

## **COMPARACIÓN DE VALORES DE IRRADIANCIA GLOBAL MEDIDA EN SITIOS DE ALTURA EN ARGENTINA CONTRA BASES DE DATOS SATELITALES.**

**Germán Salazar<sup>1</sup>, Christian Gueymard<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>UNSa-INENCO-CONICET- Avda Bolivia 5150-A4408FVY – Salta – Salta - Argentina

<sup>2</sup>Solar Consulting Services-P.O. Box 392-Colebrook, NH 03576, Estados Unidos.

e-mail: germansalazar.ar@gmail.com

*Recibido 15/08/19, aceptado 17/10/19*

**RESUMEN:** La parte occidental de la provincia argentina de Salta cubre una de las regiones con mayor disponibilidad de recursos solares en todo el mundo, gracias en parte a su altitud y poca nubosidad. Muchos proyectos de energía solar a gran escala se están desarrollando en esa región, a pesar de que la irradiancia solar no se mide sistemáticamente en todos los sitios de interés. En este trabajo, se analiza la calidad de los datos de irradiancia horizontal global (GHI) de 1 minuto medidos durante 3–4 años en dos sitios de gran altitud en la provincia de Salta. Se aplican técnicas de filtrado de control de calidad sólidas a los datos sin procesar. También se sigue un método avanzado para obtener medios significativos por hora, día y mes a pesar de la presencia de lagunas de datos. El conjunto de datos de observación válido se utiliza para validar varias bases de datos modeladas en varias escalas temporales. Se espera que los resultados actuales disminuyan la incertidumbre de las estimaciones en la región y, por lo tanto, mejoren la bancabilidad de los proyectos solares.

**Palabras clave:** GHI, control de calidad, Argentina.

### **INTRODUCCIÓN**

Los recursos eólicos y solares son las fuentes renovables de energía más utilizadas en todo el mundo. Como en muchos otros países, el interés por desarrollar tales proyectos está creciendo rápidamente en Argentina. Su recurso solar varía enormemente en todo el país, debido a su geografía alargada, topografía compleja y múltiples zonas climáticas. Dado que el clima es un factor importante al decidir la instalación de una planta de energía solar, es importante confiar en una buena evaluación del recurso solar de todas las regiones de Argentina en función de su clima específico.

El conocimiento inexacto de la variabilidad espacio-temporales del recurso solar puede traducirse en dificultades de bancabilidad o pérdidas financieras irreparables durante la vida útil de una planta de energía solar. Desafortunadamente, Argentina, al igual que la mayoría de los otros países del mundo, no tiene una red nacional de estaciones meteorológicas que cumpla con los estándares ISO-9060, ni una base de datos de radiación medida que pueda proporcionar datos estadísticamente representativos de irradiancia solar durante largos períodos.

Los modelos de bases de datos satelitales (BDS) suelen usar imágenes satelitales geo-sincrónicas que cubren grandes regiones y pueden grabarse metódicamente durante largos períodos de tiempo. Los modelos radiativos especializados aprovechan estos datos para derivar series de tiempo largas de irradiancia horizontal global (GHI) e irradiancia normal directa (DNI) con resoluciones espaciales de 1–10 km y resoluciones temporales de 15–60 min, normalmente con precisión razonable.

Una dificultad importante es que la mayoría de los BDS no cubren América del Sur en absoluto, o solo una pequeña parte de ella. Por ejemplo, el límite sur del dominio NSRDB de NREL es  $-21^\circ$ . Por debajo de esa latitud, los únicos conjuntos de datos SDB de dominio público que se pueden obtener son mensualmente, por ejemplo, de NASA-SSE o UNEP-SWERA. Otra fuente de datos útiles de irradiancia es proporcionada por reanálisis de modelos numéricos de predicción del clima. Dichas bases de datos de reanálisis (BDR) proporcionan series temporales más largas y cubren un dominio geográfico más grande que los BDS, pero con una resolución espacio-temporal menor (por ejemplo, datos por hora en una cuadrícula de 30-60 km).

Para validar los modelos de las BDS o BDR y evaluar su incertidumbre real, las observaciones de irradiancia de superficie de alta calidad son de crucial importancia, particularmente en regiones de topografía compleja o microclimas (Sengupta et al., 2017).

El objetivo de este trabajo es mejorar la calidad general de las bases de datos de irradiancia medidas para que puedan usarse para evaluar el acuerdo en varias escalas de tiempo entre las mediciones de GHI y las estimaciones de BDS o BDR en la región de Salta. En ese proceso, se evaluaron varias bases de datos de dominio público disponibles que ofrecen una resolución temporal de hora a mes debido a su importancia en las evaluaciones de los recursos solares.

## **RECURSO SOLAR DE LA REGIÓN EN ESTUDIO.**

La parte occidental de la provincia de Salta está incluida en el "punto caliente" solar (Salazar et al, 2015) de América del Sur (Fig. 1). Que esta región reciba mucha radiación solar ha sido un hecho conocido popularmente por generaciones, pero el estudio formal de su recurso solar solo ha comenzado durante las últimas tres décadas.

El reciente interés del gobierno argentino en alentar la instalación de parques solares fotovoltaicos (300 MW cada uno) a través del programa RenovAR (<https://www.argentina.gob.ar/renovar>) ha motivado la necesidad de contar con datos confiables de radiación solar en aquellas áreas que presentan un buen potencial, especialmente en la región noroeste de Salta. En ausencia de una densa red de estaciones radiométricas, los desarrolladores solares deben confiar en datos modelados para estimar el recurso solar y con ellos preparar el diseño de sus proyectos, realizar simulaciones de energía y evaluar análisis de rendimiento / costos.

La Figura 1 muestra un mapa derivado del modelo de GHI anual para la provincia de Salta. Se aprecia un fuerte gradiente este-oeste, de  $\approx 1800 \text{ kWh/m}^2$  en el este a  $\approx 2700 \text{ kWh/m}^2$  en el oeste. El mapa ha sido desarrollado por el proyecto ESMAP del Grupo del Banco Mundial (<https://globalsolaratlas.info/>) y es de dominio público, pero solo proporciona valores medios anuales.

## **MEDICIONES Y CONTROL DE CALIDAD DE DATOS.**

Los datos medidos analizados en este trabajo provienen de dos sitios: Salta (Lat.  $-24.7^\circ$ , Long.  $-65.4^\circ$ , 1200 msnm) y El Rosal (Lat.  $-24.4^\circ$ , Long.  $-65.7^\circ$ , 3355 msnm). Estos están marcados con un cuadrado azul y blanco, respectivamente, en la Fig. 1. Para las mediciones de GHI, la estación de Salta está equipada con un piranómetro Eppley PSP, mientras que El Rosal tiene un K&Z CMP3. Ambos instrumentos están calibrados contra un K&Z CM21, que a su vez está calibrado contra los instrumentos estándar argentinos, trazables a WRR. La incertidumbre resultante en la medición de la GHI se estima en 4-5%. Los dataloggers utilizados en ambas estaciones son Campbell Scientifics CR-1000.

Las mediciones de GHI de Salta se han utilizado previamente, pero sin ningún procedimiento formal de Control de Calidad (CC), para evaluar las predicciones de la media mensual de las bases de datos SWERA y NASA-SSE (Salazar et al., 2015). Los resultados sugirieron que estas bases de datos sobreestimaron GHI en una cantidad significativa. Para evitar el mayor sesgo experimental posible, ahora se aplica una corrección a las observaciones de GHI para compensar el desplazamiento térmico de los piranómetros, ya que constituye un error sistemático que ahora está bien documentado

(Gueymard y Myers, 2009). También se aplica un procedimiento de CC, siguiendo los protocolos de tipo BSRN (Long y Shi, 2008; Ameen et al., 2018). Además, se realiza un análisis estadístico detallado para eliminar el impacto de las rupturas de datos en las estadísticas por hora, día y mes, siguiendo las mejores prácticas (Roesch et al., 2011).

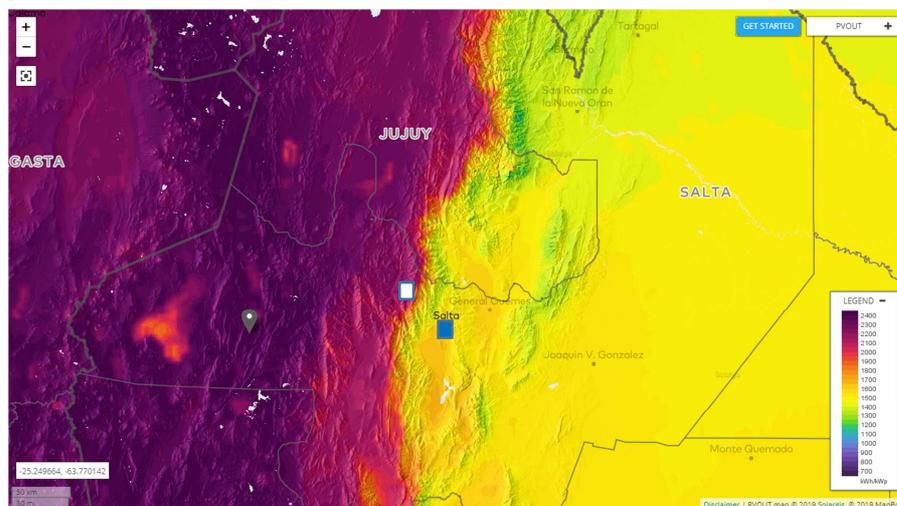


Figura 1: Distribución espacial anual de GHI para el noroeste de Argentina (Grupo del Banco Mundial-ESMAP). Se indica la frontera de la provincia de Salta. La ubicación de las dos estaciones en estudio se indica mediante cuadrados.

Para el presente estudio, se analiza una base de datos medida de tres años para la ciudad de Salta (2013-2015), así como datos que abarcan cuatro años (2013-2016) del sitio de mayor altitud de El Rosal.

Dado que no se disponen de valores medidos de DNI en ninguno de los sitios, los filtros utilizados fueron solo los de valores físicamente posibles, valores de salida y puesta de Sol, y valores de día de cielo claro. Se utilizó el método de las 4 cajas de 15 minutos de Roesch et al (2011) para el cálculo de los valores horarios, centrando el cálculo en cada hora hh:00.

### COMPARACIÓN CON LAS ESTIMACIONES DEL MODELO.

Las bases de datos modeladas analizadas son de dominio público y ofrecen una bibliografía que respalda sus estimaciones y describe sus modelos. Las mediciones de GHI controladas por la calidad (descritas anteriormente) se comparan con las estimaciones de varias bases de datos: UNEP-SWERA (<https://s3.amazonaws.com/openei-public/swera.zip>) , NASA-SSE (<https://power.larc.nasa.gov/>) , Meteonorm (<https://meteonorm.com/en/>) , ECMWF-CAMS (<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>) y NASA-MERRA2 (<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>) . La Tabla 1 compara la media anual de GHI extraída de estas bases de datos con los datos medidos para las dos estaciones, Salta y El Rosal. Sorprendentemente, todas las bases de datos modeladas tienden a sobreestimar GHI en Salta y subestimar en El Rosal

Estación	Medida	CAMS	MERRA2	SSE	Meteonorm	SWERA	ESMAP	
Salta	(kWh/m <sup>2</sup> )	4.75	4.99	6.67	5.37	5.01	5	5.1
	(% dif.)	—	<b>5.1</b>	40.5	13.1	5.7	5.3	7.5
El Rosal	(kWh/m <sup>2</sup> )	6.87	5.97	6.67	5.33	6.05	5.45	6.4
	(% dif.)	—	-13.1	<b>-3.0</b>	-22.4	-12.0	-20.6	-6.8

Tabla 1: Comparación de la media anual medida de GHI en Salta y El Rosal con resultados modelados de varias bases de datos. GHI se expresa como kWh/m<sup>2</sup> por día. La diferencia relativa porcentual (% dif.) se indica en comparación con el valor medido. Las diferencias más bajas aparecen en negrita.

Algunas de las discrepancias exceden  $\pm 20\%$ , lo cual es sustancial y puede afectar negativamente los proyectos solares. Una causa probable es la topografía compleja con cambios rápidos en la elevación, combinada con el gran tamaño de celda de la mayoría de las bases de datos. Las Figuras 2 y 3 muestran la variación mensual de GHI en los dos sitios. Solo se encuentra un acuerdo limitado entre las diferentes evaluaciones mensuales.

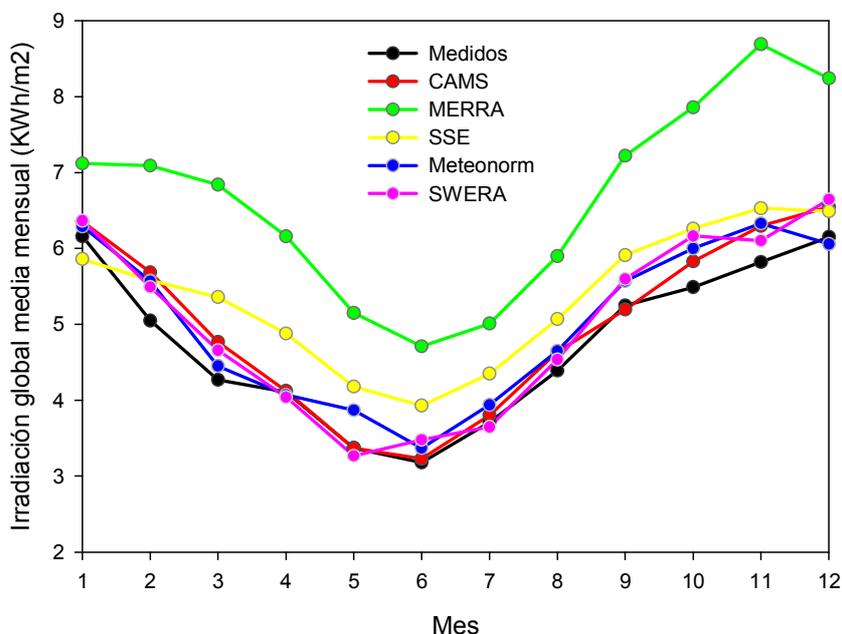


Figura 2: Mediciones de GHI media mensual en comparación con varias BDS para Salta Capital.

Para los datos de la ciudad de Salta, los resultados de los estimados de GHI pueden clasificarse de “mejores” a “peores” de la siguiente manera:

- 1) CAMS (5.1% de diferencia)
- 2) SWERA (5.3% de diferencia)
- 3) Meteornorm (5.7% de diferencia)
- 4) ESMAP (7.5% de diferencia)
- 5) SSE (13.1% de diferencia)
- 6) MERRA2 (40.5% de diferencia)

Para los datos de la ciudad de El Rosal, los resultados de los estimados de GHI se acomodan de la siguiente manera:

- 1) MERRA2 (-3% de diferencia)
- 2) ESMAP (-6.8% de diferencia)
- 3) Meteornorm (-12% de diferencia)
- 4) CAMS (-13.1% de diferencia)
- 5) SWERA (-20.6% de diferencia)
- 6) SSE (-22.4% de diferencia)

Es evidente que no existe una concordancia entre los valores de diferencia para los sitios Salta y El Rosal. La capacidad de estimar la GHI para el sitio de altura parece exceder los modelos utilizados por cada BDS. Deberá analizarse con detalle la influencia del tamaño de la celda satelital, la orografía y la altitud.

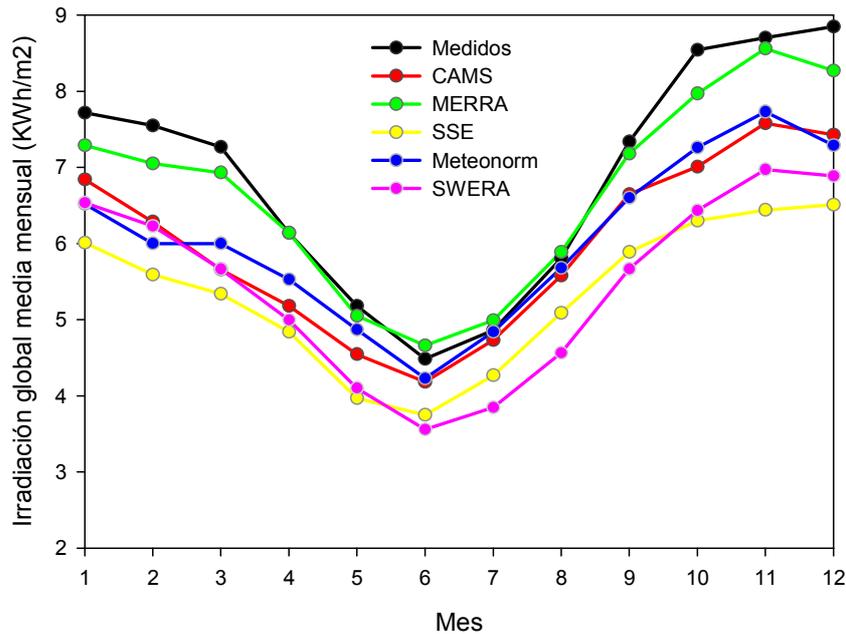


Figura 3: Mediciones de GHI media mensual en comparación con varias BDS para El Rosal.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han obtenido valores de GHI diarios medios mensuales interanuales para dos sitios de altura en la provincia de Salta: Salta Capital (1200 msnm) y El Rosal (3350 msnm), utilizando filtros de control de calidad y a partir de datos medidos con una frecuencia de 1 minuto.

Se han comparado los valores diarios medios mensuales interanuales de 5 bases de datos satelitales disponibles en internet.

Para el caso de Salta, los valores estimados están en exceso respecto de los valores medidos, mientras que para El Rosal están siempre en defecto. Para Salta la mejor estimación es de CAMS, con un 5.1% de diferencia porcentual. La BDS con la mayor diferencia (40.5%) es MERRA2.

Para El Rosal la mejor estimación (-3%) es de MERRA2. SSE tiene la diferencia porcentual más grande, con -22.4%.

Deberá estudiarse con mayor detalle las posibles relaciones entre los valores medidos y estimados y las causas que originan esas diferencias, aunque el tamaño de celda, la altitud y la orografía aparecen como las más probables causas de ellas.

## REFERENCIAS

Ameen B., Balzter H., Jarvis C. (2018). Quality control of global horizontal irradiance estimates through BSRN, TOACs and air temperature/sunshine duration test procedures. *Climate* 6, 69.

Gueymard C. A. y Myers D. R. (2009). Evaluation of conventional and high-performance routine solar radiation measurements for improved solar resource, climatological trends, and radiative modelling. *Solar Energy* 83, 171-185.

Long C. N. y Shi Y. (2008). An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *The Open Atmospheric Science Journal* 2, 23-37.

Roesch A., Wild M., Ohmura A., Dutton E. G., Long C. N., Zhang T. (2011). Assessment of BSRN radiation records for the computation of monthly means. *Atmos. Meas. Tech.* 4, 339-354.

Salazar G., Checura Diaz M., Denegri M., Tiba C. (2015) Identification of potential areas to achieve stable energy production using the SWERA database: A case study of northern Chile. *Renewable Energy* 77, 208-216.

Sengupta M., Habte A., Gueymard C., Wilbert S., Renne D., Stoffel T. (2017) Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications: Second Edition. NREL/TP-5D00-68886, National Renewable Energy Lab.

## **QUALITY CONTROL OF GLOBAL IRRADIANCE MEASURED AT HIGH-ALTITUDE SITES IN ARGENTINA FOR THE VALIDATION OF MODELED SOLAR RESOURCE ESTIMATES.**

### **ABSTRACT**

The western part of the Argentine province of Salta covers one of the regions with the greatest availability of solar resource worldwide, thanks in part to its generally high elevation and low cloudiness. Many large-scale solar energy projects are being developed in that region, even though solar irradiance is not systematically measured at all sites of interest. In this work, the quality of 1-min global horizontal irradiance (GHI) data measured over 3–4 years at two high-altitude sites in the province of Salta is analyzed. Robust quality-control filtering techniques are applied to the raw data, with further corrections to compensate for the thermal offset of pyranometers. An advanced method is also followed to obtain meaningful hourly, daily, and monthly means despite the presence of data gaps. The valid observational dataset is then used to validate various modeled databases at various temporal scales. The present results are expected to lower the uncertainty of solar resource estimates over the region, and thus improve the bankability of solar projects.

**Keywords:** GHI, quality control, Argentina.