

EVALUACIÓN EN URUGUAY DEL PRODUCTO DSR GOES-16 DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL HORIZONTAL

R. Ledesma¹, R. Alonso-Suárez^{2,3}, A. Monetta², A. Laguarda³, O. Vilela⁴, G. Salazar¹

¹Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

²Laboratorio de Energía Solar, Depto. de Física del Litoral, CENUR Litoral Norte, Udelar

³Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Udelar

⁴Departamento de Energía Nuclear, Centro de Tecnología, Universidad Federal de Pernambuco

E-mail: rdledesma@exa.unsa.edu.ar, r.alonso.suarez@gmail.com

RESUMEN: La información sobre el recurso solar es esencial para el desarrollo de aplicaciones que utilicen esta fuente energética. En ausencia de mediciones terrestres o estimaciones satelitales con modelos localmente adaptados, los usuarios tienden a recurrir a otras bases de datos disponibles. Estas bases de datos usualmente se componen de estimaciones de origen satelital o modelado atmosférico que no siempre alcanzan desempeños adecuados. Conocer el desempeño de tales herramientas es por tanto importante para asesorar de mejor manera a los usuarios del sector solar. En este estudio se evalúa por primera vez en Uruguay el desempeño del producto GOES-16 de irradiancia solar global horizontal (DSR) elaborado por la NESDIS/NOAA. El modelo Heliosat-4, largamente evaluado en esta región, se incluye en el análisis como referencia. La comparación demuestra que el producto GOES-DSR presenta un desempeño inferior al de Heliosat-4 en la región. Se obtuvo un RMSE porcentual de 19-20 %, un desvío estándar de 88 W/m² y un MBE porcentual de +3 % para el GOES-DSR, en comparación al 17-18 %, 70 W/m², y -1.5 %, respectivamente, del Heliosat-4. Los indicadores del Heliosat-4 son consistentes con evaluaciones previas en Uruguay.

Palabras clave: irradiancia solar, GHI, estimación satelital, Uruguay, GOES-DSR, Heliosat-4

INTRODUCCIÓN

El diseño y dimensionamiento de emprendimientos de aprovechamiento de la energía solar requiere información del recurso solar disponible en el emplazamiento elegido. El tamaño del proyecto, en particular, el volumen de la inversión, determina la calidad exigida para los datos base de radiación solar que serán utilizados. Los emprendimientos de gran escala requieren información de recurso muy precisa y de baja incertidumbre, dado que pequeñas diferencias entre la predicción del recurso y la realidad futura puede resultar en menores rentabilidades de las esperadas o afectar críticamente el flujo de caja de los proyectos (Schnitzer et al., 2012; McMahan et al., 2013). En cambio, para proyectos más chicos, por ejemplo, residenciales, empresariales o industriales de bajo porte, información menos precisa puede ser suficiente, siempre que los sesgos de los valores mensuales y anuales de largo plazo estén caracterizados. En este contexto, la evaluación de las fuentes de datos disponibles es información relevante para poder asesorar a los usuarios, atendiendo la aplicación específica de cada uno. Esto es especialmente importante para las fuentes de datos de libre distribución, dado que en ausencia de mejor información, los usuarios tienden a confiar en ellas sin visión crítica ni mayores cuestionamientos.

Existen varias bases de datos de acceso gratuito que proveen información de radiación solar para sitios arbitrarios, es decir, en ubicaciones que un usuario puede elegir ad-hoc ingresando las coordenadas geo-

gráficas o seleccionando en un mapa. Dependiendo de la escala temporal en que se provee la información (10-minutal, horaria, diaria, mensual, anual), estas bases pueden estar compuestas de interpolaciones de medidas terrestres, datos de reanálisis de modelos numéricos de atmósfera, o estimaciones por satélite. Dado que la medición terrestre presenta serias limitaciones de extrapolación espacial y los modelos de atmósfera tienden a subrepresentar la nubosidad, la única opción capaz de producir estimaciones confiables de radiación solar para sitios arbitrarios es la de origen satelital. Naturalmente, si uno cuenta con mediciones de calidad de radiación solar en sitio por varios años en el emplazamiento del proyecto, o cercano a él, esta sería la mejor información disponible, no obstante, es una situación muy infrecuente. La estimación de la irradiancia solar mediante imágenes satélites surge como una herramienta útil en situaciones en donde no se cuenta con información medida en el sitio específico, lo que es la situación más común. Para poder hacer uso de esta información, adaptarla al sitio, o desarrollar modelos satelitales localmente ajustados, la información medida en tierra es absolutamente fundamental, pero alcanza con que esté disponible dentro de la región climática afín. Esto relaja el requerimiento de disponibilidad de medida terrestre, en especial, la densidad espacial necesaria de las mediciones, un aspecto en que una red de medida en tierra no podría competir con la información satelital (Perez et al., 1997; Zelenka et al., 1999). En suma, la medición terrestre y la información satelital tienen una relación de complementariedad, donde la medida terrestre aporta la referencia para ajuste y/o validación de modelos, y la información satelital provee la espacialidad. La ganancia de espacialidad conlleva el costo de un aumento de incertidumbre respecto a lo que se lograría con una medida de calidad en el sitio específico. Aún así, resulta en información de menor incertidumbre y más detallada que la interpolación de mediciones terrestres si los sitios de medición están separados más de algunas pocas decenas de kms. El estudio a escala diaria de Gallegos y Lopardo (1988) demostró que en la Pampa Húmeda, al igual que en otras regiones, el error al extrapolar la irradiancia solar medida puede ser alto incluso para distancias cortas.

La nueva serie de satélites geoestacionarios GOES de la NOAA¹ (GOES16 y GOES17) implementa el producto llamado DSR (Downward Shortwave Radiation) mediante el cual se puede obtener una estimación de irradiancia global horizontal (GHI) de las imágenes satelitales (Laszlo et al., 2020). Este nuevo producto fue desarrollado por la STAR/NESDIS/NOAA² principalmente en el marco de la evaluación del balance radiativo terrestre, fundamental para entender la dinámica atmosférica, la circulación oceánica y el calentamiento global, entre otros fines. Las estimaciones se generan a través de un modelo de transferencia radiativa (RTM) que utiliza las imágenes hiperespectrales GOES (reflectancias en el espectro solar), propiedades de nubes, aerosoles, agua precipitable, ozono, y albedo de superficie terrestre obtenidos de productos GOES, e información auxiliar de modelos atmosféricos. Las estimaciones del GOES-DSR son de libre acceso y están integradas a los mecanismos de distribución de información satelital GOES. Los datos de GHI provistos por este producto han sido evaluados contra las mediciones de la red SURFRAD en Estados Unidos (Laszlo et al., 2020) y en varios sitios de Oceanía, Asia y América del Norte (Li et al., 2023). En particular, en Li et al. (2023) se compara el desempeño del GOES-DSR contra otras bases de datos satelitales disponibles que utilizan RTM, encontrando un desempeño relativamente bajo para este producto. Dicho trabajo incluye un único punto en Sudamérica (Florianópolis, Brasil), pero no desglosa el desempeño en dicho sitio. Por tanto, el producto GOES-DSR aún no ha tenido una evaluación específica en Latinoamérica.

En este trabajo se evalúa el desempeño de la estimación de GHI horaria del producto GOES-DSR en dos sitios de Uruguay ubicados al norte y al sur del país. Se utiliza una estadística de tres años de datos en cada sitio (2020-2022) y se compara el desempeño con la base de datos satelital CAMS³ que provee estimaciones del modelo Heliosat-4 (Qu et al., 2017). Este modelo se toma como referencia debido a su fácil acceso y a que ha sido evaluado previamente en esta región en varios trabajos (Gonzalez et al., 2019; Laguarda et al., 2020, 2021; Iturbide et al., 2023; Sarazola et al., 2023). Esto permite establecer dónde se ubica este nuevo producto en términos de desempeño, dado que el producto CAMS ya ha sido

¹National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Estados Unidos.

²Center for Satellite Applications and Research (STAR), National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), Estados Unidos.

³Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

intercomparado en los trabajos previos con otras bases de información satelital disponibles. La evaluación del GOES-DSR presentada aquí es la primera dedicada a sitios en Latinoamérica, y por extensión, en la Pampa Húmeda sudamericana, donde se ubica el territorio de Uruguay.

MEDICIONES TERRESTRES

Los datos medidos fueron provistos por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República, Uruguay. Se trata de datos horarios de irradiancia solar global horizontal (promediada en la hora) para el periodo 2020-2022 y de dos sitios de dicho país, al Norte (LE) y al Sur (LB), según se muestran en la Tabla 1. Estas medidas fueron registradas a escala minutal con piranómetros Kipp & Zonen CMP10, de Clase A y respuesta espectral plana según la norma ISO 9060:2018. Estos datos son representativos de un clima templado-cálido y húmedo con veranos calurosos, típico de la Pampa Húmeda, categorizada como Cfa en la clasificación climática actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007).

Tabla 1: Sitios de Uruguay analizados. LE: Norte del país. LB: Sur del país.

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (metros s.n.m)
LB	-34.6720	-56.3401	38
LE	-31.2827	-57.9181	56

Cuando se dispone sólo de la medida de GHI, los controles de calidad que se pueden aplicar a las mediciones son relativamente limitados. En este caso, se aplicó un filtro de envolvente máxima basado en el modelo de cielo claro ESRA (Rigollier et al., 2000). Este modelo de cielo claro depende de un único parámetro conocido como Turbidez de Linke, T_L . Para utilizarlo como filtro de valores máximos de GHI, se utiliza un valor bajo de turbidez, en este caso, $T_L = 2$, lo que es un valor suficientemente bajo para actuar de esta manera en el territorio de Uruguay (Abal et al., 2017).

ESTIMACIÓN SATELITAL

La estimación satelital de GHI es un proceso por el cual se usan –principalmente– las imágenes de un satélite geoestacionario para estimar la cantidad de irradiancia solar que llega a la superficie terrestre (Perez et al., 2002). Esto es útil para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la evaluación y pronóstico de recursos de energía solar, la planificación agropecuaria, y la modelización climática. Los modelos basados en satélites tienen la ventaja de poder producir estimaciones en alta resolución espacial (1-2 km) y temporal (10-15 mins) de la radiación solar sobre extensas regiones territoriales. Existen diversos servicios de datos que implementan algún modelo de estimación satelital, entre ellos se encuentran NASA POWER Data Series, la National Solar Radiation Data Base del NREL⁴, LSA-SAF de EUMETSAT⁵ y el servicio de CAMS, entre otras. Este trabajo analiza el producto DSR que ofrece la NESDIS/NOAA en base a la nueva serie de satélites GOES.

El satélite GOES-16

El GOES16 es un satélite meteorológico de la nueva serie de satélites GOES que se lanzó en el año 2016 por la NOAA. Este satélite cuenta con una amplia gama de sensores que se utilizan para monitorear y proporcionar información sobre la actividad meteorológica en tiempo real. Algunos de los sensores incluidos en el GOES16 son: el ABI (Advanced Baseline Imager), que proporciona imágenes de alta resolución de la Tierra en tiempo real y permite vigilancia meteorológica y elaboración de diversos productos satelitales; el GLM (Geostationary Lightning Mapper) que se utiliza para detectar y monitorear la actividad eléctrica en las nubes (rayos) en tiempo real; y el SEISS (Space Environment In-Situ Suite), que se utiliza para monitorear la actividad solar y su impacto en la Tierra. La información de los sensores es manipulada y combinada entre sí generando productos que pueden ser utilizados para diversos estudios

⁴National Renewable Energy Laboratory (NREL), Estados Unidos.

⁵European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), Alemania.

meteorológicos, del Sol, y del clima espacial. Puede consultarse la lista de los productos generados por la serie GOES en <https://www.goes-r.gov/products/overview.html>.

El modelo DSR

La sigla DSR se refiere a la radiación solar descendente de onda corta que llega a la superficie terrestre. El producto GOES-DSR (Laszlo et al., 2020) utiliza el algoritmo híbrido ESP SRB (Enterprise Processing System Shortwave Radiation Budget), desarrollado para estimar la DSR y la RSR (radiación solar reflejada al espacio exterior) a partir de las imágenes de reflectancia del ABI dentro del espectro solar. Este proceso implica varios pasos, que incluyen la calibración de los datos del sensor, la corrección atmosférica para el caso de cielo despejado, y la determinación de la cantidad de nubes y aerosoles presentes.

La implementación del algoritmo SRB se realiza de manera individual a nivel de píxeles. A cada píxel se le asigna una de cuatro categorías: cielo despejado sin nieve/hielo, cielo despejado sobre nieve/hielo, nube de agua y nube de hielo. El algoritmo considera dos caminos para establecer la estimación en función de la disponibilidad de información de entrada de Nivel 2 (L2)⁶. Si se dispone de estimaciones L2 de albedo de superficie, profundidad óptica de aerosoles y albedo de dispersión simple para escenas despejadas, o profundidad óptica de nubes/radio/altura de tope para escenas nubladas, se selecciona una secuencia de procesamiento denominada ruta directa. Si falta alguno de estos valores necesarios, se utiliza otra secuencia denominada ruta indirecta. La disponibilidad de productos L2 de agua precipitable total y ozono no se considera en la selección de la ruta, debiéndose tener en ambos casos. En caso de no haber estimaciones L2 de estas cantidades, la información se toma del GFS (Global Forecast System).

La ruta directa es una adaptación del modelo CERES (Rutan et al., 2015; Fillmore et al., 2022), donde se utilizan tablas de búsqueda precalculadas con el RTM de Fu y Liou (1993) utilizando como entrada las variables descritas anteriormente, en particular, propiedades de nubes y aerosoles, albedo de superficie, columna de agua precipitable y ozono. El RTM considera 18 bandas espectrales, lo que permite un modelado adecuado de la dispersión de Rayleigh, la absorción por ozono y la absorción en el infrarrojo cercano por otros gases minoritarios, procesos críticos para la radiación en cielo despejado. Para el caso nublado, se utilizan las estimaciones L2 de la profundidad óptica de nubes, el tamaño de las partículas en la nube y la altura del tope nuboso. Este enfoque es aplicado a escenas claras y nubladas, con distintas tablas de búsqueda en cada caso, y con una serie de entradas que sea compatible con las capacidades computacionales, dado que la cantidad de simulaciones escala en forma exponencial con la cantidad de entradas y de bandas espectrales consideradas.

La ruta indirecta se utiliza cuando no se pueden obtener los productos L2 requeridos. En este caso, se utilizan las reflectancias del ABI y relaciones precalculadas entre la transmisividad de la atmósfera y la reflectividad en el tope de la atmósfera para los casos de cielo claro y cielo nublado (Pinker y Laszlo, 1992). Estas relaciones precalculadas dependen de otra serie de parámetros atmosféricos que se deben estimar. Para ello se adoptan las mismas tablas de búsqueda que las utilizadas en la ruta directa, garantizando un cálculo coherente de la transferencia radiativa. Estas tablas se interpolan, primero y para ambos casos (despejado y nublado), con el ángulo cenital solar, la elevación del terreno, y la cantidad de vapor de agua y de ozono. Para cielo despejado se interpolan además con el valor climatológico del albedo de dispersión simple para aerosoles, y para cielo nublado por el radio efectivo de las nubes y la altura de tope nuboso. Como resultado, se obtienen los valores faltantes para establecer la relación transmitancia-reflectancia, y así calcular los flujos de radiación de onda corta. Más detalles se pueden consultar en Laszlo et al. (2020).

⁶Esta es una forma usual de referirse a los productos satelitales derivados de la información medida por el satélite, usualmente por modelos, parametrizaciones, o combinaciones de bandas espectrales.

Acceso a las estimaciones GOES-DSR

Los estimativos de GOES-DSR fueron obtenidos mediante el servicio en la nube Amazon S3 proporcionado por la NOAA para hacer disponible la descarga de las imágenes satelitales y productos de GOES. En <https://github.com/awslabs/open-data-docs/tree/main/docs/noaa/noaa-goes16> puede consultarse la documentación para descargar los estimativos. De la descarga se obtiene el producto GOES-DSR para toda la imagen full-disk (disponible a todas las horas en punto), de las cuales se construyeron las series temporales para los sitios de estudio.

RESULTADOS

Los valores de GHI medidos fueron comparados contra las estimaciones del modelo Heliosat-4, descargado del portal CAMS, y del producto GOES-DSR para ambos sitios de estudio. Las métricas utilizadas para la evaluación del desempeño son la desviación estándar STD, el error absoluto medio MAE, la desviación media del sesgo MBD y el desvío cuadrático medio RMSE, que se definen como,

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n}, \quad \text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}, \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}, \quad \text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}},$$
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}},$$

donde y e $\hat{y}$ son los valores de GHI medidos y estimados por los modelos, respectivamente, $e = \hat{y} - y$ es el error de estimación, n es el tamaño de la muestra, y $\bar{x}$ denota la media de la variable. Los indicadores de la primera fila pueden expresarse en términos relativos como porcentaje de la media de las medidas ($\bar{y}$), denominados aquí MBE %, MAE %, RMSE %, y STD %, respectivamente.

Evaluación de los modelos

En la Tabla 2 se muestran los distintos indicadores del desempeño en valores absolutos de cada uno de los modelos. En ambos sitios se observa que el modelo Heliosat-4 presenta una subestimación respecto a la medida con $\text{MBE} \simeq -6 \text{ W/m}^2$, por el contrario, en términos generales GOES-DSR sobrestima el recurso entorno con un $\text{MBE} \simeq +15 \text{ W/m}^2$. Esta es una diferencia marcada entre ambos estimativos. El resto de las métricas son consistentes entre sí, y muestran un desempeño inferior del GOES-DSR frente al Heliosat-4, con mayor dispersión en las tres métricas consideradas y menor correlación.

Tabla 2: Indicadores de desempeño en términos absolutos.

Código de estación	Modelo satelital	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	STD (W/m ²)	r (adim.)
LB	Heliosat-4	-6.3	43.2	71.4	71.1	0.97
LB	GOES-DSR	14.0	50.0	88.5	87.3	0.95
LE	Heliosat-4	-7.0	42.1	69.1	68.8	0.97
LE	GOES-DSR	15.1	52.0	90.8	89.6	0.95

La Tabla 3 muestra los indicadores de desempeño porcentuales expresados en términos relativos respecto a la media de la medida. En términos cuantitativos, se obtuvieron, para LE y LB respectivamente, valores de MBE de -1.5 % y -1.6 %, y RMSE % de 17.0 % y 18.0 % para el Heliosat-4, mientras que para GOES-DSR se encontraron MBE de 3.2 % y 3.1 % y RMSE de 19.3 % y 19.8 %. El valor de 17-18 % obtenido para los estimativos del portal CAMS es consistente con los hallados en Laguarda et al. (2020), donde se encontró un RMSE % promedio en Uruguay de 17.9 %, y de 17.3 % y 17.5 % respectivamente para estos sitios. Esto permite establecer que la comparación realizada aquí es consistente y puede ser tomada como

Tabla 3: Indicadores de desempeño expresados en términos relativos.

Código de estación	Modelo satelital	MBE (%)	MAE (%)	RMSE (%)	STD (%)
LB	Heliosat-4	-1.6	10.5	17.0	16.9
LB	GOES-DSR	3.1	11.15	19.8	19.5
LE	Heliosat-4	-1.5	9.0	18.0	14.6
LE	GOES-DSR	3.2	11.0	19.3	19.0

referencia para comparar con otras evaluaciones de modelos satelitales realizadas en la región. Esto ubica al modelo GOES-DSR cómo un modelo con desempeño un poco inferior a otras alternativas disponibles en la región, de los evaluados hasta la fecha (Sarazola et al., 2023).

En las Figs. 1 y 2 se presentan los gráficos de dispersión entre la medición terrestre y la estimación de cada modelo, para las estaciones de LE y LB respectivamente. A simple vista se observa una mayor dispersión de las estimaciones del modelo GOES-DSR en comparación al Heliosat-4 para condiciones de baja irradiancia en ambos sitios.

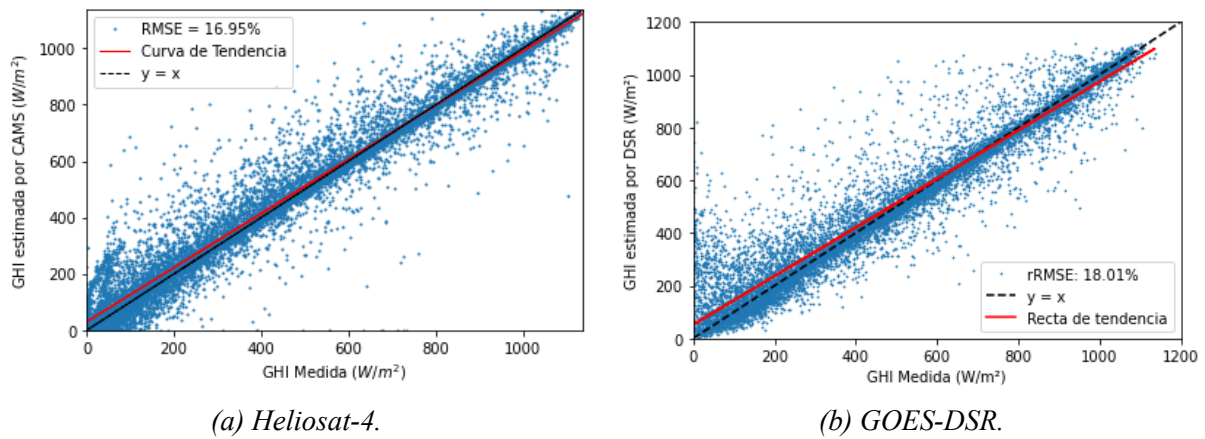


Figura 1: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para la estación LE.

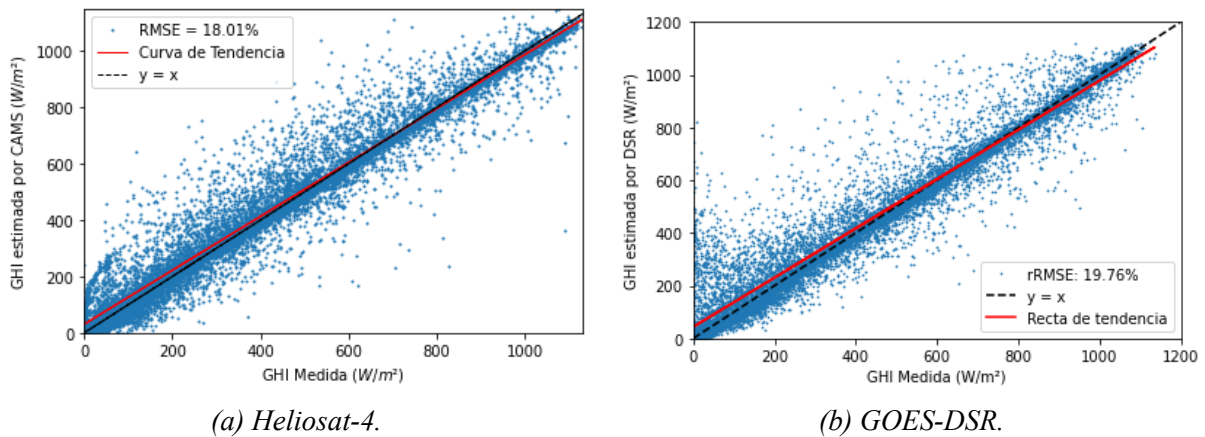
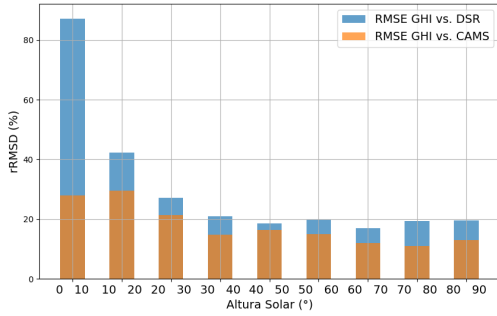


Figura 2: Gráfico de dispersión entre la medida y la estimación de GHI para la estación LB.

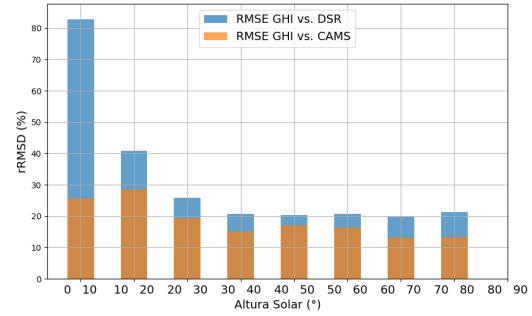
Discriminación del desempeño

Para profundizar la evaluación y comparación de los modelos, se evaluó el RMSE % en función de la altura solar (α_s) y el índice del claridad (k_t), definido como el cociente entre la GHI y el correspondiente valor en el tope de la atmósfera, y la declinación solar, como proxy para la evolución anual.

La variación del desempeño como función de α_s y k_t se muestra en las Figs. 3 y 4, respectivamente. En ambos casos se observa un menor desempeño del GOES-DSR en comparación al Heliosat-4 para la mayoría de las condiciones, exceptuando las condiciones de cielo despejado ($k_t > 0.65$) donde ambos presentan desempeños similares. Cabe destacar que para condiciones de alta claridad, i.e. $k_t \simeq 0.75$, el GOES-DSR funciona levemente mejor que CAMS, ya que su RMSE % es menor por aproximadamente un 1 %. La diferencia de desempeños se acentúa notoriamente para alturas solares bajas ($\alpha_s < 20^\circ$) y cielo totalmente cubierto por nubosidad ($k_t < 0.25$), donde el desempeño del GOES-DSR disminuye notoriamente, superando en RSMD % en más de un 300 % al de CAMS para $\alpha_s < 10^\circ$. Notar que los valores porcentuales de error se disparan para k_t muy bajo debido a que la media de normalización es significativamente menor en estas condiciones.

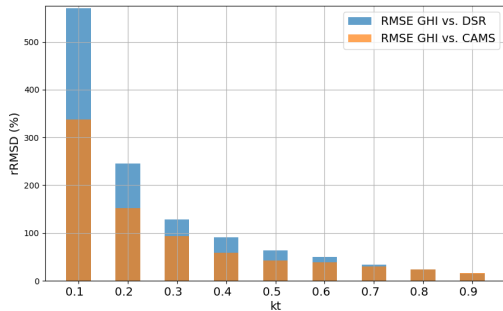


(a) Estación LE.

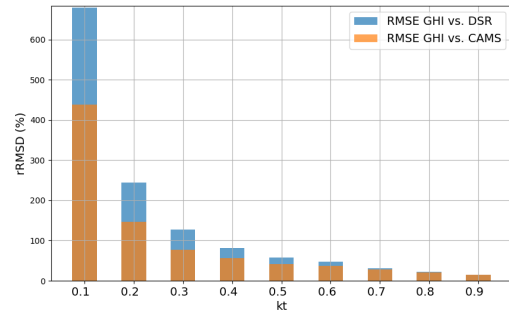


(b) Estación LB.

Figura 3: RMSE % como función de la altura solar.



(a) Estación LE.



(b) Estación LB.

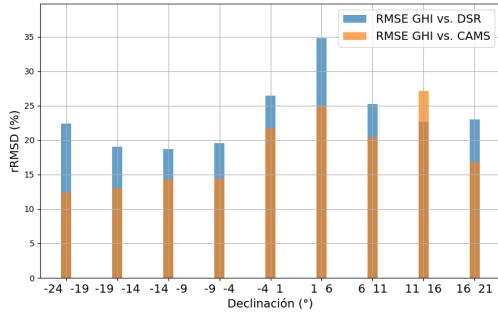
Figura 4: RMSE % como función del índice de claridad.

La variación del RMSE % con el ángulo de declinación solar se muestra en la Fig. 5. Se puede observar que el error de ambos modelos tiende a incrementarse en los días correspondientes al otoño austral. Esta es la primera vez que se analiza la estacionalidad del error de la estimación satelital en la región, dado que en general es un comportamiento que se estudia poco a pesar de ser relevante.

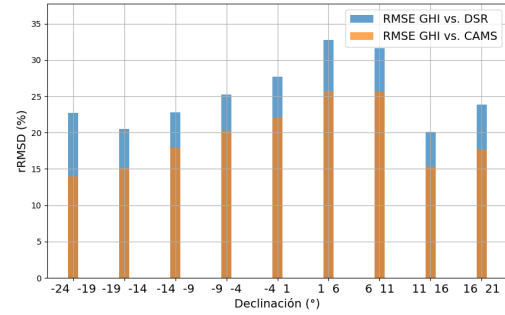
CONCLUSIONES

El modelo GOES-DSR presenta una mayor incertidumbre en Uruguay respecto a los valores estimados por el modelo Heliosat-4. En condiciones de cielo claro ambos modelos tienen un RMSE % similar, teniendo incluso el modelo GOES-DSR un 1 % de ganancia para las condiciones de cielo muy despejado. Dejando esa condición particular de lado, el modelo GOES-DSR presenta menor desempeño para el resto de las condiciones, en particular, para valores de nubosidad intermedia y total, y para todas las alturas solares. Para altos niveles de nubosidad y muy baja altura solar la diferencia entre ambos modelos se incrementa significativamente.

Ambos modelos presentan un error que aumenta conforme disminuye la altura solar y el índice de cla-



(a) Estación LE.



(b) Estación LB.

Figura 5: RMSE % como función de la declinación solar.

ridad. Este aspecto ya fue estudiado para el CAMS en Laguarda et al. (2020), obteniéndose el mismo comportamiento. Este problema es mayor en la estimación del modelo GOES-DSR (su manual recomienda la utilización de este producto para alturas solares mayores a 20°). Los modelos satelitales de estimación de irradiancia solar asumen en general ciertas características atmosféricas y geométricas. A alturas solares bajas, estas suposiciones pueden volverse menos precisas debido a efectos atmosféricos y geométricos más pronunciados. Por lo tanto, es importante considerar estas limitaciones al interpretar las estimaciones de irradiancia solar en diferentes momentos del día y en diferentes ubicaciones geográficas.

El desempeño evaluado para el Heliosat-4 coincide con otras evaluaciones hechas para la misma región. La comparación relativa entre ambos permite ubicar aproximadamente a las estimaciones GOES-DSR en un ranking de desempeño regional. Resulta claro que este modelo presenta un desempeño menor al de CAMS, que de por sí no es la mejor opción satelital para la región bajo estudio. Esto se debe a que el portal CAMS utiliza imágenes del satélite Meteosat como entrada al modelo Heliosat-4, que tiene un elevado ángulo de visión sobre la Pampa Húmeda. La comparación hecha aquí ubica al GOES-DSR como una alternativa satelital de desempeño inferior a otras alternativas satelitales disponibles en la región, pero mejor que datos de reanálisis de modelos numéricos de atmósfera como MERRA2.

AGRADECIMIENTOS

Los coautores del Laboratorio de Energía Solar agradecen a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), Udelar, por el apoyo financiero a través de su programa de Grupos de I+D.

REFERENCIAS

- Abal, G., Aicardi, D., Suárez, R. A., y Laguarda, A. (2017). Performance of empirical models for diffuse fraction in uruguay. *Solar Energy*, 141:166–181.
- Fillmore, D., Rutan, D., Kato, S., Rose, F., y Caldwell, T. (2022). Evaluation of aerosol optical depths and clear-sky radiative fluxes of the CERES Edition 4.1 SYN1deg data product. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(15):10115–10137.
- Fu, Q. y Liou, K. N. (1993). Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, 50(13):2008 – 2025.
- Gallegos, H. G. y Lopardo, R. (1988). Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the argentine pampa humeda. *Solar Energy*, 40(5):397–404.
- Gonzalez, J., Teixeira-Branco, V., y Alonso-Suárez, R. (2019). Evaluation of the Heliosat-4 and FLASHFlux models for solar global daily irradiation estimate in Uruguay. En *ISES Conf. Proceedings, Solar World Congress*. URL: <https://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0197-TeixeiraAlvesBranco.pdf>.
- Iturbide, P., Alonso-Suarez, R., y Ronchetti, F. (2023). An analysis of satellite-based machine learning

- models to estimate global solar irradiance at a horizontal plane. En Naiouf, M., Rucci, E., Chichizola, F., y De Giusti, L., editores, *Cloud Computing, Big Data & Emerging Topics*, pp. 118–128, Cham. Springer Nature Switzerland.
- Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted cams database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the pampa húmeda. *Solar Energy*, 199:295–307.
- Laguarda, A., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M., Luza, S., Burgos, B., Stern, V., y Alonso-Suárez, R. (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 48:1–9.
- Laszlo, I., Kim, H.-Y., y Liu, H. (2020). *Algorithm Theoretical Basis Document For Downward Short-wave Radiation (Surface), and Reflected Shortwave Radiation (TOA), Enterprise Processing System (EPS) Version*. NOAA/NESDIS/STAR.
- Li, R., Wang, D., Wang, W., y Nemani, R. (2023). A GeoNEX-based high-spatiotemporal-resolution product of land surface downward shortwave radiation and photosynthetically active radiation. *Earth System Science Data*, 15(3):1419–1436.
- McMahan, A., Grover, C., y Vignola, F. (2013). Evaluation of resource risk in solar-project financing. En Kleissl, J., editor, *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp. 81–95. Academic Press, Boston.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11:1633–1644.
- Perez, R., Ineiche, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., y Vignola, R. G. F. (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances: Description and validation. *Solar Energy*, 73:307–317.
- Perez, R., Seals, R., y Zelenka, A. (1997). Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, 60(2):89–96.
- Pinker, R. T. y Laszlo, I. (1992). Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 31(2):194 – 211.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, C., Klüser, L., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., y Wald, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: the Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(1):33–57.
- Rigollier, C., Bauer, O., y Ward, L. (2000). On the clear sky model of the esra– european solar radiation atlas– with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, p. 33–48.
- Rutan, D., Kato, S., Doelling, D., Rose, F., Nguyen, L., Caldwell, T., y Loeb, N. (2015). CERES synoptic product: Methodology and validation of surface radiant flux. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(6):1121 – 1143.
- Sarazola, I., Laguarda, A., Ceballos, J. C., y Alonso-Suárez, R. (2023). Benchmarking of modeled solar irradiation data in uruguay at a daily time scale. *IEEE Latin American Transactions*, 21(9):1040–1048.
- Schnitzer, M., Thuman, C., y Johnson, P. (2012). The impact of solar uncertainty on project financeability: mitigating energy risk through on-site monitoring. En *Proceedings of the American Solar Energy Society (ASES)*, pp. 1–5, Denver, Colorado, United States.
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., y Renné, D. (1999). Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, 62(3):199–207.

EVALUATION OF THE GLOBAL SOLAR IRRADIANCE MODEL DSR FROM GOES-16 IN URUGUAY

ABSTRACT: Solar resource information is essential for the development of solar energy applications. In the absence of quality ground measurements or satellite estimates with locally adapted models, users tend to rely on the available databases. These databases are usually composed of generic satellite-based estimates or atmospheric modeling data that do not always achieve adequate performance. Knowing the performance of such tools is therefore important to better advise solar sector's users. This study evaluates for the first time in Uruguay the performance of the GOES-16 solar global horizontal irradiance (DSR) product developed by NESDIS/NOAA. The Heliosat-4 model, long evaluated in this region, is included in the analysis as a reference. The comparison shows that the GOES-DSR product does not outperform in the region the Heliosat-4 estimates, with a relative RMSE of $\simeq 19 - 20\%$, a standard deviation of $\simeq 95 \text{ W/m}^2$ and a relative MBE of $\simeq +3\%$ compared to the Heliosat-4's RMSE of $17-18\%$, STD of 70 W/m^2 , and MBE of -1.5% . The Heliosat-4 metrics are consistent with previous evaluations in Uruguay.

Keywords: solar irradiance, GHI, satellite-based estimation, Uruguay, GOES-DSR, Heliosat-4