

# **ESTUDIO DE VALORES DIARIOS MEDIOS MENSUALES DE GHI MEDIDOS EN ARGENTINA Y BRASIL. COMPARACIÓN CONTRA BASES DE DATOS SATELITALES.**

**Germán Ariel Salazar** (UNSa-INENCO) - germansalazar.ar@gmail.com

**Gonzalo Duran** (Instituição - a informar) - gonzalo.jose.duran@gmail.com

**Martín Romano Armada** (Instituição - a informar) - martinromanoarmada@gmail.com

**Aitor Marzo** (Instituição - a informar) - aitor.marzo@uantof.cl

**Rodrigo Henrique de Lima Farias** (UFPE) - rodrigohlfarias@gmail.com

**Olga de Castro Vilela** (UFPE) - ocv.olga.cer@gmail.com

## **Resumo:**

*El análisis de los estimados de Bases de Datos Satelitales (BDS) es importante para realizar estudios de caracterización del recurso solar en regiones extensas. Estos estimados presentan errores cuando se comparan contra datos de calidad medidos en superficie, y es importante analizar estas correlaciones. En este trabajo se comparan los valores diarios medios mensuales interanuales de GHI medidos en Salta (Argentina), El Rosal (Argentina) y Petrolina (Brasil), contra estimaciones de cinco BDS: LSA-SAF, CAMS, SWERA, Meteonorm y SSE-NASA. Los sitios argentinos son sitios de altura. Se encuentra que CAMS ofrece mejores resultados que las demás BDS. Se seguirá analizando, en trabajos futuros, el comportamiento de LSA-SAF para sitios de altura y datos de estaciones de la red SONDA-INPE en Brasil.*

**Palavras-chave:** *radiación solar, plano horizontal, Bases de Datos Satelitales*

**Área temática:** *Radiação Solar*

**Subárea temática:** *Recursos Solares e Meteorologia da Radiação Solar*

# ESTUDIO DE VALORES DIARIOS MEDIOS MENSUALES DE GHI MEDIDOS EN ARGENTINA Y BRASIL. COMPARACIÓN CONTRA BASES DE DATOS SATELITALES.

**Germán Salazar**- german.salazar@conicet.gov.ar

**Gonzalo Duran** - gonzalo.jose.duran@gmail.com

**Martin Romano Armada** - martinromanoarmada@gmail.com

Universidad Nacional de Salta (Argentina)

**Aitor Marzo** - aitor.marzo@uantof.cl

Universidad de Antofagasta (Chile)

**Rodrigo Farias** – rodrigohlfarias@gmail.com

**Olga de Castro Vilela** – ocv@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco (Brasil)

**Resumen:** *El análisis de los estimados de Bases de Datos Satelitales (BDS) es importante para realizar estudios de caracterización del recurso solar en regiones extensas. Estos estimados presentan errores cuando se comparan contra datos de calidad medidos en superficie, y es importante analizar estas correlaciones. En este trabajo se comparan los valores diarios medios mensuales interanuales de GHI medidos en Salta (Argentina), El Rosal (Argentina) y Petrolina (Brasil), contra estimaciones de cinco BDS: LSA-SAF, CAMS, SWERA, Meteororm y SSE-NASA. Los sitios argentinos son sitios de altura. Se encuentra que CAMS ofrece mejores resultados que las demás BDS. Se seguirá analizando, en trabajos futuros, el comportamiento de LSA-SAF para sitios de altura y datos de estaciones de la red SONDA-INPE en Brasil.*

**Palabras Clave:** *radiación solar, plano horizontal, Bases de Datos Satelitales.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Conocer la distribución del recurso solar en regiones extensas es de importancia para diversas aplicaciones: instalación de centrales FV o CSP, agricultura, cambio climático, etc. En años recientes, el uso de Bases de Datos Satelitales (BDS) ha brindado un nuevo empuje al conocimiento de las características de la radiación solar en regiones donde o no se han instalado nunca estaciones meteorológicas o no era posible instalarlas. Sin embargo, las BDS son el resultado de modelos y, como tales, presentan errores que deben conocerse y analizarse.

Las BDS utilizan información registrada en satélites, la que se compara contra datos medidos en sitios en la superficie, en estaciones meteorológicas con sensores de calidad, homologados y calibrados (Tarpley, 1979). Así, se pueden calibrar los valores de radiación solar asignados a celdas satelitales (definidas por la resolución de cada equipo) y de esa manera se pueden extrapolar valores a “estaciones virtuales”: una por cada celda satelital, de manera que la información que puede brindar una BDS abarca regiones extensas, países y hasta continentes (Zelenka et al, 1999).

Ha habido muchos avances desde los primeros trabajos sobre BDS (Tarpley, 1979; Justus et al, 1986; Noia et al, 1993a-1993b; Zelenka et al, 1999). La tecnología ha evolucionado y los modelos también. Así, la calidad de los resultados va mejorando al grado de encontrar BDS que ofrecen productos sub-horarios; sin embargo, el grado de error puede ser significativo (Huld et al, 2012). Incluso se asocian los valores estimados de las BDS a aplicaciones prácticas en FV y CSP ([ec.europa.eu/jrc/en/pvgis](http://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis)).

Recientemente se ha realizado una comparación entre valores medidos y estimados por varias BDS para Petrolina (Salazar et al, 2020). Dentro de esas BDS no está incluida LSA-SAF (Satellite Application Facility on Land Surface Analysis, [landsaf.ipma.pt/en/](http://landsaf.ipma.pt/en/)), y presenta 4 características interesantes:

- i) Es de acceso gratuito.
- ii) El tamaño de su celda es de 3 km de lado.
- iii) Poseen frecuencia sub-horaria.
- iv) Los datos están disponibles hasta fechas recientes.

Esta BDS ha sido analizada para estudios realizados en Europa con muy buenos resultados de correlación (Sepulcre-Canto et al, 2014; Hu et al, 2015).

En este trabajo también se utilizan datos medios mensuales interanuales de otras BDS: CAMS (<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>), SSE-NASA (<https://power.larc.nasa.gov/>), Meteonorm (<https://meteonorm.com/en/>) y SWERA (<https://s3.amazonaws.com/openei-public/swera.zip>). Así, se realiza la comparación de datos medidos en tres sitios de Sudamérica (dos en Argentina y uno en Brasil) contra los estimados por 5 BDS, realizándose una evaluación preliminar de la BDS LSA-SAF. Para ello se correlacionan los valores diarios medios mensuales interanuales de GHI medidos en los tres sitios, contra los estimados por las BDS.

## 2. DATOS ANALIZADOS

Los datos medidos de GHI, analizados en este trabajo, provienen de tres sitios particulares:

- |      |            |             |              |                |
|------|------------|-------------|--------------|----------------|
| i)   | Salta:     | Lat. -24.7° | Long. -65.4° | Alt. 1200 msnm |
| ii)  | El Rosal:  | Lat. -24.4° | Long. -65.7° | Alt. 3350 msnm |
| iii) | Petrolina: | Lat. -9.07° | Long. -40.3° | Alt. 390 msnm  |

Los primeros dos sitios se encuentran en la provincia de Salta (noroeste de Argentina) mientras que el último sitio se encuentra en el estado de Pernambuco (nordeste de Brasil). Estos tres sitios poseen características especiales que los destacan en cada uno de sus países. Los sitios argentinos son sitios de altura, ya que se encuentran a más de 1000 metros s.n.m. El sitio brasileño es especial ya que allí la disponibilidad de la radiación solar es superior a la media brasileña, tal y como se ve en el mapa de radiación brasileño ([http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017-en.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017-en.html)).

En este trabajo se analizaron datos de GHI registrados con frecuencia de 1 minuto. En Salta se midió con un sensor Eppley PSP conectado a un datalogger Campbell Scientific CR1000, abarcando los años 2013 a 2015. En El Rosal se midió con un Kipp & Zonen CMP3 conectado también a un datalogger CR1000, cubriendo el periodo de 2013 a 2016. En Petrolina se mide GHI con un Kipp & Zonen CM11. Los datos analizados de GHI para Petrolina abarcan el periodo 2010 a 2014 (<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>).

Los datos de GHI minutales de Petrolina fueron filtrados siguiendo el Protocolo de Control de Calidad (PCC) de la BSRN (<https://bsrn.awi.de/>). Para el caso de Salta y El Rosal, al tener solo datos de GHI, se utilizaron solo los siguientes criterios para el Control de Calidad:

- i) Hora de salida y puesta del Sol (Duffie y Beckman, 2013)
- ii) Primer criterio del PCC de la BSRN.

Actualmente se está trabajando en el desarrollo de criterios para datos de GHI que sean más rigurosos (Petribú et al., 2017).

### 2.1 La Base de Datos Satelital LSA-SAF

Las características de CAMS, SWERA, Meteonorm y SSE-NASA han sido analizadas con anterioridad (Salazar et al, 2020). La BDS llamada Instalación de Aplicaciones Satelitales para el Análisis de la Superficie Terrestre (Satellite Application Facility on Land Surface Analysis, LSA-SAF) es una empresa conjunta organizada por el Instituto Portugués del Mar y la Atmósfera (IPMA) junto con los Servicios Meteorológicos de países como Alemania, Bélgica, España, Inglaterra y los Países Bajos. EUMETSAT (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos), es una organización intergubernamental que proporciona datos satelitales relacionados con el clima y la meteorología. Dentro de esta, el objetivo de LSA-SAF es desarrollar productos a partir del procesamiento

de datos satelitales como la vegetación, la evapotranspiración y también, objeto de este trabajo, la radiación de onda corta superficial, conocida como DSSF (flujo descendente de onda corta en superficie).

El DSSF se refiere a la energía de radiación en el rango de longitud de onda (300 nm a 4000 nm) que emana de la superficie, medida como Irradiancia (en W/m<sup>2</sup>) y depende esencialmente de parámetros como el ángulo cenital solar, el albedo de la superficie, la capa de nubes y la absorción atmosférica. Este es un producto derivado del radiómetro Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI) a bordo del Meteosat Second Generation (MSG), con una resolución espacial de 3 km/píxel (muestreo nadir) disponible para 4 regiones geográficas cubiertas por el MSG.

Los datos DSSF se proporcionan en formato HDF5 (formato de datos jerárquicos) a través del portal LSA-SAF, donde el usuario solicita datos de la página del producto para un período temporal determinado. Para este trabajo, se utilizó específicamente el producto MDSSF, de 2010 a 2014, con una frecuencia temporal de 30 minutos. Así, en cada intervalo de 30 minutos se genera un archivo con extensión HDF5. La herramienta utilizada para extraer datos de irradiancia para una región determinada, cuyas limitaciones están dadas por las coordenadas geográficas, fue MSG Toolbox, puesta a disposición por LSASAF en su portal. Después de la extracción, se abre un nuevo archivo en un formato compatible a medida que se genera el texto y, a través de algoritmos de Python, fue posible crear series de tiempo para cada año del período mencionado anteriormente.

## 2.2 Comparación y Resultados

A continuación se muestran los valores extraídos de las BDS LSA-SAF, CAMS, SSE-NASA, Meteonorm y SWERA para las coordenadas geográficas de Salta, El Rosal y Petrolina. Se las compara contra los valores de GHI diarios medios mensuales interanuales. En la Fig. 1 se muestran los valores diarios medios mensuales para la ciudad de Salta. Los valores de LSA-SAF y CAMS corresponden a los mismos años que los datos medidos (2013-2014 y 2015). Meteonorm, SSE-NASA y SWERA corresponden a periodos que no coinciden con los años de los datos medidos.

Los indicadores estadísticos utilizados son los siguientes (Gueymard, 2014):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (I_{e,i} - I_{m,i})^2} \quad (1)$$

$$\text{MBE} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (I_{e,i} - I_{m,i}) \quad (2)$$

$$\text{MABE} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} |I_{e,i} - I_{m,i}| \quad (3)$$

donde  $I_e$  es el valor estimado de la irradiación diaria media mensual e  $I_m$  es el valor medido de la irradiación diaria media mensual (ambas en kWh/m<sup>2</sup>). El subíndice  $i$  varía de 1 a 12, asociando cada mes del año con la posición cardinal. Sin embargo debe notarse que es más útil expresar estos indicadores estadísticos como porcentajes (RMSE%, MBE% y MABE%), ya que esto ayuda a entender más rápidamente sus implicancias.

La Tabla 1 muestra que, para Salta, CAMS es el mejor modelo (RMSE% = 6.8%) mientras que SSE NASA es el peor modelo (RMSE% = 14.8%). Los indicadores MBE% y MABE% indican que todos las BDS sobrestiman los valores para Salta, siendo LSA-SAF el que menos lo hace (4.2%). SSE es la BDS con mayor desvío.

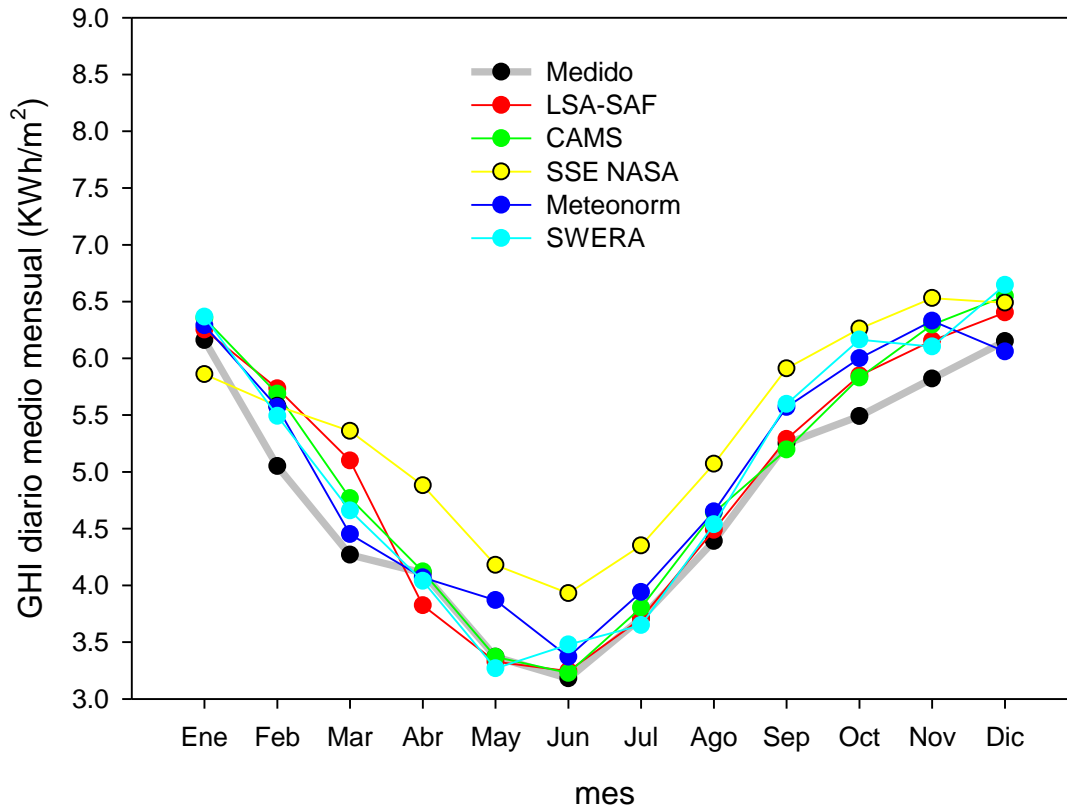


Figura 1- Valores diarios medios mensuales interanuales medidos y estimados de GHI para la ciudad de Salta. Los valores medidos se han resaltado con una línea gris gruesa.

Tabla 1 - Valores de los indicadores estadísticos MBE, RMSE y MABE (y porcentuales) para los valores medidos en Salta, respecto de cada BDS.

	MBE (kWh/m <sup>2</sup> )	RMSE (kWh/m <sup>2</sup> )	MABE (kWh/m <sup>2</sup> )	MBE%	RMSE%	MABE%
LSA-SAF	0.20	0.36	0.26	4.2	7.6	5.4
CAMS	0.24	0.32	0.25	5.1	6.8	5.3
SSE NASA	0.62	0.70	0.67	13.1	14.8	14.1
Meteonorm	0.27	0.34	0.29	5.6	7.1	6.1
SWERA	0.25	0.34	0.29	5.3	7.2	6.2

En la Fig. 2 se muestran los valores para El Rosal. Este sitio se encuentra a más de 3300 metros de altura sobre el nivel del mar, por lo que en él se experimentan todos los efectos que la altitud tiene sobre variables como la radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa.

Se observa que todos los valores estimados por las BDS para El Rosal son inferiores a los valores de GHI medidos en el sitio. Meteonorm y CAMS son las mejores BDS estimando los valores de GHI medios mensuales con un RMSE% de  $\approx 15\%$  respecto de los medidos. Las mayores diferencias se dan para los meses de Octubre a Marzo (Fig. 2). Los valores de MBE% indican una sobrestimación por todas las BDS.

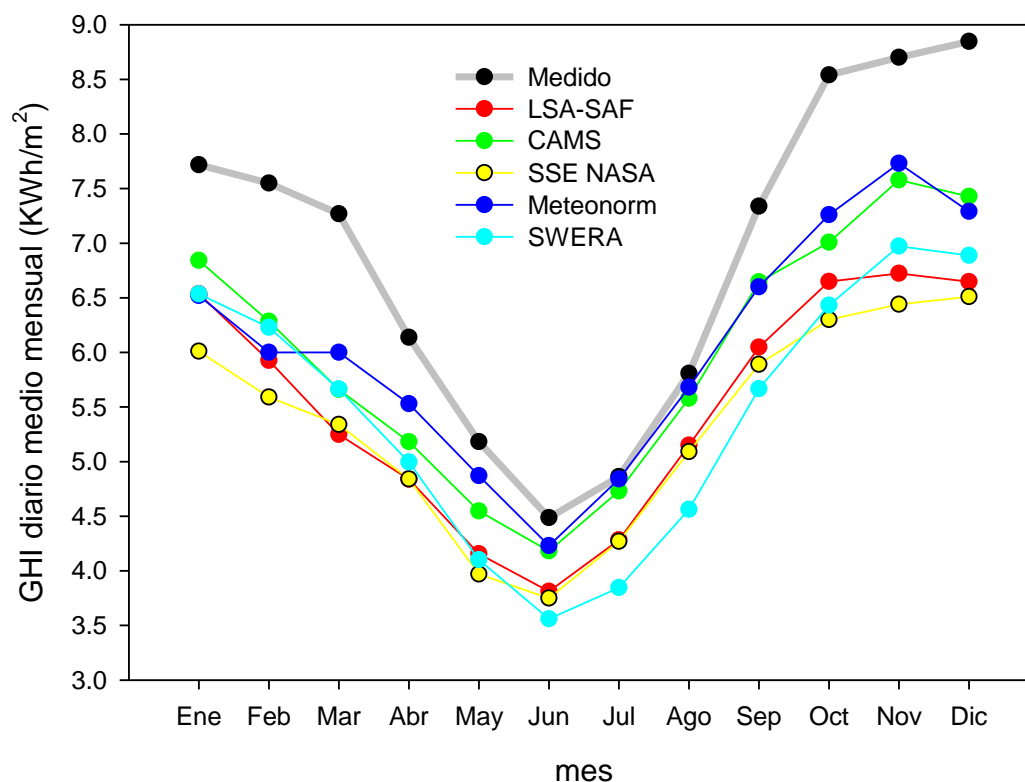


Figura 2 - Valores diários médios mensais interanuais medidos e estimados de GHI para El Rosal. Los valores medidos se han resaltado con una línea gris más gruesa.

Tabla 2 - Valores de los indicadores estadísticos MBE, RMSE y MABE (y porcentuales) para los valores medidos en El Rosal, respecto de cada BDS.

	MBE (kWh/m <sup>2</sup> )	RMSE (kWh/m <sup>2</sup> )	MABE (kWh/m <sup>2</sup> )	MBE%	RMSE%	MABE%
LSA-SAF	-1.37	1.47	1.37	-19.9	21.5	19.9
CAMS	-0.90	1.02	0.90	-13.1	14.9	13.1
SSE NASA	-1.54	1.65	1.54	-22.4	24.1	22.4
Meteonorm	-0.82	0.98	0.82	-12.0	14.3	12.0
SWERA	-1.42	1.46	1.42	-20.6	21.3	20.6

Para el caso de Petrolina, los mejores resultados se obtiene para CAMS (RMSE% = 1.9%), SWERA (RMSE%=2.0%) y LSA-SAF (RMSE%=2.8%). Para el caso del MBE%, CAMS, LSA-SAF y SWERA dan valores cercanos a 0%, indicando que lo que sobrestima en algunos meses lo compensa subestimando en otros. SSE NASA y Meteonorm presentan RMSE%  $\approx$  8%, los cuales resultan significativos considerando los valores de las otras BDS.

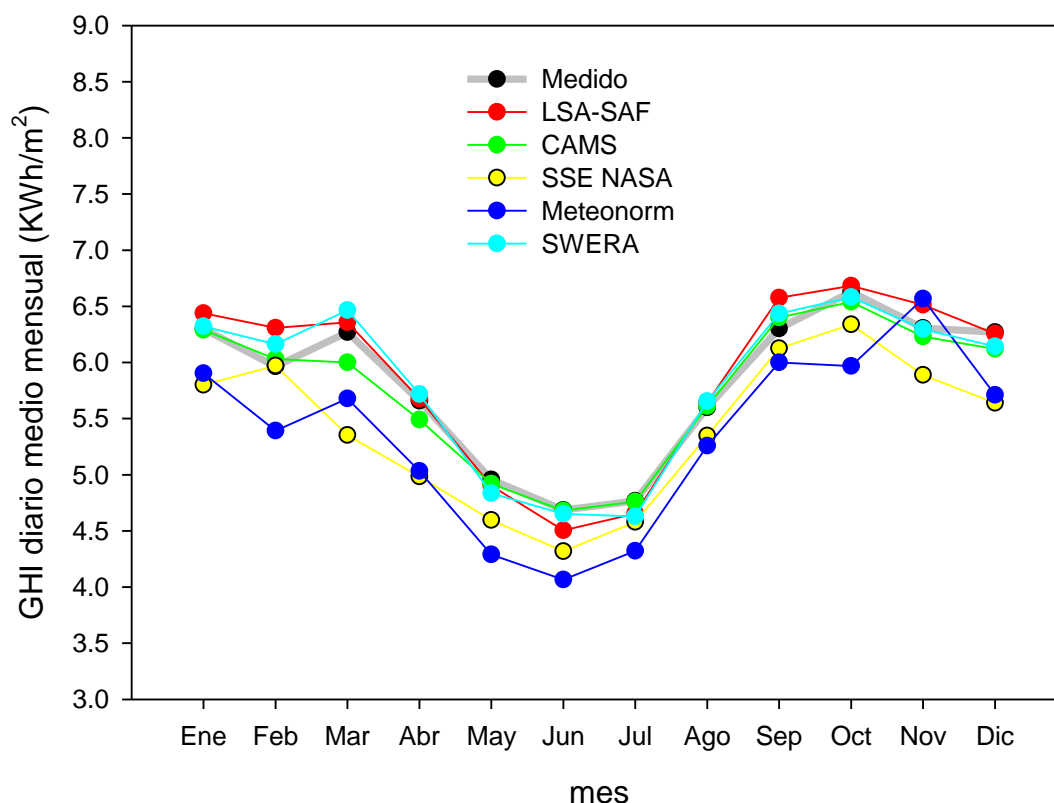


Figura 3- Valores diarios medios mensuales interanuales medidos y estimados de GHI para Petrolina. Los valores medidos se han resaltado con una línea gris más gruesa.

Tabla 3 - Valores de los indicadores estadísticos MBE, RMSE y MABE (y porcentuales) para los valores medidos en Petrolina, respecto de cada BDS.

	MBE (kWh/m <sup>2</sup> )	RMSE (kWh/m <sup>2</sup> )	MABE (kWh/m <sup>2</sup> )	MBE%	RMSE%	MABE%
LSA-SAF	0.07	0.16	0.13	1.1	2.8	2.2
CAMS	-0.05	0.11	0.08	-0.9	1.9	1.4
SSE NASA	-0.40	0.47	0.40	-6.8	8.0	6.9
Meteonorm	-0.46	0.52	0.50	-7.9	9.0	8.7
SWERA	0.02	0.11	0.10	0.3	2.0	1.6

### 3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los sitios analizados poseen diferente climas, los que podrían ser clasificados usando el criterio de Köppen –Geiger (<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>). Salta sería Cwa, El Rosal sería Cwc y Petrolina sería Bsh. Esta asignación surge de un análisis realizado por los autores y debe ser corroborado con estudios futuros más exhaustivos.

Para el caso de los datos medidos en Salta y en El Rosal, como era de esperarse, hay una diferencia significativa en los valores de GHI (25.48 kWh/m<sup>2</sup>) calculados integrando anualmente las diferencias de irradiancias medias mensuales, que se atribuye a la diferencia de altitud entre ellas (2500 metros, aproximadamente) teniendo en cuenta que la distancia lineal que las separa es de 50 km (Fig. 4).

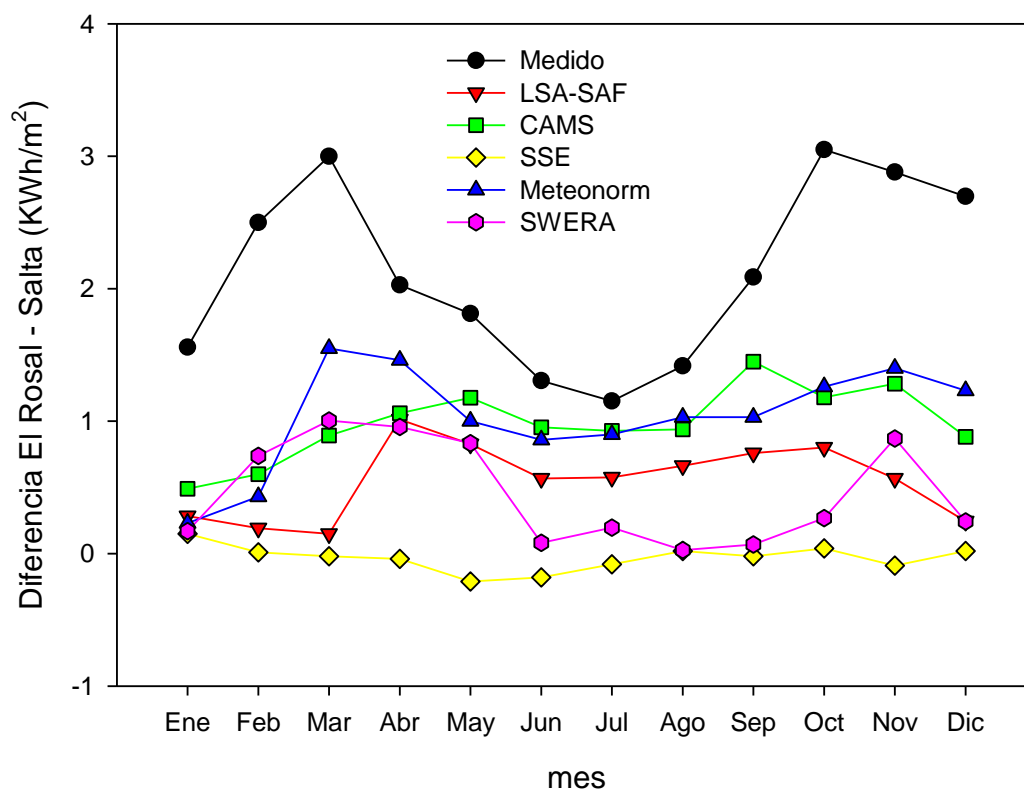


Figura 4 - Diferencia de los valores medidos y de BDS diarios medios mensuales de GHI entre El Rosal y Salta.

Resulta muy interesante observar que sucede cuando se comparan los valores de las demás BDS. Meteonorm y CAMS son las que presentan las mayores diferencias al integrar anualmente los valores medios mensuales: 12.38 kWh/m<sup>2</sup> y 11.83 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente. Las diferencias de LSA-SAF (6.64 kWh/m<sup>2</sup>) son similares a las de SWERA (5.46 kWh/m<sup>2</sup>). Solo SSE da como resultado un valor negativo (-0.40 kWh/m<sup>2</sup>). Esto último puede deberse al tamaño de su celda. Se debe analizar estas diferencias, ya que brindaran información sobre cómo cada BDS analiza datos en sitios de altura.

También debe notarse que CAMS cubre todo el territorio brasileño pero solo una muy pequeña porción de la región norte de Argentina, mientras que LSA-SAF abarca hasta la mitad de la Argentina continental.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se comparan los valores diarios medios mensuales de GHI medidos en dos sitios de altura en el noroeste de Argentina (Salta y El Rosal) y en un sitio del Nordeste de Brasil (Petrolina). Se comparan los valores diarios medios mensuales interanuales contra estimaciones de 5 BDS: LSA-SAF, CAMS, SSE-NASA, Meteonorm y SWERA.

Para Salta el mejor modelo resulta ser CAMS (RMSE% = 6.8%) y el peor es SSE-NASA (RMSE% = 14.8%). Para El Rosal el mejor modelo es Meteonorm (RMSE%= 14.3%), con CAMS muy próximo (RMSE%= 14.9%), y el peor es SSE-NASA (RMSE%=24.1%). Para Petrolina el mejor modelo es CAMS (RMSE%=1.9%) y el peor es Meteonorm (RMSE%=9.0%).

LSA-SAF ha mostrado un grado de correlación muy satisfactorio respecto de los estadísticos de CAMS, aunque deben analizarse sus estimados para sitios de altura.



## REFERENCIAS

- Duffie J. y Beckman W., 2013. Solar Engineering of Thermal Processes. 4ª Edición. Wiley.
- Gueymard C.A., 2014. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renew Sustain Energy Rev*; 39: 124–34. doi:10.1016/j.rser.2014.07.117.
- Hu G., Jia L., Menenti M. (2015) Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011, *Remote Sensing of Environment*, Volume 156, Pages 510-526, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.017>.
- Huld T., Müller R., Gambardella A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Sol Energy*;86(6):1803–15. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>.
- Justus C., Paris M., Tarpley J.D., 1986. Satellite-measured insolation in the United States, Mexico and South America. *Remote Sensing of Environment* vol. 20, pp. 57-83.
- Noia M., Ratto C.F., Festa R., 1993a. Solar Irradiance estimation from geostationary satellite data:I. Statistical models. *Solar Energy* vol 51, pp 449-456.
- Noia M., Ratto C.F., Festa R., 1993b. Solar Irradiance estimation from geostationary satellite data:II. Physical models. *Solar Energy* vol 51, pp 457-465.
- Petribú L.B., Sabino E, Barros H, Costa A.C., Barbosa E, Vilela O.C., 2017. Procedimiento objetivo para a garantia de qualidade de dados de radiação solar. Apresentado em: XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), San Juan, Argentina.
- Salazar G., Gueymard C., Bezerra Galdino J., Vilela O., Fraidenraich N., 2020. Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.10947>
- Sepulcre-Canto G., Vogt J., Arboleda A., Antofie T., 2014. Assessment of the EUMETSAT LSA-SAF evapotranspiration product for drought monitoring in Europe, *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, Volume 30, Pages 190-202, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.021>.
- Tarpley J.D., 1979. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J. Appl. Meteorol.* Vol18, pp 1172-1188.
- Zelenka A., Perez R., Seals R., Renne D., 1999. Effective accuracy of satellite derived hourly irradiance. *Theoretical and Applied Climatology* vol 62, pp 199-207.
- Website de PVGIS: [ec.europa.eu/jrc/en/pvgis](http://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis)
- Website de LSA-SAF: <https://landsaf.ipma.pt/en/>
- Website de CAMS: <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>
- Website de SSE-NASA: <https://power.larc.nasa.gov/>
- Website de Meteonorm: <https://meteonorm.com/en/>
- Website de SWERA: <https://s3.amazonaws.com/openai-public/swera.zip>
- Website del Atlas Brasileño da Radiação: [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017-en.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017-en.html)
- Website de SONDA: <http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/petrolina.html>
- Website de BSRN: <https://bsrn.awi.de/>
- Website de Koppen –Geiger: <http://koepfen-geiger.vu-wien.ac.at/>

## STUDY OF DAYLY VALUES, MONTHLY AVERAGE GHI MEASUREMENTS IN ARGENTINA AND BRAZIL. COMPARISON AGAINST SATELLITE DATABASES

**Summary:** *The analysis of satellite database estimates (BDS) is important for studies of solar resource characterization in large regions. These estimates present errors when compared against data measured on the surface and it is important to analyze these correlations. In this work, the average annual interannual daily values of GHI measured in Salta (Argentina), El Rosal (Argentina) and Petrolina (Brazil) are compared against estimates of five BDS: LSA-SAF, CAMS, SWERA, Meteonorm and SSE-NASA. Argentine sites are High sites. It is found that CAMS offers better results than the other BDS. The*

*behavior of LSA-SAF for height sites and station data of the SONDA-INPE network in Brazil will continue to be analyzed in future works.*

**Keywords:** *Solar radiation, Horizontal plane, Satellite Databases.*