadas del sensor en tierra. El producto además incluye información de la calidad de los datos con indicaciones de buena calidad, calidad degradada o inválidos y tiene mediciones a partir del 23 de junio de 2017 hasta la fecha (NOAA, 2018), razón por la cual en este trabajo sólo se realizó la validación para el año 2018, pues era el periodo de tiempo que contaba con mayor cantidad de mediciones.

El preprocesamiento de este conjunto de datos se llevó a cabo usando herramientas computacionales como Python, NCAR Command Language (NCL) y Climate Data Operators (CDO).

El conteo de los archivos faltantes se realizó con Python. Como se muestra en la **Tabla 2-2**, para el año 2018 se encuentran disponible casi la totalidad de los datos, sin embargo, este porcentaje solo representa las mediciones faltantes entre las 8:00 AM y las 4:00 PM. Los datos se descargaron con fecha y hora en formato Coordinated Universal Time (UTC), se utilizó NCL para convertir este formato a hora local Colombia (UTC-5 horas). Para esto, se extrajo la fecha y hora del nombre de cada archivo y se creó un nuevo arreglo con la hora

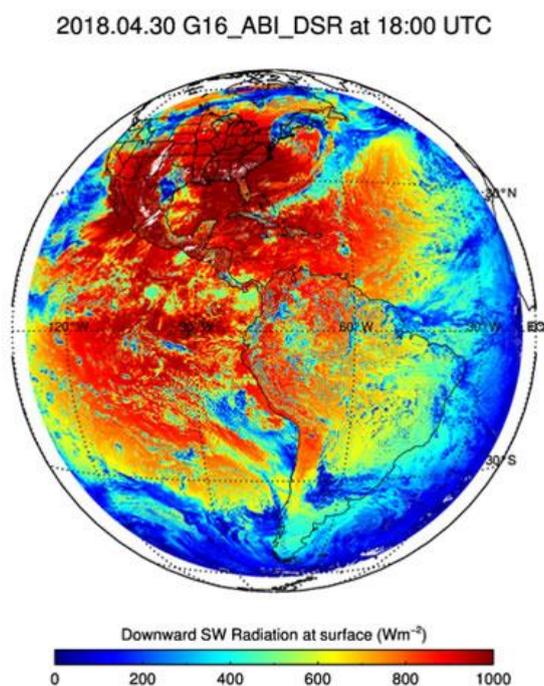


Figura 2.5. Escena Full Disk a partir de datos del producto DSR de GOES-East. Imagen tomada de <https://www.goes-r.gov/products/baseline-DSR.html>

Total de datos	Valores Faltantes	Porcentaje de valores faltantes
8,617	144	2%

Tabla 2-2. Resultado del conteo de datos faltantes para el conjunto de datos del algoritmo ABI SRB de GOES-East, con resolución temporal de 1 hora.

corregida. Esto se hizo debido a que la variable "time" de algunos archivos presentaba valores faltantes (-9999).

Se extrajo la variable DSR de cada archivo, se corrigieron algunos valores negativos de DSR añadiendo el valor 65536, de acuerdo a las recomendaciones del Dr. Istvan Laszlo, desarrollador del algoritmo ABI SRB (I. Laszlo, vía correo electrónico, 18 de junio de 2019). Se empaquetaron los datos mediante NCL y CDO en dos archivos formato NetCDF, uno para el dominio de estudio y otro para las coordenadas exactas del sensor en tierra Torre SIATA.

2.4 Procesamiento y validación de los datos.

El procesamiento de los datos se hizo mediante Python utilizando librerías como Pandas, Datetime, Numpy y Matplotlib. Los cálculos se realizaron utilizando la herramienta DataFrame de Pandas. Dado que en las primeras horas de la mañana y en las últimas horas de la tarde, la cantidad de irradiancia global horizontal disminuye considerablemente debido a la disminución del ángulo de incidencia de la radiación, y dado que el conjunto de datos GOES tiene mediciones entre las 8:00 y las 16:00. Se utilizó este rango de horas para realizar la comparación de ambas series de tiempo y posteriormente la validación de las mismas. Los resultados se presentan para cada mes por separado.

2.4.1 Series de tiempo y Anomalías.

Para realizar las series de tiempo horarias se emplearon los datos del producto ABI L2+DSR para las coordenadas anteriormente indicadas y luego se compararon directamente con las mediciones del sensor en tierra Torre SIATA en intervalos de tiempo de una hora. En el caso de la serie diaria y del ciclo anual, se promediaron los valores de irradiancia para cada día y para mes respectivamente. Estas series de tiempo sirven para estudiar la variabilidad horaria y en escala de días de la irradiancia global tanto para los resultados del algoritmo ABI SRB de GOES como para las mediciones del sensor Torre SIATA. Además, se realizaron histogramas de frecuencia a partir de los datos horarios con el fin de analizar el rango de valores de irradiancia que el algoritmo es capaz de representar en comparación con los valores de irradiancia solar que mide el sensor.

Se calcularon las anomalías de la serie horaria y la serie diaria con el fin de analizar los valores que se salen del promedio a largo plazo, es decir, valores atípicos. Para el cálculo de éstas anomalías se extrajo el valor promedio de cada serie a los valores diarios y horarios.

2.4.2 Ciclo diurno y horas solares pico

El ciclo diurno representa el patrón de variabilidad promedio de la irradiancia global durante el día. El estudio de este sirve para caracterizar las horas del día que en promedio tienen una irradiancia mayor o menor. El ciclo diurno es ampliamente utilizado en el sector energético con el fin de caracterizar las horas en las que un panel solar o celda fotovoltaica va a obtener el rendimiento máximo de generación de energía.

Para determinar la energía que puede producir diariamente un panel solar en una localidad determinada se usa el concepto de Horas Solares Pico (HSP). Una HSP es la energía total incidente sobre una superficie de un 1 m^2 con una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m^2 y tiene unidades de Wh/m^2 . Así, el cálculo de HSP da un estimado del número de horas al día en las que una celda fotovoltaica proporcionaría su potencia pico.

En este trabajo se calculó el ciclo diurno y las horas solares pico para la serie de tiempo de GOES y se comparó con la serie de tiempo de SIATA.

2.4.3 Métricas de error

La calidad del algoritmo ABI SRB se evalúa comparando los datos del producto ABI L2 +DSR con las mediciones del sensor en tierra. En este trabajo basamos la comparación estadística en tres diferentes pasos de tiempo: horario, diario y mensual, teniendo así una evolución temporal del error que permite analizar con mayor detalle el comportamiento del producto del satélite. Se utilizaron tres métricas para el cálculo de error muy conocidas en la evaluación de pronósticos de energía solar, mean bias error (MBE), root mean square error (RMSE) y el coeficiente de correlación(R).

2.4.3.1 Mean Bias Error (MBE).

El error de sesgo medio se define como la media de los valores de GOES menos la media de los valores observados (SIATA). De modo que un sesgo positivo representa sobreestimaciones de las observaciones medias y de modo inverso, un sesgo negativo equivale a una subestimación de las mismas.

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

Los valores de MBE fueron normalizados mediante el promedio de los valores medidos por el sensor de SIATA para cada mes.

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

2.4.3.2 Root Mean Square Error (RMSE).

El error cuadrático medio es la raíz de las diferencias cuadráticas entre los valores medidos y los valores estimados por el algoritmo ABI SRB de GOES. Esta medida es de uso frecuente para evaluar la precisión de pronósticos y por lo tanto también es útil para cuantificar la precisión de las estimaciones del satélite. El RMSE da mayor peso a los grandes errores debido a que los errores se cuadraron antes de promediar. Esto es idóneo en la evaluación del recurso solar y la validación de productos como ABI L2+DSR pues permite ver más claramente los cambios repentinos de la radiación durante toda la serie de tiempo evaluada.

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

El RMSE también fue normalizado

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

Los errores anteriormente mencionados se aplicaron para evaluar la precisión del producto en las series de tiempo horaria, diaria, el ciclo anual y el ciclo diurno. Así se estudia el desempeño de éste para la representación de la variabilidad en diferentes escalas de tiempo.

2.4.3.3 Coeficiente de correlación de Pearson (r)

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que mide el grado de covariación de dos variables, es decir, mide la dependencia entre el valor estimado y el valor medido, y se obtiene dividiendo la covarianza de las dos variables por el producto de sus desviaciones estándar.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{\text{GOES},i} - \bar{I}_{\text{GOES}})(I_{\text{SIATA},i} - \bar{I}_{\text{SIATA}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I_{\text{GOES},i} - \bar{I}_{\text{GOES}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_{\text{SIATA},i} - \bar{I}_{\text{SIATA}})^2}} \quad \text{Ec. 5}$$

Los valores del coeficiente de correlación de Pearson varían entre $-1 < r < +1$, en donde la magnitud de la relación está indicada por el valor numérico del coeficiente y el signo indica la dirección de la relación. En este sentido, una relación de +1 o de -1 indica una correlación perfecta positiva y negativa respectivamente. Así mismo, un coeficiente de correlación cercano a cero es indeseable en este trabajo pues indica que no hay una covariación

entre los valores de irradiancia solar estimados por GOES y los observados por SIATA.

En este trabajo se aplicó el coeficiente de correlación a las anomalías mencionadas anteriormente (ver Sección 2.4.1) para analizar la capacidad del algoritmo ABI SBR de representar los valores atípicos de radiación en diferentes escalas de tiempo.

2.5 Atlas de irradiación solar de Colombia.

Tener una visión más amplia del conjunto de datos ABI L2 + DSR de GOES-East es uno de los objetivos de este trabajo. Para esto, se realizó el Atlas de irradiación solar de Colombia para el año 2018 y se comparó cualitativamente con el Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono publicado por el IDEAM en el año 2017. Cabe aclarar que este último, es el resultado de un análisis de datos desde 1981 hasta el 2010, y por lo tanto no incluye el período de tiempo analizado en este trabajo. Con el propósito de que esta comparación fuera más apropiada, se llevaron los datos de irradiancia solar horarios, obtenidos del satélite, a promedios diarios mensuales y promedios diarios anuales de irradiación solar mediante la utilización de CDO, pues son las unidades en las que se encuentra expresado el atlas del IDEAM. La irradiancia solar, como se ha explicado anteriormente, es la cantidad de radiación que llega a un área en un determinado momento, por lo tanto, es un flujo instantáneo medido en W/m^2 . La irradiación solar, es la energía recibida en una superficie a lo largo de un tiempo determinado y se expresa en Wh/m^2 . El proceso de realización de los mapas mensuales y del mapa anual de irradiación solar requirió de la utilización de NCL para extraer, de los archivos escena FullDisk, los datos correspondientes a las coordenadas de Colombia, posteriormente graficarlos y darles una apariencia comparable con el atlas del IDEAM.

Se ubicaron los proyectos solares con mayor capacidad de generación energética registrados en la página de la UPME y los parques solares que ya se encuentran en operación a lo largo del país. Con esto, se seleccionaron tres departamentos, La Guajira, Cesar y Santander, y se buscaron sensores del IDEAM con buena representatividad temporal y con una distancia mínima a los proyectos localizados. Se descargaron datos de irradiancia solar del año 2018, para los municipios de Riohacha en La Guajira, El paso en el Cesar y Barrancabermeja en Santander, y se calculó el ciclo anual de irradiación solar para cada uno de ellos. Se extrajo del producto ABI L2 +DSR los datos de las coordenadas correspondientes a las ubicaciones de los sensores seleccionados IDEAM y se calculó el ciclo anual para ser comparado con el resultado del IDEAM. Además, se descargaron datos de otros dos piranómetros de SIATA, Área Metropolitana del Valle de Aburra y I.E Joaquín Vallejo. Junto con los resultados del sensor Torre SIATA se hizo un promedio de las tres estaciones y se comparó con los resultados del satélite y con datos descargados para el año 2018 del sensor IDEAM ubicado en el aeropuerto Olaya Herrera en Medellín.

Este último paso, se realizó únicamente para evaluar la proximidad de los datos satelitales GOES a las mediciones en tierra en lugares con mayor potencial energético, con un clima local y topografía propios y diferentes a los que se presentan en la ciudad de Medellín utilizada para la validación del producto satelital.

3 Resultados y análisis

3.1 Ciclo anual de irradiancia solar

3.1.1 Serie de tiempo mensual de irradiancia solar

La **Figura 3.1.1** muestra el ciclo anual de irradiancia solar producido mediante los datos del algoritmo ABI SRB para el año 2018 versus el ciclo anual calculado con los datos obtenidos por el sensor en tierra para el mismo año en la ciudad de Medellín-Colombia.

En esta figura se puede apreciar que el comportamiento de la irradiancia promedio mensual capturada por el sensor SIATA tiene un patrón muy similar al régimen bimodal de precipitación de la ciudad (ver **Figura 2.2**). Se muestra claramente dos temporadas de mayor irradiación en los meses de junio a agosto y desde enero hasta principios de marzo, y dos temporadas en donde la irradiancia disminuye en los meses marzo, abril y mayo, y septiembre, octubre y noviembre. Este patrón puede ser el resultado de mayores formaciones de sistemas convectivos en donde se reportan altos valores de precipitación mensual y como consecuencia de esto la llegada de la irradiancia a la superficie es limitada.

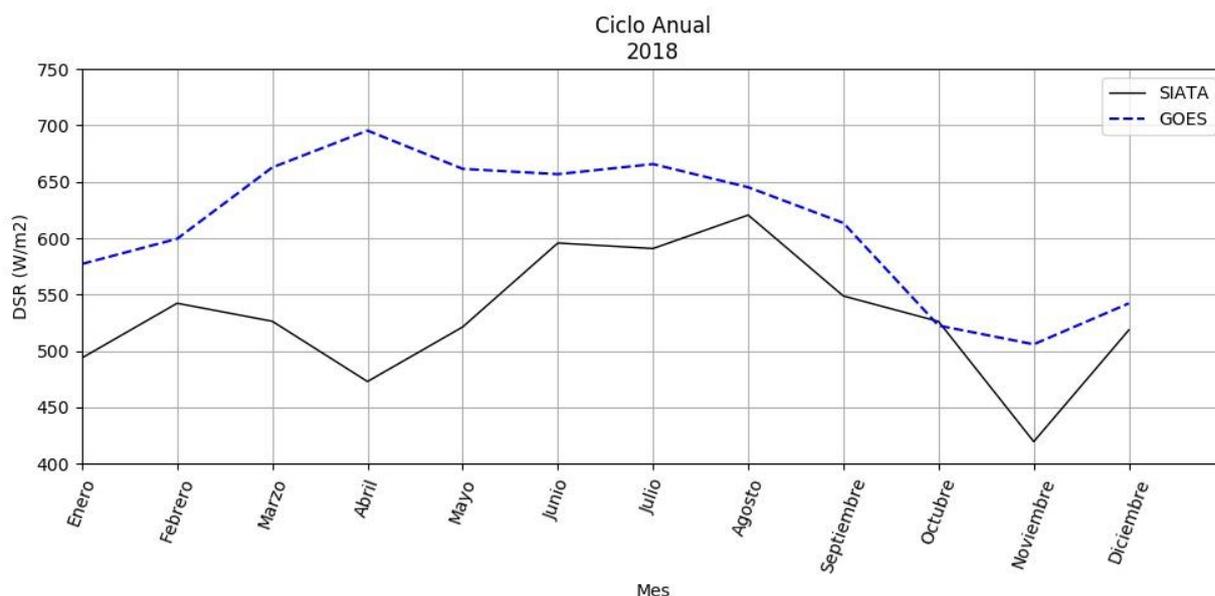


Figura 3.1.1. Ciclo anual de irradiancia solar para Medellín-Colombia durante el año 2018 a partir de mediciones del sensor Torre SIATA y de los resultados obtenidos por el algoritmo ABI SRB de GOES.

Por otro lado, el algoritmo no logra representar el patrón bimodal mencionado anteriormente, aunque a partir de junio del 2018 hasta diciembre de 2018 tiene un comportamiento que en general es similar al reportado por sensor SIATA (con aumentos de junio a agosto y disminuciones de septiembre a noviembre), los valores obtenidos para marzo, abril y mayo son mayores y no siguen el comportamiento de disminución como lo medido por SIATA.

Los meses con mayor irradiación mensual promedio en la ciudad de Medellín para el año 2018 según el sensor torre SIATA fueron: junio con 595.69 W/m², julio con 590.78 W/m² y agosto con 620.48 W/m². En contraste, los valores más altos reproducidos por GOES fueron 695.42 W/m², 661.48 W/m², 662.76 W/m² y 665.72 W/m² para los meses abril, mayo, marzo y julio respectivamente. Así mismo, los meses con menor irradiancia mensual para la ciudad reportados por SIATA fueron noviembre (419.52 W/m²), abril (472.84 W/m²) y enero (493.77 W/m²), mientras que según el algoritmo ABI SRB fueron noviembre (505.86 W/m²), octubre (522.46 W/m²) y diciembre (542.20 W/m²).

Para esta serie de tiempo, se puede apreciar que en general el algoritmo sobreestima la irradiancia promedio mensual para el año 2018, sin embargo, ABI SRB reproduce mejor la irradiancia solar en el mes de octubre que en los demás meses, con un valor de 522.46 W/m² en comparación con los 526.10 W/m² capturados por SIATA. Se calculó el sesgo porcentual como se muestra en la **Ecuación 6** para cada mes del 2018.

$$\text{Sesgo Porcentual} = \left[\frac{\bar{I}_{\text{GOES,mes}(i)} - \bar{I}_{\text{SIATA,mes}(i)}}{\bar{I}_{\text{SIATA,mes}(i)}} \right] * 100\%$$

Ec.6

Mes	Sesgo Absoluto (W/m ²)	Sesgo porcentual (%)
Enero	83.332814	16.876539
Febrero	57.209463	10.550189
Marzo	136.491213	25.935468
Abril	222.585509	47.073929
Mayo	140.253174	26.907878
Junio	61.057813	10.249799
Julio	74.93915	12.684597
Agosto	24.649616	3.972621
Septiembre	64.769136	11.804078
Octubre	3.640129	-0.691904
Noviembre	86.336599	20.579371
Diciembre	23.586471	4.547938

Tabla 3.1.1. Sesgo absoluto y porcentual del promedio mensual para el año 2018 a partir de mediciones del sensor Torre SIATA y de los resultados obtenidos por el algoritmo ABI SRB de GOES para la ciudad de Medellín.

En la **Tabla 3.1.1** se puede apreciar que para el mes de octubre el sesgo porcentual del algoritmo respecto al sensor SIATA es de $-0,6\%$. Además, meses como agosto y diciembre también tienen bajos sesgos porcentuales en comparación con meses como marzo, abril y mayo en donde el sesgo va de 25% a 47% aproximadamente.

3.1.2 Validación de datos mensuales de irradiancia solar.

La **Figura 3.1.2** presenta los resultados de la comparación estadística entre el producto DSR de GOES y las mediciones *in situ* de irradiancia para el ciclo anual del año 2018. El producto ABI L2+DSR tiene una mejor representación en los meses de junio, julio y agosto con un nRMSE de 36% , 35% y 33% respectivamente en comparación con los meses de marzo, abril y mayo con errores mayores al 50% . Además, se puede observar que el satélite sobreestima los valores de irradiancia durante todo el periodo de estudio con sobreestimaciones hasta del 47% como sucede en el mes de abril y de hasta 5% para el mes de diciembre y de 10% , 11% , y 9% para meses como junio, julio y agosto.

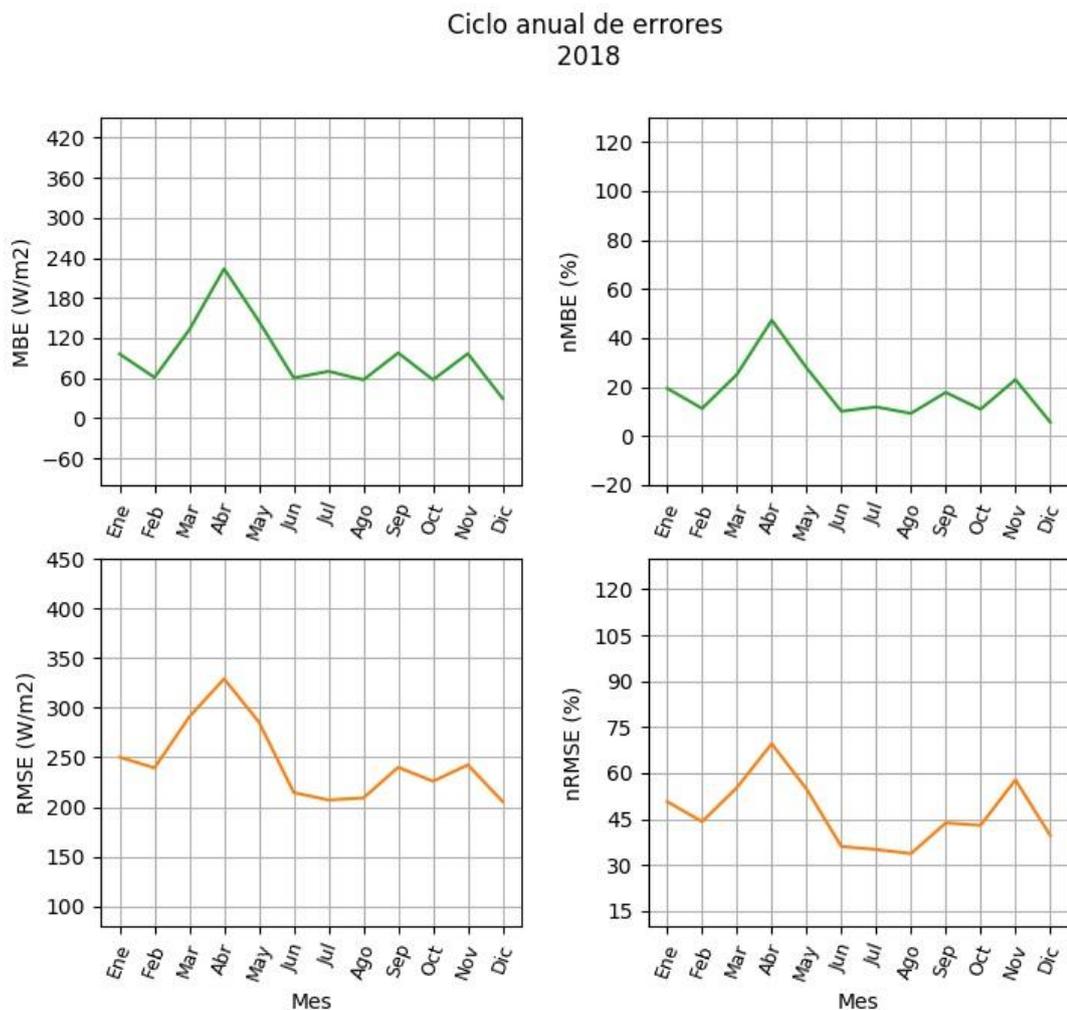


Figura 3.1.2. Evolución mensual de los errores MBE, RMSE y sus respectivos normalizados para el año 2018 en Medellín-Colombia.

Estas sobreestimaciones pueden darse porque en meses como marzo, abril y mayo aumentan las precipitaciones y por lo tanto la nubosidad sobre la ciudad, lo que podría introducir errores sobre los cálculos realizados por el satélite.

3.2 Escala diaria de la irradiancia solar.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la validación del producto ABI L2 +DSR del satélite GOES-East sobre Medellín para el año 2018 en donde se evalúa el desempeño del producto para reproducir la irradiancia solar a escala diaria para cada mes.

3.2.1 Serie de tiempo diaria de irradiancia solar

Se presentan los resultados para tres meses en particular: abril, junio y octubre de 2018 (ver **Figuras 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3**), ya que son los meses en los que se encontraron resultados interesantes en el análisis del ciclo anual presentado en la **Sección 3.1**.

La **Figura 3.2.1** muestra la variabilidad diaria durante el mes de abril del 2018 tanto para el producto del satélite como para las mediciones del sensor Torre SIATA. Abril es el mes en el que el satélite tiene un nRMSE por encima del 60%, mucho mayor que para los demás meses (ver **Figura 3.1.2**). Los picos máximos de GHI según Torre SIATA se presentan los días 23 con 707 W/m^2 , 30 con 720 W/m^2 y 9 con 722 W/m^2 , mientras que los resultados arrojados por el satélite GOES muestran un pico máximo el día 18 de abril de 2018 con 752 W/m^2 , día que según la estación Torre SIATA la radiación que alcanzó el suelo no superó los 400 W/m^2 . Los valores mínimos de GHI según el satélite se dan el 6 y 15 del mes en cuestión, con 541 W/m^2 y 545 W/m^2 respectivamente. Según las mediciones en

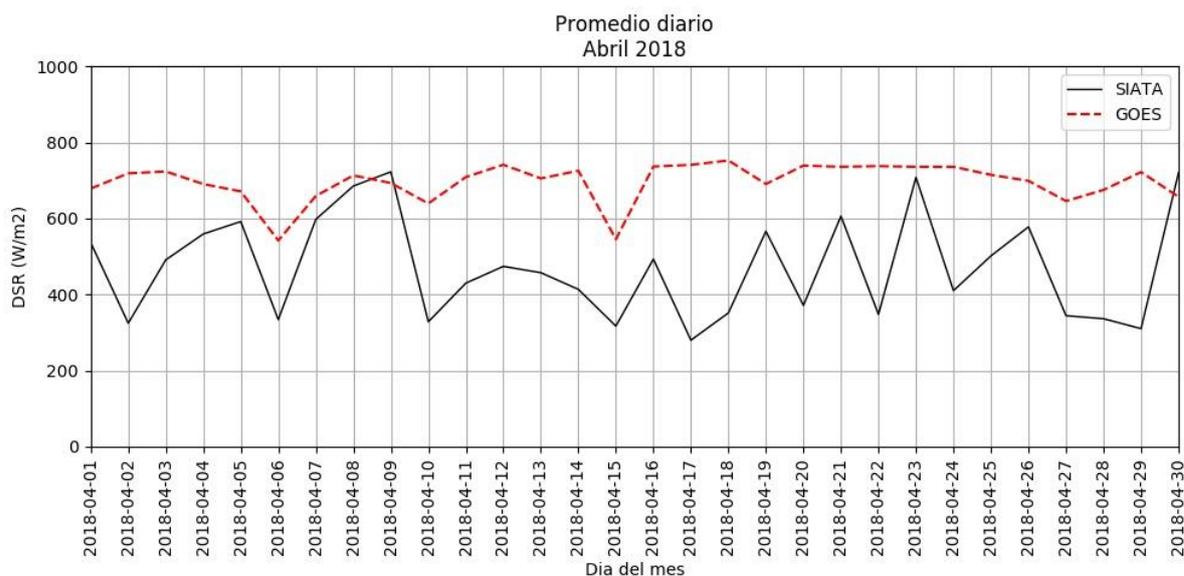


Figura 3.2.1. Variabilidad diaria durante el mes de abril del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

tierra el 15 de abril de 2018 también coincide con ser uno de los días con valores más bajos de irradiancia solar, pero con una diferencia en la magnitud de aproximadamente 230 W/m^2 . Además, se detectan otros dos valores bajos de GHI los días 17 y 29 de abril, días en los que el satélite GOES-East no representa adecuadamente ni la magnitud ni el comportamiento de la irradiancia solar. Cabe anotar que los resultados arrojados por el satélite para este mes no presentan una variabilidad diaria marcada, pues la irradiancia oscila en entre 600 W/m^2 y 800 W/m^2 . En la **Figura 3.2.2** se presenta la variabilidad diaria durante el mes de julio del 2018 tanto para el producto del satélite como para las mediciones del sensor Torre SIATA. Los picos máximos de GHI reproducidos por GOES son en los días 4 y 22 con 703 W/m^2 y 701 W/m^2 y los capturados por SIATA se dan en el día 4 y en el día 14, con una diferencia no mayor a 30 W/m^2 para el día en común. Así mismo, se reconocen los valores mínimos registrados por GOES los días 24 y 2 con 556 W/m^2 y 576 W/m^2 respectivamente, y los registrados por SIATA se presentan los días 9 con 401 W/m^2 y 31 con 429 W/m^2 .

Julio es uno de los meses en los que el algoritmo representa mejor el promedio mensual de irradiancia solar para el año evaluado, puesto que tiene un bajo RMSE respecto a los demás meses. En gran parte del mes, el algoritmo y el sensor registran irradiancias que varían entre los 600 W/m^2 y los 800 W/m^2 , esto podría explicar el bajo error RMSE en el ciclo anual mostrado en la **Figura 3.1.2**. El satélite no reproduce bien los picos bajos que el sensor si puede detectar de un día para otro. Esta poca representatividad diaria se podría explicar a partir del supuesto de que la formación repentina de nubes que cubren el área de medición del sensor disminuyen la radiación que llega a la superficie y que este registra. El tamaño de estas nubes podría ser mucho menor en comparación con el tamaño del pixel de medición del algoritmo (50 km)

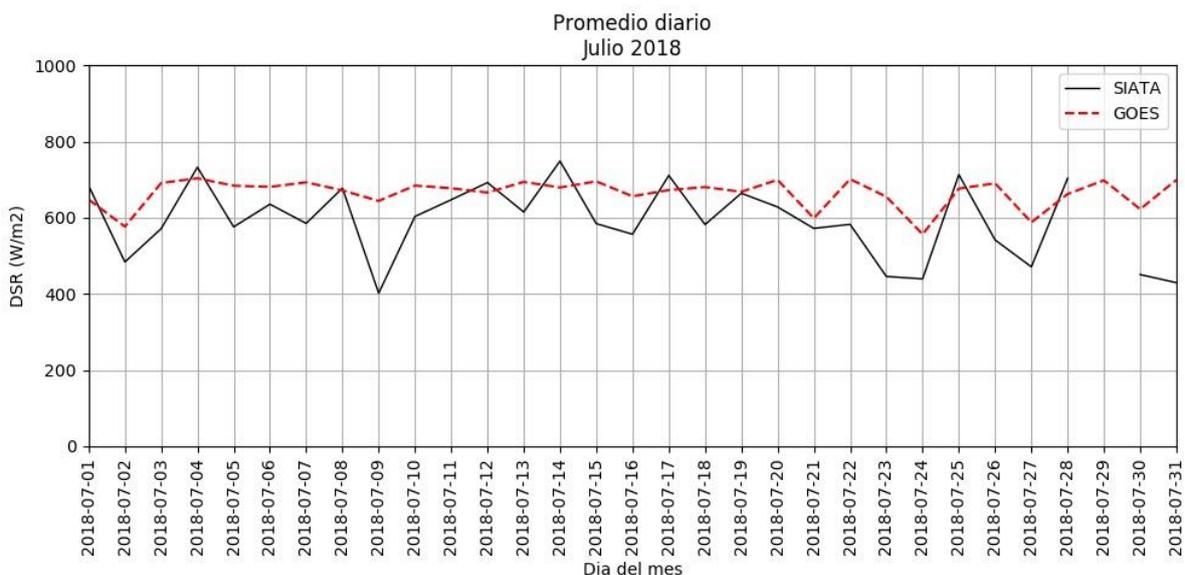


Figura 3.2.2. Variabilidad diaria durante el mes de julio del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

por lo que el peso de estas sobre el resultado final que arroja GOES para el pixel es insignificante.

Julio, característicamente pertenece a la temporada seca de la distribución bimodal del régimen de precipitación de la ciudad, los sistemas convectivos que se pueden formar en esta temporada son en su mayoría de menor escala en comparación con aquellos que se forman en meses como marzo, abril y mayo. La consecuencia directa de esta ausencia de nubes convectivas es la notable disminución de la dispersión de la radiación solar que alcanza la superficie, por lo que para un mes como abril la irradiancia promedio es de 475 W/m^2 mientras que en un mes como julio alcanza un valor de 600 W/m^2 .

La **Figura 3.2.3** presenta la variabilidad diaria de irradiancia solar obtenida de los resultados del producto ABI L2+DSR y de las mediciones del sensor de SIATA para octubre de 2018, mes del ciclo anual en el que el sesgo porcentual es menor. Para este mes se tienen valores máximos de la variable DSR obtenida del algoritmo ABI SRB de 699 W/m^2 y 706 W/m^2 para los días 1 y 13 de octubre, y de 800 W/m^2 y 725 W/m^2 para los días 14 y 13 de octubre según el sensor en tierra. El algoritmo fue capaz de identificar el pico máximo el día 13 de octubre con 22 W/m^2 de desfase, aun así, el valor máximo identificado por el sensor Torre SIATA para el día 14 de octubre no es representado adecuadamente por el satélite pues su desfase se acerca a los 312 W/m^2 . En cuanto a los valores mínimos registrados por SIATA se tienen los días 9 (268 W/m^2) y 21 (308 W/m^2) de octubre, mientras que para el satélite los picos mínimos se dan los días 9, 17 y 12. De nuevo, el satélite logra representar la irradiancia solar del día 9 con una diferencia en magnitud baja pero los otros dos días no tienen buena representación ni en magnitud de la variable ni en su comportamiento.

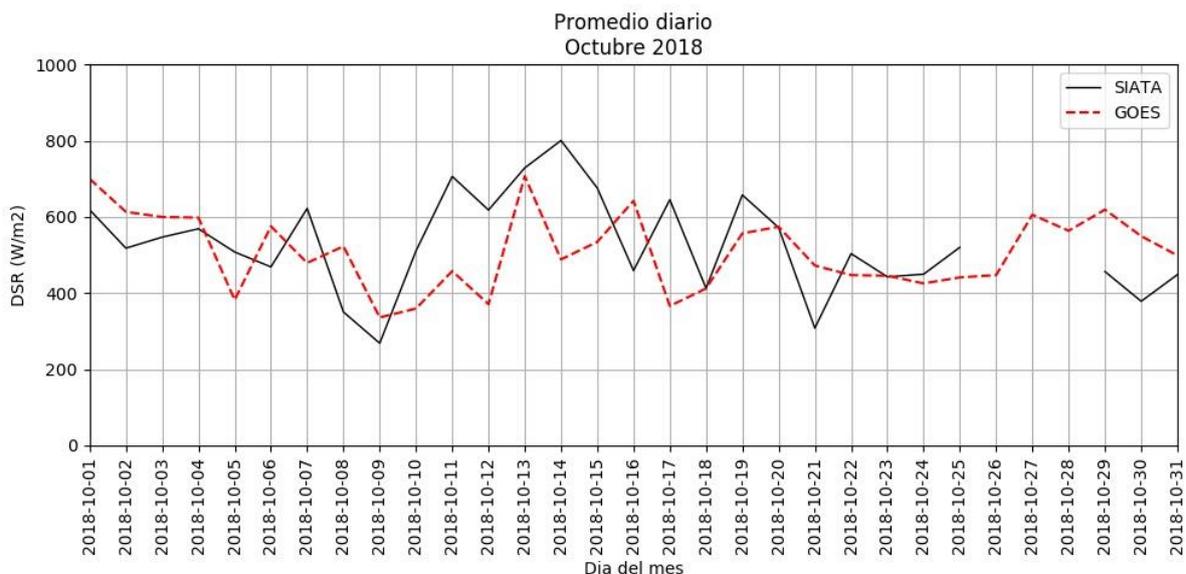


Figura 3.2.3. Variabilidad diaria durante el mes de octubre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

Octubre es un mes que pertenece a la segunda temporada de lluvias que se presentan en Medellín-Colombia. Cuando se comparan los resultados según el satélite del promedio diario de abril y octubre, se puede notar que octubre presenta una variabilidad diaria del recurso mucho mayor al mes de abril. Esto podría explicar el alto error RMSE de abril frente a octubre y, además, puede significar que los sistemas convectivos que se formaron en el pixel de medición del satélite eran los suficientemente grandes como para que tuvieran peso en el resultado final para dicho pixel. Sin embargo, esto es sólo una suposición y habría que caracterizar los SCM que se formaron para este mes y compararlos con los que se formaron para el mes de abril de 2018.

La variabilidad diaria de irradiancia solar para todos los meses se graficó a partir de los datos obtenidos por el sensor Torre SIATA (ver **Figura 3.2.4**). Los espacios en color blanco indican que no hay mediciones por parte del sensor para esos días, colores cálidos indican mayores valores de irradiancia solar y colores fríos indican menores valores de irradiancia solar. En la figura se puede apreciar que meses como junio, julio y agosto hay mayor cantidad de días con valores altos de irradiancia solar en comparación con meses como marzo, abril, mayo, octubre y noviembre. Sin embargo, cuando se compara abril y octubre se puede ver que abril tiene una variabilidad más alta especialmente en los últimos días del mes, la cual podría ser dada por nubes de menor tamaño que cubren el sensor durante un periodo de tiempo más corto lo que resulta en días nublados seguidos de días despejados. En contraste para octubre, se pueden ver periodos nublados más extensos durante los primeros y últimos 10 días del mes y un periodo de días despejados entre el 10 y el 15 de octubre del año 2018. Estos resultados podrían significar que las formaciones convectivas durante el mes de

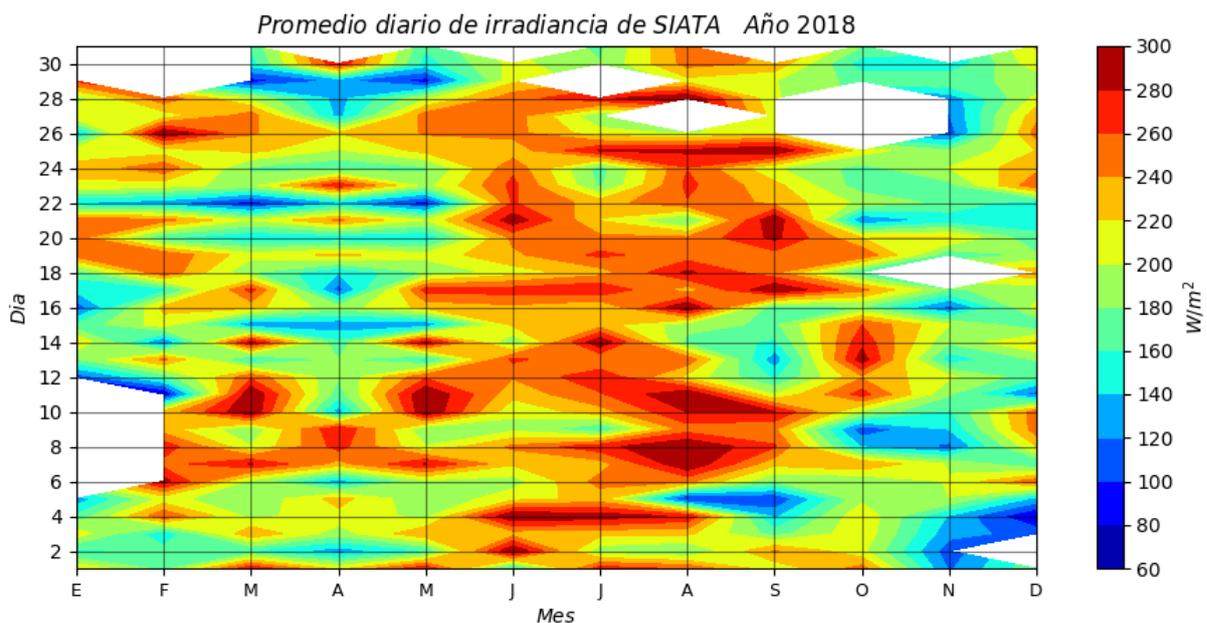


Figura 3.2.4. Variabilidad diaria de la irradiancia solar para el año 2018 a partir de mediciones tomadas por el sensor Torre SIATA en Medellín-Colombia.

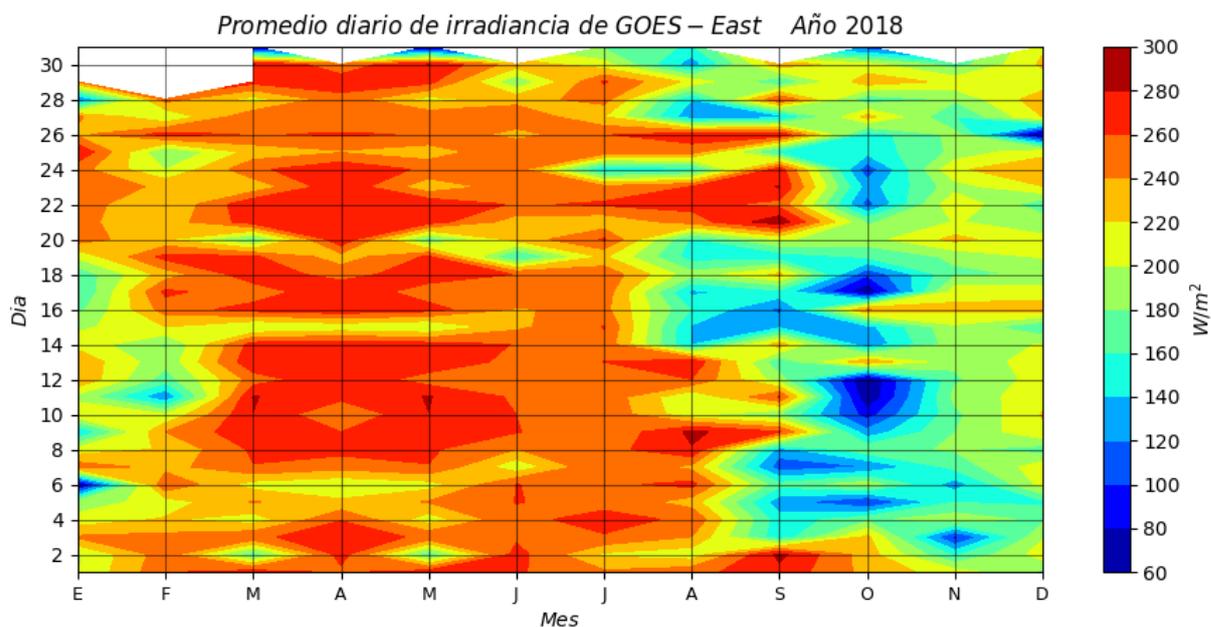


Figura 3.2.5. Variabilidad diaria de la irradiancia solar para el año 2018 a partir de mediciones tomadas por el satélite GOES-East en Medellín-Colombia.

octubre tienen un tamaño mayor a las formaciones convectivas del mes de abril y por lo tanto el algoritmo no logra reproducir la variabilidad de este mes como logra hacerlo en el mes de octubre. La **Figura 3.2.5** presenta la variabilidad diaria de la irradiancia solar para el año 2018 a partir del conjunto de datos GOES-East. Principalmente se puede notar que aunque se puede observar un periodo de menor radiación a partir del mes de agosto, el satélite sobreestima la irradiancia diaria y no captura la variabilidad del recurso en los meses de marzo a julio.

Los resultados anteriores indican que el algoritmo ABI SRB logra reproducir más satisfactoriamente la variabilidad diaria de la irradiancia solar bajo condiciones de cielo despejado que bajo condiciones de cielo nublado o parcialmente nublado. Además, el tamaño de los sistemas convectivos parece influir directamente en los resultados arrojados por el sensor pues a mayor tamaño de estos, mayor área del pixel cubren y por lo tanto el resultado será más cercano a las mediciones tomadas por un sensor en tierra. Los gráficos para las demás series de tiempo diarias se presentan en la sección **Anexo A-1**.

3.2.2 Validación de datos diarios de irradiancia solar.

Las **Figuras 3.2.6 y 3.2.7** presentan los resultados de la comparación estadística entre el producto ABI L2+DSR de GOES y las mediciones *in situ* de irradiancia solar para los valores diarios promedio de cada mes del año 2018. En las **Figuras 3.2.6.a y 3.2.6.b** se pueden ver los resultados para el cálculo de los errores MBE y nMBE respectivamente, y en las **Figuras 3.2.7.a y 3.2.7.b** se muestran los resultados de los errores RMSE y nRMSE. El algoritmo ABI SRB tiende a sobreestimar mayormente los valores registrados por Torre SIATA que están por debajo de los 350 W/m²

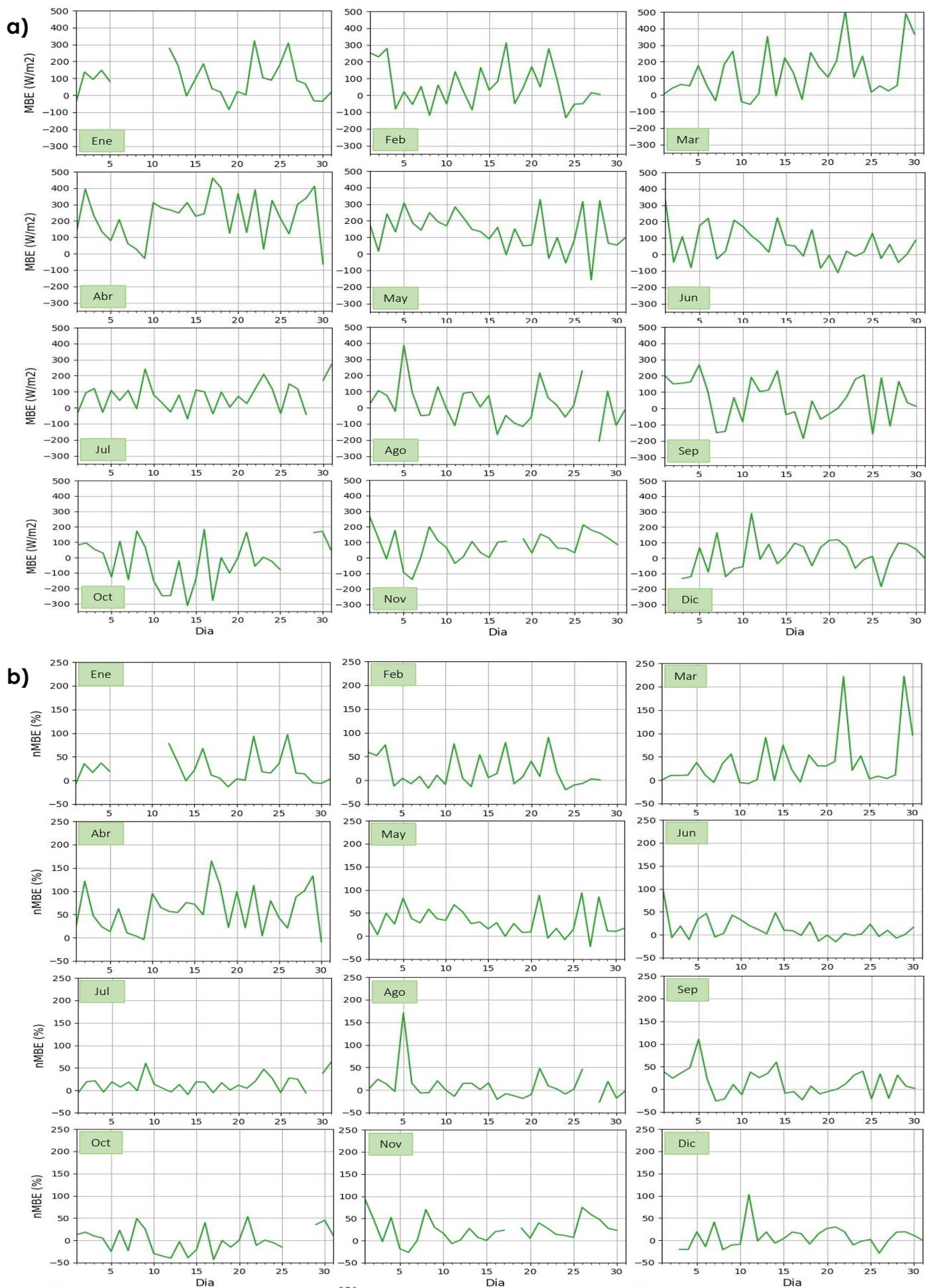


Figura 3.2.6. Evolución diaria de los errores para el año 2018 en Medellín-Colombia. **a)** MBE. **b)** nMBE.

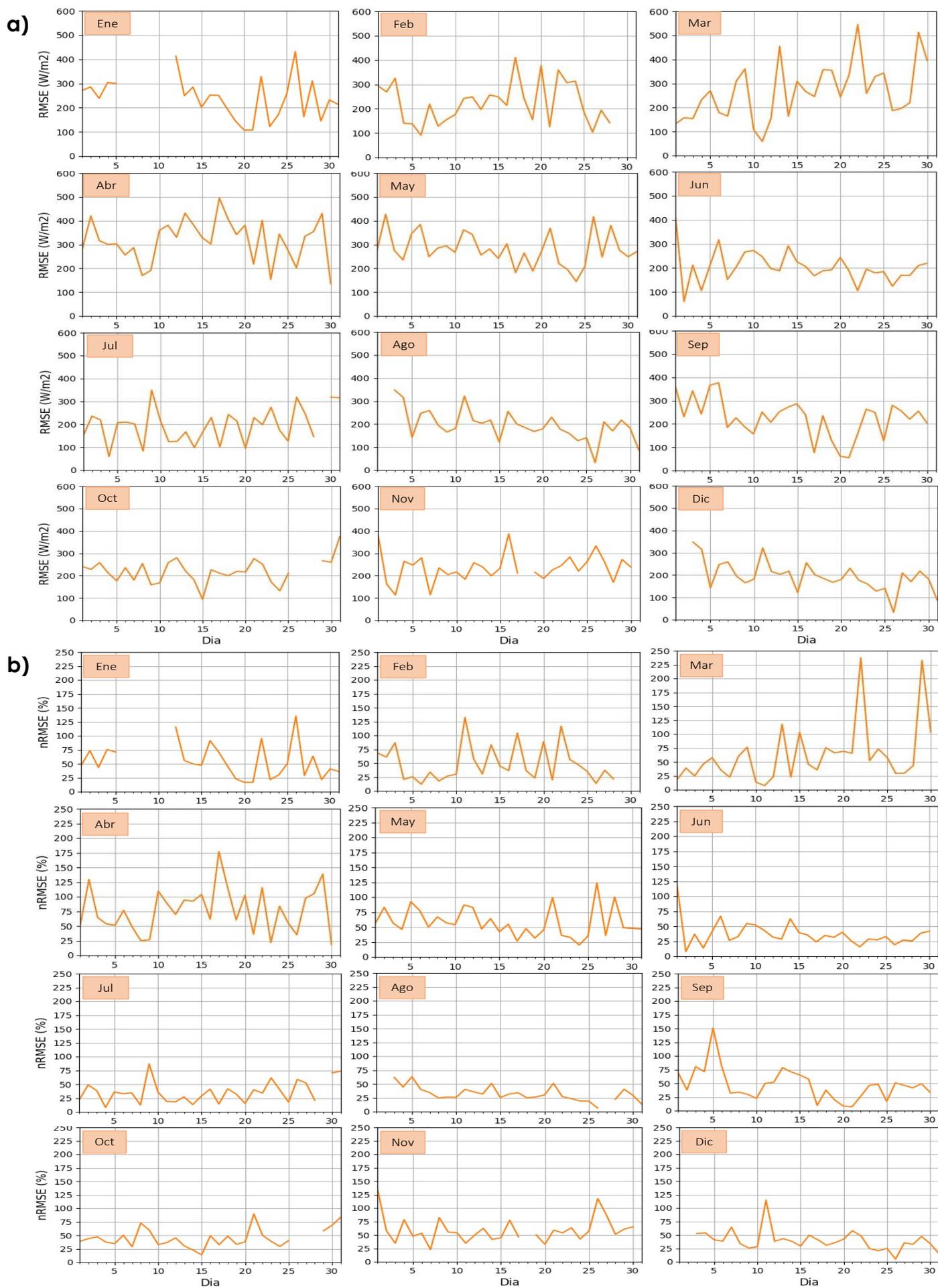


Figura 3.2.7. Evolución diaria de los errores para el año 2018 en Medellín-Colombia. **a)** RMSE. **b)** nRMSE.

y subestima aquellas mediciones diarias que se encuentran por encima de los 600 W/m^2 . Aunque el algoritmo tiende a sobreestimar la mayor cantidad de mediciones que toma el sensor Torre SIATA para todos los meses del año 2018, en meses como marzo, abril y mayo estas sobreestimaciones son aún mayores que para el resto del año. En estos meses se pueden notar picos altos de nMBE que coincidan con valores menores a 150 W/m^2 tomados por el sensor en tierra. Por ejemplo, la **Figura 3.2.6.b** muestra dos picos máximos los días 22 y 29 de marzo de 2018, días que coinciden con mediciones menores a 100 W/m^2 según el sensor en tierra (ver **Figura 3.2.4**). Lo mismo ocurre con los días 17 y 29 de abril, y con los días 21 y 28 de mayo.

La **Figura 3.2.6.a** muestra que para todo el año el satélite no tiene una buena representación de los valores de irradiancia solar. Sin embargo, la magnitud del error para marzo, abril y mayo es mayor que para los demás meses, con valores de RMSE por encima de 300 W/m^2 , mientras que para el resto de meses el error cuadrático medio está en promedio dentro del rango de 0 a 300 W/m^2 . Adicional a esto la **Figura 3.2.6.b** muestra que el error para meses como junio, julio, agosto y octubre no superó el 100% mientras que para los demás meses los valores de nRMSE pueden doblar este porcentaje. Los resultados que se obtienen de estas gráficas demuestran que el algoritmo ABI SRB no representa adecuadamente la variabilidad diaria para meses con mayor formación de sistemas convectivos y tiene un mejor desempeño para meses en los que predominan condiciones de cielo despejado.

3.2.3 Anomalías diarias de irradiancia solar

Con el fin de analizar si el satélite lograr capturar adecuadamente el signo de las variaciones del recurso solar mostradas por el sensor Torre SIATA, se graficaron las anomalías a escala diaria para ambos conjuntos de datos. En esta sección se presenta en detalle el análisis para los meses de abril, julio y octubre del 2018. Los gráficos para las demás series de anomalías diarias se presentan en la sección **Anexo A-2**.

La **Figura 3.2.8** muestra las anomalías diarias de la serie de tiempo del mes de abril de 2018 calculadas a partir del producto ABI L2+DSR y de las mediciones tomadas por el sensor en tierra Torre SIATA.

Para este mes, el algoritmo ABI SRB no capta adecuadamente las fluctuaciones mostrados por el sensor Torre SIATA ya que los aumentos de irradiancia que el sensor mide, el satélite no logra representarlos. Para días como el 6 y el 15 de abril de 2018, el satélite logra capturar la reducción de la irradiación solar, pero para anomalías negativas como las que se presentan a fin de mes que están seguidas de anomalías positivas, no logra reproducir el signo de las fluctuaciones de este periodo de tiempo de alta variabilidad diaria (ver **Figura 3.2.4**).

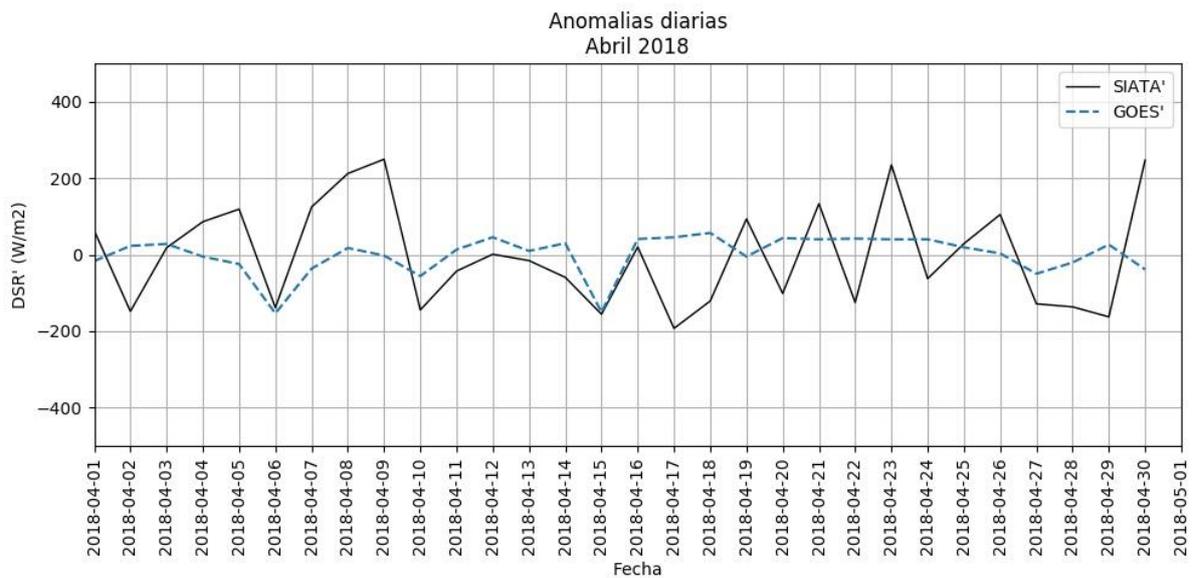


Figura 3.2.8. Anomalías diarias de abril de 2018 calculadas a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East.

La **Figura 3.2.9** muestra los resultados obtenidos para las anomalías diarias del mes de Julio de 2018. Este mes, en comparación con abril, muestra para el sensor Torre SIATA anomalías más pequeñas, esta puede ser la razón por la que el error RMSE es pequeño para este mes en comparación con el RMSE de abril. La variabilidad diaria de la irradiancia solar de julio es menor debido a que es un mes con menos lluvias y por lo tanto menos sistemas convectivos que impidan la llegada de la radiación solar a la superficie. A pesar de lo anterior, aunque las anomalías reportadas por el satélite también tienen valores pequeños,

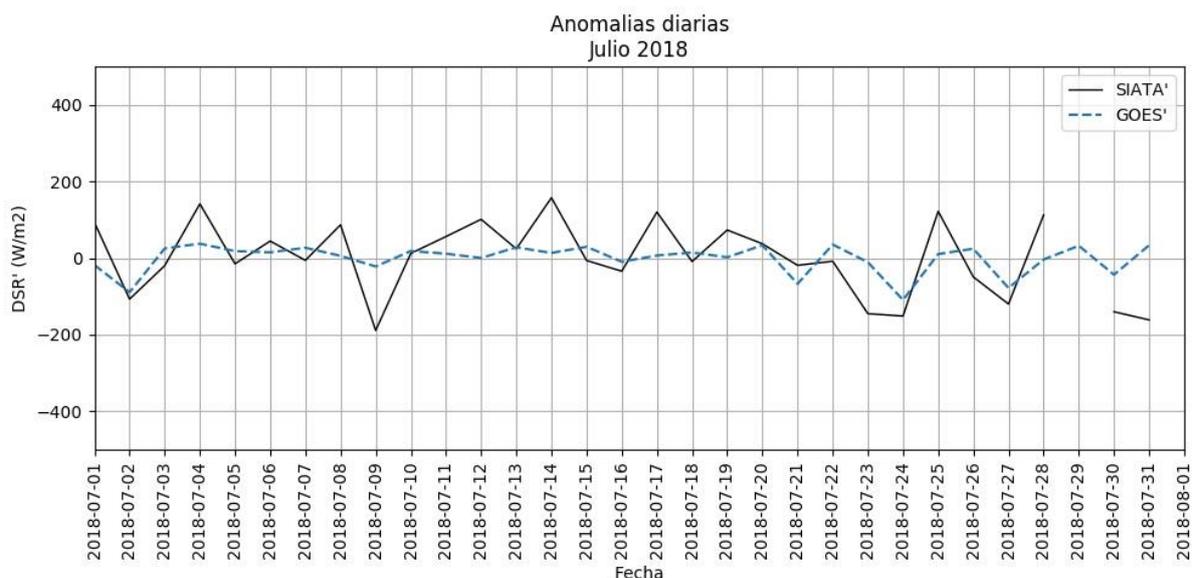


Figura 3.2.9. Anomalías diarias de julio de 2018 calculadas a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

no logra representar algunas fluctuaciones como los de los días 9, 14, 17 y 25 de julio. En la **Figura 3.2.10** se presentan los resultados para las anomalías diarias del mes de octubre de 2018. El satélite y el sensor muestran altos valores, tanto positivos como negativos de anomalías diarias para este mes. Octubre al igual que abril es un mes caracterizado por presentar aumentos en la precipitación. Sin embargo, el satélite capta mayores anomalías para este mes que para abril. En la **Figura 3.2.4** se puede ver que en octubre ocurrieron periodos de varios días donde la irradiancia disminuyó y luego periodos de varios días donde aumentó. Esto podría significar que en este mes los sistemas convectivos fueron de mayor tamaño y por lo tanto el satélite logró identificarlos. En general, el algoritmo del satélite GOES- East exhibe errores más bajos para meses en los que hay menor variabilidad de la irradiancia solar como junio, julio, agosto y diciembre; meses caracterizados por tener disminuciones en la precipitación. En consecuencia, las anomalías para estos meses registradas por el sensor son menores que para los demás meses. Un patrón similar sigue las anomalías del algoritmo en donde se registran valores menores en meses de temporada seca. Sin embargo, este patrón se rompe para los meses de temporada de lluvias puesto que para marzo, abril y mayo las anomalías son menores y menos variables que para meses como septiembre, octubre y noviembre. De nuevo, el rendimiento del satélite parece estar condicionado por el tipo y tamaño de los sistemas convectivos que se formen sobre la ciudad.

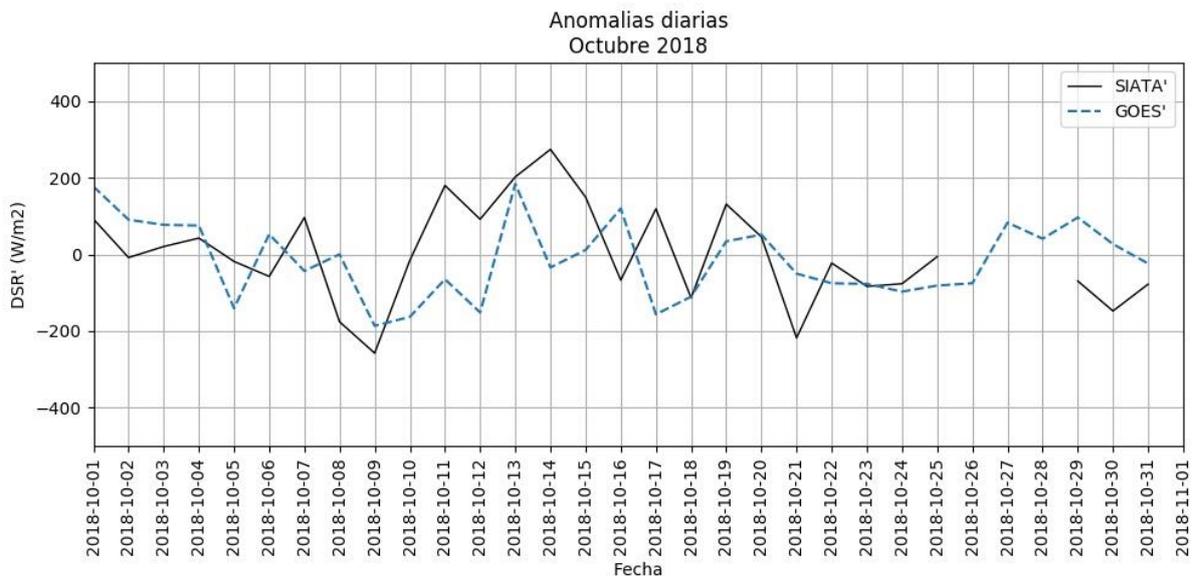


Figura 3.2.10. Anomalías diarias de octubre de 2018 calculadas a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

3.2.4 Coeficiente de correlación de Pearson

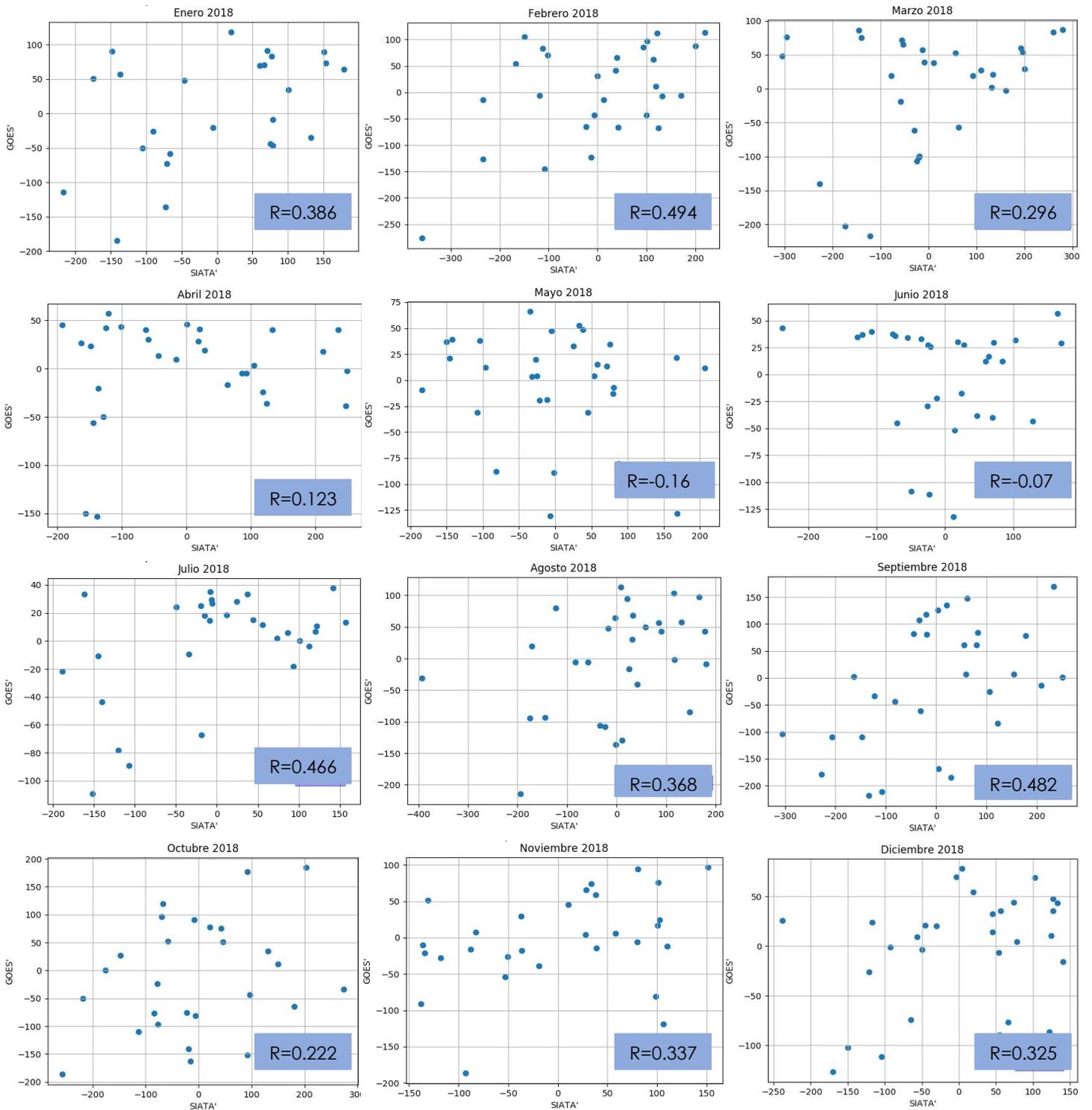


Figura 3.2.11. Coeficiente de correlación R entre anomalías del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para el año 2018 en Medellín-Colombia.

La **Figura 3.2.11** muestra el coeficiente de correlación R de las anomalías diarias calculadas a partir de los datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East. Los resultados de la **Figura 3.2.11** muestran una baja correlación entre las anomalías diarias del sensor y las anomalías diarias del satélite para todos los meses del año, esto quiere decir que el satélite no capta ni los valores atípicos de irradiancia solar ni el signo de las fluctuaciones sobre la ciudad de Medellín-Colombia. La correlación más alta se da para los meses julio, septiembre y febrero, con valores de 0.466, 0.482 y 0.494 respectivamente. Así mismo, el R más bajo se da para los meses junio, mayo y abril. Analizar el desempeño del satélite para representar variaciones a escala sinóptica mediante promedios de cinco días quedaría como trabajo futuro.

3.3 Serie horaria de la irradiancia solar.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la validación del producto ABI L2+DSR del satélite GOES-East sobre Medellín para el año 2018, en donde se evalúa el desempeño del producto para reproducir la irradiancia solar intra-diaria y su variabilidad. (ver **Anexo B**)

3.3.1 Distribución de la irradiancia horaria.

En la **Figura 3.3.1** se presenta la distribución de la irradiancia solar horaria para el mes abril del 2018, construida a partir de los datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR. La **Figura 3.3.1** se puede apreciar que, en algunos días del mes de abril, el algoritmo registra valores mayores que los medidos por el sensor en tierra principalmente en las horas del mediodía. Aun así, algunos días como el 6, 10 y 15 de abril el satélite parece reproducir muy similar el comportamiento y la magnitud de la irradiancia solar.

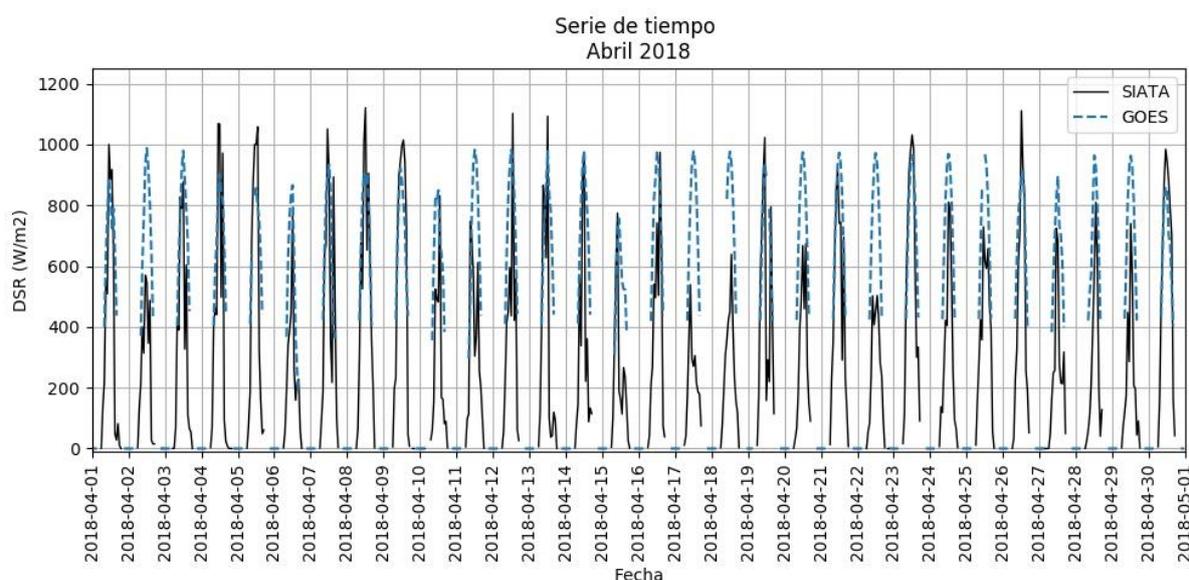


Figura 3.3.1. Serie de tiempo horaria de abril de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

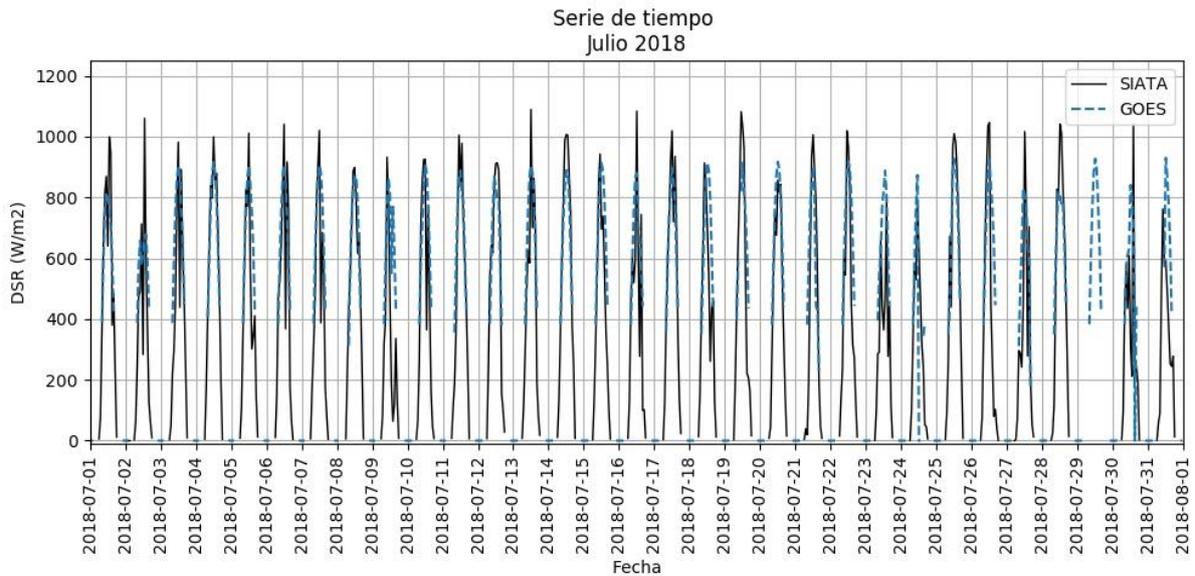


Figura 3.3.1. Serie de tiempo horaria de julio de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

La **Figura 3.3.2** muestra la serie de tiempo de la irradiancia solar horaria para el mes de julio de 2018, tanto para los datos del sensor Torre SIATA como para los datos producto del algoritmo ABI SRB. Este mes presenta valores horarios altos (mayores a 800 W/m^2) de irradiancia solar medidos por el sensor para casi todos los días. El satélite parece subestimar los valores más altos de irradiancia solar en este mes mientras que en abril, el satélite sobreestima mayormente los valores horarios menores a 800 W/m^2 .

Octubre de 2018, es uno de los meses del año evaluado que el producto de ABI SRB se acerca a la representación de la variabilidad horaria para días en los que la irradiancia disminuye por debajo de los 600 W/m^2 ,

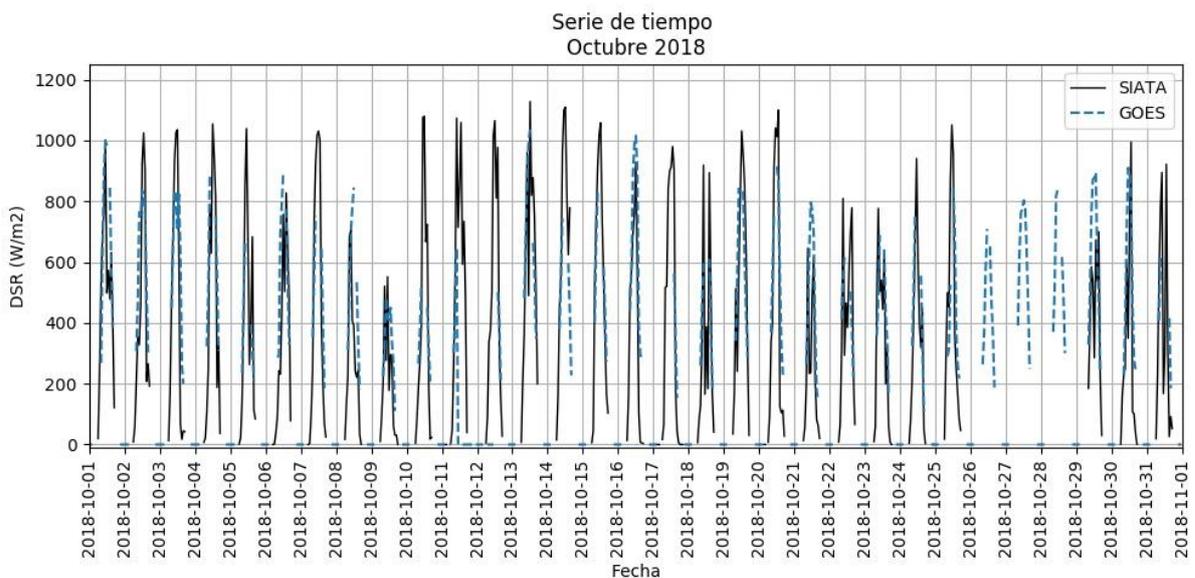


Figura 3.3.3. Serie de tiempo horaria de octubre de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

como por ejemplo el 9 de octubre. Como se puede ver en la **Figura 3.3.3**, el algoritmo produce mayor variabilidad en octubre que en abril. En general, el algoritmo puede representar la variabilidad horaria de la irradiancia solar para Medellín, presentando valores menores en las horas de la mañana y la tarde y valores mayores al mediodía. Además, presenta algunos errores en la magnitud de los valores horarios que son mayores a 800 W/m^2 y menores a 600 W/m^2 .

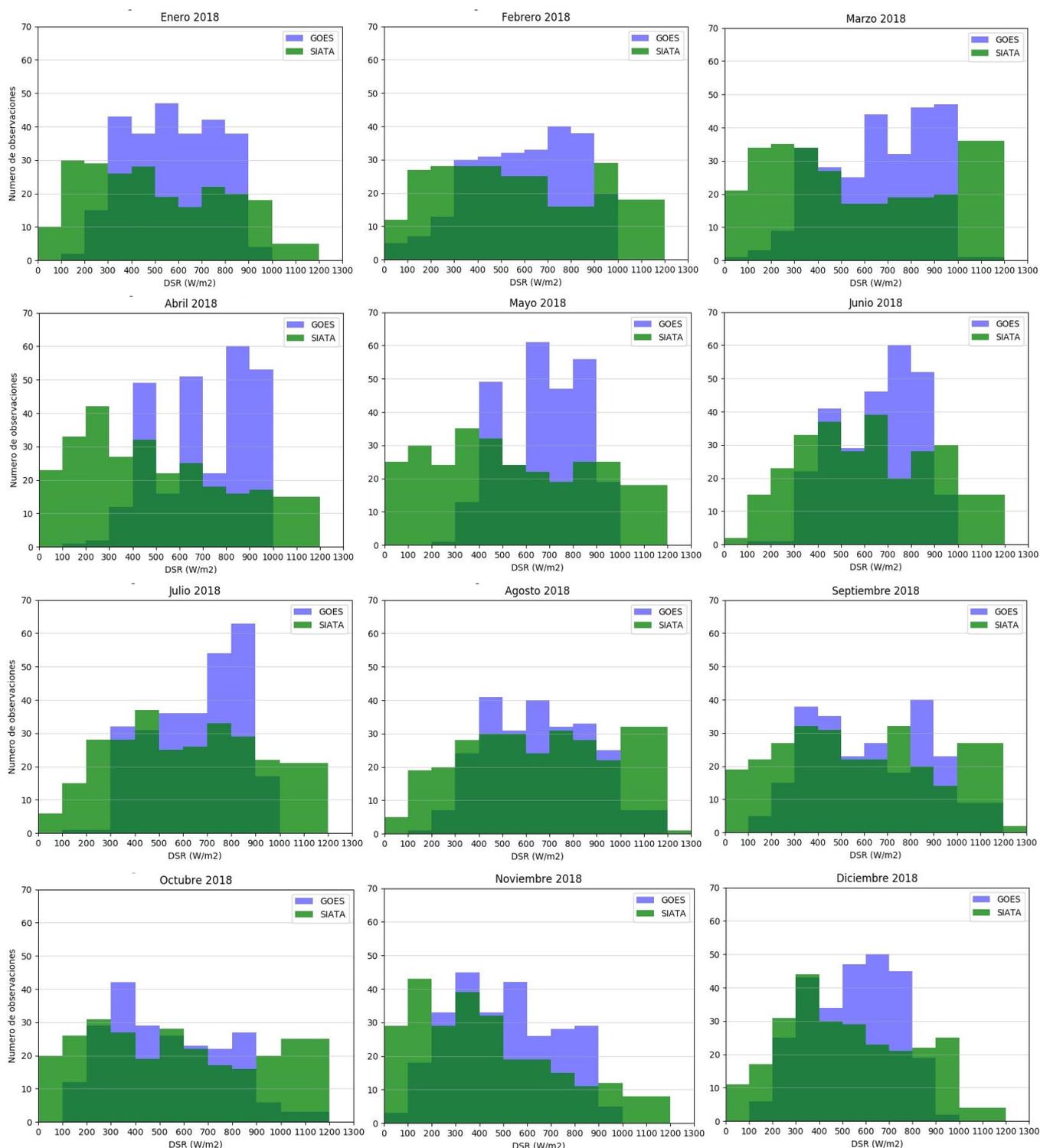


Figura 3.3.4. Distribución de la irradiancia horaria para el 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

La distribución de los valores horarios del año 2018 tanto para el producto ABI L2+DSR como para el sensor Torre SIATA se presenta en la **Figura 3.3.4**. Los datos registrados por el sensor muestran distribuciones de la irradiación horaria desde 0 W/m² hasta 1300 W/m². La concentración de los datos medidos por el sensor se encuentra casi uniforme a lo largo del año. Sin embargo, se puede ver que en meses como abril, marzo, noviembre y diciembre hay mayor cantidad de datos en rangos de 0 a 600 W/m² y meses como julio, agosto y septiembre tienen los datos concentrados en valores mayores a 600 W/m². Por otro lado, el algoritmo registra valores horarios de irradiancia solar concentrados entre 300 W/m² y 900 W/m² en gran parte del año. Además, tiene dificultades para detectar valores menores a 200 W/m² y mayes a 1000 W/m².

3.3.2 Ciclo diurno de irradiancia solar.

El ciclo diurno de irradiancia solar en Medellín para el año 2018 calculado a partir de mediciones del sensor en tierra, se presenta en la **Figura 3.3.5**. En general, las horas de sol para la ciudad de Medellín ocurren entre las 8 de la mañana y las 4 de la tarde, teniendo valores máximos al mediodía. Para gran parte del periodo analizado, la irradiancia solar comienza a incrementar considerablemente antes de las 10 de la mañana (con valores mayores a 500 W/m²), los valores máximos de radiación solar que alcanza la superficie ocurren a las 12 del mediodía y disminuyen luego de las 2 de la tarde. No obstante, en meses como abril, octubre, noviembre y diciembre, la radiación comienza a aumentar considerablemente después de las 10 de la mañana, sus valores máximos se presentan al mediodía y disminuyen

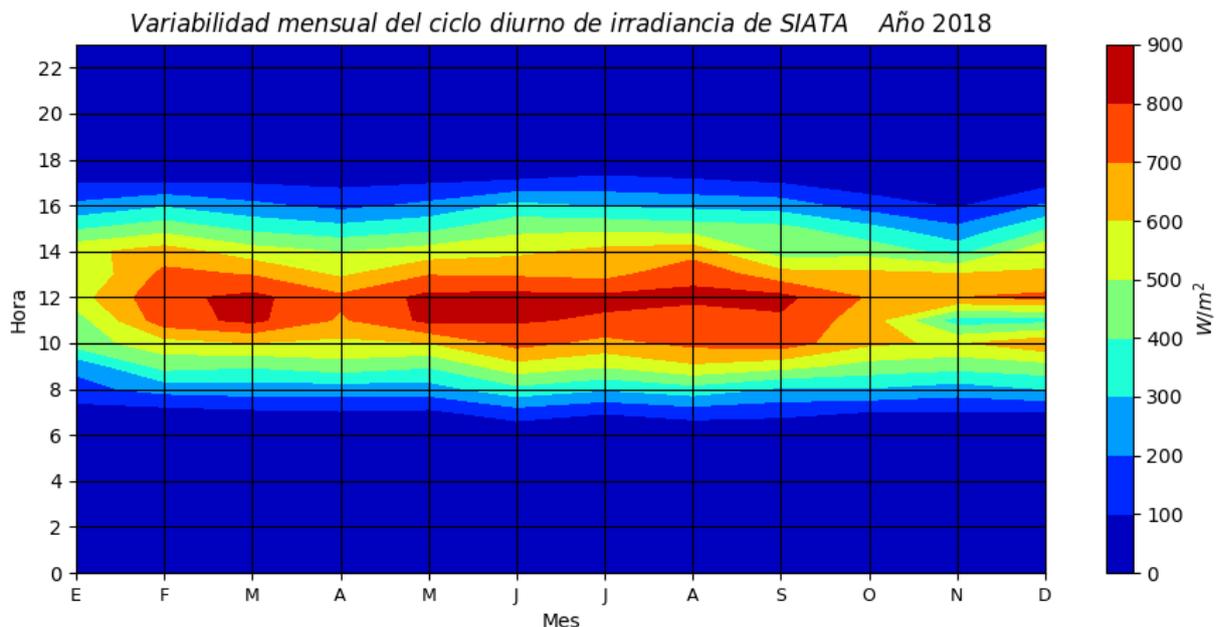


Figura 3.3.5. Variabilidad mensual del ciclo diurno de irradiancia solar para Medellín-Colombia a partir de datos del sensor Torre SIATA para el año 2018.

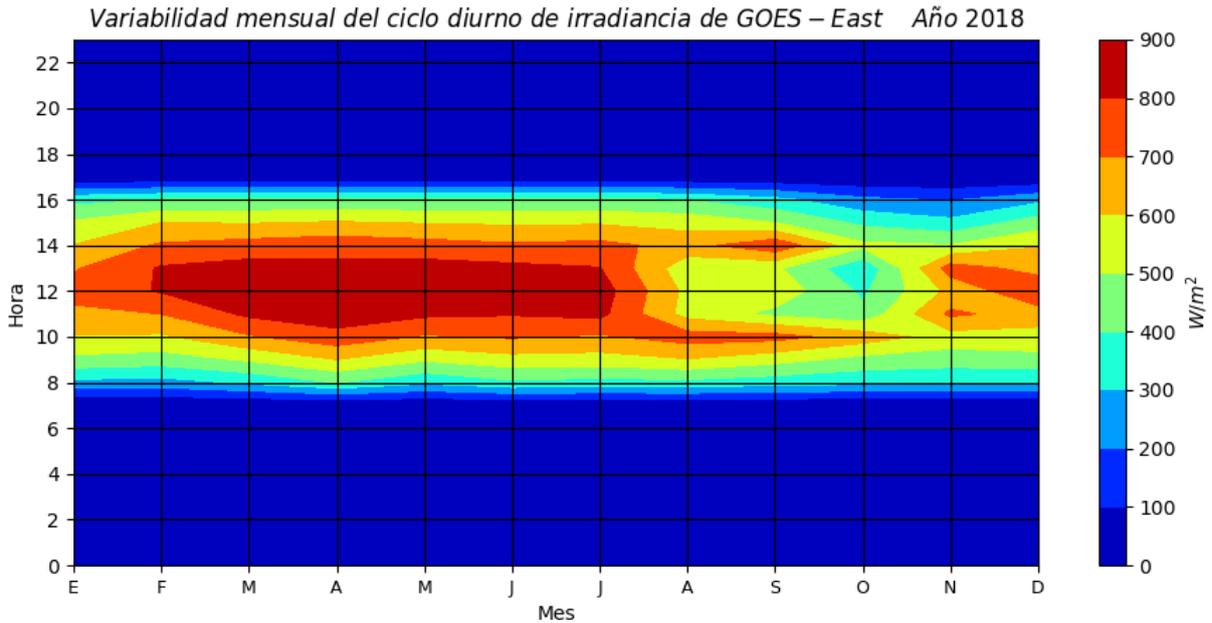


Figura 3.3.6. Variabilidad mensual del ciclo diurno de irradiancia solar para Medellín-Colombia a partir de datos del satélite GOES-East para el año 2018.

rápido luego de la 1 pm. En particular, el pico máximo de irradiancia solar de abril es de 800 W/m^2 y los valores del recurso a lo largo del día varían entre 700 y 200 W/m^2 . En octubre, noviembre y diciembre, el pico máximo del recurso es de 700 W/m^2 y a lo largo del día este valor varía entre 100 y 600 W/m^2 . La **Figura 3.3.6** presenta el ciclo diurno para todos los meses del año 2018 calculado a partir de datos del satélite GOES-East. En comparación con la **Figura 3.3.5** se puede observar que, a partir de agosto, el satélite registra valores inferiores para las horas del mediodía y muestra un aumento considerable para el mes de abril, el cual en la **Figura 3.3.5** se observa como una disminución en los valores de irradiancia solar.

El ciclo diurno para cada mes del año 2018 se graficó a partir de datos del sensor en tierra Torre SIATA y del satélite GOES-East. La **Figura 3.3.7** muestra que los meses con mayor irradiancia al mediodía según el sensor para el año 2018 fueron marzo, junio, julio y agosto. Por otro lado, enero, febrero, abril, octubre y noviembre fueron los meses del 2018 en los que la radiación solar que alcanzó la superficie no superó los 800 W/m^2 para el área de estudio. Además, el comportamiento para la mayoría de meses del 2018 muestra que los valores de irradiancia solar en las horas de la mañana (antes de las 12 am) son mayores que los valores medidos para las horas de la tarde (después de la 1 pm). Este comportamiento también se puede observar en la **Figura 2.3** reportada por IDEAM, en la que se exhibe el ciclo diurno multianual de precipitación por la ciudad de Medellín. La ocurrencia de precipitaciones en la ciudad aumenta en las horas de la tarde. Esta puede ser la razón por la que el sensor registra menores valores de irradiancia en las tardes que en las mañanas.

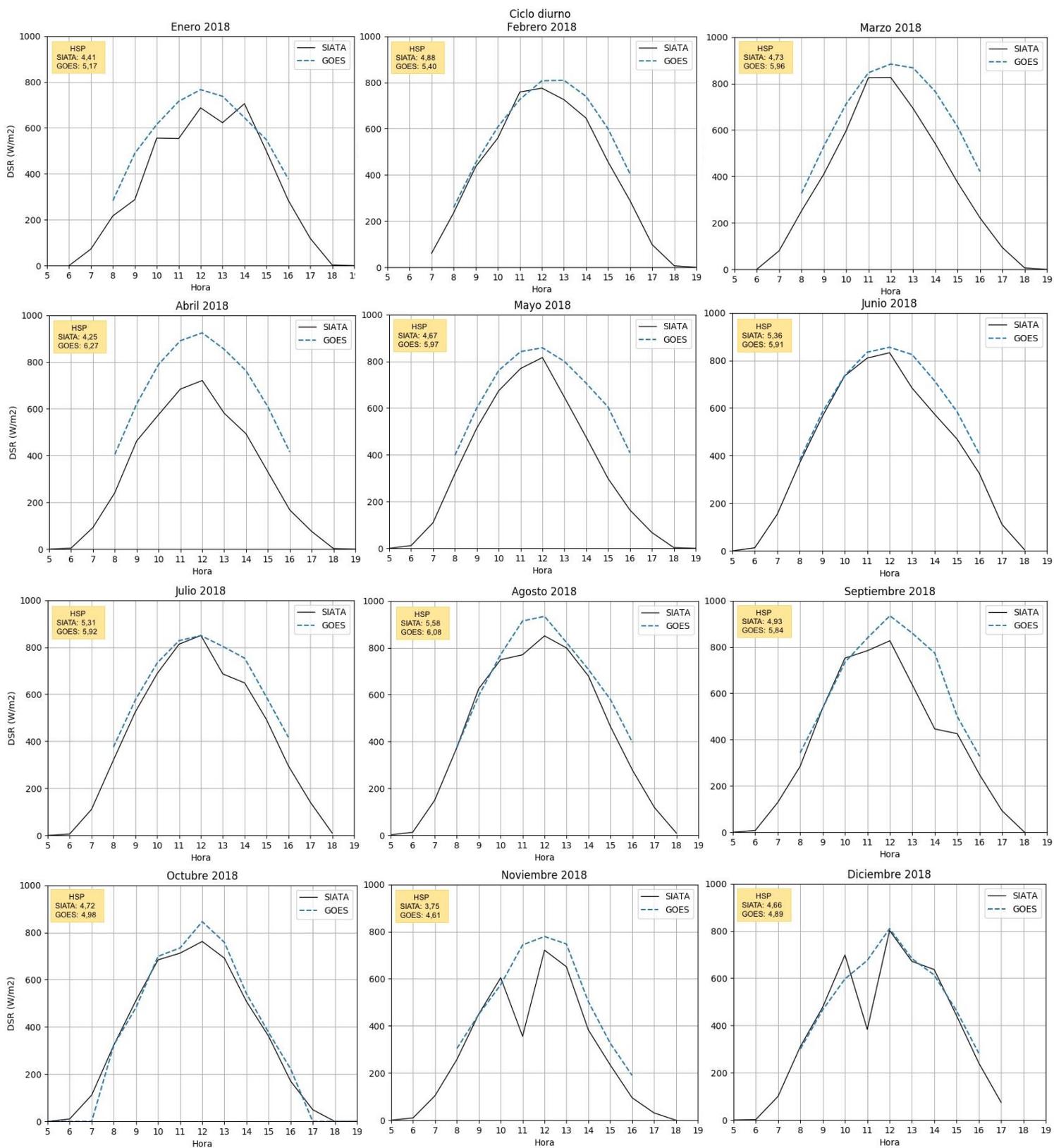


Figura 3.3.7. Ciclo diario de irradiancia solar y horas solares pico para el 2018 calculados a partir de datos del sensor Torre SIATA y el producto ABI L2 + DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

En contraste, el satélite GOES-East registró picos superiores a 800 W/m^2 para la mayoría de meses del 2018, excepto para noviembre y enero. Además, el ciclo diurno construido a partir de estos datos presenta valores mayores que los reportados por el sensor en tierra y no logra captar adecuadamente el comportamiento mostrado por el sensor de SIATA en donde la irradiancia disminuye rápidamente en las horas de la tarde. Sin embargo, el satélite puede captar la variación horaria de la irradiancia solar, mostrando una curva que alcanza su punto máximo en las horas del mediodía y valores más bajos en las horas de la mañana y la tarde.

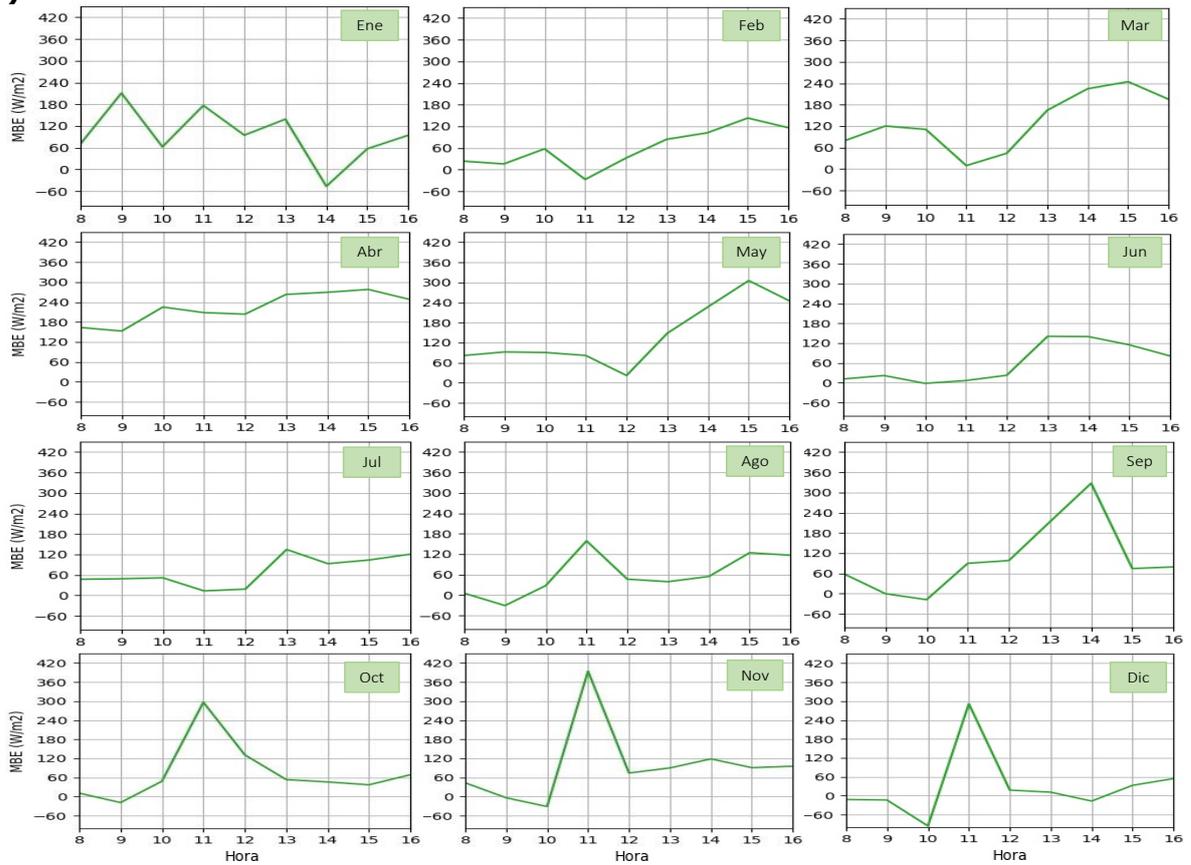
Las horas solares pico calculadas tanto para SIATA como para GOES, también se observan en la **Figura 3.3.7**. Este valor es importante para la industria energética porque indica la cantidad de horas diarias en las que una celda fotovoltaica trabajará a su máxima potencia. Por lo tanto, cuando se hace un plan de instalación de paneles fotovoltaicos es importante orientar los estudios a la cantidad de irradiancia solar que llega a un lugar de interés y el tiempo en el que la producción de energía será mayor. Para el caso de Medellín, se tiene que junio, julio y agosto tienen mayor cantidad de horas solares pico mientras que noviembre, abril y enero fueron los meses con menor número de horas sol pico. En cuanto a las HSP calculadas a partir de los datos del satélite GOES-East, los meses con mayor número de horas sol pico fueron agosto y abril con 6 HSP, seguidos de mayo, marzo, julio, junio y septiembre con 5 horas sol pico aproximadamente. Por último, noviembre, diciembre y octubre del año 2018 tuvieron aproximadamente 4 HSP, valor menor al resto de HSP de los demás meses. Al comparar los resultados anteriores, el satélite reprodujo adecuadamente las HSP de junio, julio y diciembre y tuvo un desfase mayor para abril que para el resto de meses del periodo analizado.

3.3.3 Validación de datos horarios de irradiancia solar.

Con el fin de estudiar el rendimiento del algoritmo ABI SRB de GOES-East en la representación del ciclo diurno de la irradiancia solar, se realizó la validación estadística del producto ABI L2 +DSR con mediciones *in situ* obtenidas del sensor Torre SIATA en la ciudad de Medellín para el año 2018. Los resultados de esta validación se presentan en las **figuras 3.3.8** y **3.3.9**. En la **Figura 3.3.8.a** y **3.3.8.b** se presentan los resultados del ciclo diurno de los errores MBE y nMBE respectivamente, y en la **Figura 3.3.9.a** y **3.3.9.b** se presentan los resultados.

El algoritmo ABI SRB presenta un error RMSE mayor a 100 W/m^2 para todos los meses del año 2018. Se puede observar que en la mayoría de los meses el error nRMSE a las 8 de la mañana está cerca al 30%, luego este disminuye teniendo valores menores (por debajo del 30%) en las horas cercanas al mediodía y finalmente el error vuelve a incrementar en las

a)



b)

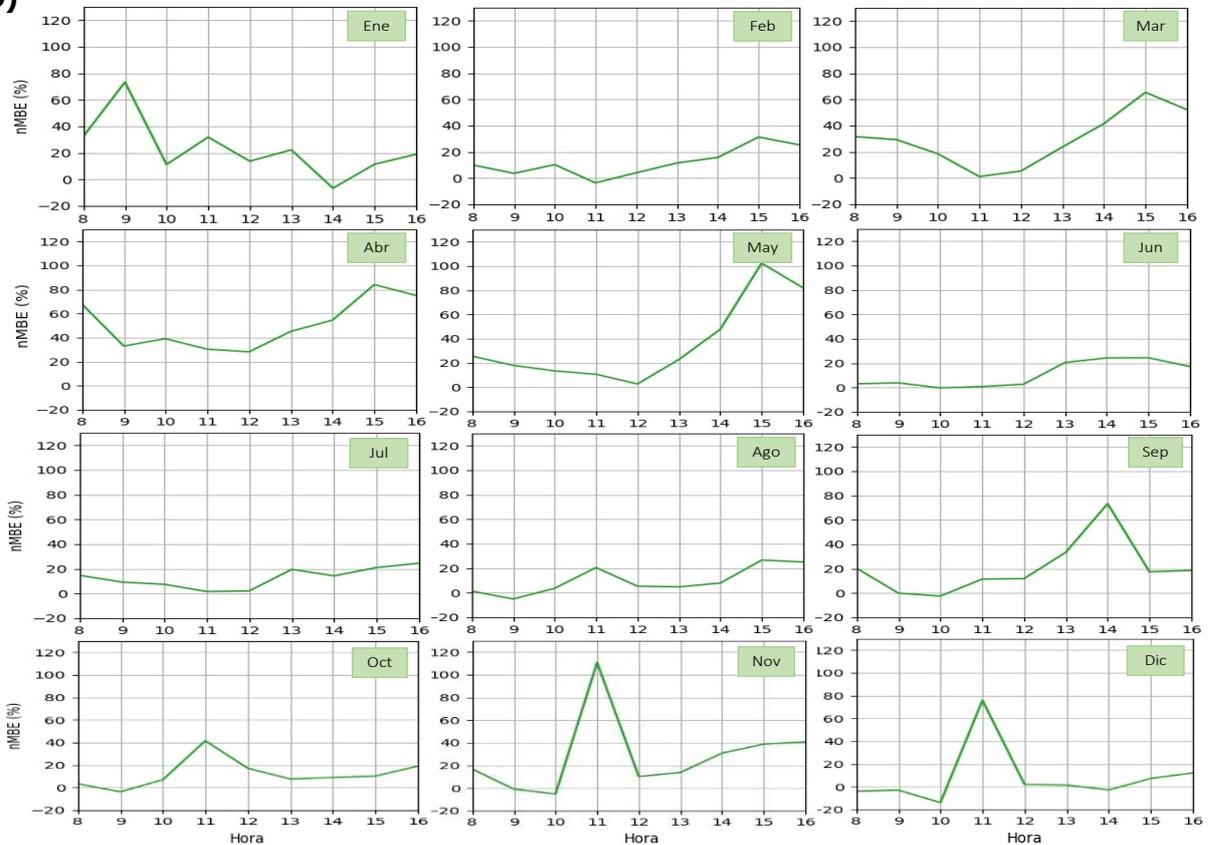


Figura 3.3.8. Ciclo diario de los errores MBE (a) y nMBE (b) para el 2018 calculados a partir de datos del sensor Torre SIATA y el producto ABI L2 + DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

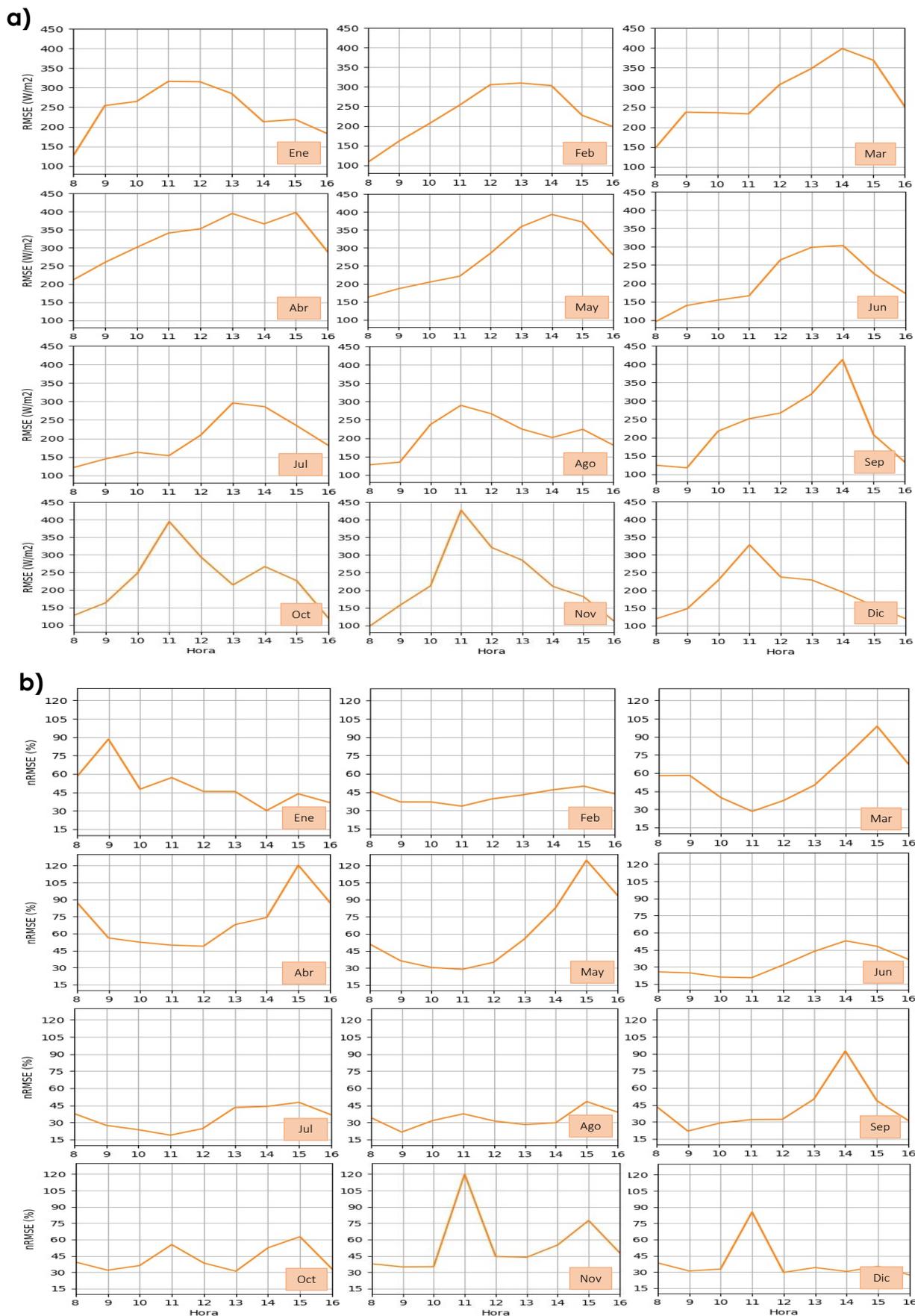


Figura 3.3.9. Ciclo diario de los errores RMSE **(a)** y nRMSE **(b)** para el 2018 calculados a partir de datos del sensor Torre SIATA y el producto ABI L2 + DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

horas de la tarde siendo mayor que el reportado para las horas de la mañana. Especialmente a las 2 y 3 de la tarde, el satélite tiene mayor sobreestimación de la irradiancia solar y son las horas donde se presenta el error nRMSE más alto. Particularmente para octubre, noviembre y diciembre, el error más alto se presentó a las 11 de la mañana, sin embargo, el error disminuye hacia las 12 del mediodía y vuelve a incrementar en las horas de la tarde como los demás meses del año.

Este comportamiento del ciclo diurno de los errores para el año 2018 puede ser explicado a partir del supuesto planteado en secciones anteriores en donde se expone que el algoritmo posiblemente baja su rendimiento en condiciones de cielo nublado o parcialmente nublado. La **Figura 2.3** muestra que para la ciudad de Medellín es común la ocurrencia de lluvias en las horas de la madrugada y a partir de las 2 de la tarde, por lo que es de suponer que en estas horas hay sistemas convectivos sobre la ciudad que pueden introducir errores en el producto final del algoritmo haciendo que éste sobreestime la radiación solar que llega a la superficie.

3.3.4 Anomalías horarias de irradiancia solar

Se graficaron las anomalías de la irradiancia solar horaria para todos los meses con el fin de analizar si el satélite es capaz de reproducir las fluctuaciones (positivas o negativas) de los valores horarios. En esta sección se presentará el análisis de los meses seleccionados (abril, julio y octubre), en la sección **Anexo B-2** se pueden encontrar los resultados de los demás meses.

Las anomalías horarias obtenidas a partir del sensor Torre SIATA (ver **Figura 3.3.10**) muestran valores positivos en las horas de la mañana seguidos de valores negativos en las horas de la tarde. Esto puede ser debido a la reducción de la irradiancia solar mostrada en la **Sección**

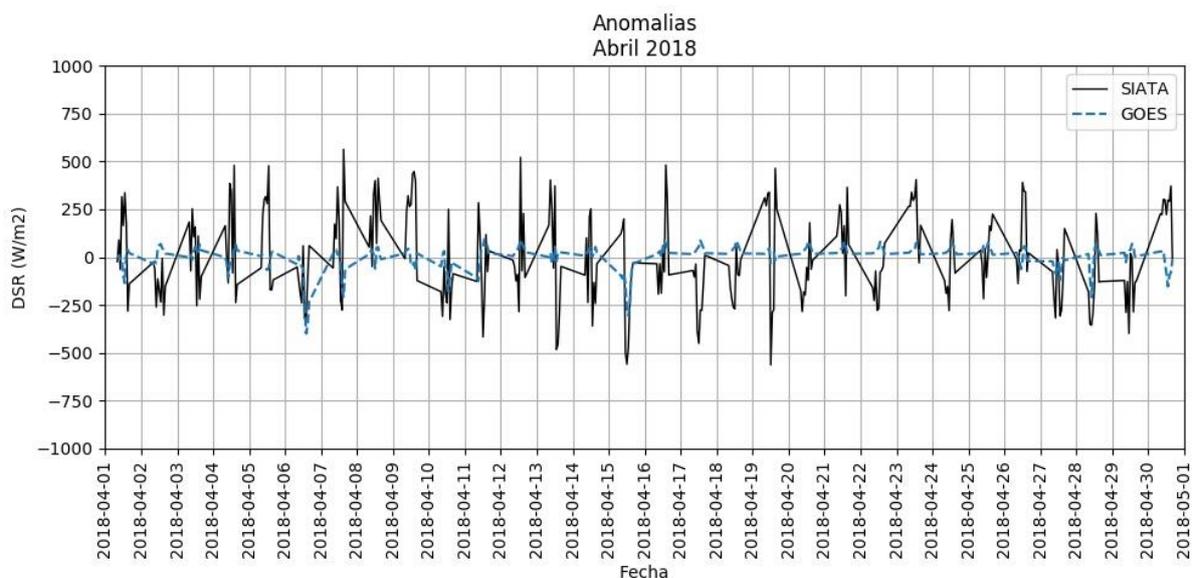


Figura 3.3.10. Serie de anomalías horarias para abril del 2018 calculados a partir de datos del sensor Torre SIATA y el producto ABI L2 + DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

3.3.2, en donde aumenta la ocurrencia de lluvias en estas horas y por lo tanto la formación de nubes.

Para los meses marzo, abril y mayo que coinciden con la primera temporada de lluvias de la ciudad, los valores de anomalías positivas se registran entre los 250 W/m^2 y los 500 W/m^2 mientras que las anomalías negativas varían en rangos de menor magnitud (ver **Figura 3.3.10**). Este comportamiento registrado por el sensor Torre SIATA es esperado pues la irradiancia solar promedio para estos meses tiene valores más bajos que para la temporada seca. El satélite GOES-East no logra capturar las anomalías de este mes, pues muestra poca variabilidad que no coincide con la registrada por el sensor.

La **Figura 3.3.11** presenta la serie horaria de anomalías para julio del 2018 en la cual se puede observar que los valores atípicos positivos varían en un rango menor que los presentados para el mes de abril, esto es indicio de que se trata de un mes más seco con valores más altos irradiancia solar promedio que el mes de abril. En cuanto a las anomalías reportadas por el satélite GOES-East no presenta alta variabilidad sin embargo logra capturar algunos valores atípicos negativos. Resultados similares se obtuvieron para junio y agosto.

La segunda temporada de lluvias de la ciudad de Medellín se da en los meses de septiembre, octubre y noviembre. En la **Figura 3.3.12** se pueden observar los resultados para el mes de octubre de 2018. Este mes en comparación con abril muestra una variabilidad más marcada. Se aprecian periodos cortos de varios días donde las anomalías horarias positivas son mayores y otros donde la magnitud de las mismas disminuye. El satélite en comparación con los demás meses también muestra mayor variabilidad de las anomalías. Estos resultados indican que en este mes los valores intra-diarios de irradiancia solar variaron más

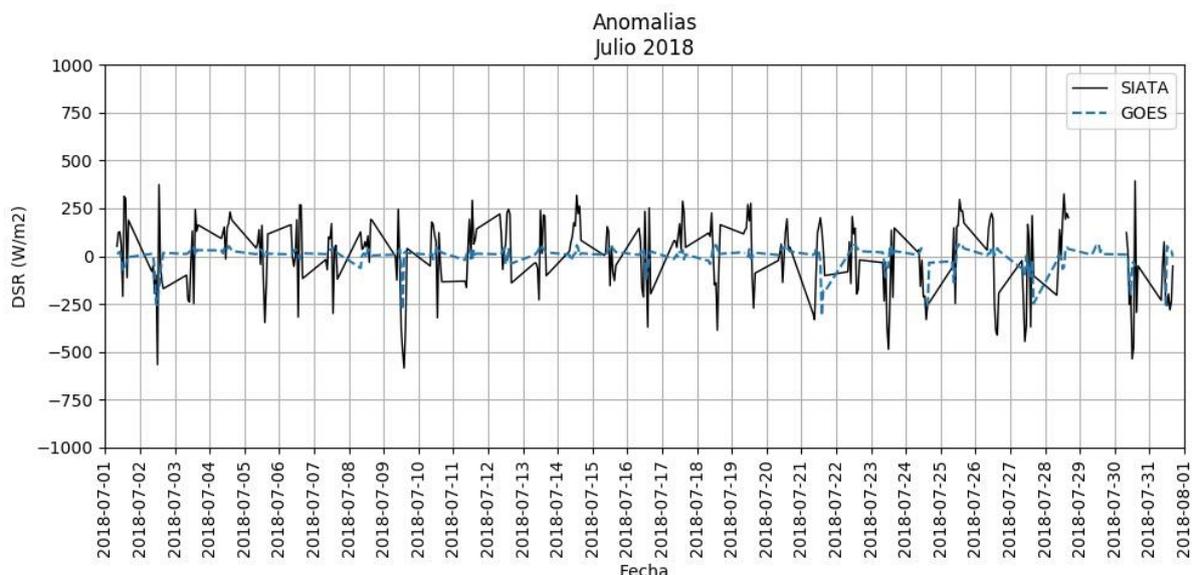


Figura 3.3.11. Serie de anomalías horarias para julio del 2018 calculados a partir de datos del sensor Torre SIATA y el producto ABI L2 + DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

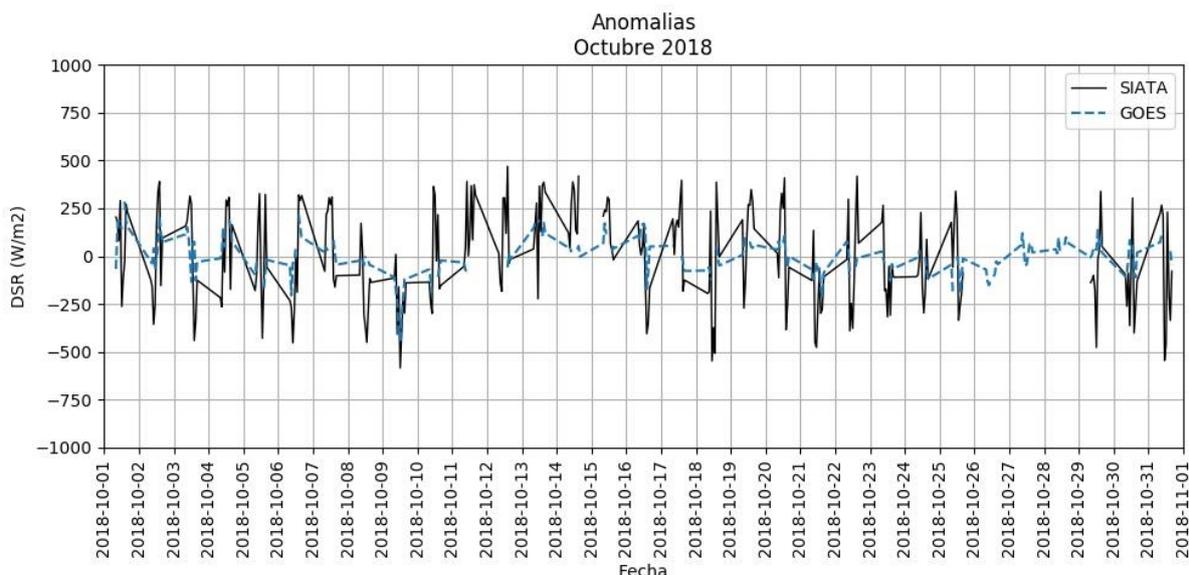


Figura 3.3.12. Serie de anomalías horarias para octubre del 2018 calculados a partir de datos del sensor Torre SIATA y el producto ABI L2 + DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

alrededor de media que en abril lo que podría significar que efectivamente se presentaron periodos de días nublados seguidos de periodos más despejados como se expone en secciones anteriores.

3.3.5 Coeficiente de correlación de Pearson.

La **Figura 3.3.13** muestra la correlación entre las anomalías calculadas a partir de los datos del sensor Torre SIATA y el producto del algoritmo ABI SRB de GOES-East.

El satélite no reproduce óptimamente las anomalías horarias de la irradiancia solar para Medellín-Colombia. Los meses con mayor correlación fueron diciembre, octubre, y septiembre con un coeficiente de correlación R de 0.37, 0.38 y 0.41 respectivamente. Los meses con menor coeficiente de correlación fueron mayo, junio y abril. Sin embargo, es importante resaltar la diferencia entre la primera temporada de lluvias (marzo, abril y mayo) y la segunda temporada de lluvias (septiembre, octubre y noviembre). Para marzo, abril y mayo, la correlación es menor que para septiembre, octubre y noviembre. La variabilidad de las anomalías horarias para la primera temporada es mayor que para la segunda. Esto podría complementar lo expuesto en secciones anteriores. Sistemas convectivos de menor tamaño y duración temporal corta (que pueden ser detectados por el sensor en tierra, pero no por el satélite GOES), se pudieron formar en marzo, abril y mayo. Sin embargo, el algoritmo al tener una resolución espacial de 50 km no puede reproducir con exactitud el efecto de estos sistemas convectivos sobre la irradiancia solar. Caso contrario ocurre en septiembre, octubre y noviembre, en donde los sistemas convectivos presentes sobre la ciudad de Medellín pudieron ser de mayor tamaño y

duración temporal, lo cual facilitaría su detección tanto por el sensor como por el satélite.

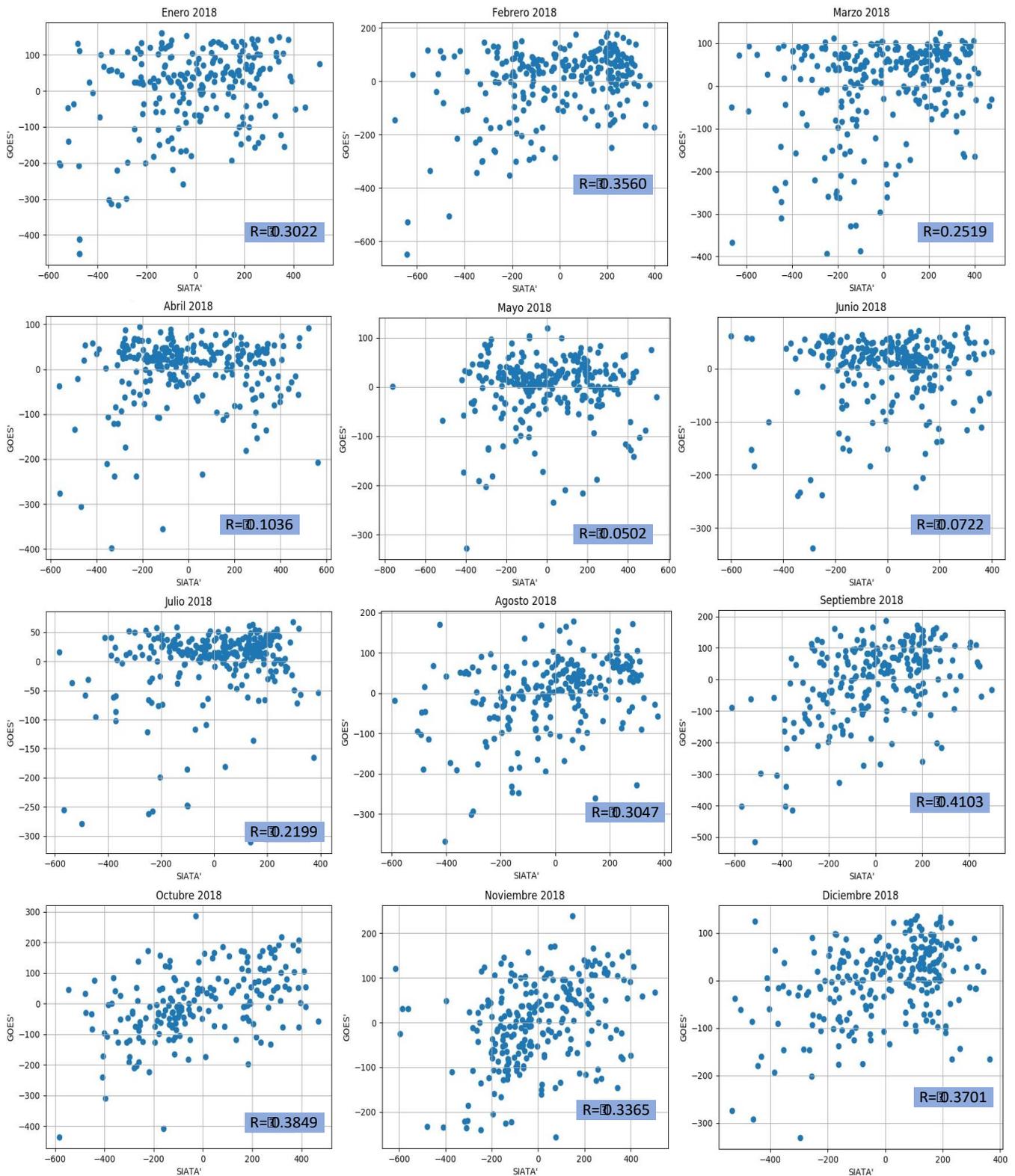


Figura 3.3.13. Coeficiente de correlación R entre anomalías horarias del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para el año 2018 en Medellín-Colombia.

3.4 Atlas de irradiación solar de Colombia.

3.4.1 Distribución espacial y temporal de la irradiación solar en Colombia suministrada por IDEAM

La distribución espacial y temporal del recurso solar es de suma importancia para el sector energético del país. La identificación de regiones estratégicas para la utilización de la energía solar es el primer paso para la solución de las necesidades energéticas de las comunidades. La **Figura 3.4.1** fue tomada del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia publicado por IDEAM en el 2017. Se presenta el promedio anual multianual de irradiación global para Colombia expresado en kWh/m² por día. En el mapa se observan los promedios más altos en la región Caribe, la Orinoquía y los valles interandinos, mientras que los menores se dan hacia la región Pacífica, el occidente de la Amazonía y algunos sectores de las tres cordilleras (IDEAM, 2017). Las zonas que reciben menor irradiación solar, con promedios inferiores a 3,5 kWh/m² por día son el Chocó, gran parte de Putumayo y Nariño, oriente del Cauca y algunas zonas de Cundinamarca, Caquetá y Santander. Los valores de irradiación más altos, por encima de los 5 kWh/m² por día, se presentan en los departamentos en La Guajira, Cesar, Magdalena y algunas zonas de Atlántico y Tolima. Además, se resaltan zonas como el norte de Bolívar, el sur de Sucre, Valle del Cauca, Casanare, Vichada, Arauca, Meta y gran parte del norte, sur y oriente de Antioquia en donde se pueden encontrar valores mayores a 4,5 kWh/m² por día.

En cuanto a la distribución temporal de la irradiación global media a lo largo del año en el país, IDEAM (2017) destaca que esta posee un comportamiento bimodal en algunas regiones, caracterizado por tener dos periodos de alta y dos de baja irradiación; en otras regiones se presenta un comportamiento monomodal, que puede contener un periodo de alta irradiación o un periodo de baja irradiación.

Las regiones Caribe y Andina se caracterizan por tener un comportamiento bimodal con valores altos de irradiación solar al inicio y mediados del año y valores bajos entre los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre. Exceptuando el departamento de Nariño, que tiene un comportamiento monomodal con valores altos de irradiación de julio a septiembre. En el norte de la región Pacífica se observa un comportamiento monomodal, con valores altos en junio, julio y agosto, y el resto de la región presenta un comportamiento bimodal contrario al comportamiento de las regiones Caribe y Andina. La Amazonía tiene un comportamiento monomodal. En el sur de la región se presentan los valores altos de irradiación en junio, julio y agosto, mientras que para el resto de la región estos meses poseen valores bajos de irradiación global. Finalmente, la Orinoquía también posee un comportamiento monomodal, con valores máximos al inicio y al final del año.

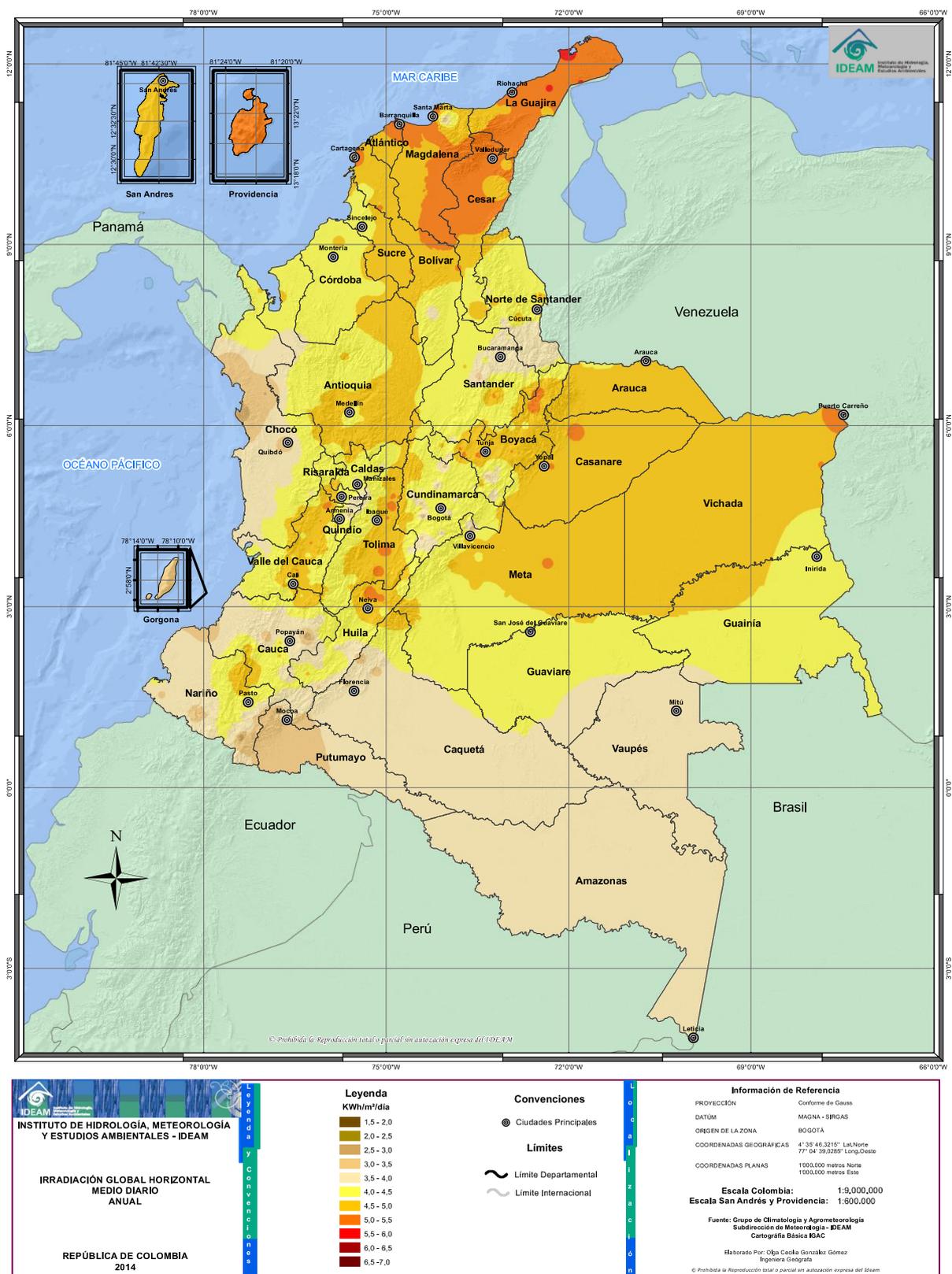


Figura 3.4.1. Irradiación global horizontal media diaria anual. Tomada del Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. IDEAM.

3.4.2 Generación de energía solar en Colombia.

En esta sección mencionamos algunos proyectos de generación de energía solar en Colombia. El recurso solar disponible puede entenderse remitiéndose a la **Figura 3.4.1** del IDEAM. Además, en las secciones siguientes, haremos referencia a algunos de los proyectos mencionados a la luz de datos del IDEAM y GOES.

Según el informe de registro de proyectos de generación de energía eléctrica publicado por UPME, en el 2019 se inscribieron 428 proyectos de energía solar (UPME, 2019). De estos, 37 son megaproyectos que tienen una capacidad de generación mayor a 100 MW. Los departamentos con mayor número de megaproyectos registrados son La Guajira, Atlántico, Cesar y Santander. Dos de los proyectos destacados en este informe son Sebastosol y Parque Solar Cuestecitas. El primero, que se encuentra en fase 2 o factibilidad, se ubicaría en Cimitarra - Santander y contaría con una capacidad de 700 MW. El segundo, se ubicaría en Maicao- La Guajira, tendría una capacidad de 600 MW y se encuentra en fase 1 o pre-factibilidad. Adicional a esto, las empresas generadoras de energía Celsia y Ecopetrol tienen agendados varios proyectos en diferentes regiones del país. Celsia planea construir dos parques solares con capacidad de 100 MW y 156 hectáreas cada uno en Cesar y Santander, y Ecopetrol tiene tres proyectos de generación de energía solar en el departamento del Meta, uno de ellos inaugurado el 18 de octubre de 2019 cuya capacidad de energía puede abastecer cerca de 27.000 habitantes (Dinero, 2019). En Colombia existen otras granjas solares que se encuentran operando y entregando energía a la red nacional. El parque solar El Paso Solar, está ubicado en El Paso-Cesar y es la granja solar más grande del país. Con una capacidad de 86,2 MW y un área de 210 hectáreas, este parque puede generar suficiente energía para abastecer 400.000 personas (Enel Green Power, 2019). Además, Celsia tiene dos granjas solares, una de 12 hectáreas en Bolívar y otra de 18 hectáreas en Yumbo-Valle del Cauca la cual entrega la energía producida a una de las centrales de producción de bebidas gaseosas Postobón.

3.4.3 Distribución espacial y temporal de la irradiación solar en Colombia suministrada por GOES-East.

La **Figura 3.4.2** presenta el mapa de irradiación media diaria anual de Colombia para el año 2018, creado a partir del producto ABI L2+ DSR de GOES-East; este mapa puede compararse con la información del IDEAM presentada en la **Figura 3.4.1**. Además la **Figura 3.4.2** incluye histogramas de irradiación media diaria mensual, calculados a partir de datos de cuatro sensores del IDEAM ubicados en los municipios: Rihacha, Barrancabermeja, El paso y Medellín, y datos extraídos del producto ABI L2 + DSR para estas mismas localidades. Adicionalmente,

IRRADIACIÓN MEDIA DIARIA ANUAL

AÑO 2018

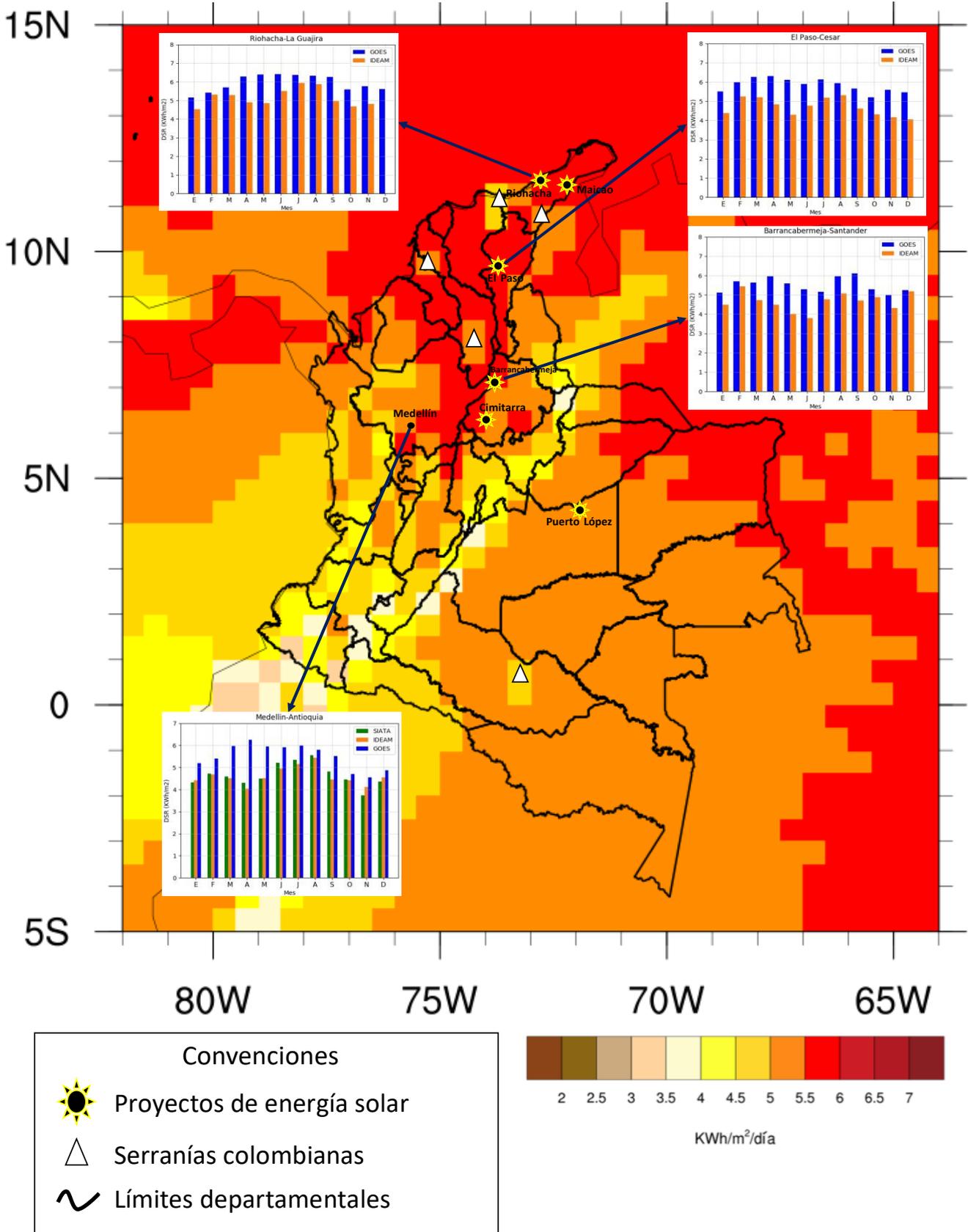


Figura 3.4.2. Irradiación global horizontal media diaria anual de Colombia para el 2018. A partir de datos de irradiancia solar del producto ABI L2 +DSR de GOES-East.

se utilizaron los datos de tres piranómetros del SIATA para el análisis en la ciudad de Medellín.

En el mapa se observan los valores más altos de irradiación solar en la región Caribe, al nororiente de la Orinoquía y en los valles interandinos. Además, se pueden apreciar valores en el rango de 5 a 5.5 kWh/m² por día en el sur de la Orinoquía y gran parte de la Amazonía. Contrario a esto, los valores mínimos de irradiación solar ocurrieron en el sur y centro de la región Pacífica, al noroccidente de la Amazonía y sobre la cordillera oriental de la cordillera de los Andes en Colombia. Las zonas que presentan promedios superiores a 5.5 kWh/m² por día son La Guajira, Cesar, Magdalena, Atlántico, Sucre, norte de Córdoba, Vichada, Arauca, Casanare, norte, sur y oriente Antioqueño. Otras zonas, como el sur de Córdoba, Santander, Norte de Santander, Meta, Guainía, Guaviare, Amazonas, Vaupés y Caquetá mostraron valores mayores a 5 kWh/m² por día. Por otro lado, los promedios de irradiación menores a 4 kWh/m² por día fueron hallados en Nariño, al occidente de Putumayo, norte de Boyacá y al oriente del Cauca. Además, en el mapa se logran visualizar promedios bajos en algunas de las serranías de Colombia como la Serranía del Chiribiquete en Caquetá, La Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá en La Guajira, la Serranía San Jacinto entre Sucre y Bolívar, y la Serranía de San Lucas al Sur de Bolívar.

Según estos resultados y aunque no es una comparación rigurosa, pues el Atlas de irradiación solar presentado por IDEAM es un mapa multianual (**Fig. 3.4.1**) y los datos satelitales sólo representan el comportamiento del recurso solar para el año 2018 (**Fig. 3.4.2**), se puede observar que el satélite logra representar las zonas con mayor radiación como la región Caribe, la Orinoquía y los valles interandinos, y tiene dificultades a la hora de calcular la irradiancia solar en lugares como el Pacífico y la Amazonía.

El sistema de información ambiental colombiana (SIAC) en su catálogo de mapas, contiene el Mapa de Bosque-No Bosque de Colombia para el año 2016 elaborado por IDEAM, en donde se muestra que la cobertura éstas dos regiones está conformada principalmente por bosques. En el Mapa de Coberturas de la Tierra elaborado por la misma institución en el año 2014 se clasificó el tipo de cobertura para gran parte de estas dos regiones como bosque denso, abierto y fragmentado. En particular, para la región amazónica, el 72,25% de la región está constituida por bosque denso alto de tierra firme y el 6,42% está constituida por bosque denso alto inundable (Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI, (2012). Para la región del Pacífico se estimó una cobertura boscosa cercana al 75% de su área total (INDERENA-IGAC, 1984). La presencia de este tipo de cobertura en estas dos regiones podría ocasionar errores en el resultado final de algoritmo ABI SRB de GOES-East debido a la alta tasa de evapotranspiración del bosque, que proporciona humedad a las masas ascendentes de aire y que finalmente da paso a la formación de sistemas convectivos.

Poveda et al (2004), destacan "gran cantidad de eventos convectivos en la región Amazónica y en una mayor proporción en la costa pacífica colombiana. Además de la baja densidad de eventos en la región norte de Colombia y Venezuela".

Se ubicaron seis zonas donde se planean construir grandes proyectos de energía solar en el país (ver **Figura 3.4.2**) y de donde se lograron obtener datos de irradiancia solar de sensores del IDEAM. En La Guajira, se encuentran principalmente el Parque Solar Cuestecitas en el municipio de Maicao, el parque solar Santa Teresa y el parque solar ENCOL I en Riohacha. En Santander, se planea la construcción del parque solar Sebastosol ubicado en el municipio Cimitarra y los parques solares El Zarzal y BarrancaSolar ubicados en Barrancabermeja. En Cesar, se encuentra la granja solar El Paso construida por la empresa Enel Green Power en el municipio de El Paso, y además se planea la construcción de otros dos proyectos solares, SC Solar San Martin y LATAM Solar La Loma, ubicados en el mismo municipio. Adicionalmente, se ubicaron dos proyectos importantes en Puerto Gaitán-Meta que se registraron con el nombre de Bosque Solares de los Llanos 1 y 2, pero para este municipio no se encontraron datos de irradiancia con buena representación espacio-temporal.

La **Tabla 3.4.1**. presenta el sesgo absoluto y porcentual entre los datos de irradiación del IDEAM y del producto de GOES-East para los municipios El Paso, Barrancabermeja, Riohacha y Medellín. Los resultados arrojados para el municipio de Riohacha, según el sensor del IDEAM, muestran un comportamiento bimodal de la irradiación solar con valores altos de febrero a marzo y de junio a agosto. El satélite por otro lado, no captura este comportamiento pues muestra una temporada de alta irradiación de abril a septiembre (ver **Figura 3.4.2**).

Mes	Estación IDEAM							
	El Paso - Cesar		Barrancabermeja - Santander		Riohacha - La Guajira		Medellín - Antioquia	
	Sesgo absoluto (kwh/m ²)	Sesgo porcentual (%)	Sesgo absoluto (kwh/m ²)	Sesgo porcentual (%)	Sesgo absoluto (kwh/m ²)	Sesgo porcentual (%)	Sesgo absoluto (kwh/m ²)	Sesgo porcentual (%)
Enero	1.14	26.04	0.63	14.10	0.63	13.85	0.78	17.57
Febrero	0.74	14.04	0.27	5.02	0.10	1.91	0.71	15.27
Marzo	1.05	20.15	0.92	19.41	0.41	7.77	1.46	32.37
Abril	1.46	30.27	1.49	33.22	1.38	28.13	2.21	54.65
Mayo	1.83	42.85	1.59	39.75	1.54	31.84	1.45	32.09
Junio	1.15	24.09	1.50	39.42	0.90	16.35	0.96	19.50
Julio	0.95	18.39	0.41	8.51	0.43	7.16	0.83	16.15
Agosto	0.64	12.07	0.90	17.70	0.45	7.66	0.37	6.71
Septiembre	1.04	22.48	1.39	29.58	1.29	26.05	1.07	23.99
Octubre	0.89	20.59	0.39	8.06	0.92	19.72	0.29	6.50
Noviembre	1.43	34.51	0.68	15.81	0.97	20.20	0.43	10.56
Diciembre	1.42	35.23	0.07	1.27	NaN	NaN	0.32	7.10

Tabla 3.4.1. Sesgo absoluto y porcentual del promedio mensual para el año 2018 a partir de mediciones de sensores IDEAM en El paso-Cesar, Barrancabermeja-Santander, Riohacha-La Guajira y Medellín-Antioquia y de los resultados obtenidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East para estas localidades.

Los meses con sesgos más altos fueron abril, mayo y septiembre, meses en los que la irradiación solar es menor a 5 kWh/m^2 según las mediciones del IDEAM (ver **Tabla 3.4.1**). En el municipio de El Paso, ubicado en el departamento del Cesar, los valores con mayor irradiación según el sensor del IDEAM se presentaron al inicio y a mitad del año, mientras que los promedios menores se registraron en mayo, octubre, noviembre y diciembre. El producto del algoritmo ABI SRB logra identificar para este municipio los promedios mayores al inicio y mediados del año y valores más bajos en los meses octubre, noviembre y diciembre. Los resultados de la **Tabla 3.4.1** mostraron un sesgo porcentual superior al 30% en los meses de baja irradiación como abril, mayo, noviembre y diciembre. En Barrancabermeja, el sensor IDEAM registró promedios altos en los períodos de diciembre a marzo y de julio a octubre y valores mínimos en abril a julio. El satélite GOES-East por otro lado, registra valores máximos en abril, agosto y septiembre, y mínimos en julio y noviembre. Los sesgos más altos se presentaron en la temporada de baja radiación, en los meses de abril, mayo y junio. En los resultados para Medellín, se obtiene que tanto el sensor de IDEAM, ubicado en el aeropuerto Olaya Herrera, como el resultado del promedio de las tres estaciones del SIATA, representan de forma equivalente el comportamiento bimodal de la irradiación en Medellín, con dos temporadas de radiación alta al inicio y mediados del 2018. El resultado del producto ABI L2+DSR para la ciudad, muestra una temporada de alta irradiación en los meses de marzo, abril y mayo y una de menor irradiación en los meses de octubre, noviembre y diciembre. La **Tabla 3.4.1** muestra sesgos altos en los meses de marzo, abril, mayo y septiembre, en donde la irradiación según el sensor en tierra es menor a 5 kWh/m^2 . El satélite logra capturar el comportamiento de la irradiación solar con valores altos en junio, junio y agosto, y valores bajos en septiembre, octubre y noviembre.

La **Figura 3.4.3** presenta el ciclo anual de irradiancia solar calculado a partir de datos obtenidos de sensores en tierra del IDEAM y del producto ABI L2 + DSR de GOES-East para cuatro municipios diferentes de Colombia. El sensor ubicado en el municipio El Paso, en el departamento del Cesar reporta valores máximos cercanos a 600 W/m^2 en febrero, marzo, julio y agosto, y valores mínimos ocurren en mayo y diciembre. El satélite GOES-East para este municipio no reproduce adecuadamente el comportamiento bimodal de la irradiancia solar. Los valores mínimos reportados por este ocurren en octubre y es el único valor menor a 600 W/m^2 mientras que ninguno de los valores reportados por el sensor IDEAM supera esta cifra. En Barrancabermeja, se pueden observar valores máximos en febrero, agosto y diciembre; y valores mínimos en junio. El comportamiento bimodal de irradiancia solar característico de este municipio se puede observar en los valores reportados por el satélite GOES-East con magnitudes mayores, pero representando dos temporadas de baja irradiancia solar a mitad y final del año.

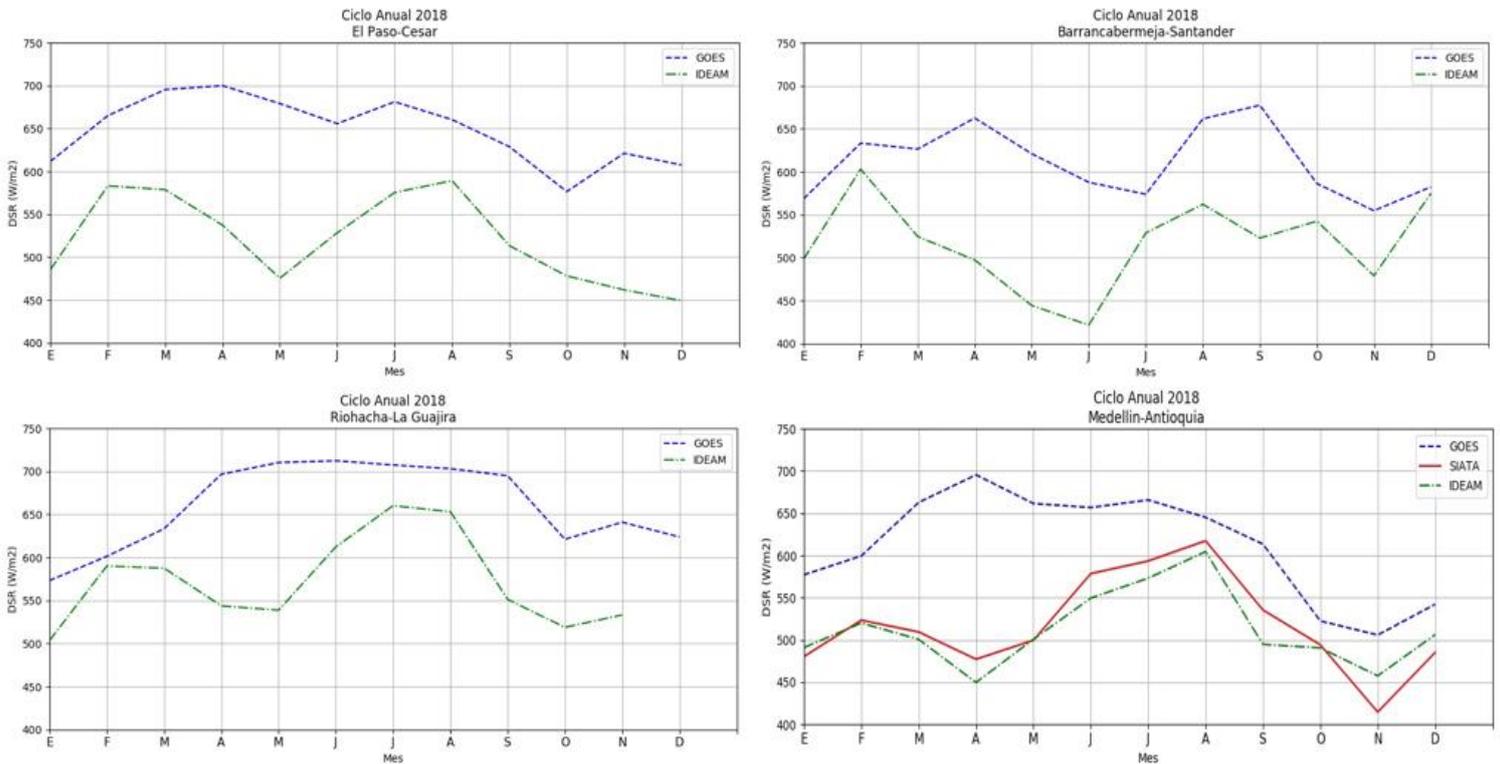


Figura 3.4.3. Ciclo anual de irradiancia solar (W/m^2) para los municipios El Paso, Barrancabermeja, Riohacha y Medellín. Calculado a partir de datos de irradiancia solar de sensores IDEAM y del producto ABI L2 + DSR de GOES-East para el año 2018.

Para el municipio de Riohacha, ubicado en el departamento La Guajira, el sensor IDEAM reporta valores máximos por encima de los $650 W/m^2$ en los meses julio y agosto, valores más bajos entre los 500 y $550 W/m^2$ en octubre, noviembre y enero, y un ciclo bimodal del recurso con dos temporadas de alta irradiancia solar al inicio y mediados del año. Por otro lado, el satélite GOES-East reporta valores mínimos no inferiores a $550 W/m^2$ y una temporada de valores altos, por encima de los $700 W/m^2$, que se extiende desde abril hasta septiembre. Esto indica que el satélite reproduce un comportamiento monomodal no característico de la irradiancia solar real que llega a este municipio. Los resultados arrojados por el sensor IDEAM en el cálculo del ciclo anual para la ciudad de Medellín fueron muy similares a los que se obtuvieron en el análisis de los datos del sensor Torre SIATA (ver **Figura 3.4.3**), las diferencias en las mediciones están dadas principalmente porque los sensores no se encuentran ubicados en el mismo lugar. El análisis del ciclo anual y el desempeño del satélite para la ciudad de Medellín se realizó en la **Sección 3.1.1**.

La **Tabla 3.4.2**. contiene los errores mensuales calculados para los municipios El Paso, Barrancabermeja y Riohacha durante el año 2018 a partir de datos obtenidos de sensores IDEAM y del producto ABI L2 + DSR. Principalmente, los resultados muestran que el satélite sobreestima las mediciones mensuales para todos los municipios evaluados. En

Mes	EL PASO-CESAR				RIOHACHA-LA GUAJIRA				BARRANCABERMEJA-SANTANDER			
	MBE (W/m ²)	nMBE (%)	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	MBE (W/m ²)	nMBE (%)	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	MBE (W/m ²)	nMBE (%)	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)
Enero	128.85	26.68	213.61	44.24	73.24	14.65	260.91	52.18	72.44	14.60	253.65	51.12
Febrero	79.76	13.69	295.68	50.75	8.93	1.51	326.10	55.03	29.27	4.86	228.87	37.99
Marzo	116.38	20.10	258.12	44.57	50.64	8.69	338.19	58.03	101.78	19.40	251.75	47.98
Abril	162.99	30.41	290.54	54.21	178.86	34.64	344.78	66.78	147.73	29.51	348.58	69.62
Mayo	197.15	40.89	331.48	68.76	121.47	20.63	240.57	40.86	141.65	32.10	338.10	76.63
Junio	136.63	26.32	238.02	45.85	75.15	11.79	298.88	46.90	81.42	19.02	243.64	56.92
Julio	99.90	17.18	250.72	43.12	46.59	7.05	202.89	30.70	43.69	8.24	209.48	39.51
Agosto	83.28	14.25	248.76	42.56	91.11	14.89	341.04	55.74	104.42	18.75	400.41	71.91
Septiembre	114.56	22.23	289.82	56.24	181.06	35.36	371.79	72.61	152.55	29.10	432.85	82.56
Octubre	90.06	18.66	292.01	60.51	77.25	14.47	294.44	55.16	45.48	8.43	390.74	72.39
Noviembre	157.04	34.09	320.10	69.49	50.42	9.47	168.92	31.73	72.21	14.96	344.27	71.34
Diciembre	157.19	34.69	353.61	78.04	NaN	NaN	NaN	NaN	15.07	2.66	201.61	35.54

Tabla 3.4.2. Error de sesgo medio, error cuadrático medio y sus respectivos normalizados para los municipios El Paso, Riohacha y Barrancabermeja durante el año 2018.

particular para el municipio El paso, los errores mayores se presentaron en diciembre, noviembre y mayo con un RMSE por encima de 300 W/m²; en Barrancabermeja, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre tienen un error cuadrático medio normalizado por encima del 70% y en Riohacha el error mayor se presentó en septiembre con un nRMSE mayor a 70%, sin embargo, abril y marzo también tuvieron errores mayores al 58%. Estos errores coinciden para todas las localidades con los meses en los que baja considerablemente la irradiación solar.

Teniendo en cuenta los resultados de la **Tabla 3.4.2** y los errores mensuales calculados para la ciudad de Medellín (ver **Sección 3.1.1**), Riohacha es el municipio de los cuatro evaluados en el que el satélite produce datos con menor sobreestimación y menor RMSE para el periodo de tiempo evaluado. Estos datos, aunque no han sido validados rigurosamente, logran exhibir mejores resultados para zonas con relieve plano que para zonas con relieve montañoso como es el caso de Medellín. La radiación solar que alcanza la superficie es espacialmente heterogénea en superficies rugosas debido a la complejidad topográfica y clima local. Por lo tanto, la validación de datos DSR satelitales puede generar mayor incertidumbre en terrenos más complejos que en áreas planas (Jin et al., 2013).

La distribución estacional de la irradiación solar en Colombia a partir de datos suministrados por el algoritmo ABI SRB de GOES para el año 2018 se presenta en la **Figura 3.4.4**. Se encuentra que el satélite captura algunos comportamientos propios para cada región. La región Caribe, presenta aumentos en los valores promedio de irradiación para los meses del inicio y mediados del año. Además, muestra disminuciones para los meses de septiembre, octubre y noviembre. Este comportamiento es típico de un régimen bimodal, como se mencionó en la **Sección 3.4.1**. Sin embargo, el producto ABI L2 + DSR muestra

IRRADIANCIA MEDIA ESTACIONAL – AÑO 2018

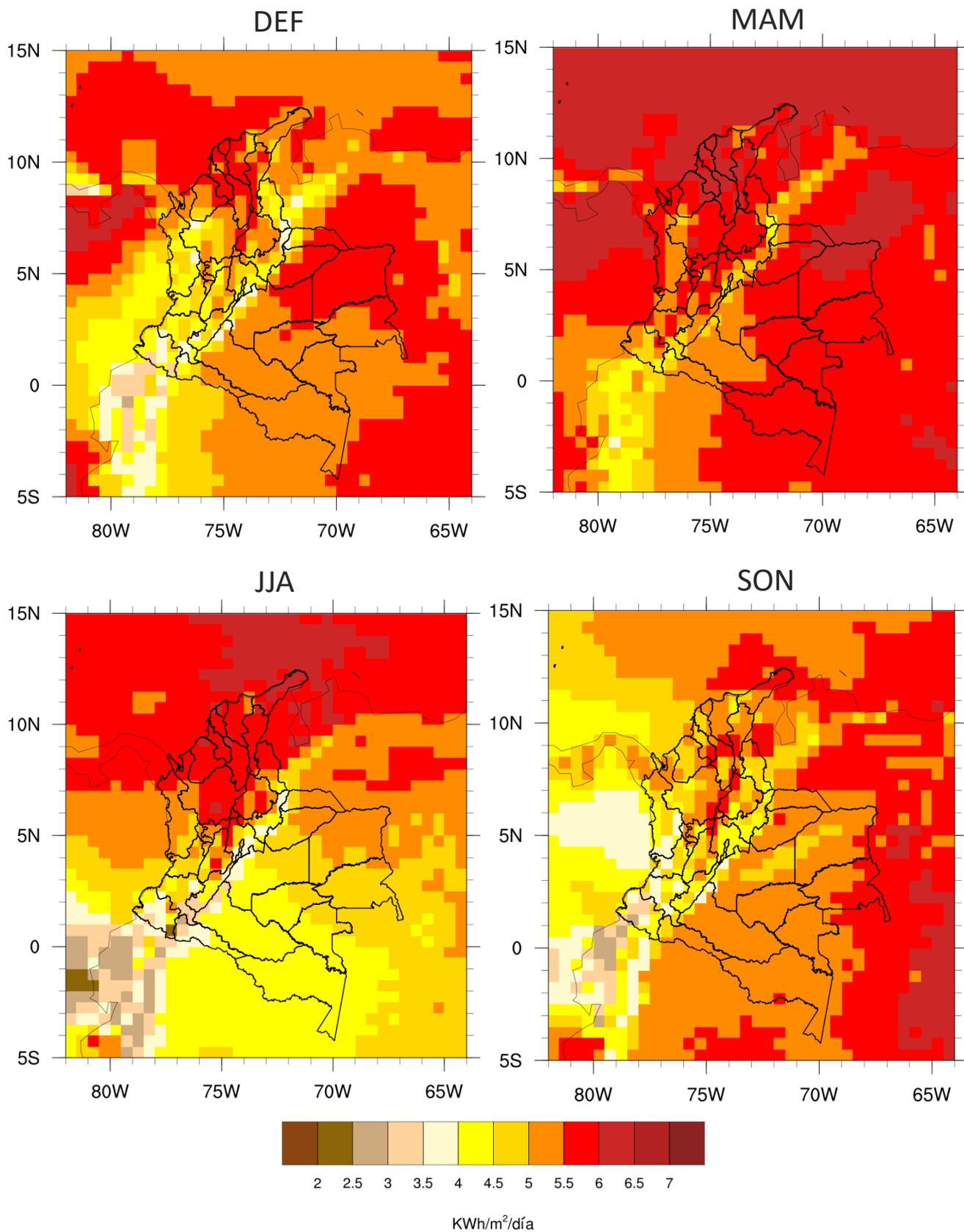


Figura 3.4.3. Irradiación media estacional (KWh/m^2) para Colombia. Calculado a partir de datos del producto ABI L2 + DSR de GOES-East para el año 2018.

sobreestimaciones en los meses de abril y mayo, los cuales comúnmente presentan valores bajos del recurso. La región Andina, al igual que la región Caribe, presentó valores altos al inicio y mitad del año y bajos en los meses octubre y noviembre. De nuevo, en los meses de marzo a abril se observan valores altos, no típicos del comportamiento bimodal real de esta región. En cuanto al sur de la región Andina en el departamento de Nariño, los valores altos de irradiación se dieron en los meses de abril y mayo, mientras que para el resto del año se presentaron valores bajos. Esto no concuerda con el comportamiento monomodal del departamento. Para la región Pacífica se observan dos comportamientos. El norte de la región presenta aumentos de irradiación en los meses de febrero a abril y de junio a agosto. Para el resto del Pacífico se observan valores altos de marzo a mayo y bajos de octubre a diciembre. En esta región el satélite GOES-East no logra captar los cambios estacionales de la irradiación solar reportada por IDEAM y tampoco registra valores bajos en el departamento del Chocó, zona ampliamente conocida por ser una de las regiones más lluviosas del mundo debido a su localización en la zona de migración de la Zona de Convergencia Intertropical y la influencia del Chorro del Chocó (Poveda y Mesa, 2000). En cuanto a la región Amazonía, los valores más bajos del GOES-East se presentaron en los meses junio, julio y agosto, evidenciando un comportamiento bimodal similar al planteado por IDEAM. Sin embargo, al sur de la región se observaron valores altos en los meses de enero a abril y de septiembre a noviembre, y bajos a mediados del año. Este comportamiento no representa adecuadamente el régimen monomodal planteado por IDEAM para esta zona de la región amazónica. Por último, la región Orinoquía presentó valores máximos de irradiación solar al inicio y final de año, y valores mínimos en los meses junio, julio y agosto. Este comportamiento representa bien el régimen monomodal característico de esta región. El atlas de irradiación solar para Colombia del año 2018 a partir de conjunto de datos de GOES-East representa satisfactoriamente los lugares con mayor irradiación, en los cuales hay especial interés del sector energético y en los que se encuentran planeados la mayor parte de los proyectos de energía solar para el país. Sin embargo, la distribución espacial muestra mayores sobreestimaciones en la región Pacífico y Amazonía, y la distribución temporal muestra sobreestimaciones principalmente en los meses de abril y mayo. Cabe aclarar que la diferencia de los periodos analizados para el atlas del IDEAM y para la realización de este trabajo, no son comparables de forma cuantitativa y pueden generar altos grados de incertidumbre. En cuanto a la comparación entre diferentes estaciones del IDEAM con el producto satelital, se evidencia un mejor desempeño por parte del algoritmo ABI SRB en las zonas con relieve plano que en zonas con superficie rugosa como lo son los municipios ubicados en las cordilleras de la región Andina. Y aunque existen estudios que evidencian el efecto

de la topografía sobre la incertidumbre de los productos satelitales, estos resultados son apresurados pues necesitan una validación rigurosa. Los mapas del atlas de irradiación solar medio diario mensual derivados del GOES-East para el año 2018 se presentan en la sección **Anexo C-1**.

4 Conclusiones.

Validar el producto ABI L2 + DSR de GOES- East es importante porque la precisión que pueda lograr este producto satelital implica grandes avances para la comunidad científica en múltiples aplicaciones. Ampliar el conocimiento sobre este tipo de productos satelitales es útil para la estimación del recurso solar en un país como Colombia, que cuenta con gran potencial energético, con una industria creciente e innumerables proyectos planeados, con políticas que empiezan a impulsar el desarrollo de la energía solar, y con una gran cantidad de poblaciones que necesitan soluciones energéticas eficaces y económicamente viables.

Los resultados de este estudio muestran que un producto satelital, como ABI L2 + DSR con resolución espacial gruesa, tiene alta incertidumbre si sólo se valida con un sitio en superficie. Esta validación puso en evidencia sesgos positivos y substanciales en terrenos complejos, en donde la topografía y el clima local influyen directamente en la heterogeneidad con la que llega la radiación solar a la superficie. Consecuentemente, ABI L2 + DSR sobreestima más la irradiancia solar en zonas montañosas, como la región Andina, que, en áreas de extensas planicies como el Caribe, la Orinoquía y los valles interandinos. Además, se encontró que las zonas que mayor sobreestimación del recurso presentan eran aquellas en donde la formación de sistemas convectivos es constante, como ocurre en el Pacífico y en la Amazonía colombiana. Este error introducido por la formación de nubes no sólo se evidenció en el análisis del atlas solar de irradiación para todo Colombia, sino que también se comprobó en el estudio del desempeño del algoritmo a escala horaria, diaria y mensual para la ciudad de Medellín.

ABI L2 + DSR representa satisfactoriamente la variabilidad horaria a lo largo del día, sin embargo, tiene un alto grado de error para las horas de la tarde, conocidas por presentar mayor ocurrencia de nubes, y hasta lluvias. Además, el producto sobreestima principalmente valores por debajo de 300 W/m^2 y subestima mediciones que se encuentren por encima de 900 W/m^2 . Las condiciones de cielo despejado mejoran notablemente el desempeño del algoritmo al representar la variabilidad diaria. Un comportamiento similar se encontró al evaluar el ciclo anual de irradiancia solar. ABI L2 + DSR presentó errores más altos para los meses en los cuales ocurre la temporada de lluvias de la ciudad. En especial, se encontraron altas sobreestimaciones en los meses de abril y mayo, tanto para la validación realizada en Medellín como para el análisis cualitativo hecho para todo Colombia. La razón del alto error para estos dos meses no se conoce, pero tal vez tenga que ver con el rol de las nubes y su limitada representación en el algoritmo del DSR. En cuanto al análisis realizado para las anomalías de las series horarias y diarias de la irradiancia solar, el producto satelital no representa bien ni la magnitud ni el signo de las fluctuaciones durante año analizado. Aun así, las correlaciones para la primera temporada de lluvias (marzo-abril-mayo) son menores que para la segunda temporada de lluvias (septiembre-octubre-noviembre), respaldando aún más el supuesto de sistemas convectivos de menor tamaño

y duración temporal pudieron ocurrir en la primera temporada de lluvias, los cuales pueden ser detectados por el sensor en tierra, pero no por el satélite. Considerando lo anterior, una validación adicional del producto ABI L2 + DSR de GOES-East todavía es necesaria. Ampliar el periodo de estudio, pues el producto sólo está disponible a partir de junio del 2017, aumentar el número de estaciones en superficie usadas y validar en zonas con condiciones topográficas y climáticas diferentes pueden ilustrar mejor las potenciales bondades del producto DSR. Sin embargo, en un país como Colombia esta podría no ser una solución factible, dado que la red de mediciones en superficie tiene un cubrimiento espacio-temporal no suficiente, especialmente para las zonas alejadas de los centros urbanos, donde hay limitaciones relacionadas a la disponibilidad de información en superficie y al acceso para la instalación de equipos de medición. Aun así, con miras a buscar soluciones para las zonas no interconectadas del país y a fomentar el crecimiento del sector energético, otros productos con resolución espacial más fina y con un periodo de datos disponibles más amplio deberían ser estudiados.

5 Referencias bibliográficas

- Badescu, V. (2018). *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface* (V. Badescu, Ed.).
- Calvo, J., Morales, G., & Polo, J. (2018). *Wind Field and Solar Radiation Characterization and Forecasting* (R. Perez, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76876-2>
- Dinero, (10 de octubre 2019). *Ecopetrol inaugura el primer Parque Solar en el Meta*. Dinero. Tomado de <https://www.dinero.com/pais/articulo/como-es-el-primer-parque-solar-de-ecopetrol-en-el-meta/278254>
- Enel Green Power. (8 de abril 2019). *Enel Green Power inaugura El Paso Solar, la planta fotovoltaica más grande de Colombia*. Tomado de <https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/d/2019/04/planta-fotovoltaica-el-paso-colombia-puesto-marcha>
- Gómez, N. (2011). *Energización de las ZNI de Colombia a partir de las energías solar y eólica*. 99.
- IDEAM. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. IDEAM, Colombia, 175. <https://doi.org/10.1080/10426509308038196>
- IDEAM, & UNAL. (2018). *La Variabilidad Climática y el Cambio Climático en Colombia*. 28. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>
- IDEAM, & UPME. (2017). *Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia* (p. 172). p. 172.
- JIN, H., LI, A., BIAN, J., ZHANG, Z., & HUANG, C. (2013). *Validation of Global Land Surface Satellite (GLASS) Downward Shortwave Radiation Product in the Rugged Surface*. *J. Mt. Sci.* (2013) 10(5): 812–823 <http://jms.imde.ac.cn>. DOI: 10.1007/s11629-013-2543-6.
- Leon, G. E., Zea, J. A., & Eslava, J. A. (2000). *Circulación general del tropico y la zona de confluencia intertropical en Colombia*. *Meteorología Colombiana*, (1), 31–38. Retrieved from http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero01/01_05.pdf
- Liou, K. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. In R. DMOWSKA, J. R. HOLTON, & H. T. ROSSBY (Eds.), *INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES* (Vol. 84).
- Mandt, G. (2015). *The GOES-R Series : The Nation's Next-Generation Geostationary Weather Satellites NOAA Satellite and Information Service (NESDIS)*.
- NOAA. (2012). *NOAA NESDIS CENTER for SATELLITE APPLICATIONS and RESEARCH GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Downward Shortwave Radiation (Surface), and Reflected Shortwave Radiation (TOA)*. 107. Retrieved from <https://www.goes-r.gov/products/ATBDs/baseline/baseline-LST-v2.0.pdf>

- NOAA. (2018). GOES-16 ABI L2 + Shortwave Radiation Budget (SBR) Release Provisional Data Quality. 3.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., & Vignola, F. (2002). A New Operational Satellite-to-Irradiance Model - Description and Validation. *Solar Energy*, 73(5), 307–317. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00122-6)
- Pillot, B., Muselli, M., Poggi, P., & Dias, J. B. (2015). Satellite-based assessment and in situ validation of solar irradiation maps in the Republic of Djibouti. *Solar Energy*, 120, 603–619. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.015>
- Polo, J., Zarzalejo, L. F., & Ramírez, L. (2008). Solar Radiation Derived from Satellite Images. In V. Badescu (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Recent Advances* (pp. 449–460). Springer-Verlag.
- Poveda, G. (2004) La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 28(107): 201-222. ISSN: 0370-3908.
- Poveda, G., Zuluaga, M., & Mejía, J. (2004). Diagnostico de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia durante 1998-2002. Universidad Nacional de Colombia. XXI Congreso latinoamericano de hidrología São Paulo, estado de São Paulo, Brasil. Octubre 2004.
- Poveda, G. y Mesa, O. J. (2000). On the existence of Iloró (the rainiest locality on earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11):1675–1678.
- REN 21. (2016). Energías renovables 2016: reporte de la situación mundial. Ren21, 31. Retrieved from www.ren21.net/map
- Shuttleworth, W. J. (2012). Terrestrial Hydrometeorology. In *Terrestrial Hydrometeorology*. <https://doi.org/10.1002/9781119951933>
- Suárez, D. A. (2013). EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN BOGOTÁ A PARTIR DE IMÁGENES DEL SATÉLITE GOES. Universidad Nacional de Colombia.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). ZONAS NO INTERCONECTADAS -ZNI Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2018. Retrieved from <http://www.superservicios.gov.co/content/download/22068/180454>
- UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. In Ministerio de Minas y Energía. <https://doi.org/10.1021/ja304618v>
- UPME. (2019). Informe dinámico del registro de proyectos de generación de energía eléctrica. Visitar <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generaci%C3%B3n/Inscripci%C3%B3nde proyectosdeGeneraci%C3%B3n/tabid/113/Default.aspx>
- Urrego, J. (2019). ESTIMATES OF GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE IN MEDELLÍN-COLOMBIA USING A STOCHASTIC MODEL AND A NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL. Universidad De Antioquia.
- Velasco, I. y Fritsch, J. M. (1987). Mesoscale convective complex in the Americas. *Journal of Geophysical Research*, 92(D8):9591–9613.

- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey*. Elsevier.
- Zarzalejo, L. F., Ramírez, L., Polo, J., Martín, L., & Espinar, B. (2006). Estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite: nuevos mapas de evaluación de la irradiancia solar para la península Ibérica. II Conferencia Regional Latinoamericana de La International Solar Energy Society (ISES), 10(April 2016), 11.71-11.78. Retrieved from [http://www.asades.org.ar/averma/index.htm%5Cnfile:///j/Privada/LuisZ/Thesis/Referencias/Revistas_Varias/AVERMA_10\(2006\)_Estimacion de la radiacion solar a partir de imagenes de satelite_Iberica.pdf%5Cnfile:///j/Privada/LUIS/Articulos_Congresos/2006/BSAS_06/](http://www.asades.org.ar/averma/index.htm%5Cnfile:///j/Privada/LuisZ/Thesis/Referencias/Revistas_Varias/AVERMA_10(2006)_Estimacion de la radiacion solar a partir de imagenes de satelite_Iberica.pdf%5Cnfile:///j/Privada/LUIS/Articulos_Congresos/2006/BSAS_06/)
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., & Renné, D. (1999). Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, 62(3–4), 199–207. <https://doi.org/10.1007/s007040050084>
- Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst. (s, f). Maps of global radiation, monthly and annual sum. Dwd.de. Recuperado de https://www.dwd.de/EN/ourservices/solarenergy/maps_globalradiation_sum.html

6 ANEXOS

Anexo A. Escala diaria de irradiación solar para Medellín-Colombia.

A-1. Serie de tiempo diaria de irradiancia solar.

A-2. Anomalías diarias de irradiancia solar.

Anexo B. Escala horaria de irradiación solar para Medellín-Colombia.

B-1. Serie de tiempo horaria de irradiancia solar.

B-2. Anomalías horarias de irradiancia solar

Anexo C. Atlas de irradiación solar mensual para Colombia.

C-1. Distribución mensual de la irradiancia solar en Colombia suministrada por GOES-East para el año 2018.

ANEXO A

Escala diaria de irradiación solar para Medellín-Colombia.

A continuación, se presentan en este anexo las gráficas, figuras y tablas correspondientes a los resultados obtenidos del análisis y la validación del conjunto de datos ABI L2 + DSR de GOES-East a escala diaria durante el año 2018 en la ciudad de Medellín, Colombia.

Anexo A-1

Serie de tiempo diaria de irradiancia solar.

Las siguientes figuras pertenecen al procesamiento del conjunto de datos de irradiancia solar ABI L2+DSR del satélite GOES-East y de las mediciones obtenidas por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia durante el año 2018. Los valores corresponden a promedios diarios expresados en W/m^2 .

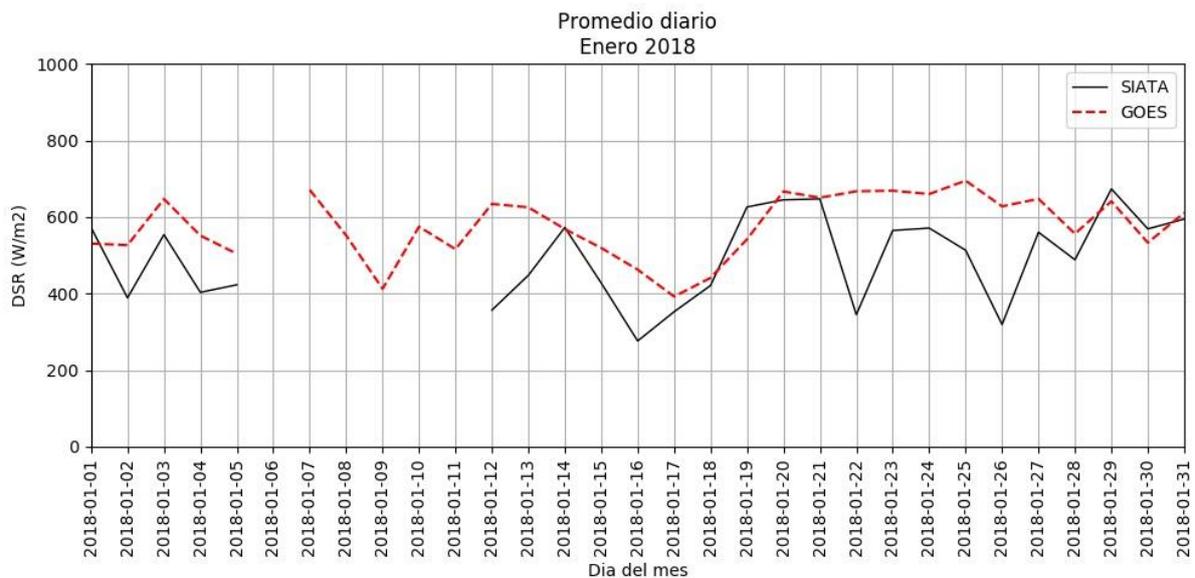


Figura A.1.1. Variabilidad diaria durante el mes de enero del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

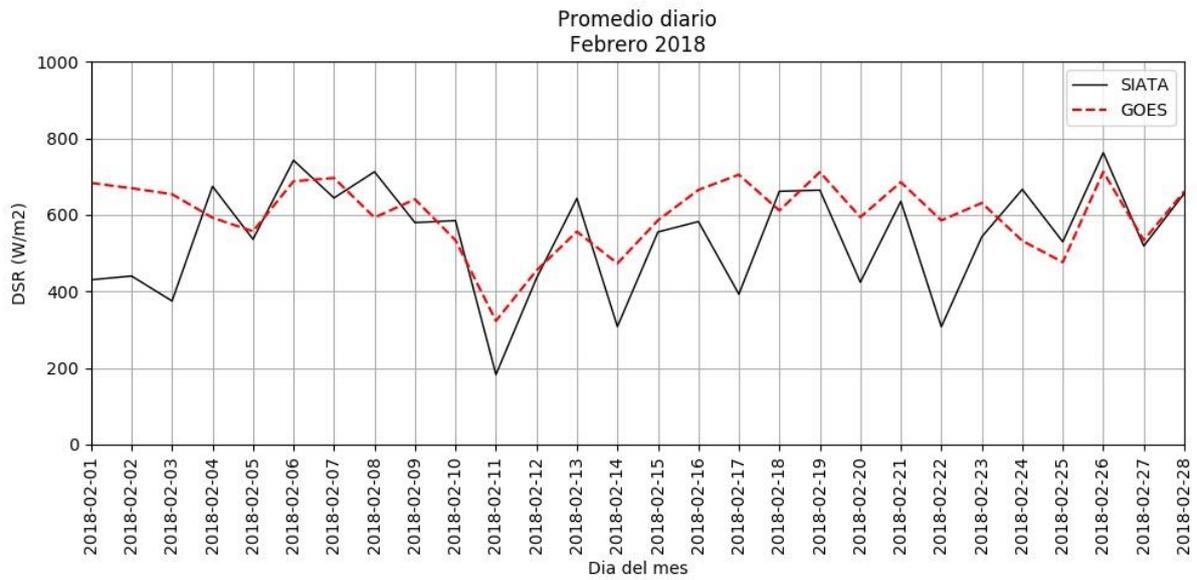


Figura A.1.2. Variabilidad diaria durante el mes de febrero del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

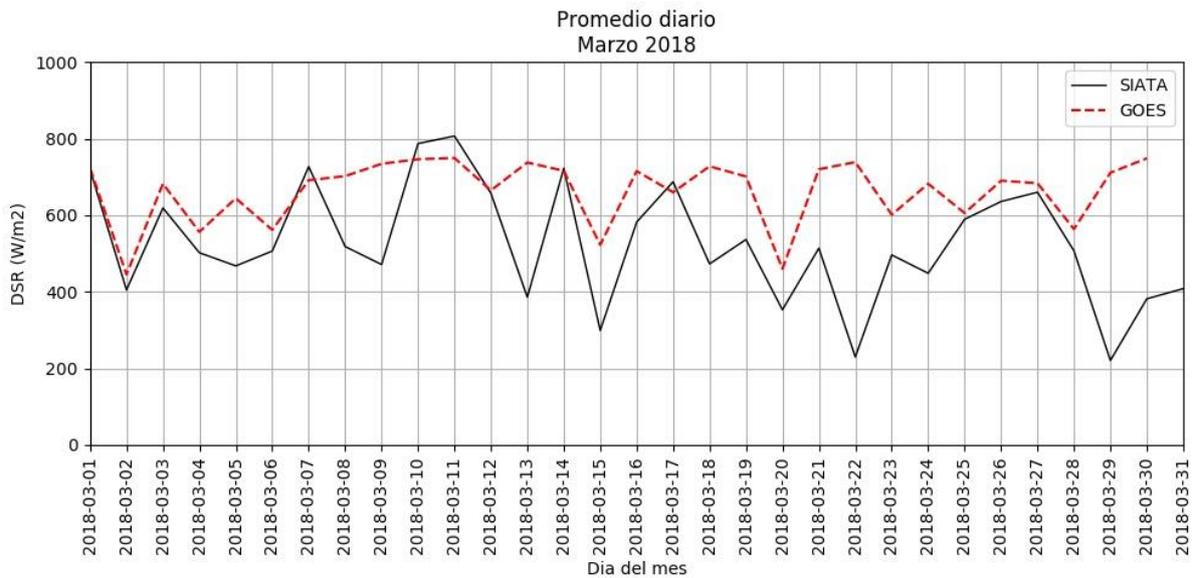


Figura A.1.3. Variabilidad diaria durante el mes de marzo del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

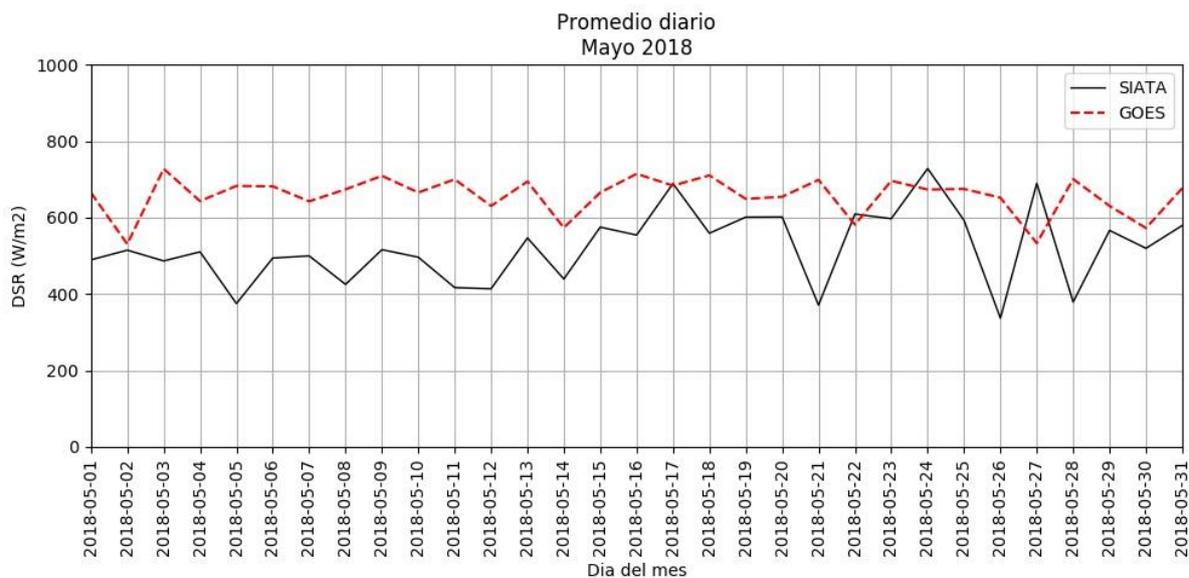


Figura A.1.4. Variabilidad diaria durante el mes de mayo del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.



Figura A.1.5. Variabilidad diaria durante el mes de junio del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

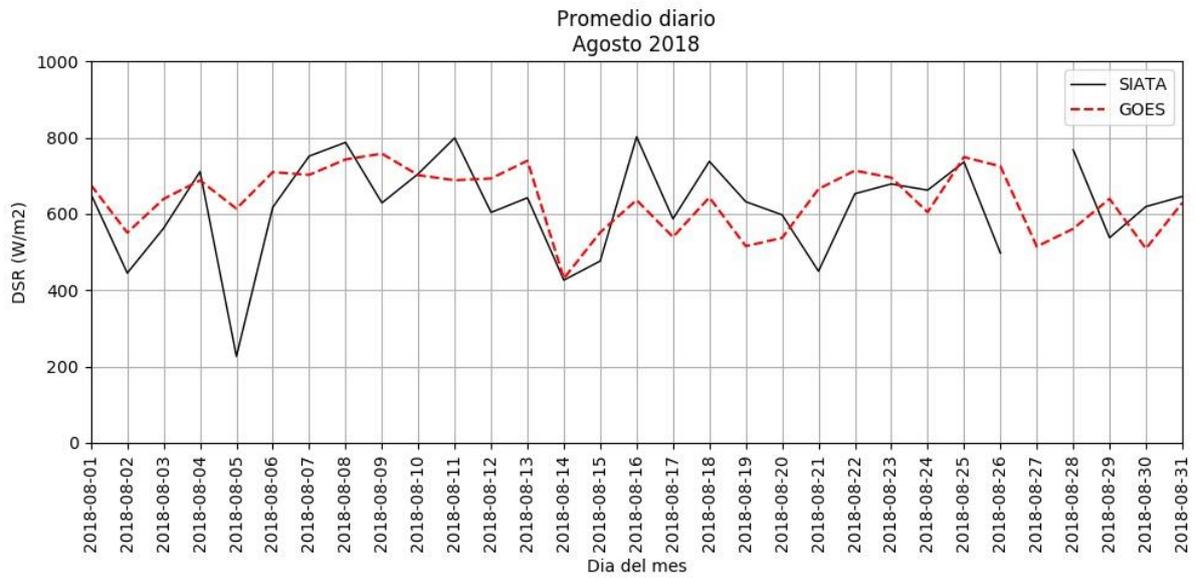


Figura A.1.6. Variabilidad diaria durante el mes de agosto del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

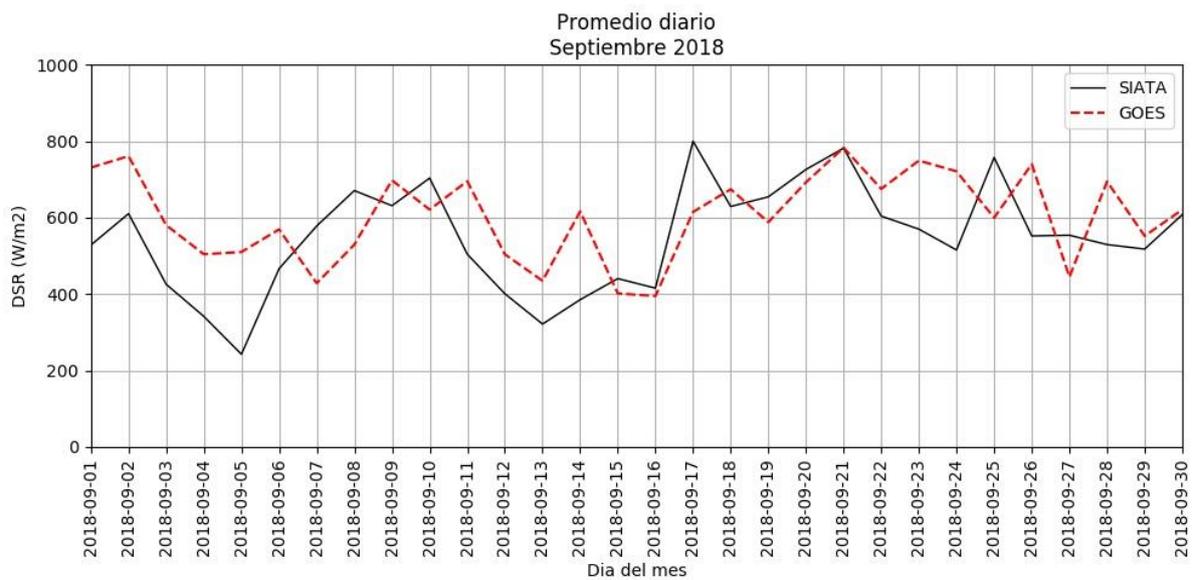


Figura A.1.7. Variabilidad diaria durante el mes de septiembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

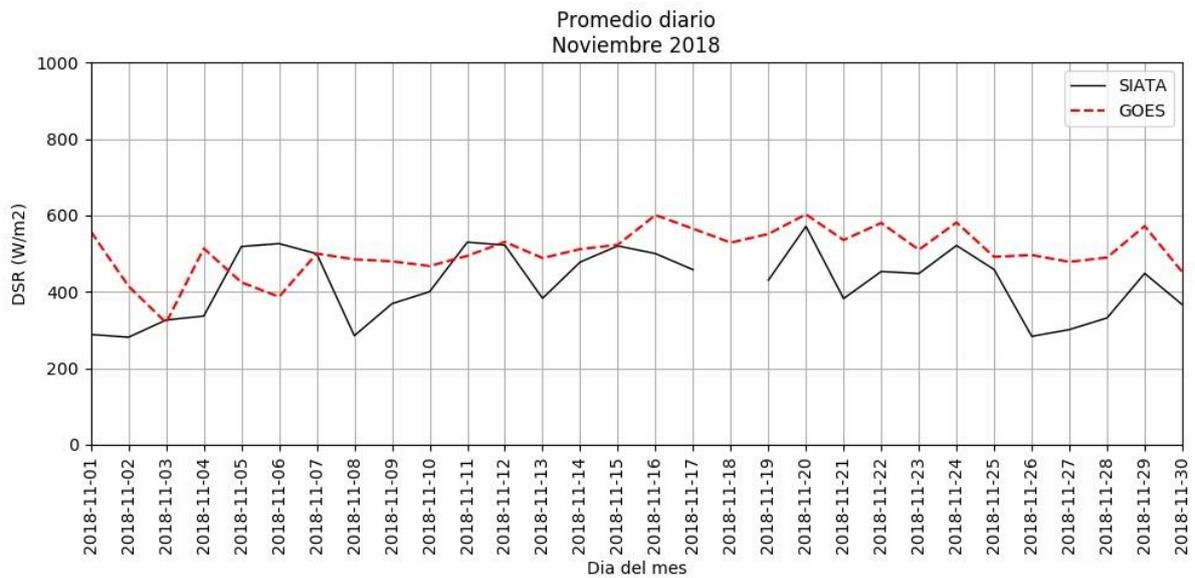


Figura A.1.8. Variabilidad diaria durante el mes de noviembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

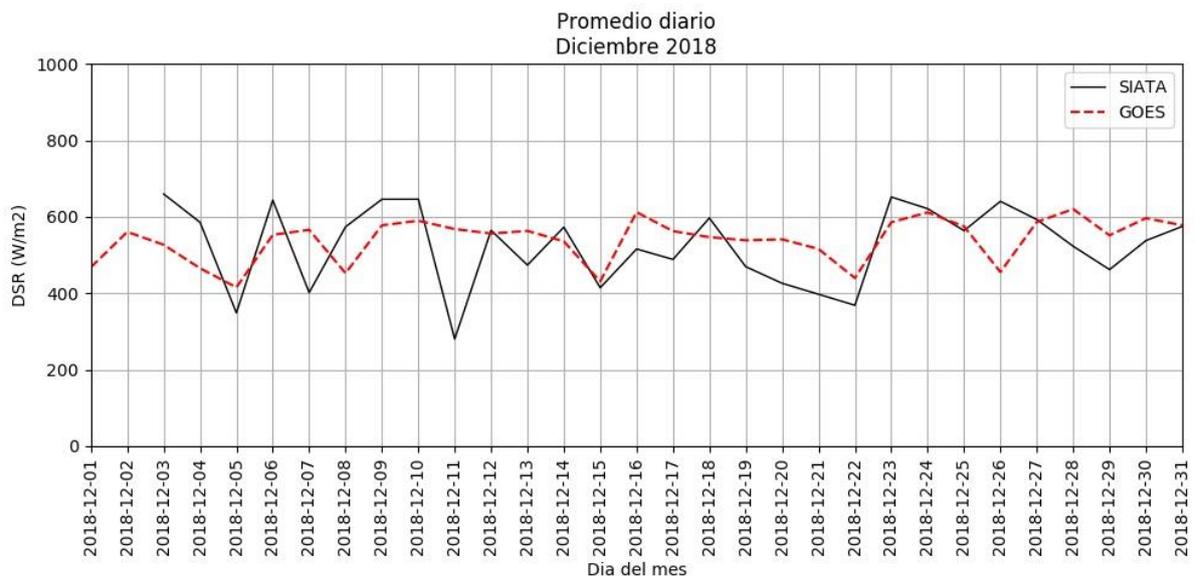


Figura A.1.9. Variabilidad diaria durante el mes de diciembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

Anexo A-2. Anomalías diarias de irradiancia solar.

Las siguientes figuras pertenecen al procesamiento del conjunto de datos de irradiancia solar ABI L2+DSR del satélite GOES-East y de las mediciones obtenidas por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia durante el año 2018. Los valores corresponden a anomalías diarias expresadas en W/m^2 .

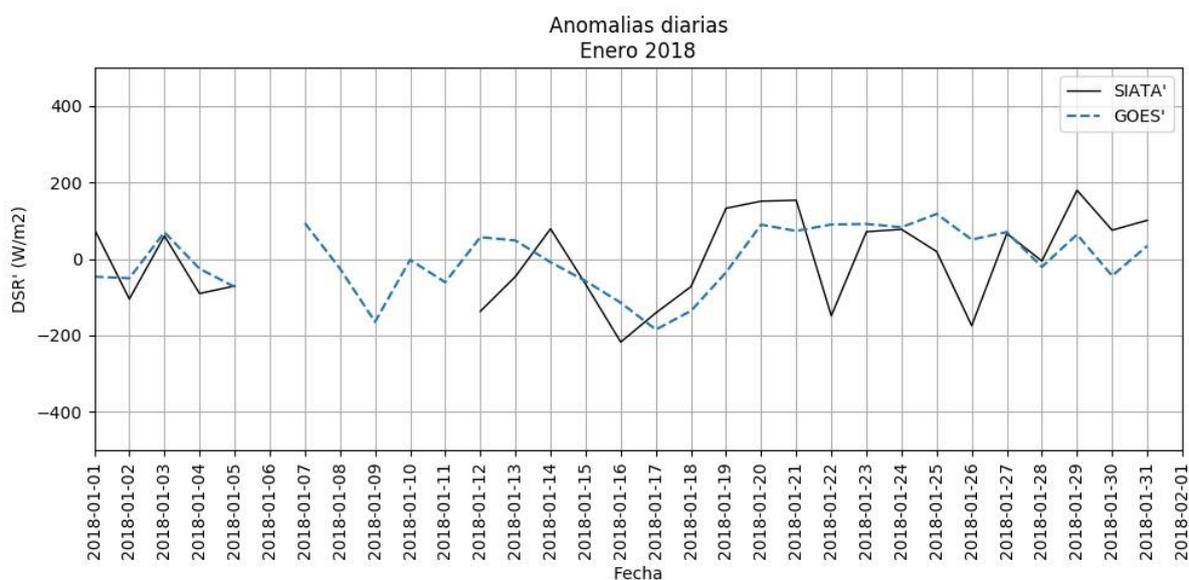


Figura A.2.1. Anomalías diarias durante el mes de enero del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

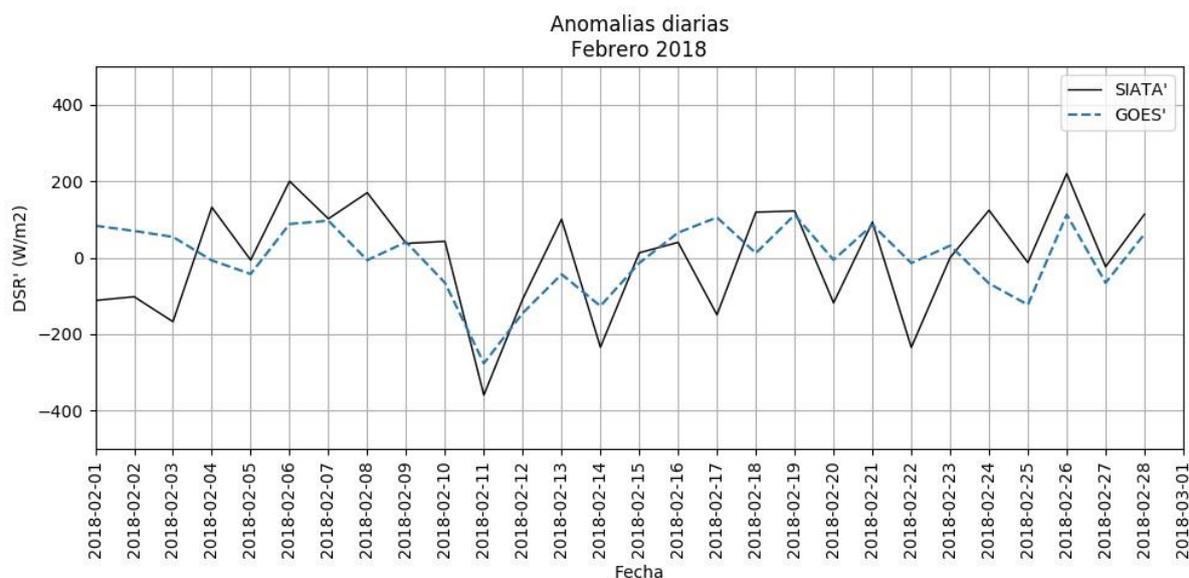


Figura A.2.2. Anomalías diarias durante el mes de febrero del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

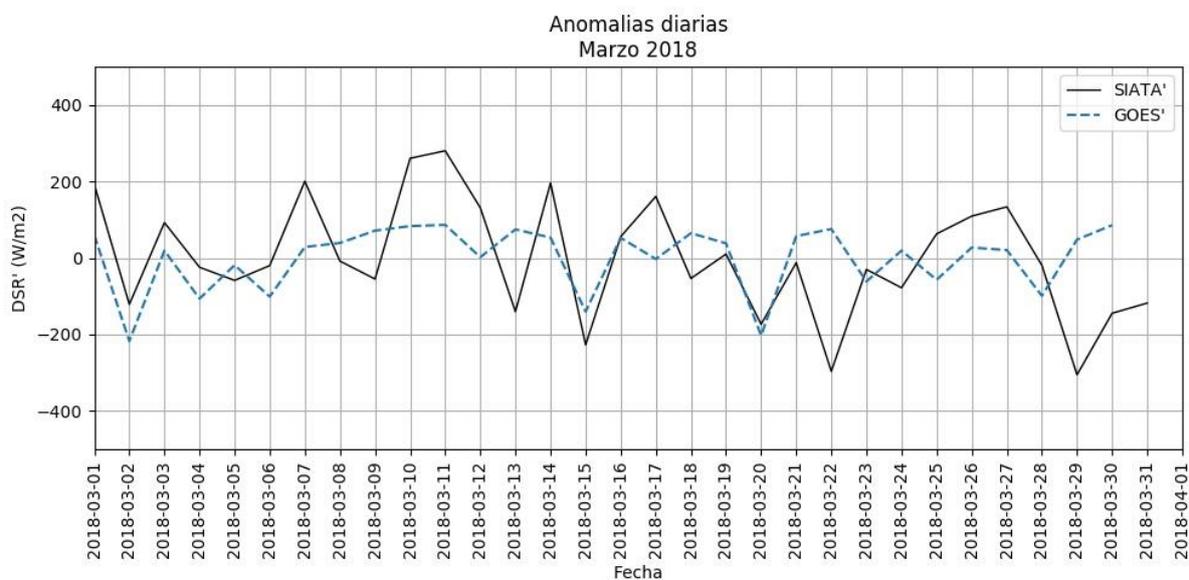


Figura A.2.3. Anomalías diarias durante el mes de marzo del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

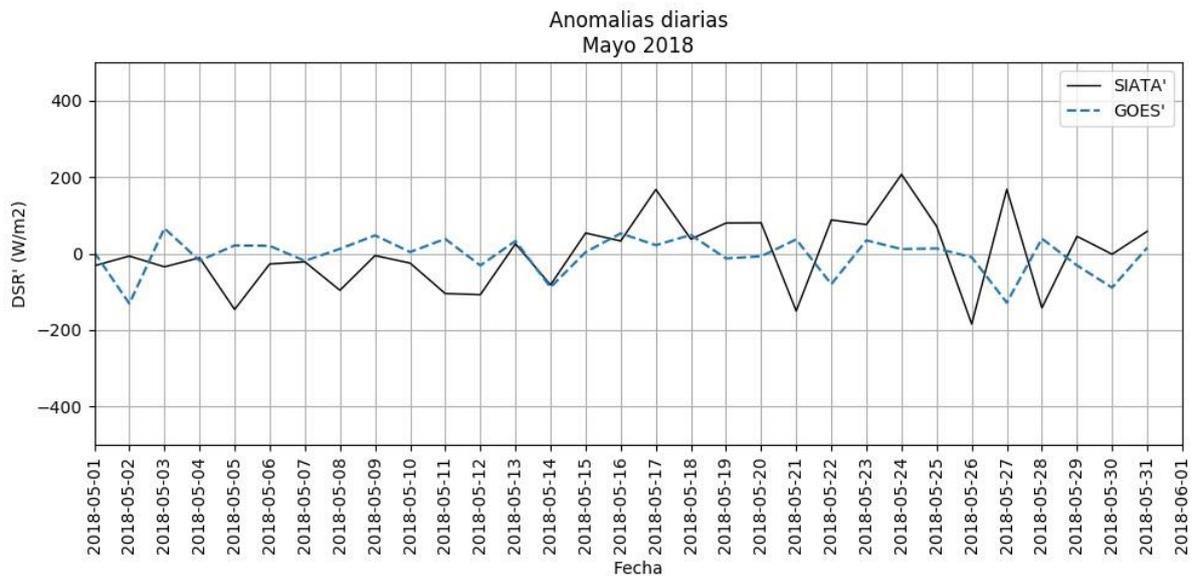


Figura A.2.4. Anomalías diarias durante el mes de mayo del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

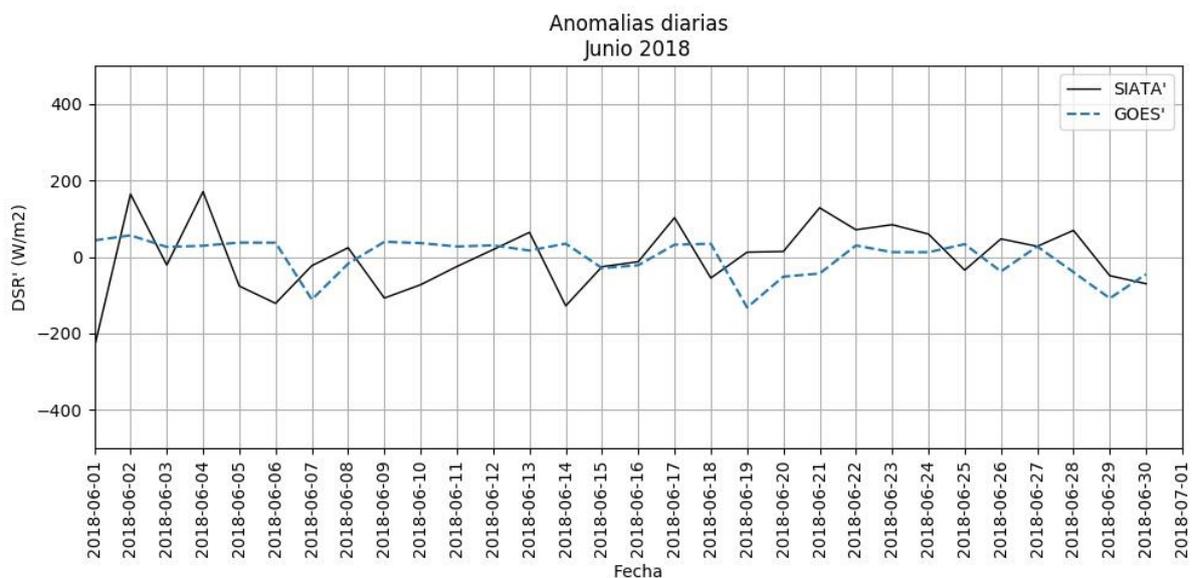


Figura A.2.5. Anomalías diarias durante el mes de junio del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

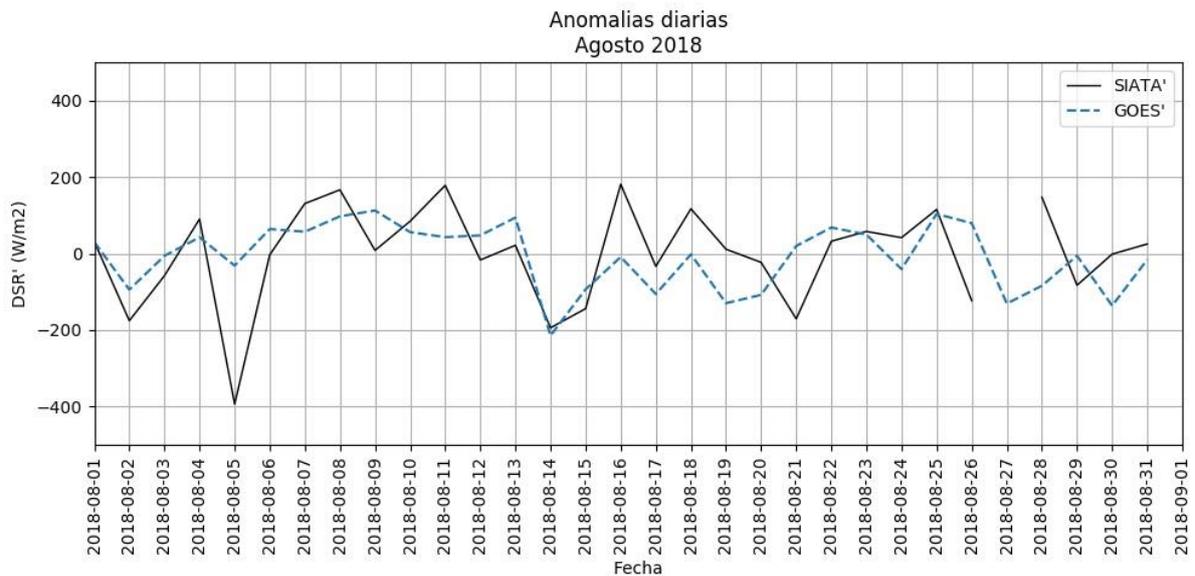


Figura A.2.6. Anomalías diarias durante el mes de agosto del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

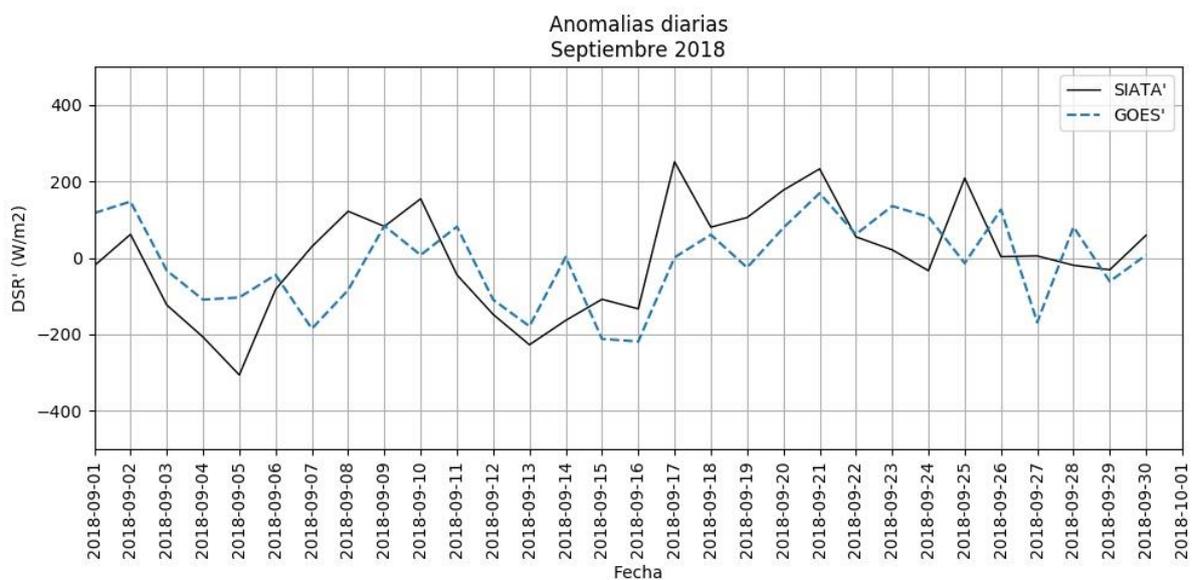


Figura A.2.7. Anomalías diarias durante el mes de septiembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

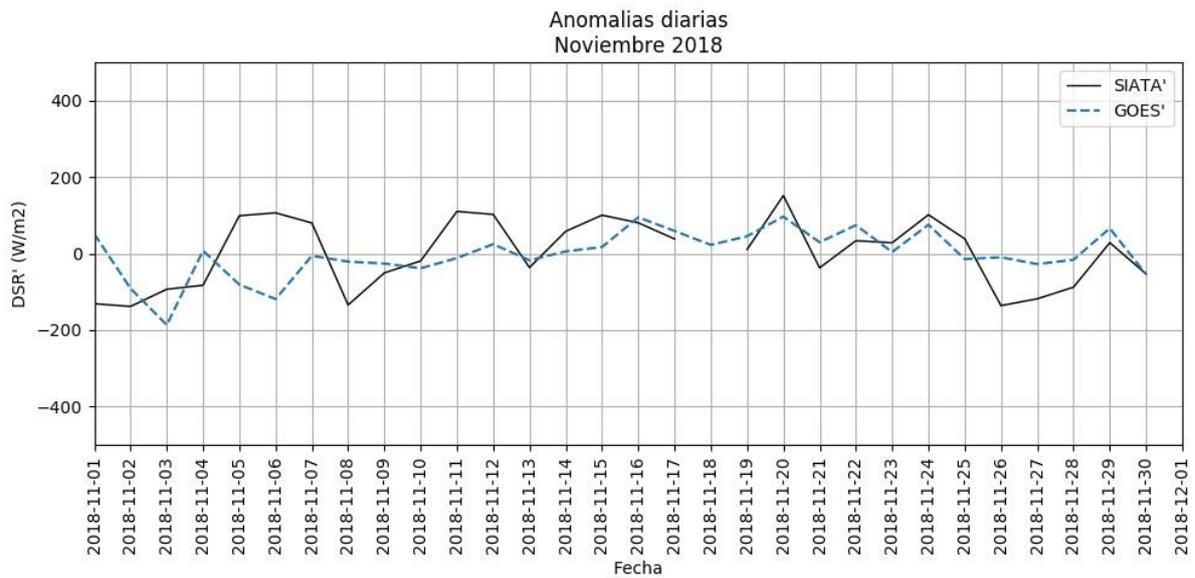


Figura A.2.8. Anomalías diarias durante el mes de noviembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

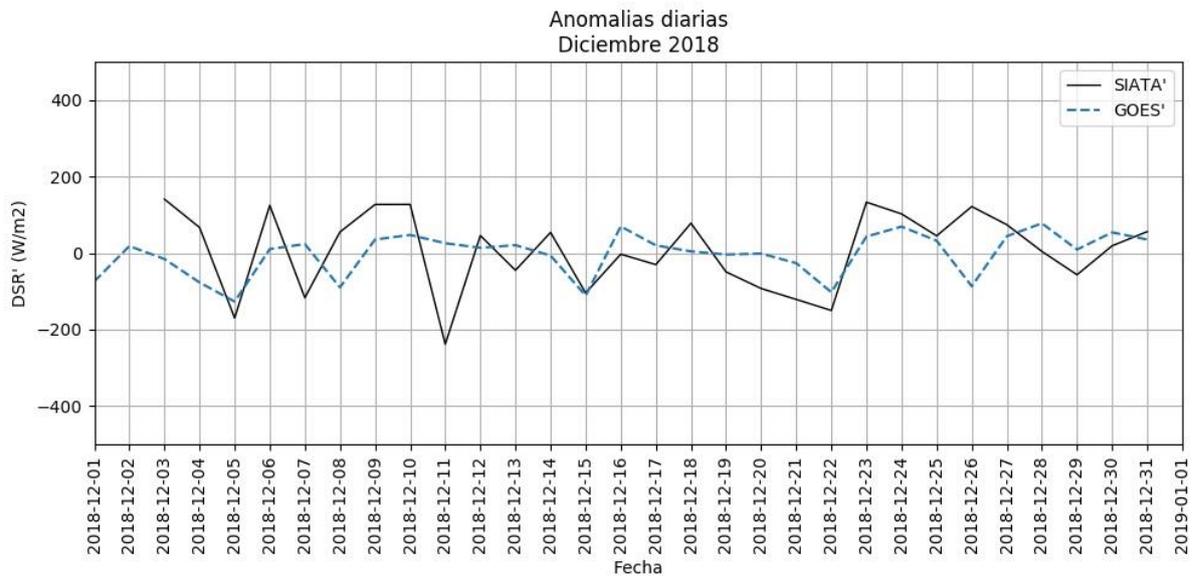


Figura A.2.9. Anomalías diarias durante el mes de diciembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

ANEXO B

Escala horaria de irradiación solar para Medellín-Colombia.

A continuación, se presentan en este anexo las gráficas, figuras y tablas correspondientes a los resultados obtenidos del análisis y la validación del conjunto de datos ABI L2 + DSR de GOES-East a escala horaria durante el año 2018 en la ciudad de Medellín, Colombia.

Anexo B-1

Serie de tiempo horaria de irradiancia solar.

Las siguientes figuras pertenecen al procesamiento del conjunto de datos de irradiancia solar ABI L2+DSR del satélite GOES-East y de las mediciones obtenidas por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia durante el año 2018. Los valores corresponden a valores horarios expresados en W/m^2 .

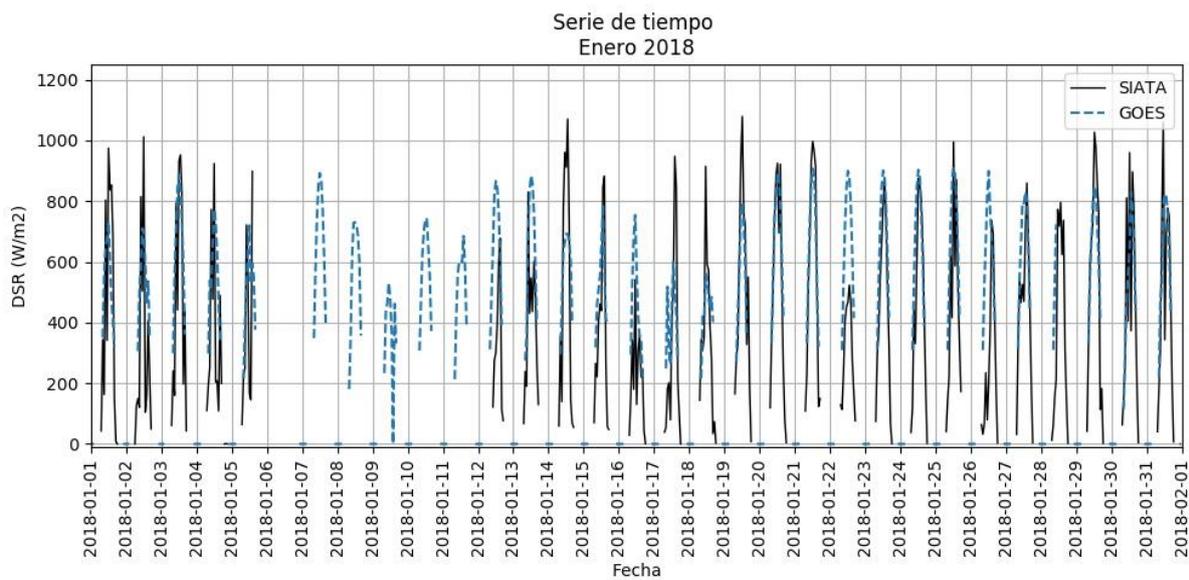


Figura B.1.1. Serie de tiempo horaria del mes de enero de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

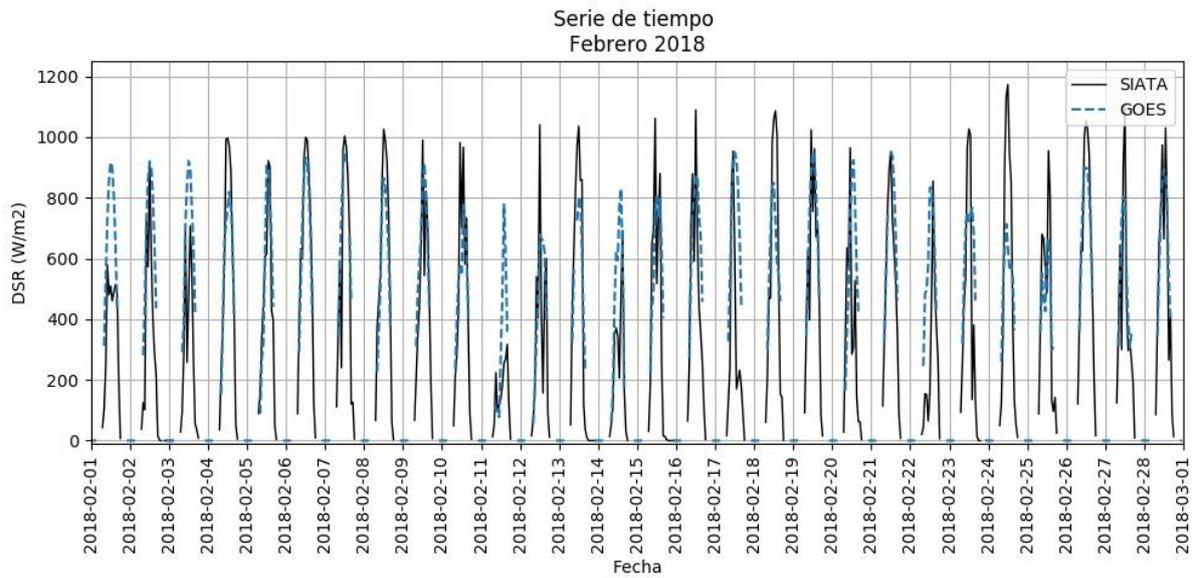


Figura B.1.2. Serie de tiempo horaria del mes de febrero de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

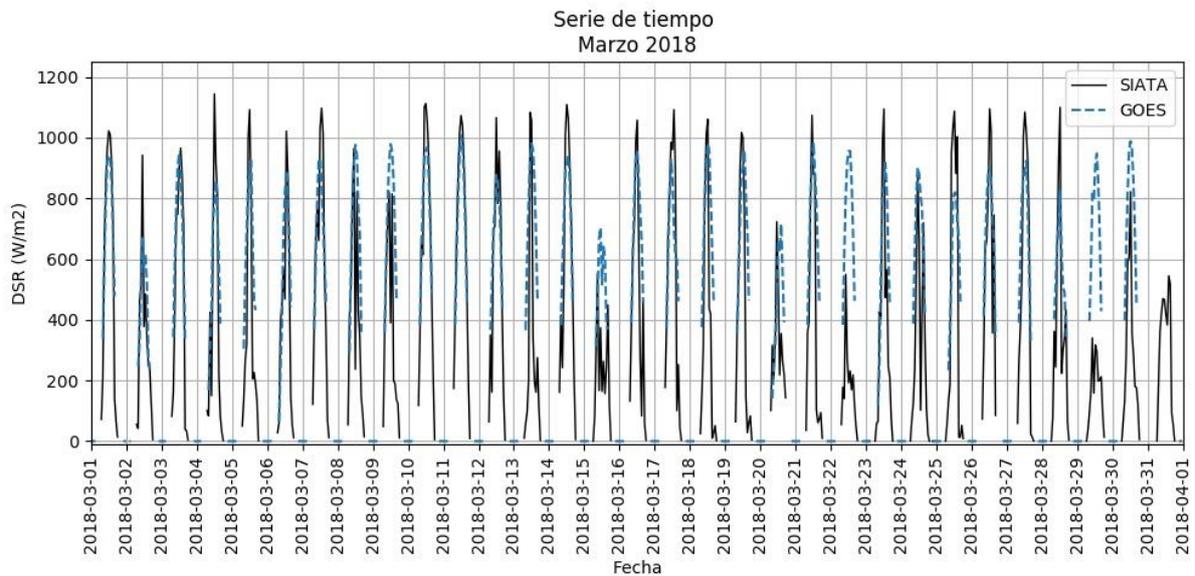


Figura B.1.3. Serie de tiempo horaria del mes de marzo de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

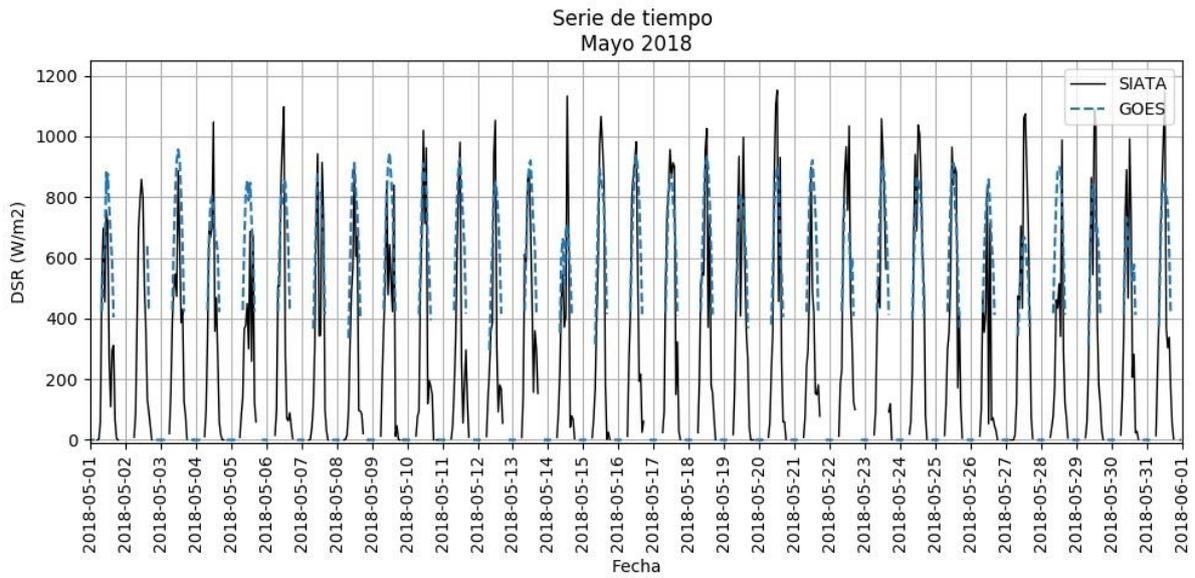


Figura B.1.4. Serie de tiempo horaria del mes de mayo de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

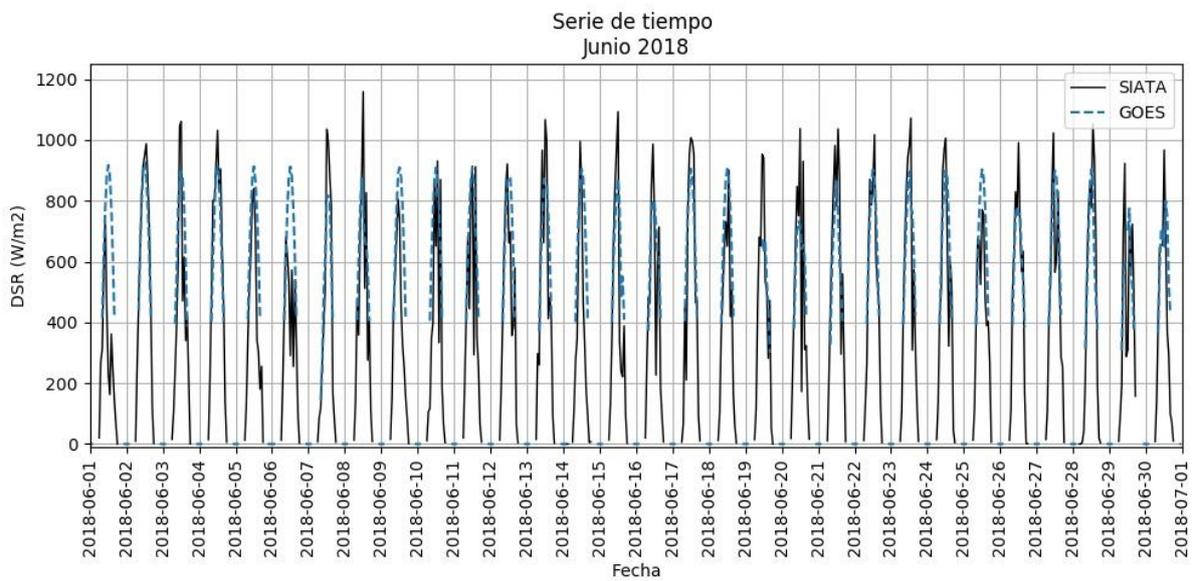


Figura B.1.5. Serie de tiempo horaria del mes de junio de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

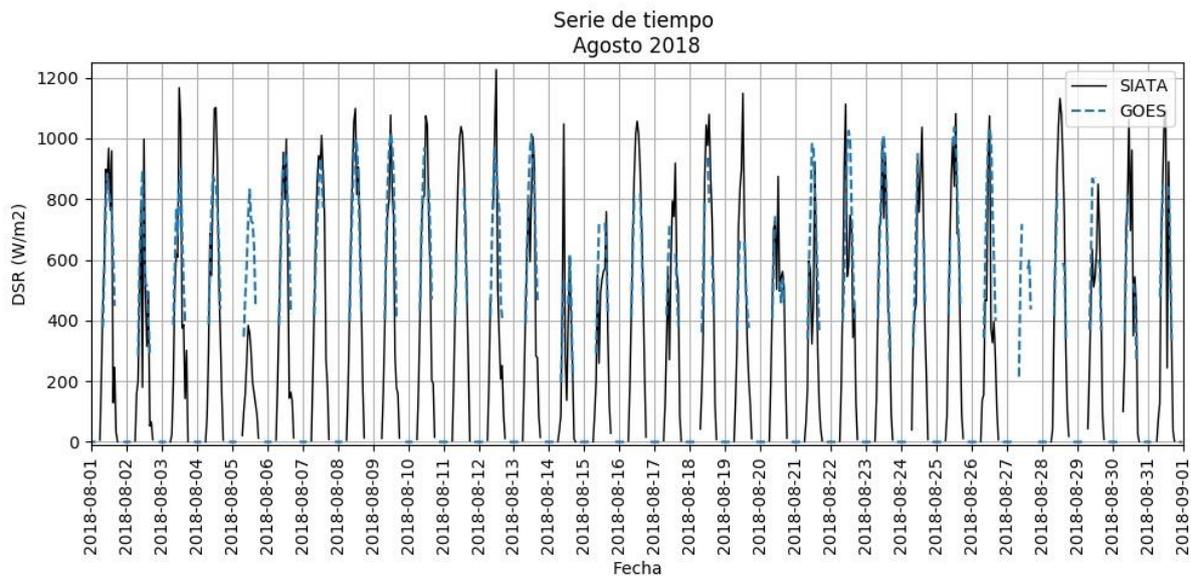


Figura B.1.6. Serie de tiempo horaria del mes de agosto de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

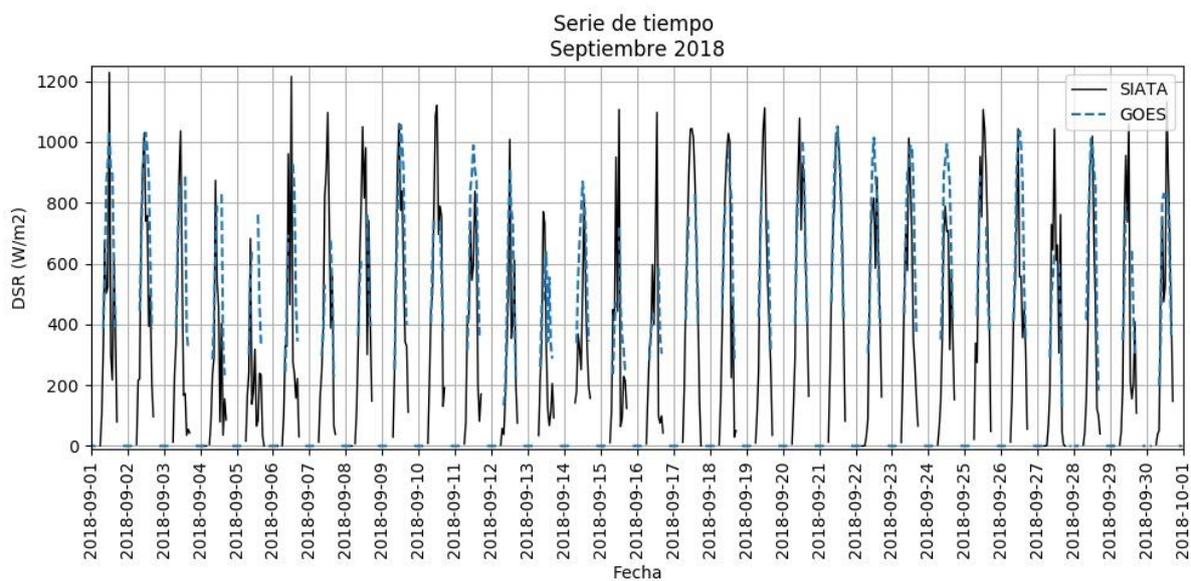


Figura B.1.7. Serie de tiempo horaria del mes de septiembre de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

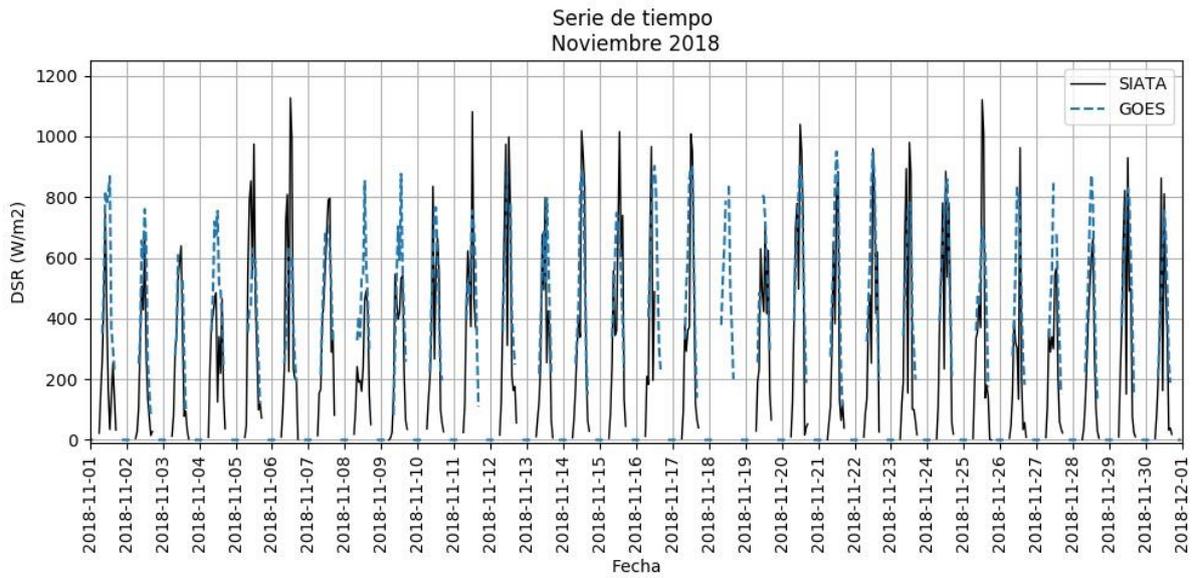


Figura B.1.8. Serie de tiempo horaria del mes de noviembre de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

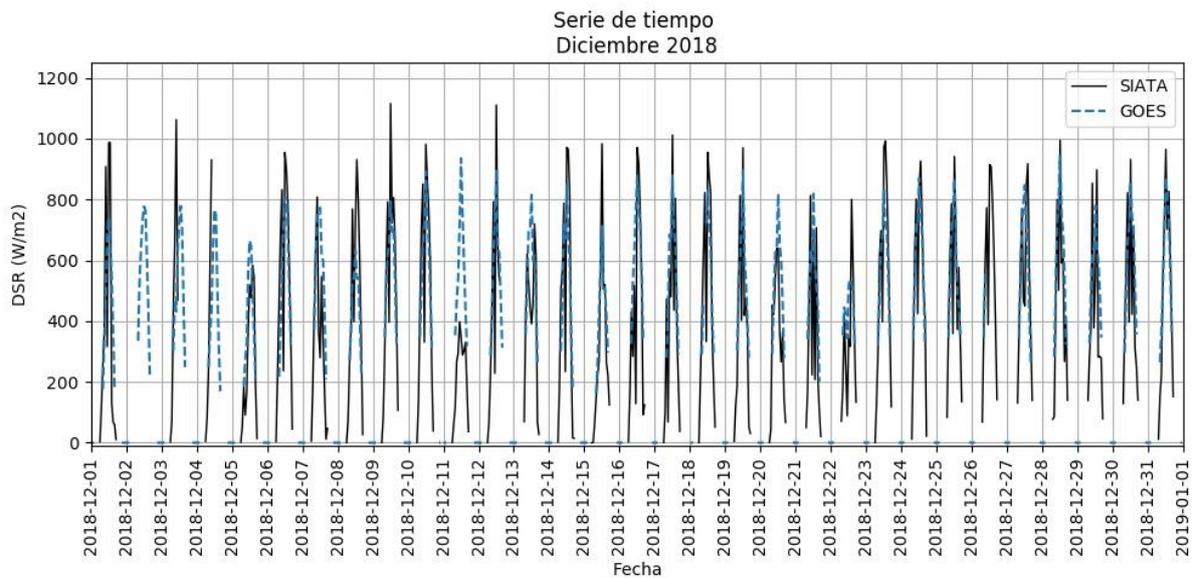


Figura B.1.9. Serie de tiempo horaria del mes de diciembre de 2018 a partir de datos del sensor Torre SIATA y del producto ABI L2+DSR de GOES-East para Medellín-Colombia.

Anexo B-2

Anomalías horarias de irradiancia solar

Las siguientes figuras pertenecen al procesamiento del conjunto de datos de irradiancia solar ABI L2+DSR del satélite GOES-East y de las mediciones obtenidas por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia durante el año 2018. Los valores corresponden a anomalías diarias expresadas en W/m^2 .

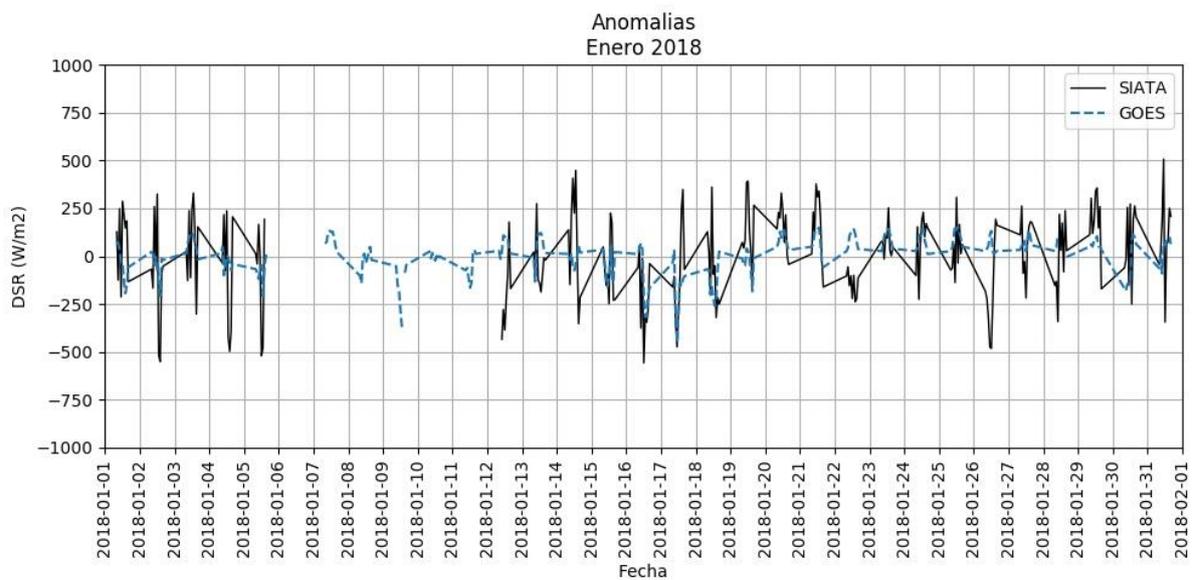


Figura B.2.1. Anomalías horarias durante el mes de enero del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

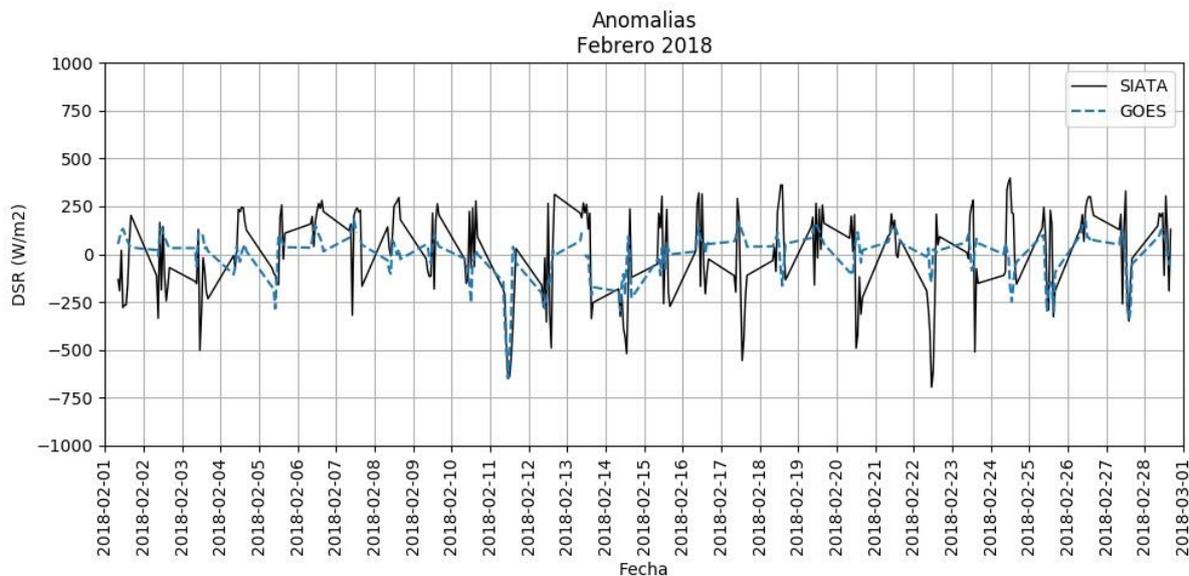


Figura B.2.2. Anomalías horarias durante el mes de febrero del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

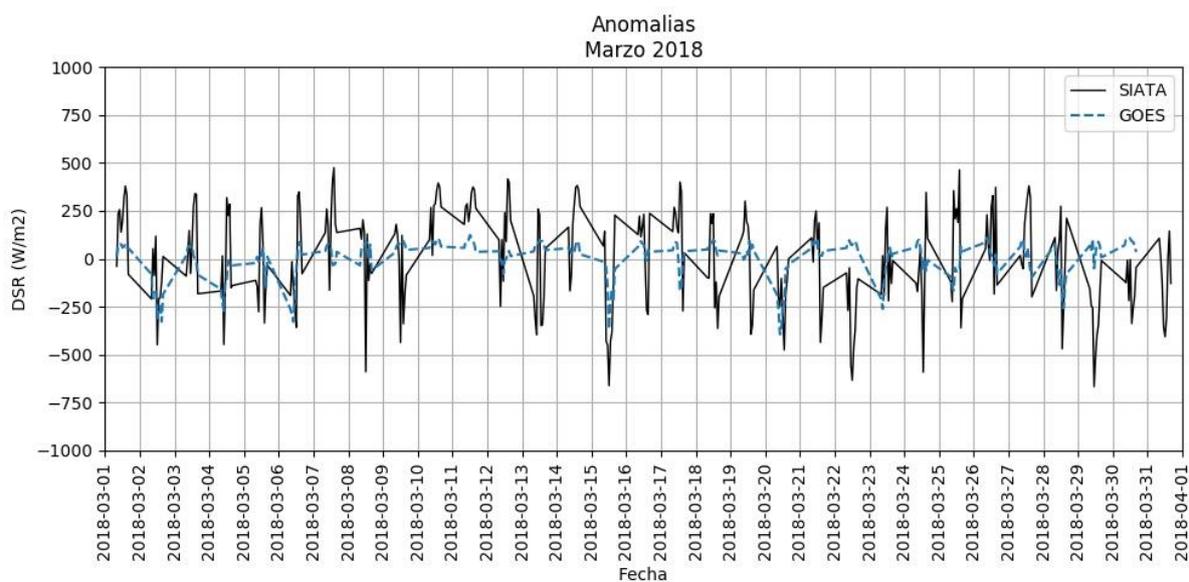


Figura B.2.3. Anomalías horarias durante el mes de marzo del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

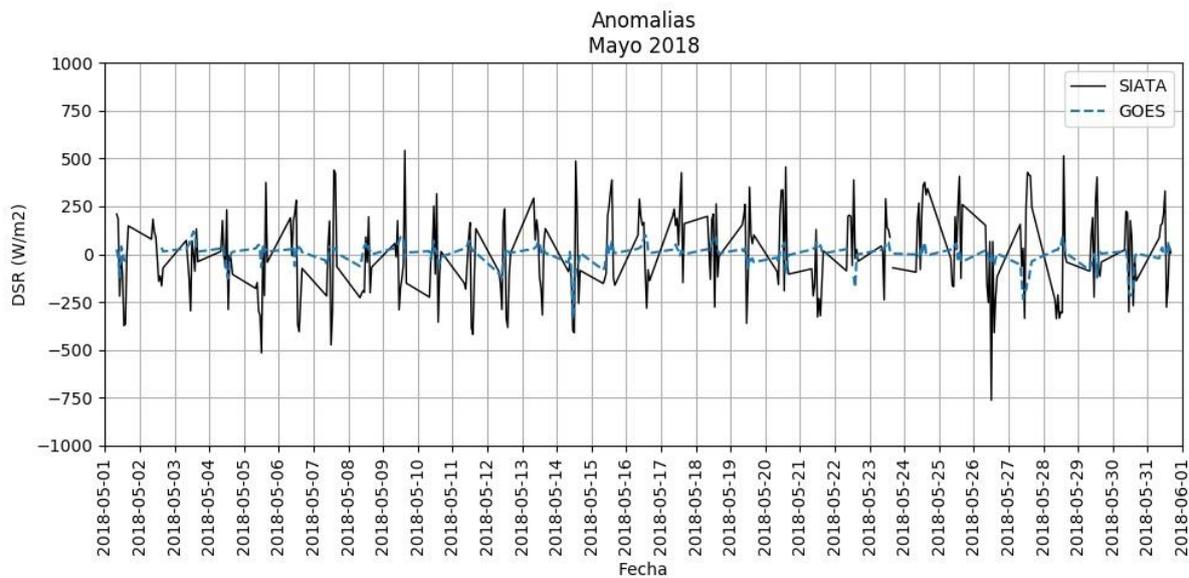


Figura B.2.4. Anomalías horarias durante el mes de mayo del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

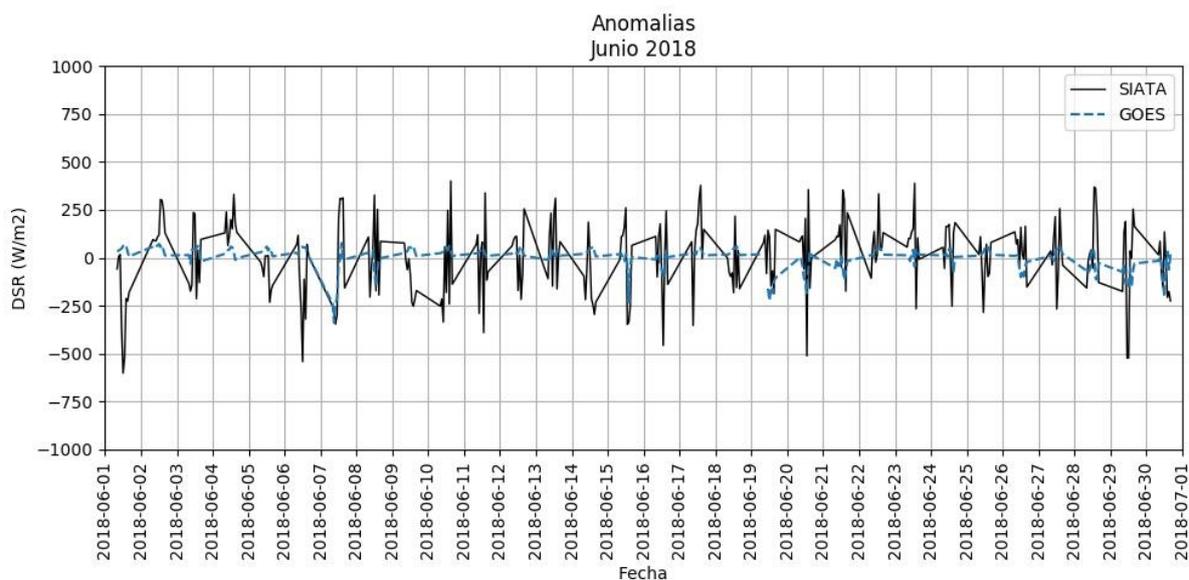


Figura B.2.5. Anomalías horarias durante el mes de junio del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

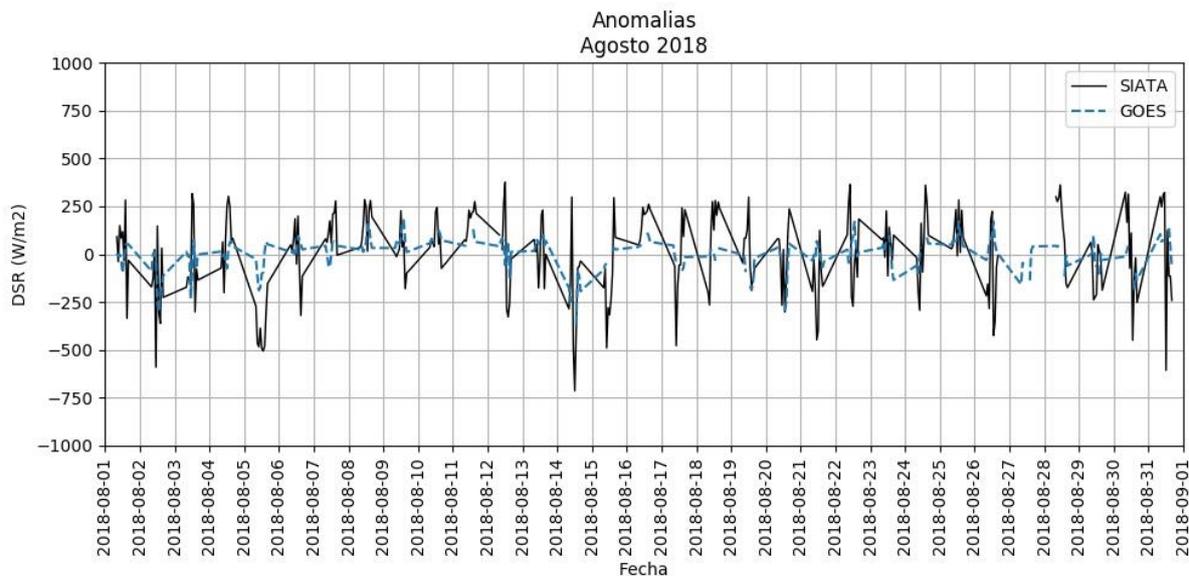


Figura B.2.6. Anomalías horarias durante el mes de agosto del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

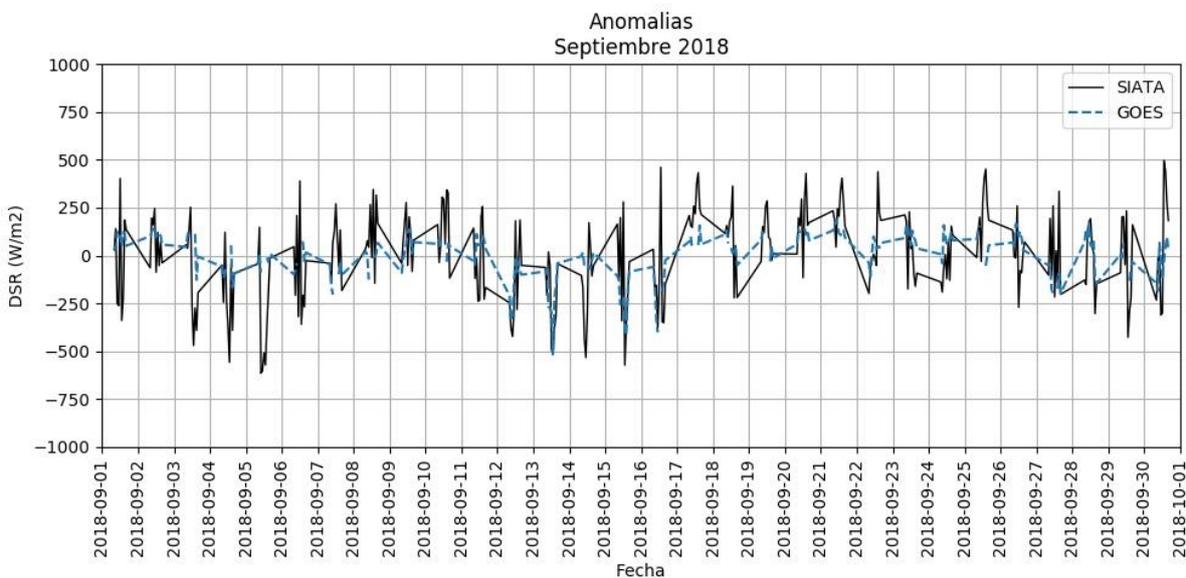


Figura B.2.7. Anomalías horarias durante el mes de septiembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

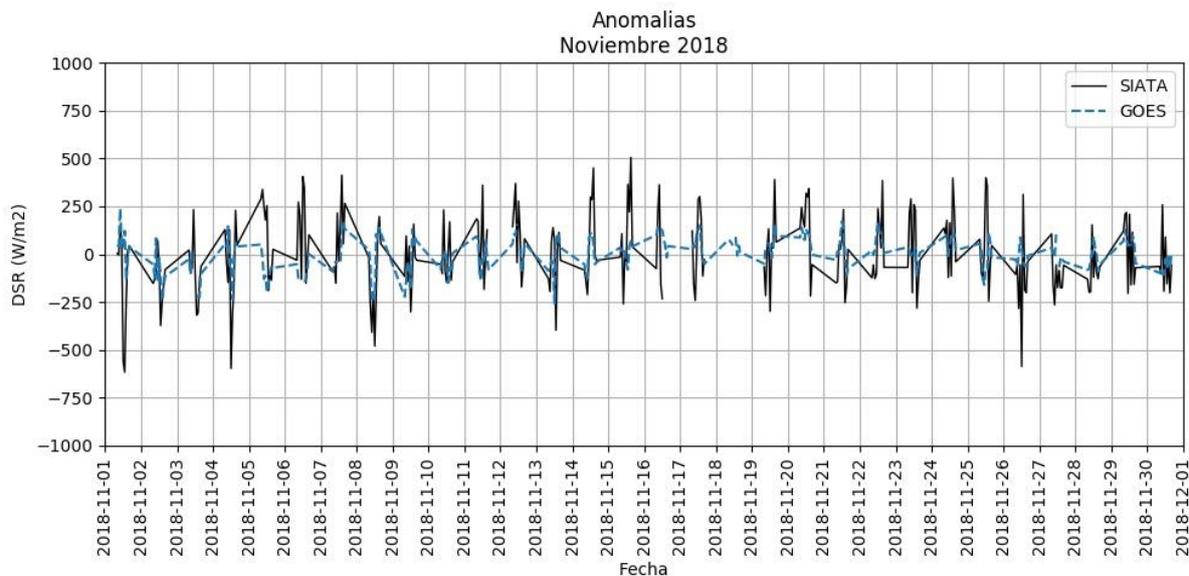


Figura B.2.8. Anomalías horarias durante el mes de noviembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

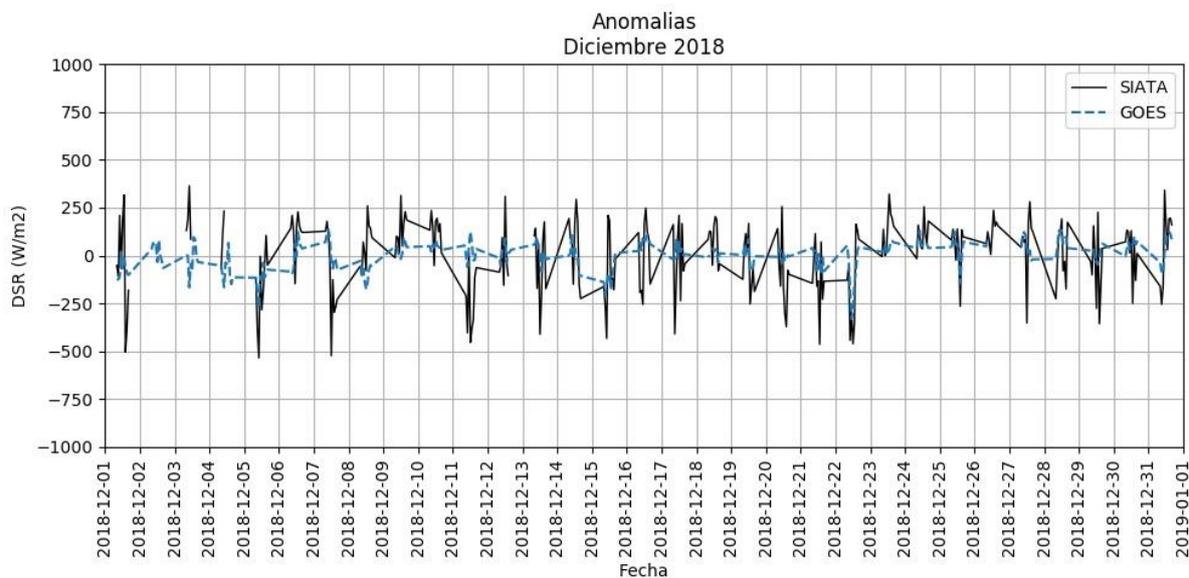


Figura B.2.9. Anomalías horarias durante el mes de diciembre del 2018 a partir de datos producidos por el algoritmo ABI SRB de GOES-East y datos registrados por el sensor Torre SIATA para Medellín, Colombia.

Anexo 3

Atlas de irradiación solar mensual para Colombia.

A continuación, se presentan en este anexo, los mapas de irradiación solar media diaria mensual para Colombia durante el año 2018 resultado del procesamiento del conjunto de datos ABI L2 + DSR de GOES-East.

Anexo C-1

Distribución media diaria mensual de la irradiancia solar en Colombia suministrada por GOES-East para el año 2018.

Los siguientes mapas presentan la distribución mensual de la irradiación solar en Colombia durante el año 2018. Los valores corresponden al promedio diario mensual del recurso expresado en KWh/m^2 y una resolución de 0.5° .

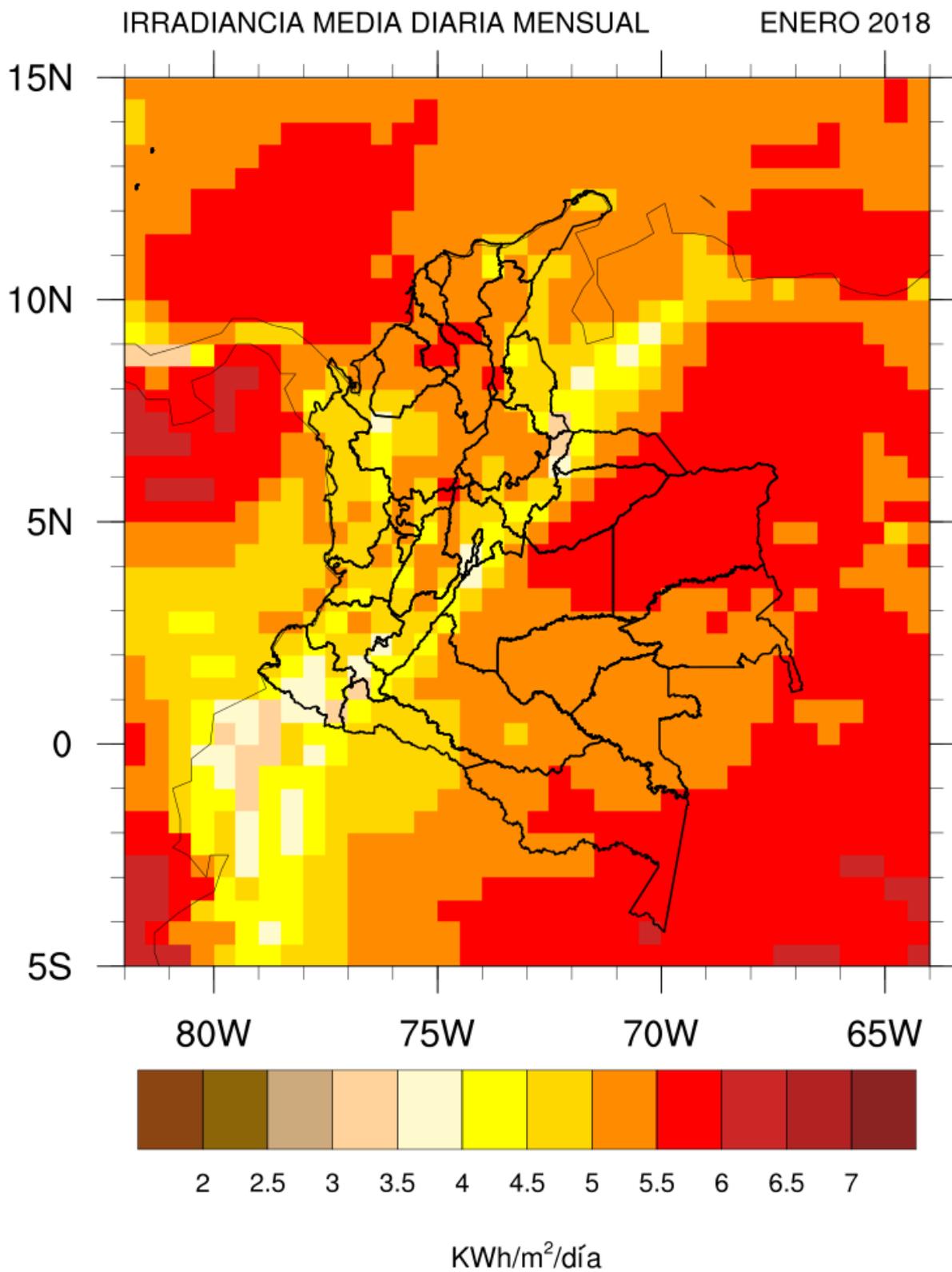


Figura C.1.1. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de enero de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

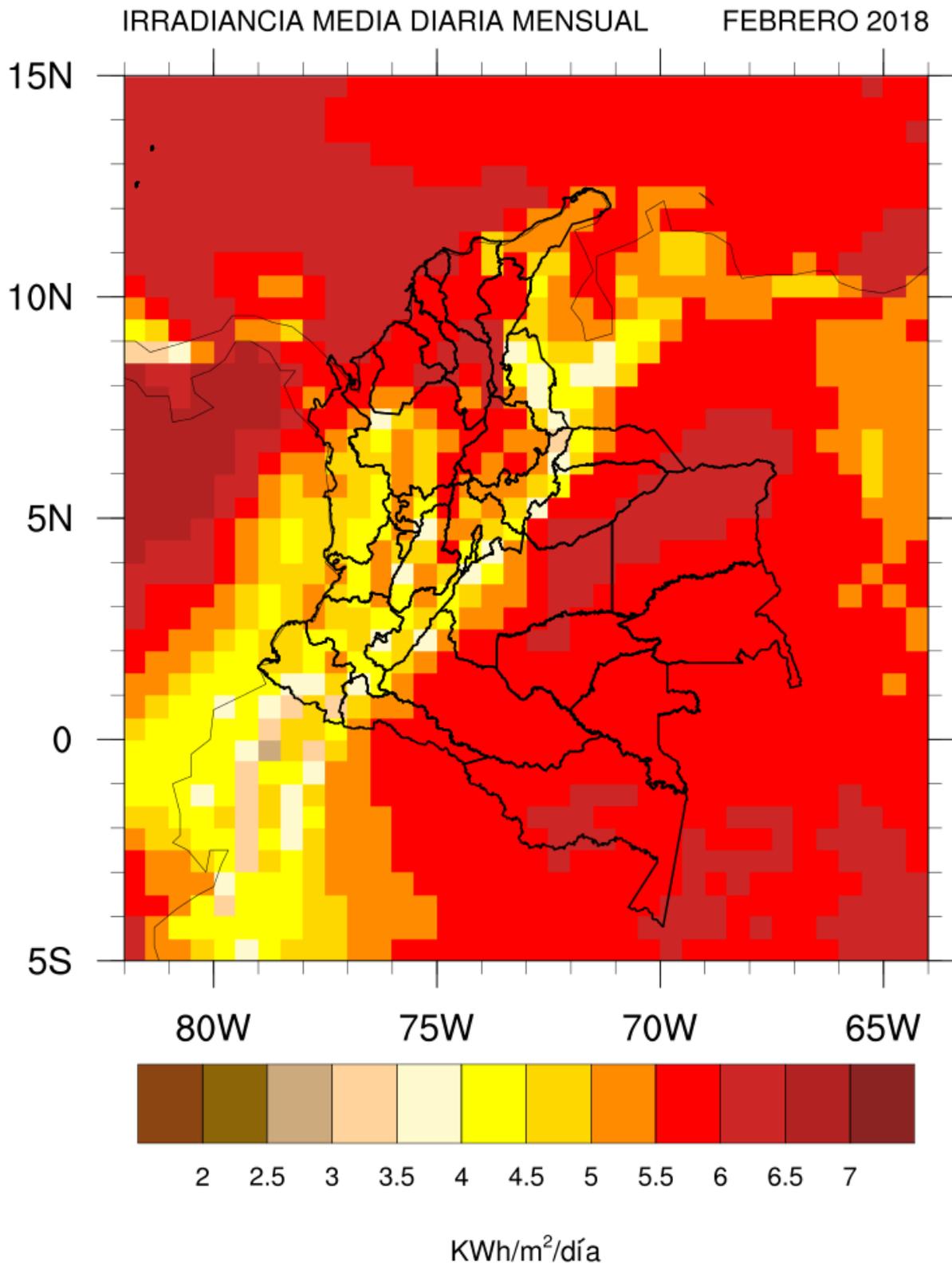


Figura C.1.2. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de febrero de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

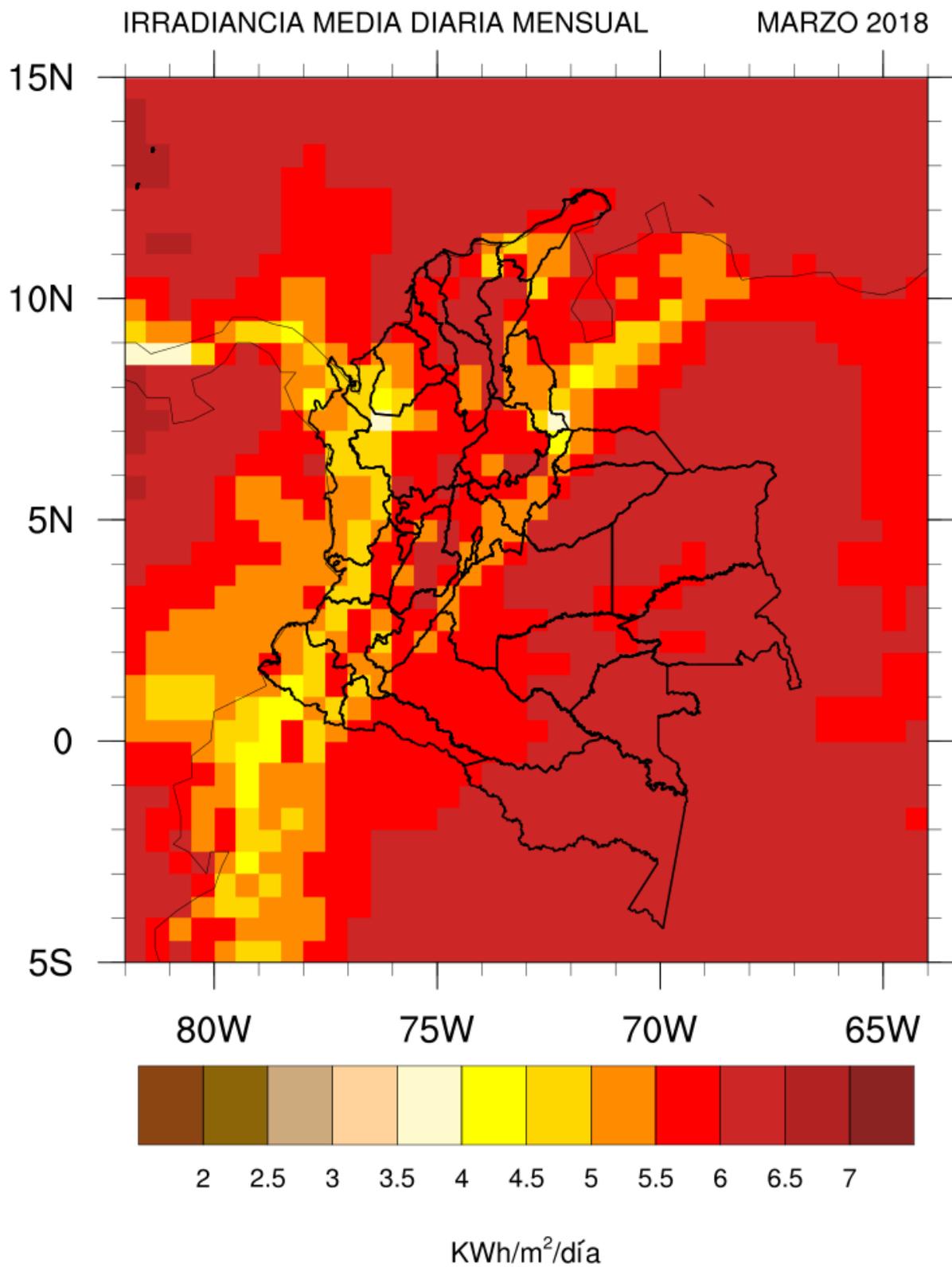


Figura C.1.3. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de marzo de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

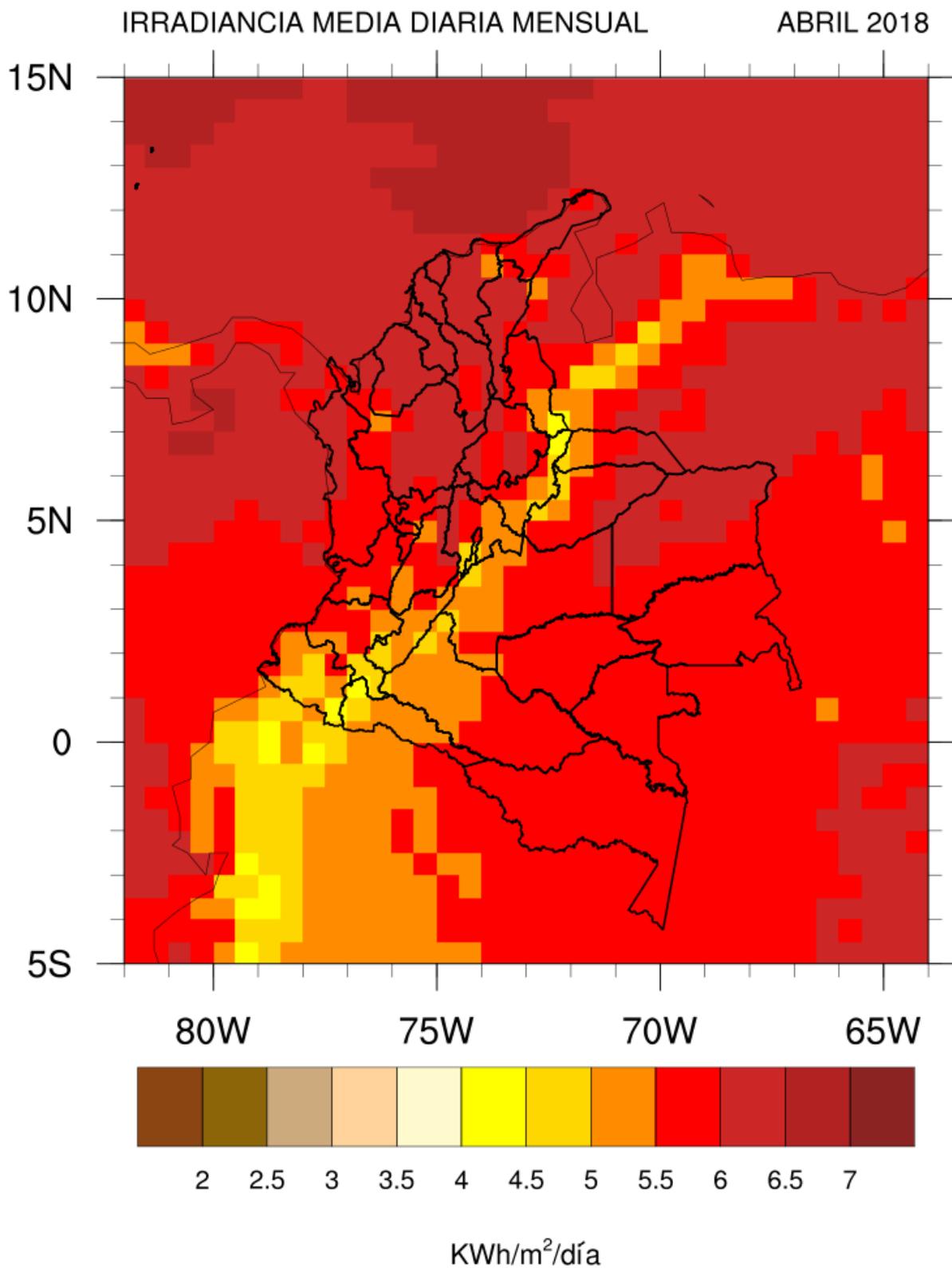


Figura C.1.4. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de abril de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

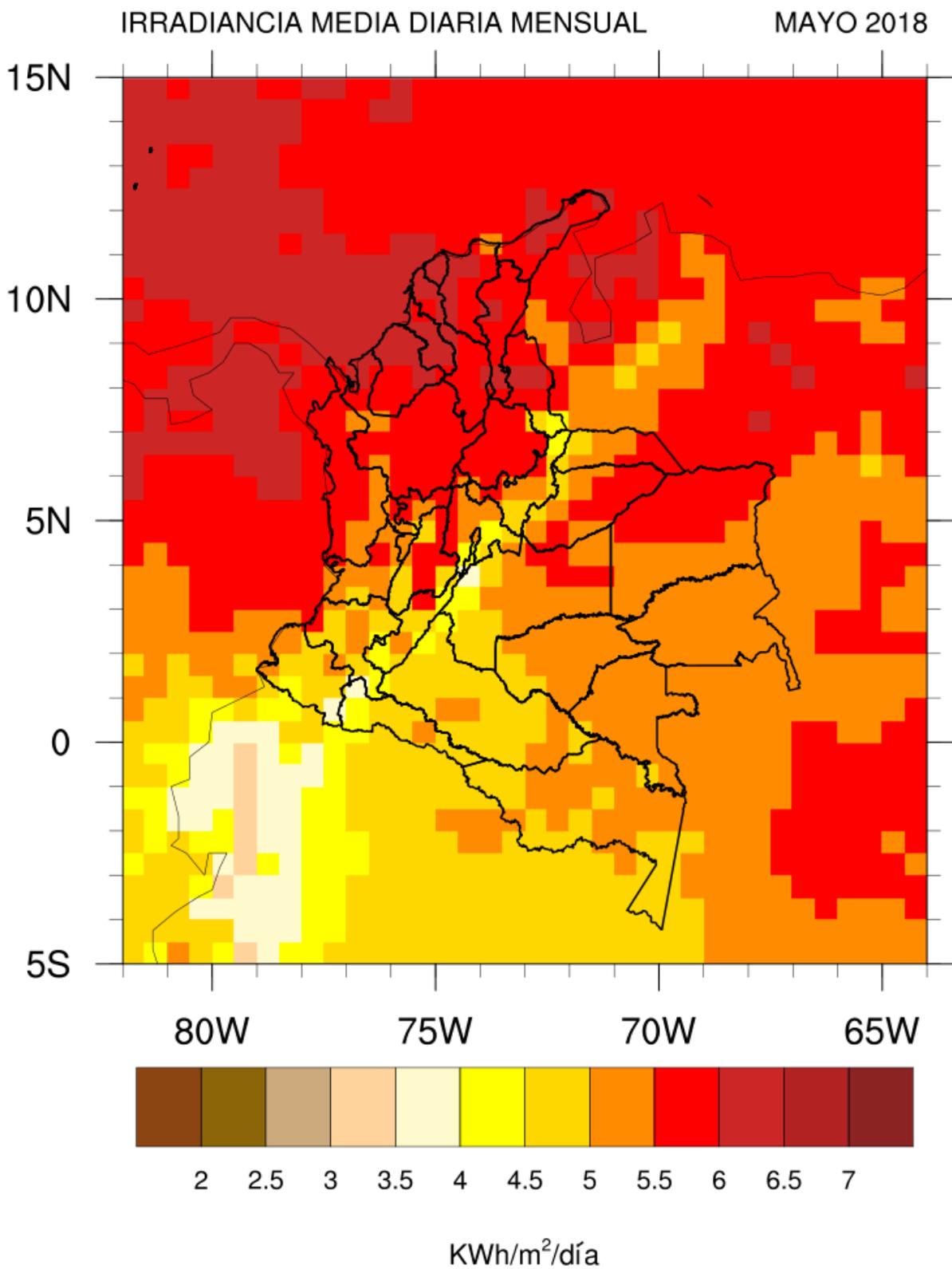


Figura C.1.5. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de mayo de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

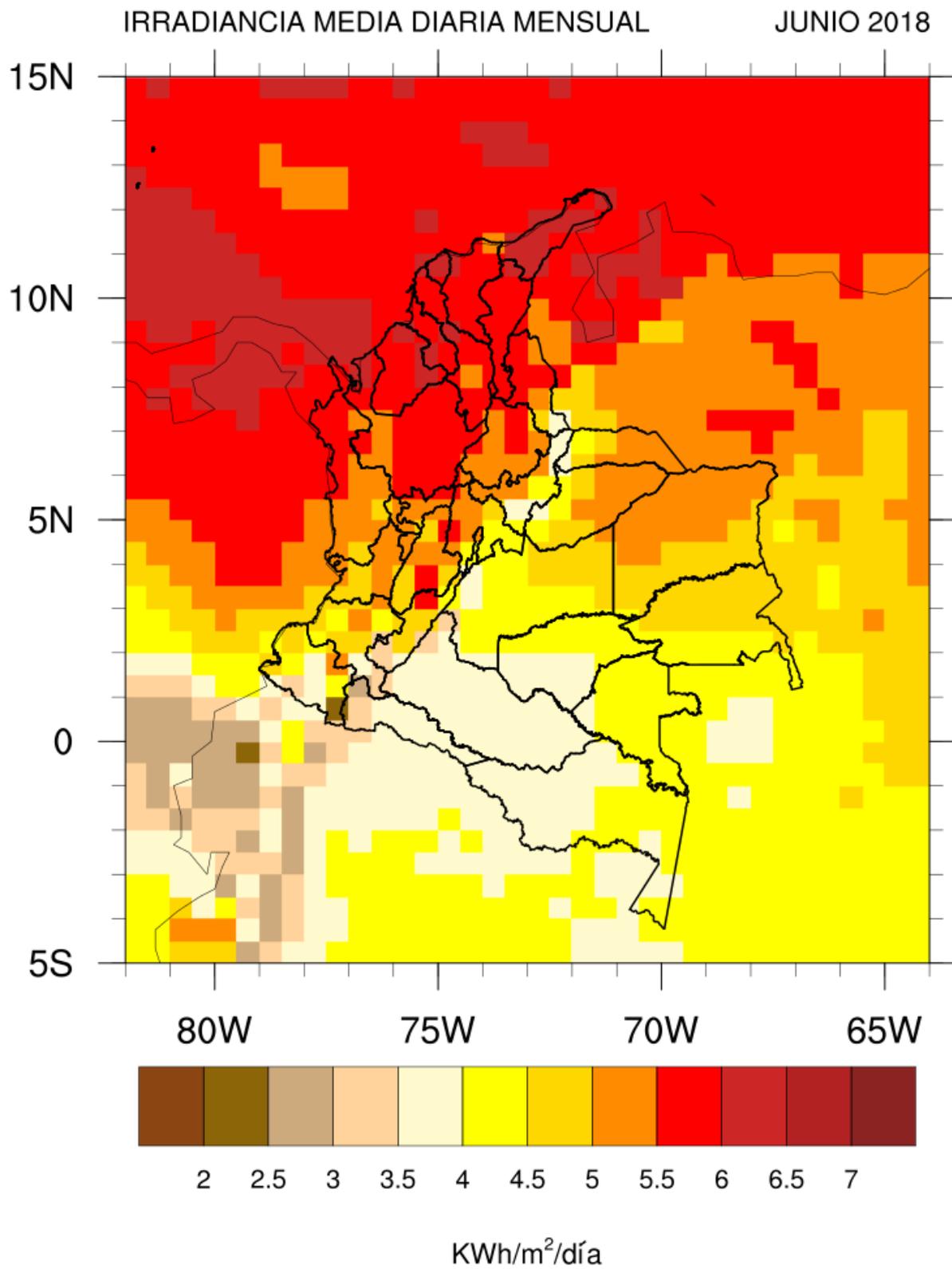


Figura C.1.6. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de junio de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

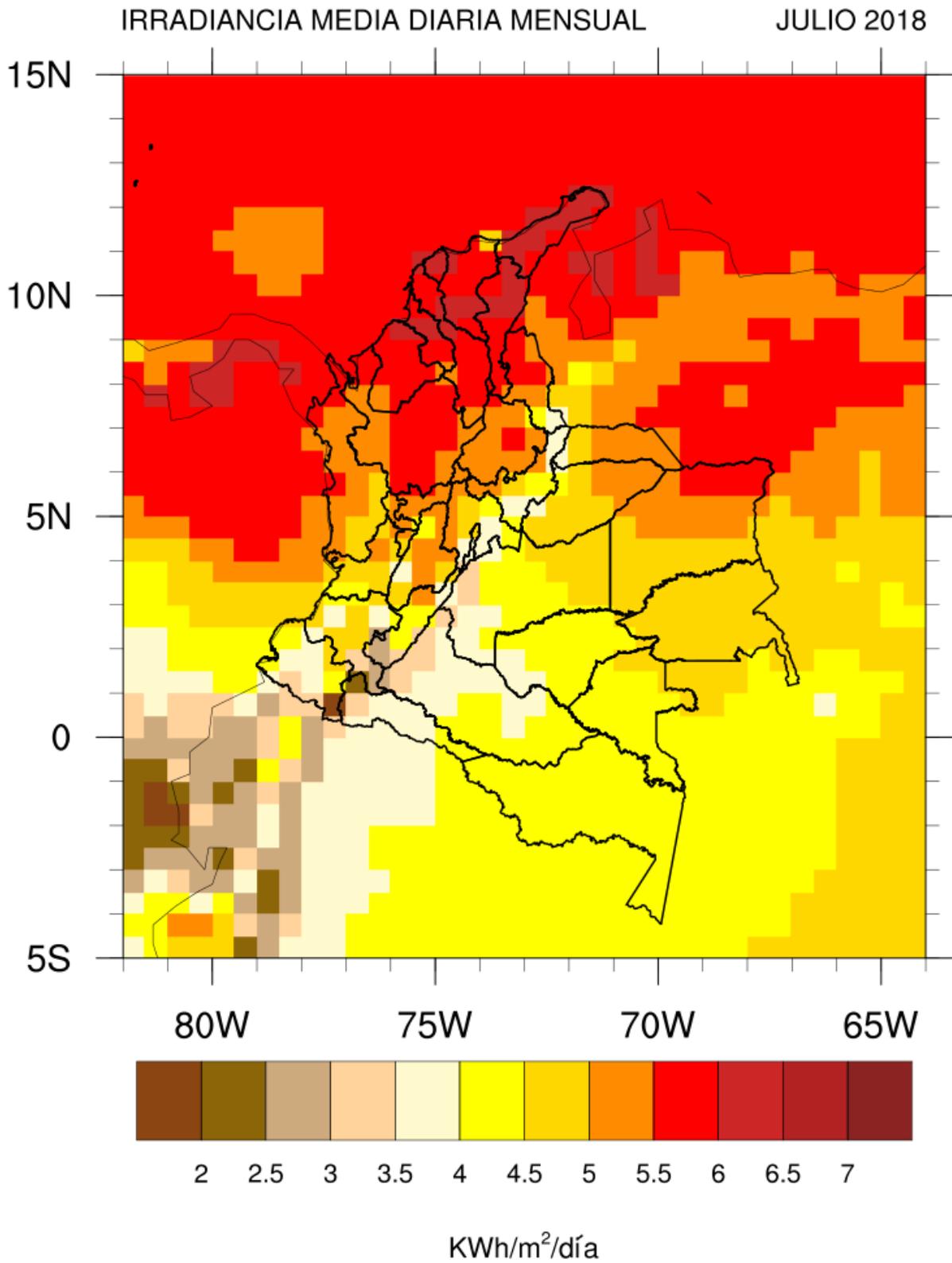


Figura C.1.7. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de julio de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

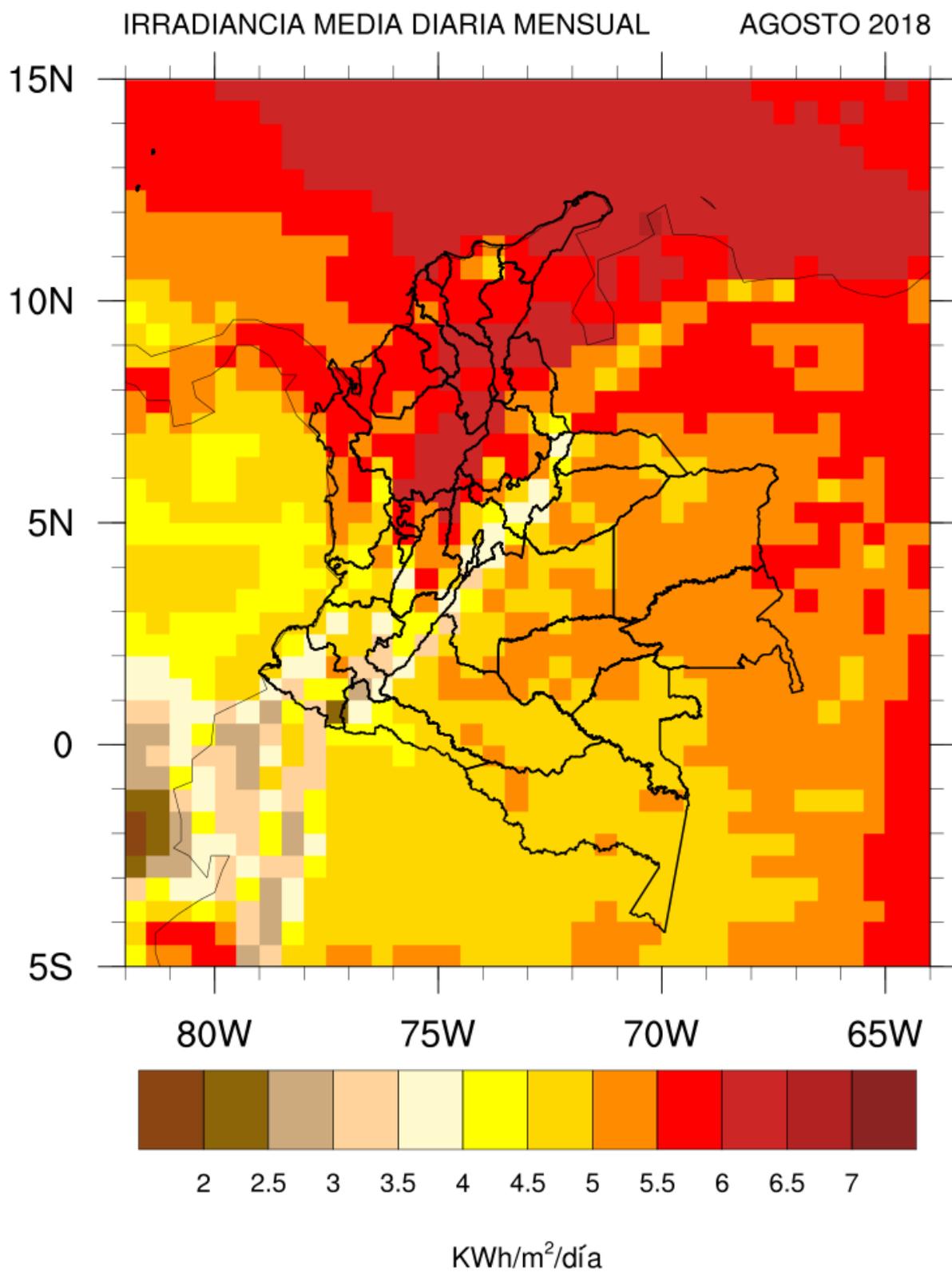


Figura C.1.8. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de agosto de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

IRRADIANCIA MEDIA DIARIA MENSUAL SEPTIEMBRE 2018

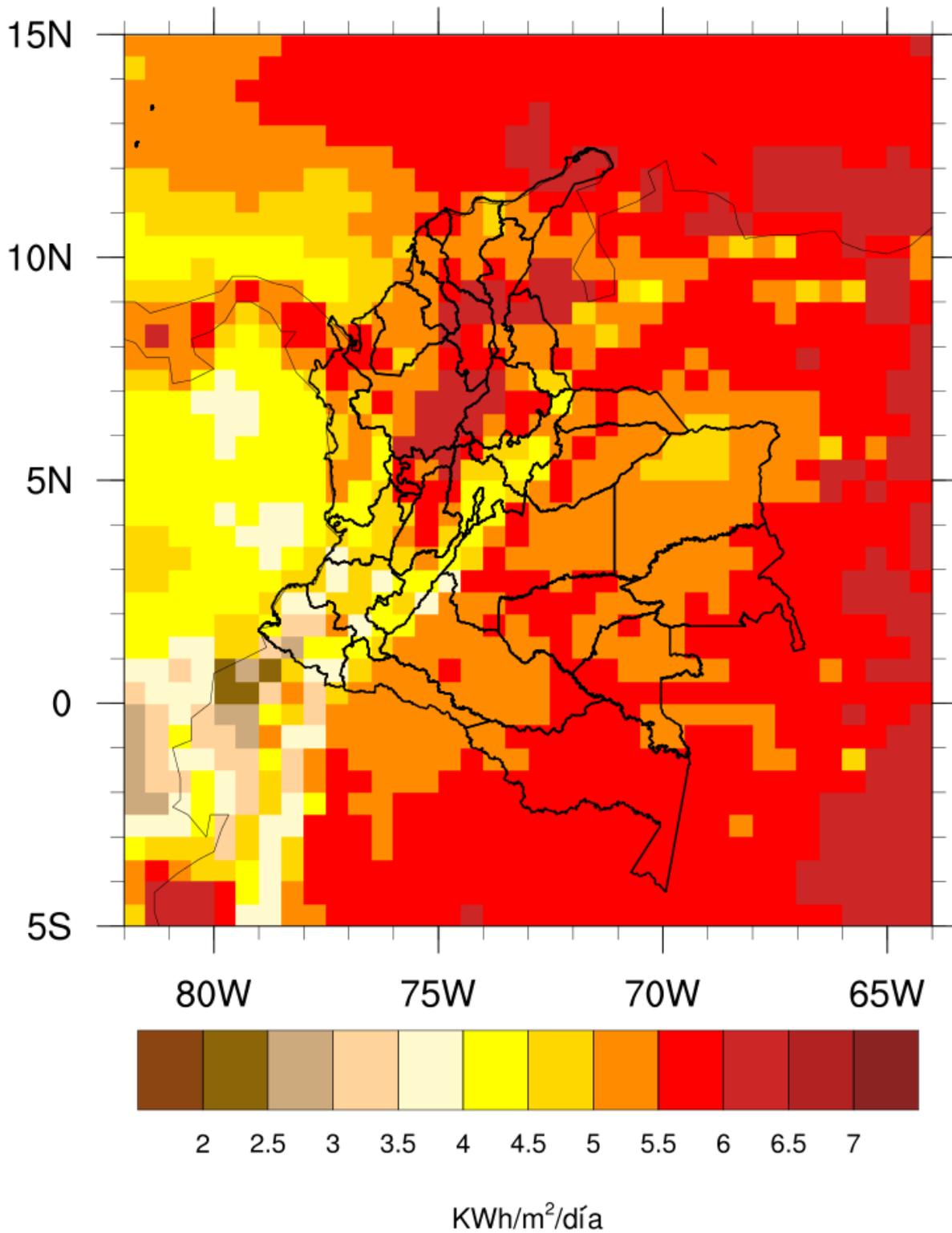


Figura C.1.9. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de septiembre de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

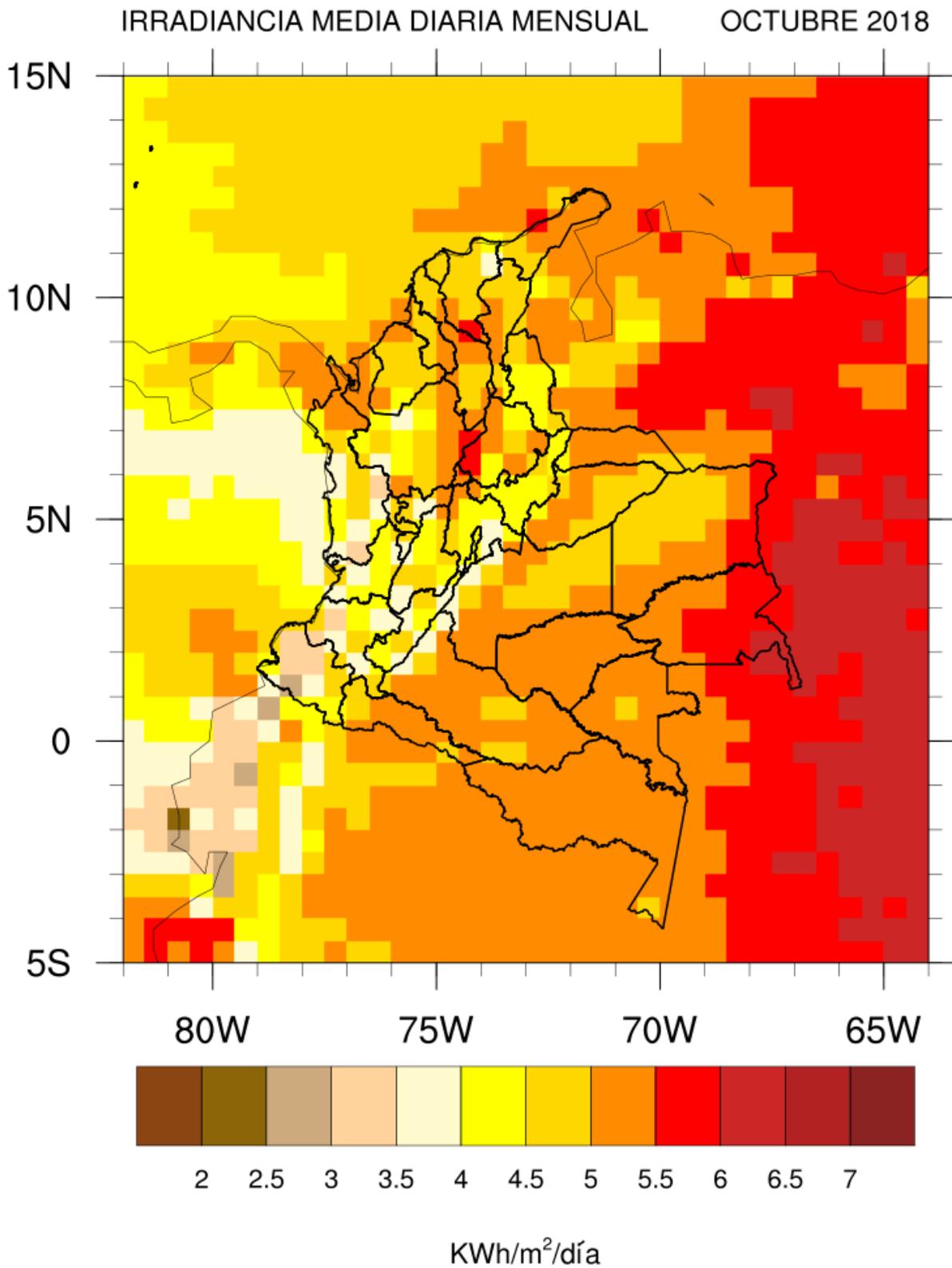


Figura C.1.10. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de octubre de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

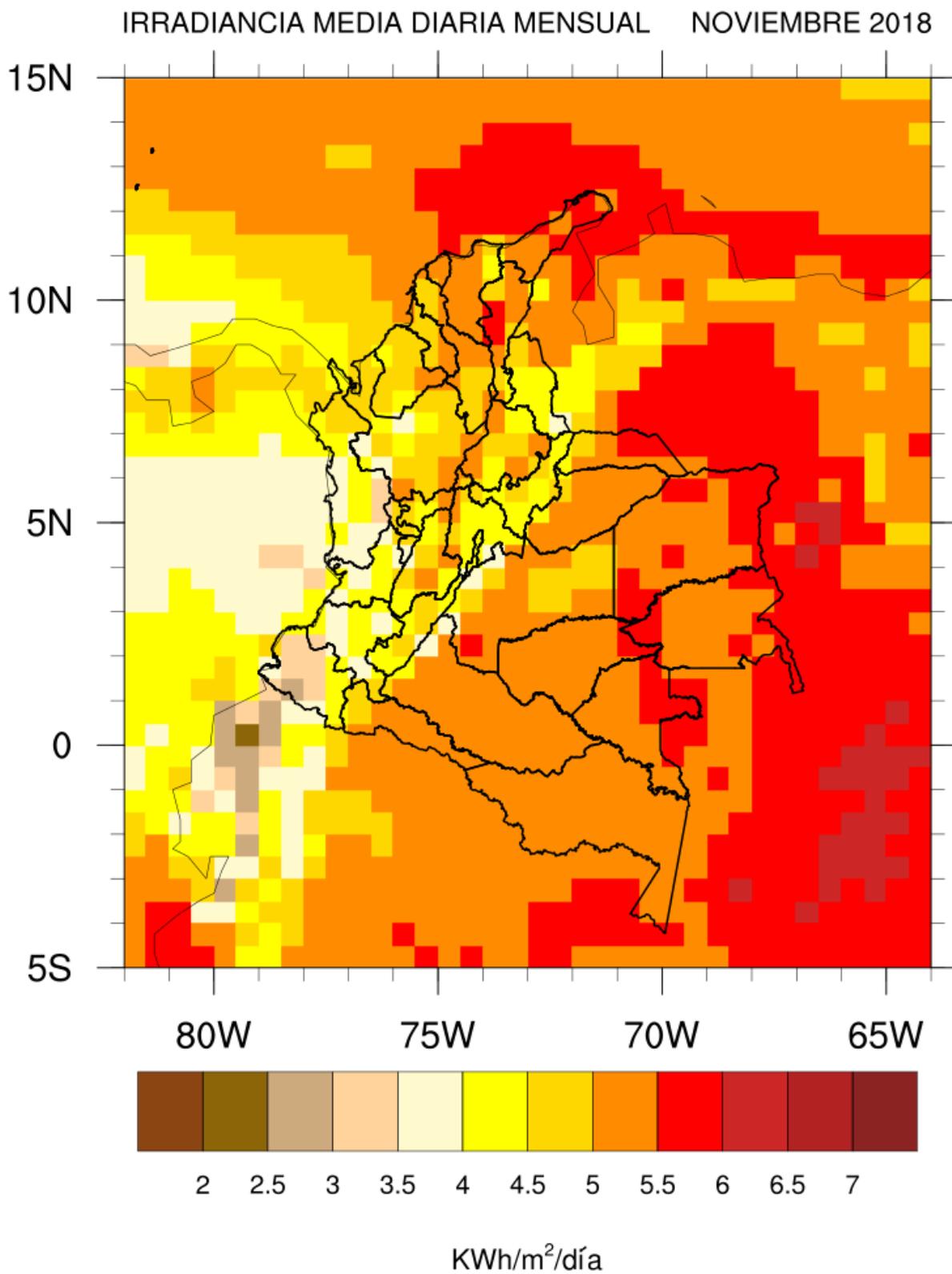


Figura C.1.11. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de noviembre de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.

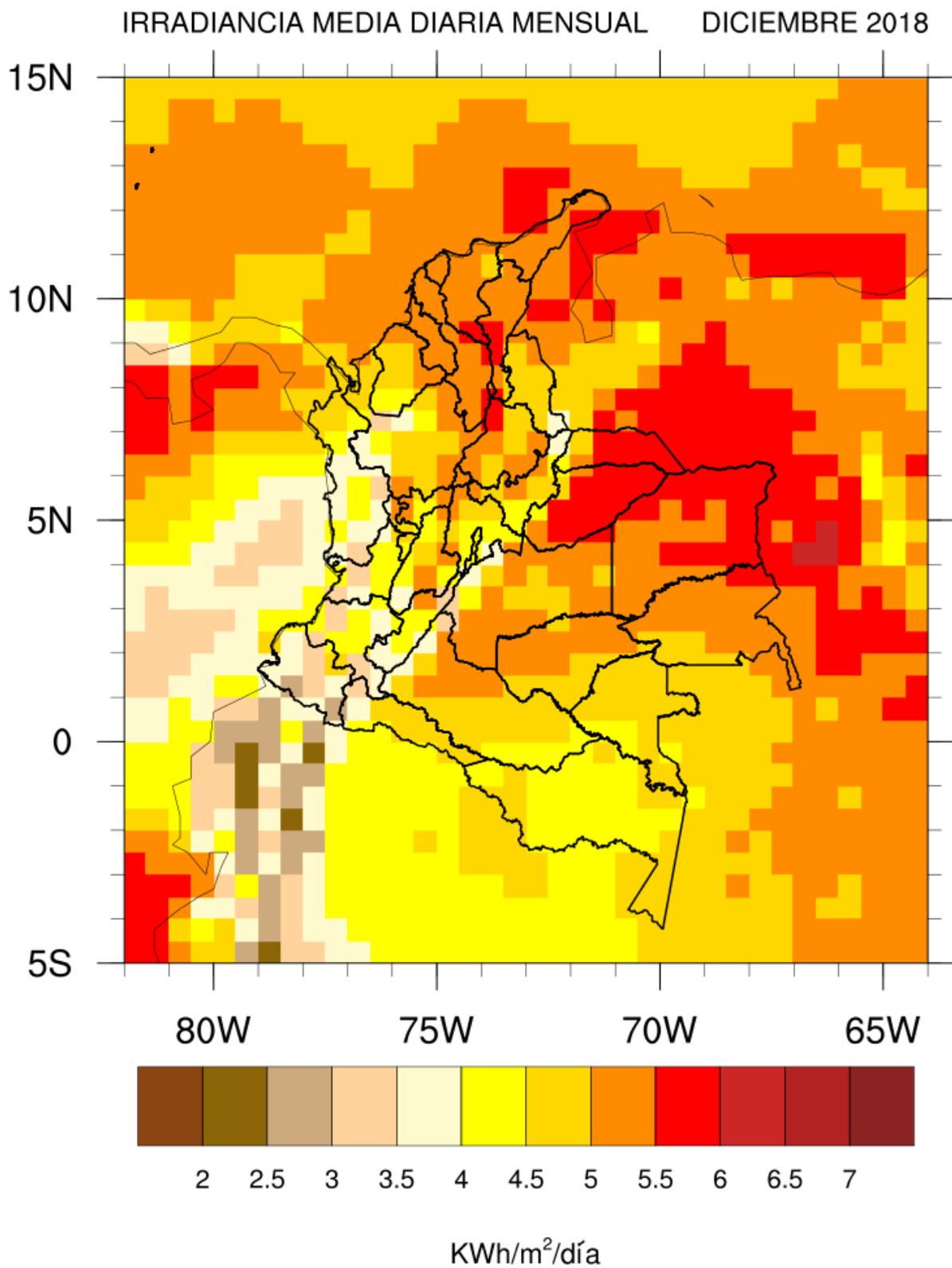


Figura C.1.12. Distribución de la irradiación media diaria mensual para Colombia en el mes de diciembre de 2018. Datos suministrados por el algoritmo ABI L2 + DSR de GOES – East.