

# AVANCES EN LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES GOES-16

R. Ledesma<sup>1</sup>, G. Salazar<sup>1</sup>, O. Vilela<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Departamento de Energía Nuclear, Centro de Tecnología, Universidad Federal de Pernambuco

E-mail: rdledesma@exa.unsa.edu.ar

**RESUMEN:** La estimación de la irradiancia solar a través de imágenes satelitales es una forma eficiente de conocer la radiación solar en grandes áreas geográficas, ya que los satélites pueden capturar datos regularmente a intervalos predeterminados durante largos periodos, constituyendo una base de información extensa en el tiempo y el espacio a los fines del monitoreo climático. En este trabajo se presentan los primeros resultados sobre la estimación de la irradiancia solar en las provincias de Salta y Jujuy utilizando imágenes del satélite GOES-16. Se evalúan dos modelos simples basados en un índice de nubosidad aplicados sobre imágenes del satélite GOES-16 para estimar la irradiación solar en 3 sitios ubicados en las provincias de Salta y Jujuy.

**Palabras clave:** energía solar, GOES 16, SUNY, cano

## INTRODUCCIÓN

La posibilidad de generar electricidad a escala industrial utilizando fuentes de energía renovables parece una opción importante para mitigar la contaminación y la inyección de gases de efecto invernadero en la atmósfera y limitar las consecuencias del cambio climático (IPCC, 2022). Centrándonos en la energía solar, y más concretamente en la conversión fotovoltaica (FV), la producción de energía eléctrica generada por plantas solares esta directamente relacionada a la magnitud del recurso solar disponible, y se ve directamente afectada por sus características espacio-temporales, como la variabilidad en diversas escalas temporales. Es necesario un análisis económico detallado para decidir si un proyecto de gran central eléctrica es viable desde el punto de vista financiero en un emplazamiento concreto. Entonces, obtener una base de datos estadísticamente representativa del recurso solar (en este caso en términos de irradiancia horizontal global, GHI) es esencial para preparar el diseño, dimensionamiento y simulación de generación de energía para poder evaluar su financiabilidad (Vignola et al., 2012). Disponer de información sobre los recursos a partir de modelos de radiación (empíricos o físicos) o de bases de datos que utilicen, por ejemplo, observaciones por satélite, es necesario para realizar análisis de prefactibilidad y preparar un buen diseño del sistema (Huld et al., 2012; Ayompe y Duffy, 2014; Drews et al., 2008; Salazar et al., 2017). Esto se debe a que rara vez se dispone de mediciones de alta calidad en el lugar de interés, a pesar de que son insustituibles para reducir las incertidumbres y realizar estimaciones fiables del nivel de riesgo económico (Sengupta et al., 2021). En el mejor de los casos, estas observaciones de calidad local sólo están disponibles durante periodos cortos, que pueden utilizarse para realizar una “adaptación al lugar” de los datos modelizados a largo plazo (Polo et al., 2016). Este procedimiento reduce la incertidumbre de los datos modelizados de los recursos, que de otro modo no se considerarían financiables. Debe resaltarse que este conocimiento adquirido a través de las imágenes satelitales no solo es útil para la

generación de energía FV, sino que también para otras ramas, como la agricultura (Cao et al., 2022) y el monitoreo ambiental (Volante et al., 2012). En la República Argentina la falta de estaciones radiométricas con mediciones sistemáticas, protocolizadas y con tiempos significativos de funcionamiento hizo que el desarrollo de modelos satelitales autóctonos fuera complicado. Sin embargo, existen en el Noroeste Argentino (NOA) estaciones con largo tiempo de medición y con protocolos de mantenimiento (Salazar et al., 2021) y se han comenzado a analizar los datos provenientes de las estaciones INTA ENARSOL (Moltoni et al., 2016). Sin embargo, el desarrollo de modelos exige primero conocer los existentes, iniciando este estudio por los más sencillos. Entre estos se encuentran SUNY (Perez et al., 2002b) y el denominado modelo de (Cano et al., 1986). Así, en este trabajo se analizan los resultados preliminares al aplicar estos modelos a datos satelitales obtenidos usando imágenes GOES 16 del canal 2, correspondientes a la región espectral entre 400 y 700 nm, es decir el canal visible (visible por el ojo humano medio), y comparando las estimaciones de los mismos contra valores medidos de GHI en esos sitios.

El objetivo de este trabajo es evaluar dos modelos simples basados en el índice de nubosidad aplicados sobre imágenes del Satélite Geostacionario Operacional Ambiental (GOES por sus siglas en inglés), en su versión 16, (GOES-16) para estimar la irradiación solar en dos sitios ubicados en la provincia de Jujuy y un sitio ubicado en la provincia de Salta.

*Tabla 1: Sitios de estudio.*

<b>Estación</b>	<b>Provincia</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Altitud (metros s.n.m)</b>
AP	Jujuy	-22.80205	-65.82436	3459
CE	Salta	-24.89438	65.47105	1235
YU	Jujuy	-23.58447	-64.5066	401

En la Tabla 1 se describen los datos de cada uno de los sitios de estudio. Valores negativos de latitud y longitud representan el sur desde el ecuador y este desde el meridiano de Greenwich respectivamente. La estación AP se encuentra en la ciudad de Abra Pampa.

Las estaciones AP y YU se encuentran situadas en la provincia de Jujuy, en las ciudades de Abra Pampa y Yuto correspondientemente, la estación CE se encuentra ubicada en la ciudad de Cerrillos de la provincia de Salta. Las tres estaciones pertenecen a la red del Sistema Argentino de Evaluación de Energía Solar (ENARSOL) (Moltoni et al., 2016), que se encuentra a cargo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) <https://www.argentina.gob.ar/inta>.

La red ENARSOL es un proyecto creado para medir la radiación solar en diferentes regiones de Argentina. Fue lanzado en 2015 por un consorcio público-privado conformado por el INTA, la Universidad Nacional de Luján (UNLu) y Y-TEC. El proyecto fue financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC). El objetivo principal de este proyecto era instalar 32 estaciones de medición de radiación solar en distintas regiones climáticas del país, con el fin de evaluar el recurso solar disponible en cada una de ellas.

#### ***Fuentes de datos en tierra***

Para este trabajo se dispusieron de valores medidos de irradiancia solar global (GHI por sus siglas en inglés) medidas cada un minuto mediante un piranómetro CMP11 correspondiente a una estación completa de monitorización solar SOLYS-2. Las mediciones contemplan los periodos correspondientes a los años 2018 para YU y 2019 para AP y CE. Ambas estaciones son operadas y mantenidas por el INTA.

Los datos minutales fueron sometidos al control de calidad (QC) para la GHI propuesto por (Nollas et al., 2023), donde se aplican tres filtros determinados empíricamente. Además se filtraron las muestras cuyo

correspondiente valor de altura solar es menor a  $7^\circ$ . Además los valores que pasaron el proceso de control de calidad fueron integrados en periodos de una hora siguiendo un procedimiento explicado (Salazar et al., 2020) donde se trabajó sobre la integración temporal de serie de datos. En este proceso los promedios horarios se tomaron solo en las horas donde se disponían al menos quince muestras luego del proceso de filtrado.

Tabla 2: Descripción de los Filtros del QC

Filtro	Descripción
F1	$GHI < 1.5SE1361.7(\cos(SZA))^{1.2} + 100W/m^2$
F2	$GHI > (6.5331 - 0.065502SZA + 1.8312E - 4SZA^2)/(1 + 0.01113SZA)$
F3	$kt < 1.4 \ \& \ \alpha < 7^\circ$

La Tabla 2 describe los filtros utilizados en donde  $S$  es el factor de corrección de la distancia Tierra-Sol,  $E$  es la constante solar,  $kt$  es el índice de claridad adimensionado y  $\alpha$  es la altura solar expresada en grados.

Tabla 3: Resultados del QC

Estación	Valores Diurnos	F1	F2	F3
AP	229342	229342	224086	209230
CE	202261	202261	192137	182771
YU	153016	153016	147871	138660

La Tabla 3 muestra el resultado de aplicar los filtros. Las columnas indican la cantidad de datos que han pasado cada criterio de filtrado, contando con un 91.23 %, 90.36 % y 90.61 % de los datos que pasan el QC para AP, CE y YU respectivamente.

En la Figura 1 se muestran los gráficos de dispersión de la GHI vs coseno del ángulo cenital (CTZ) de los datos en los cuales se aplicaron los modelos. Puede observarse que el aunque el proceso de QC es minucioso no se muestran valores atípicos sobre la medida.

Luego se realizó la integración horaria de los datos, obteniéndose un total de 3494, 3067 y 2291 valores horarios para AP, CE y YU respectivamente. Las medias las medidas horarias de GHI son de  $501.7W/m^2$ ,  $319.3W/m^2$ , y  $295.2 W/m^2$  para AP, CE y YU respectivamente, indicando la gran variabilidad del recurso solar que existe entre los sitios.

### Información satelital

GOES-16 es un satélite meteorológico de la serie GOES operado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. Su objetivo principal es proporcionar observaciones meteorológicas y climáticas de la Tierra desde una órbita geostacionaria, lo que significa que se mantiene en una posición fija sobre una región específica de la Tierra, lo que le permite monitorear continuamente su área de cobertura, abarcado los territorios e América del Norte y del Sur y el Océano Atlántico hasta la costa oeste de África (Losos, 2021).

El producto Cloud and Moisture Imagery (CMI) del satélite GOES-16 consiste en el conjunto de imágenes de nubosidad y humedad capturadas por el instrumento ABI (Advanced Baseline Imager) a bordo del satélite. Estas imágenes proporcionan información sobre la distribución y la intensidad de las nubes y la humedad en la atmósfera. El producto CMI se utiliza para monitorear y analizar las condiciones meteorológicas, especialmente en relación con la formación de tormentas y sistemas climáticos. Estas imágenes son útiles para los meteorólogos y otros profesionales que estudian el clima y el tiempo. El CMI utiliza los datos de la vista de la Tierra del nivel 1b del ABI y los expresa en términos de factor de reflectancia para los canales VNIR (Bandas 1-6) y temperatura de brillo para los canales IR (Bandas 7-16) (W. y Schmit, 2018).

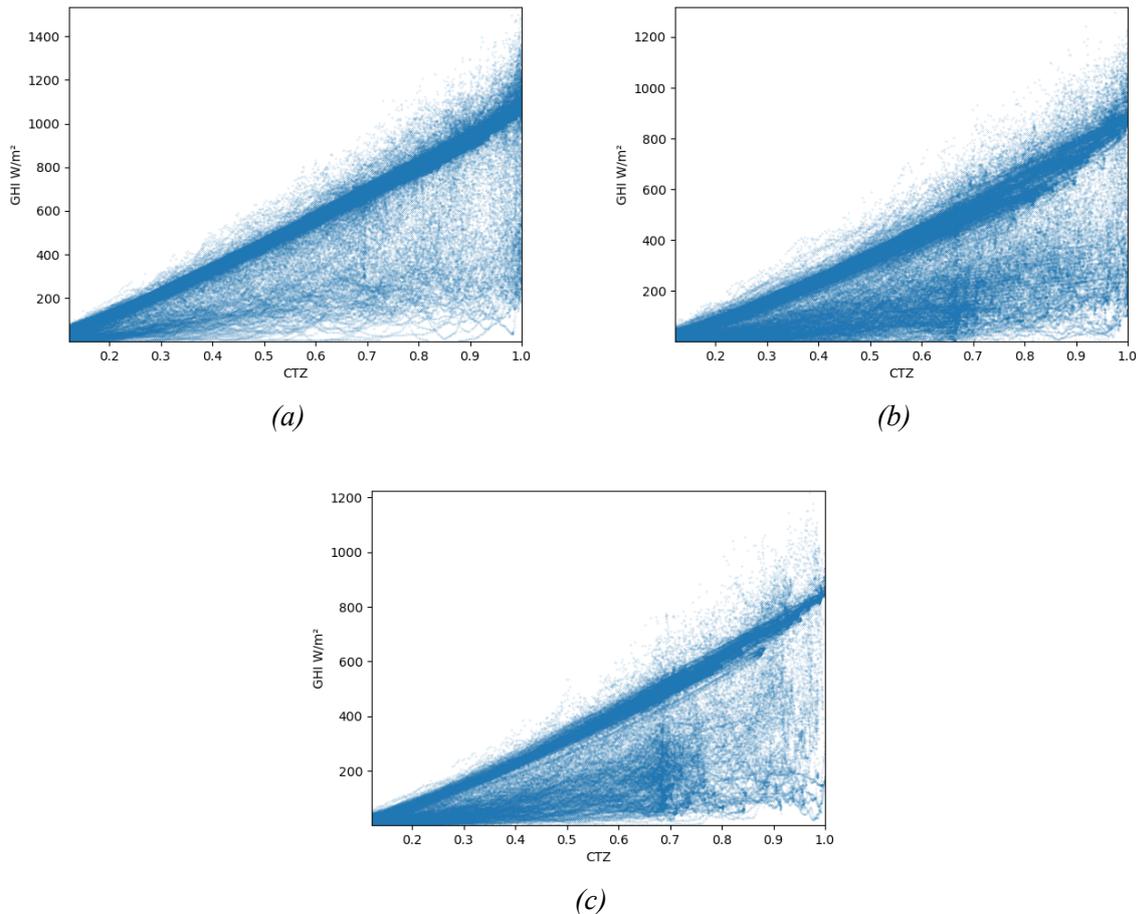


Figura 1: Gráfico de dispersión de las medidas disponibles de GHI en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

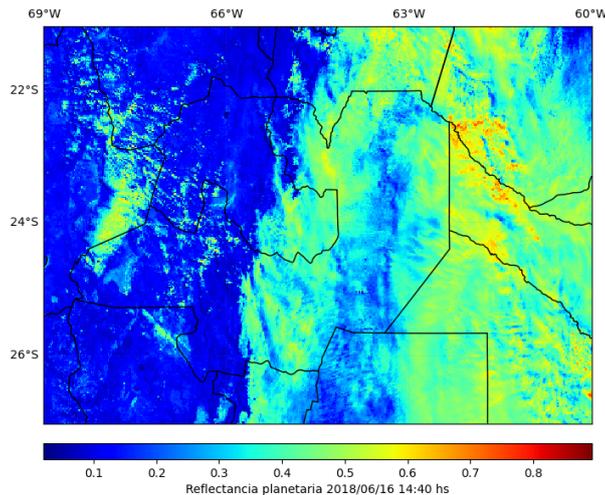
## MODELOS SATELITALES

Básicamente, la idea detrás de un modelo satelital para estimar la cantidad de energía solar que llega a la superficie de la Tierra consiste en convertir una imagen del canal visible en una imagen de la irradiancia solar a nivel del suelo. Esto se logra mediante la conversión de la lectura del canal visible en una indicación de la nubosidad, que a su vez se utiliza para aplicar un modelo y obtener una estimación del valor de la irradiancia. La indicación de nubosidad puede ser desde algo muy sencillo, como el propio factor de reflectancia, hasta definiciones más elaboradas, como los índices de nubosidad (Alonso-Suárez, 2017).

### *Factor de reflectancia y reflectancia planetaria*

El factor de reflectancia es una medida de la cantidad de luz visible reflejada por un objeto en comparación con la luz recibida. En la teledetección, se utiliza para crear firmas espectrales y detectar diferentes clases de vegetación y superficies terrestres. El factor de reflectancia contiene en esencia la misma información física que la radiancia observada por el satélite, pero normalizada y corregida por la variación de la distancia Tierra-Sol (Laguarda, 2021). Esta variable es sensible a la presencia de nubosidad (en la medida que el alto brillo de las nubes se distinga del fondo), pero depende además de la posición relativa del Sol respecto a la Tierra y de la posición relativa entre el satélite y el Sol, dado que el sistema Tierra-Atmósfera no refleja de forma perfectamente isotrópica. Para disminuir la dependencia con la posición aparente del Sol se define la reflectancia planetaria o albedo terrestre  $\rho$ , siendo su valor un indicador de la reflectividad del sistema Tierra-Atmósfera, principalmente afectada por la nubosidad (Alonso-Suárez, 2017).

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de una imagen de reflectancia planetaria. Esta imagen brinda una



*Figura 2: Reflectancia Planetaria*

indicación de la reflectividad de los elementos en la imagen, Los valores cercanos a 0, color azul, indican que la superficie absorbe toda la radiación y no refleja nada, mientras que los valores cercanos a 1, en color rojo, indican que la superficie refleja toda la radiación incidente.

#### ***El modelo de Cano et al.***

El modelo propuesto por Cano es un modelo estadístico que permite calcular la irradiancia solar a nivel de suelo a partir de imágenes satelitales. Este modelo se basa en el cálculo del índice de nubosidad  $\eta$ , que se obtiene a partir de la reflectancia planetaria o albedo terrestre ( $\rho$ ) (Cano et al., 1986).

Este modelo utiliza un conjunto de datos de entrenamiento de datos terrestres para determinar los parámetros del modelo de regresión, que a su vez predicen la radiación global. La idea básica de este método es que la cantidad de cobertura de nubes en una determinada área determina estadísticamente la radiación global para esa área. El procesamiento se divide en dos pasos: primero se deriva un índice de cobertura de nubes o índice de nubosidad para cada ubicación de la imagen satelital original y luego se utiliza en una segunda etapa para una estimación estadística de la radiación global.

En cuanto a los resultados obtenidos, el modelo se probó en dos conjuntos de datos diferentes, uno que cubre Francia en mayo de 1979 y otro que en Europa en abril de 1982. En ambos casos, se compararon los valores estimados y medidos y se calcularon los errores. En el primer conjunto de datos, el coeficiente de correlación entre los valores medidos y estimados fue en la mayoría de los casos mejor que 0.8, y el error cuadrático medio (RMS) osciló entre 14 y 72 J/m<sup>2</sup> (9 a 200 Wh/m<sup>2</sup>) con un valor promedio de 42 J/m<sup>2</sup> (117 Wh/m<sup>2</sup>). En el segundo conjunto de datos, los resultados fueron aún mejores, con RMS de 18, 24 y 23 J/m<sup>2</sup> (50, 67, 64 Wh/m<sup>2</sup>) para los tres períodos de una hora. En general, los resultados sugieren que este modelo estadístico puede ser una herramienta útil para estimar la radiación solar global en áreas donde no se dispone de mediciones directas.

El índice de nubosidad se utiliza para estimar la cantidad de nubes en la imagen satelital, lo cual es importante ya que las nubes reducen la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. A partir de este índice de nubosidad, se aplican distintas correcciones que permiten estimar la irradiancia solar a nivel de suelo con mayor precisión.

El modelo de Cano ha sido muy influyente en la investigación sobre estimación de irradiancia solar a partir de imágenes satelitales y ha inspirado otros modelos posteriores, como los modelos SUNY (Perez et al., 2002a) y Heliosat (Rigollier et al., 2004), que han mejorado aún más la precisión de las estimaciones.

La manera en la que en este modelo se define el índice de nubosidad  $\eta$  es la siguiente:

$$\eta = \frac{\rho - \rho_o}{\rho_c - \rho_o} \quad (1)$$

donde:

$\rho$  = reflectancia planetaria de nivel de píxel.

$\rho_o$  = factor de reflectancia de fondo.

$\rho_c$  = parámetro asociado a la atenuación máxima por nubosidad.

En condiciones de cielo despejado, el valor de  $\eta$  se aproxima a cero, por el contrario, cuando el cielo está completamente cubierto,  $\eta$  se acerca a la unidad.

Para obtener los valores de  $\rho_o$  y  $\rho_c$  en este modelo, se lleva a cabo un proceso iterativo en la serie temporal de  $\rho$  definido por (Moussu et al., 1989), donde se busca encontrar los valores que permitan normalizar la serie de datos de  $\rho$  de la mejor manera.

Para obtener el valor de  $\rho_o$  se eliminan las muestras con albedo superior al promedio del conjunto (j) de manera iterativa, hasta que no quede ninguna muestra descartada, añadiendo un pequeño umbral  $\epsilon$ . El valor de  $\rho_o$  corresponderá con el promedio del último conjunto obtenido. Para obtener el valor de  $\rho_c$  se sigue un procedimiento opuesto al descrito, eliminando de manera iterativa las muestras con albedo inferior al promedio más una tolerancia.

En base a esta definición del índice de nubosidad se propone la definición de la GHI instantánea como,

$$GHI_{Cano} = G_{TOA} \times f(\eta) \quad (2)$$

donde:

$G_{TOA}$  = la irradiancia global extraterrestre en el tope de la atmósfera.

$f(\eta)$  = una relación lineal simple de la forma  $f(\eta) = a\eta + b$ . Los valores de  $a$  y  $b$  deben ser ajustados para cada sitio utilizando medidas de tierra.

### ***El modelo SUNY***

En este modelo  $\eta$  calculado a partir de la reflectancia planetaria (albedo), y se basa en la correlación entre la relación de la irradiancia global en la superficie y la irradiación extraterrestre sobre la atmósfera. SUNY se refiere a "State University of New York", donde se desarrolló originalmente este modelo (Perez et al., 2002a)

En este modelo la definición de  $\eta$  sigue la siguiente forma,

$$\eta_{SUNY} = \frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (3)$$

Para calcular el índice de nubosidad, se utiliza una técnica que implica el uso de una ventana móvil durante varios días. Esto permite llevar un registro del rango dinámico de la serie temporal de albedos y establecer valores para  $\rho_{max}$  y  $\rho_{min}$ .

$$GHI_{SUNY} = G_{csk} \times f(\eta_{SUNY}) \quad (4)$$

donde:

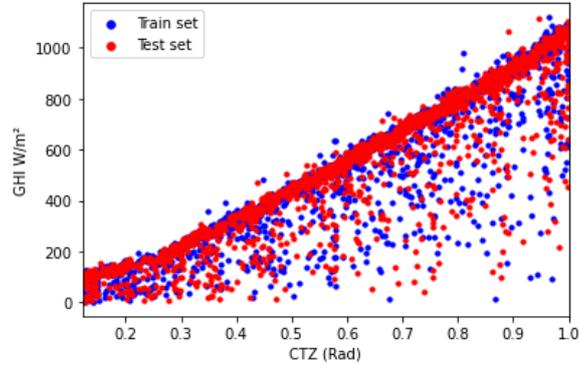
$G_{csk}$  = irradiancia global horizontal en condiciones de cielo claro.

$f(\eta_{SUNY}) = a\eta_{SUNY} + b$ . Los valores de  $a$  y  $b$  deben ser ajustados para cada sitio utilizando medidas de tierra.

## DESARROLLO DE LA EVALUACIÓN

### *División del conjunto de datos*

Para realizar la evaluación del rendimiento de los modelos en base al ajuste de los parámetros  $a$  y  $b$ , los datos se dividen en los conjuntos de entrenamiento (train) y prueba (test), con los que se realiza una validación cruzada.



(a)

Figura 3: Gráfico de dispersión de GHI medida vs CTZ de los conjuntos Train y Test en AP

La Figura 3 muestra la división del conjuntos de los datos en AP. El coeficiente de correlación entre el conjunto train y test es de -0.016, -0.021 y 0.008 para AP, CE y YU respectivamente.

Las métricas utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos frente a las medidas son

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i}{n} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (6)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

donde:

$x$  = Valor medido

$y$  = Valor valor estimado

$n$  = Tamaño de la muestra

$\bar{x}$  = Media de los valores medidos

$\bar{y}$  = Media de los valores estimados

$e$  = es la diferencia entre  $x$  e  $y$

$\bar{e}$  = Media de  $e$

Los indicadores MBE, MAE, RMSD y S también son presentados en términos relativos como porcentaje de la media de la serie medida, denominados aquí MBE %, MAE %, RMSD % y S % respectivamente.

### Modelo satelital Heliosat-4

Heliosat-4 (Qu et al., 2017) es un modelo satelital que estima GHI y DNI para toda condición de cielo obteniendo información de las nubes a través de imágenes Meteosat. Este modelo se toma como referencia en la comparativa puesto que ha sido utilizado en distintas evaluaciones realizadas en la región, aunque no ha sido caracterizado puntualmente en los sitios de estudio de este trabajo (Salazar y Gueymard, 2019; Miranda, 2023).

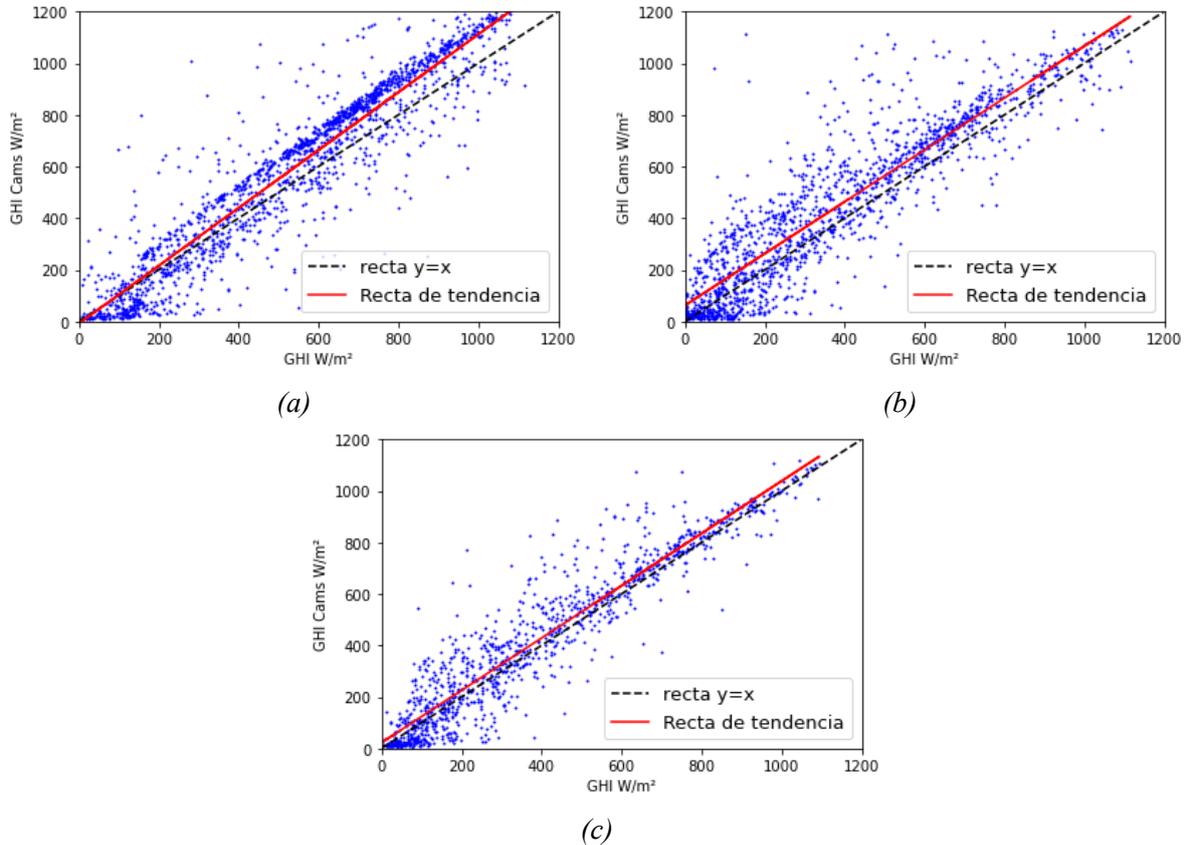


Figura 4: Gráfico de dispersión de GHI medida vs GHI estimada por Heliosat-4 en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

La Figura 4 muestra una comparativa entre los valores horarios medidos y los valores estimados por el modelo Heliosat-4 del conjunto test. En términos cualitativos la estimación presenta grandes limitaciones, existe un sesgo sistemático en donde las estimaciones tienden a ser más altas que los valores medidos, esto aun en condiciones de nubosidad baja como en AP.

Tabla 4: Métricas de desempeño del modelo Heliosat-4

Estación	MBE W/m <sup>2</sup>	MAE W/m <sup>2</sup>	RMSD W/m <sup>2</sup>	S W/m <sup>2</sup>
AP	76.07	119.04	159.35	140.02
CE	63.57	103.82	144.58	129.85
YU	13.33	40.02	77.12	75.96

En la Tabla 4 se muestran los valores de las métricas de desempeño en términos absolutos. Claramente el modelo Heliosat-4 sobrestima la medida. En YU la estimación tienen a ser favorable con MBE de  $\approx 77\text{W/m}^2$ , mientras que en AP y YU la sobrestimación indica un MBE  $\approx 58.8\text{W/m}^2$ .

### Implementación del modelo CANO et al.

En esta implementación la serie temporal  $\eta$  fue obtenida a partir de la Ecuación 1, es decir que se calcularon los valores de  $\rho_o$  y  $\rho_c$  para cada sitio. En la Tabla 5 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 5: Valores  $\rho_o$  y  $\rho_c$  obtenidos

Estación	$\rho_o$	$\rho_c$
AP	12.90	86.99
CE	11.77	93.53
YU	9.55	87.03

Una vez obtenida la serie  $\eta$  para este modelo, los parámetros  $a$  y  $b$  se ajustaron aplicando una regresión lineal.

Tabla 6: Coeficientes  $a$  y  $b$  obtenidos para el modelo Cano et al.

Estación	$a$	$b$
AP	-0.659	0.751
CE	-0.701	0.658
YU	-0.639	0.690

La Tabla 6 muestra los valores  $a$  y  $b$  obtenidos para las tres estaciones. Estos coeficientes fueron obtenidos a partir de una regresión lineal aplicada sobre el conjunto train.

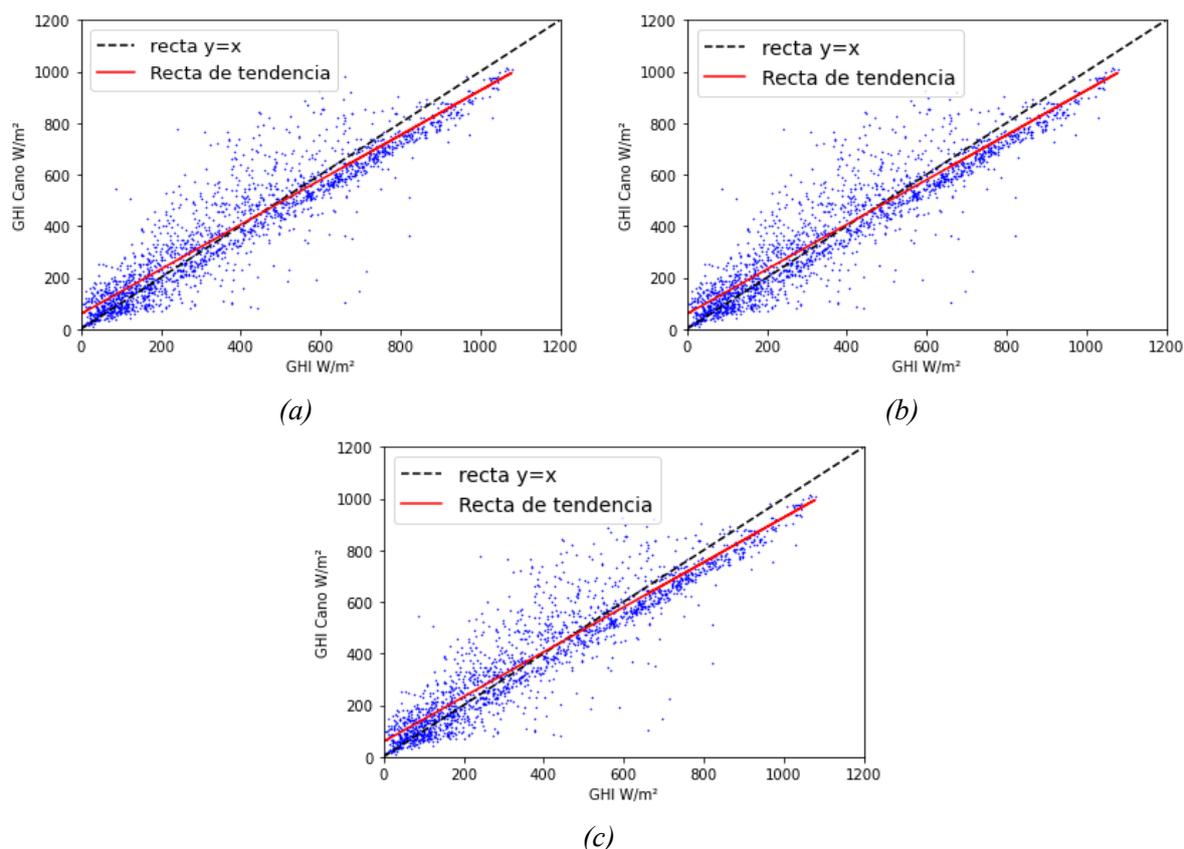


Figura 5: Gráfico de dispersión de la GHI medida vs GHI estimada por el modelo CANO et al. en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

En la Figura 5 se muestran los gráficos de dispersión de los valores estimados por el modelo en función de la medida para el conjunto test. Gráficamente puede apreciarse cómo disminuye la dispersión si se compara los datos obtenidos los del modelo Heliosat-4.

### Implementación del modelo SUNY

La implementación del modelo SUNY requiere la elección de un modelo de estimación de GHI en condiciones de cielo claro ( $GHI_{csk}$ ), en este trabajo se utilizó el modelo  $ARGP_{v2}$ , que es un modelo estadístico basado en los estimativos del modelo Mc-Clear, y que fue desarrollado y evaluado para la región de estudio de este trabajo.  $ARGP_{v2}$  presenta un RMSD  $\simeq 1,857\%$  en escala 15 minutal, en la región (Ledesma et al., 2022).

Para obtener la serie  $\eta$  sobre la que opera el modelo SUNY deben encontrarse los valores de  $\rho_{min}$  y  $\rho_{max}$ , para encontrar  $\rho_{min}$  y  $\rho_{max}$  se utilizó un proceso similar al desarrollado en (Laguarda et al., 2018).  $\rho_{min}$  fue calculado como el promedio de los 20 valores más bajos tomando una ventana móvil de 160 hs. centrada en en la hora de interés. En la Figura 6 puede observarse el comportamiento estacional que presenta  $\rho_{min}$ .  $\rho_{max}$  esta asociado a gran presencia de nubosidad, por lo que se tomó constante, igual al 80% de la reflectancia máxima, se tomó este valor a partir del resultado obtenido por el análisis de sensibilidad realizado en (Laguarda et al., 2018). En la Figura 6 se presentan los valores  $\rho_0$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_{min}$  y  $\rho_{max}$  obtenidos. Puede observarse cómo claramente el sitio AP presenta una mayor cantidad de valores  $\rho$  próximos al mínimo, indicando baja nubosidad, lo que coincide con las características climáticas del sitio, contrario a CE y YU que presentan mayor dispersión.

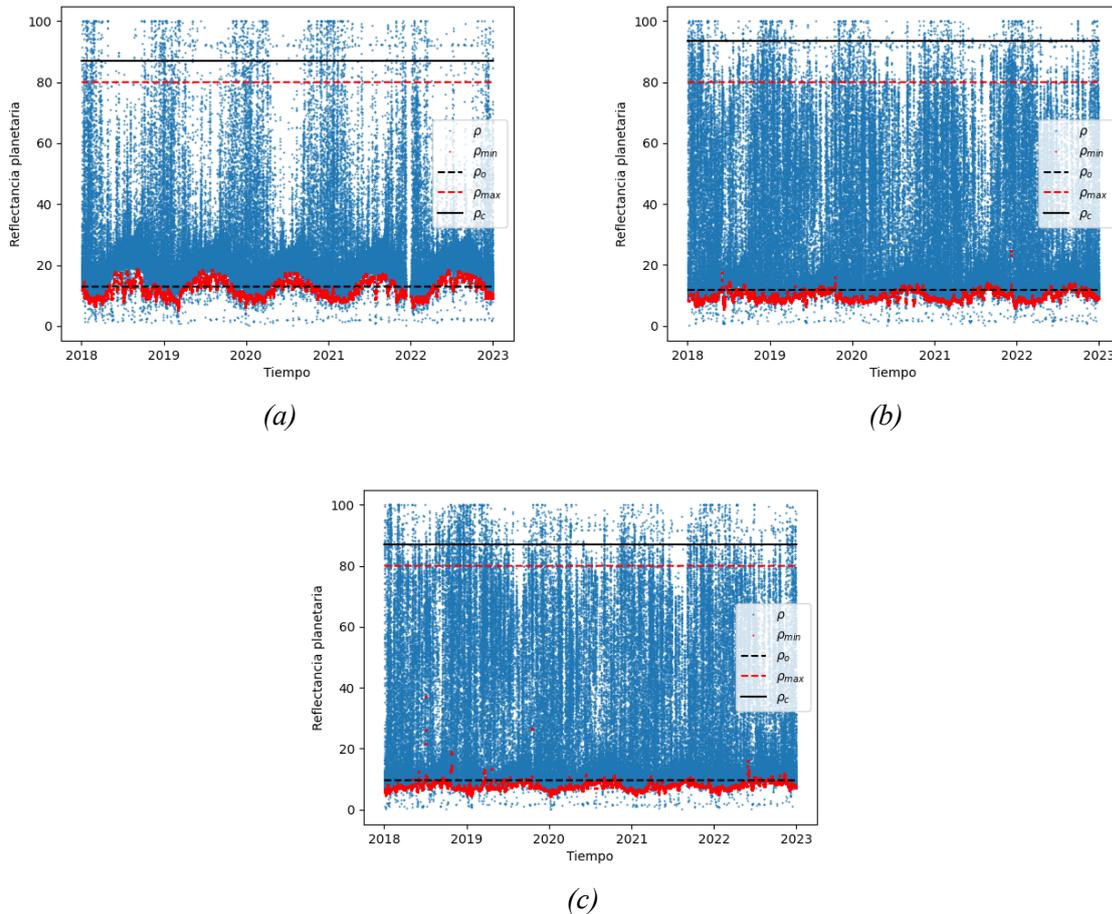


Figura 6: Gráfico de Reflectancia Planetaria en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

Una vez obtenida la serie temporal  $\eta$  mediante una regresión lineal se obtuvieron los coeficientes a y b obtenidos que optimizan el modelo sobre el conjunto train, presentados en la tabla 7.

En la Figura 7 se muestran los gráficos de dispersión de los valores estimados por el modelo en función de la medida para el conjunto test. En términos generales se observa un mejor desempeño del modelo respecto a la estimación de Heliosat-4. Los valores estimados obtenidos presentaron un comportamiento

Tabla 7: Coeficientes  $a$  y  $b$  obtenidos para el modelo SUNY.

Estación	$a$	$b$
AP	-0.649	0.891
CE	-0.801	0.912
YU	-0.871	0.987

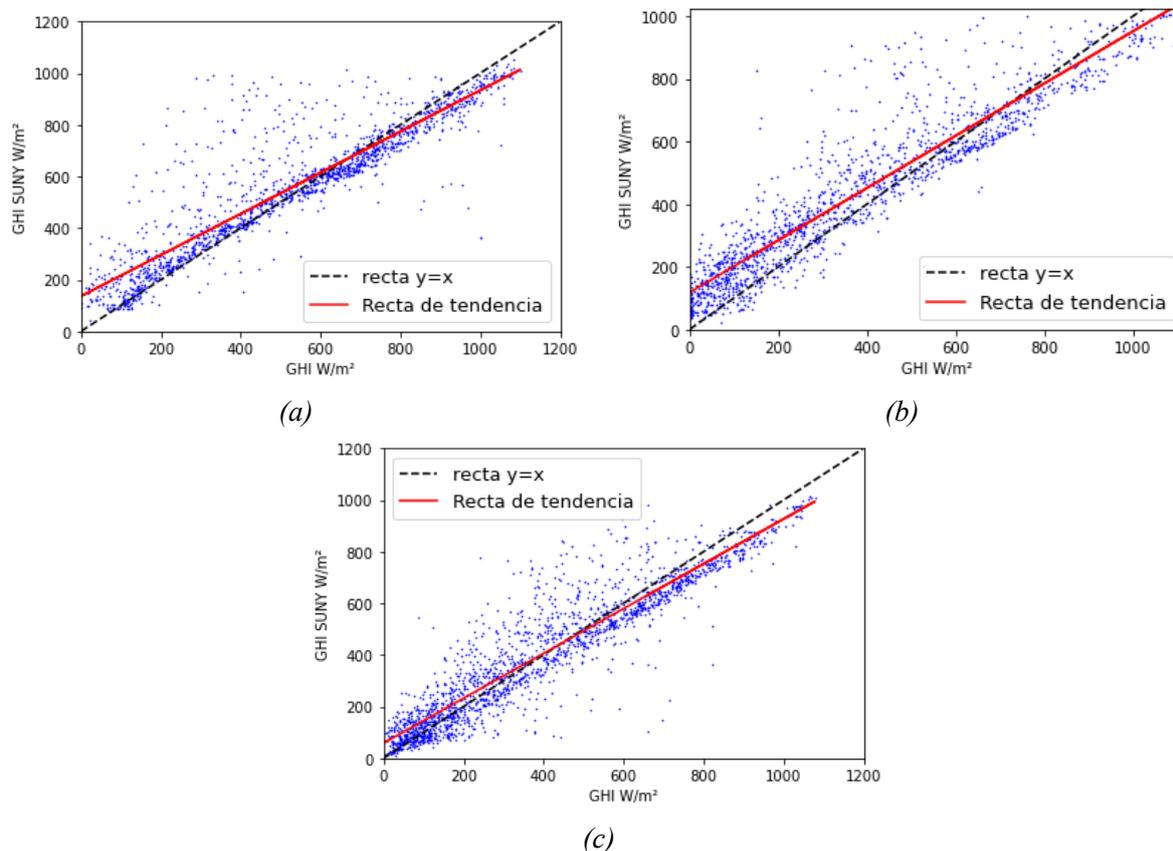


Figura 7: Gráfico de dispersión de la GHI medida vs GHI estimada por el modelo SUNY en las estaciones AP (a), CE (b) y YU (c).

similar al obtenido por el modelo Cano et al.

### Evaluación del desempeño

Tabla 8: Métricas de desempeño en términos absolutos

Estación	Modelo	MBE $W/m^2$	MAE $W/m^2$	RMSD $W/m^2$	S $W/m^2$
AP	Cano	32.00	84.47	126.19	122.01
AP	SUNY	46.84	75.79	130.43	121.73
CE	Cano	22.35	89.63	115.40	113.21
CE	SUNY	54.44	86.85	117.04	103.60
YU	Cano	18.29	71.34	92.86	91.04
YU	SUNY	11.08	28.01	35.42	33.64

En la Figura 8 se muestra el comportamiento del RMSD % en función de los índices de nubosidad tanto para modelo SUNY en AP (8a) como para el modelo Cano et al en YU (8b), además se muestra el desempeño del modelo Heliosat-4. Las gráficas dejan en evidencia que al incrementarse la nubosidad el

Tabla 9: Métricas de desempeño en valores relativos a la media de las medidas

Estación	Modelo	MBE %	MAE %	RMSD %	S %
AP	Cano	6.24	16.48	24.62	23.81
AP	SUNY	9.13	14.78	25.44	23.75
CE	Cano	5.85	23.74	30.22	29.64
CE	SUNY	14.25	22.74	30.65	27.13
YU	Cano	4.72	18.44	24.01	23.54
YU	SUNY	1.99	18.33	26.22	26.14

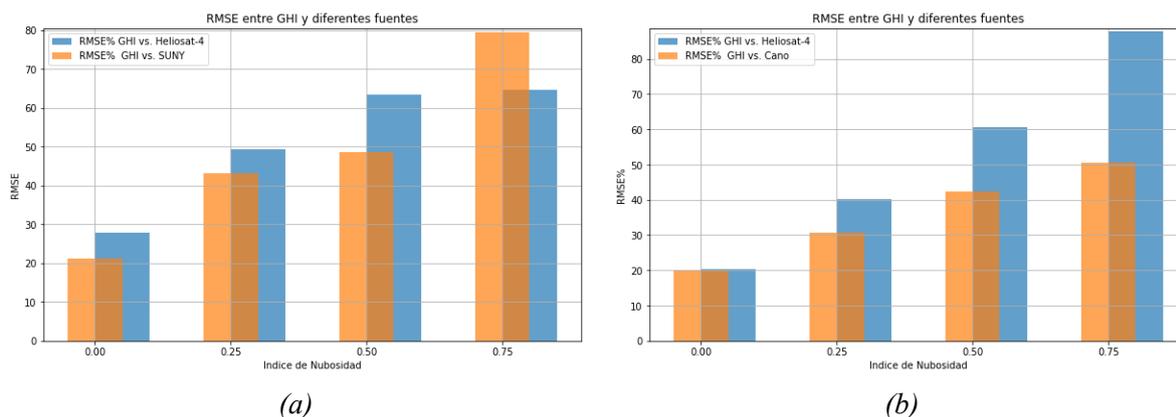


Figura 8: Histograma del RMSD en función de  $\eta$  en las estaciones AP (a), YU (b) para los modelos SUNY y Cano et al respectivamente.

error de ambos modelos tiende a incrementarse gradualmente.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS:

Este trabajo muestra los pasos iniciales en la búsqueda de un modelo satelital operativo para la región NOA. Debe notarse que el modelo satelital CAMS se usa como referencia por ser un modelo donde sus estimaciones son de fácil acceso. Además este modelo ha sido ya analizado para los sitios de Salta Ciudad (1200 metros snm) y de El Rosal (3350 metros snm), ambos en la provincia de Salta. Debe destacarse que los tres sitios tienen climas diferentes, lo que influye en sus valores de radiación y de temperatura ambiente. Las diferencias en las métricas que muestran los valores medidos con las estimaciones de CAMS sirven para establecer una referencia general. Esto es porque CAMS utiliza estimaciones basadas en imágenes del satélite Meteosat, que solo llegan hasta la longitud  $-66^\circ$  ( $66^\circ$  Oeste), por lo que las estimaciones pueden ser afectadas por efectos de borde (Miranda, 2023).

Es necesario destacar que la estimación de CAMS es una estimación general, que puede ser mejorada mediante un proceso de site-adaptation, comparativa que no fue abordada en este trabajo, esto debe tenerse en cuenta puesto que los modelos presentados son modelos con ajuste local. En (Miranda, 2023) se analizaron técnicas de aprendizaje automático para constituir un proceso de ajuste local a los estimativos de CAMS, donde se consideraron dos estaciones ubicadas en la provincia de Salta, como resultado se obtuvo un RMSE  $\simeq 21\%$  y un coeficiente de correlación  $\simeq 0.93$ .

No se encontraron diferencias significativas asociadas al cálculo de  $\eta$ . Pueden explorarse otras alternativas mediante un estudio de sensibilidad para determinar las mejores definiciones para el modelado de  $\rho_{max}$  y  $\rho_{min}$ .

El ajuste de los coeficientes  $a$  y  $b$  en ambos modelos requiere la disponibilidad de mediciones terrestres,

si embargo una caracterización del clima de la región puede permitir utilizar coeficientes encontrados en otras regiones que presenten características similares.

## CONCLUSIONES

Los modelos Cano et al. y SUNY presentan en la región  $MBE \simeq 24.21 \text{ W/m}^2$ ,  $MAE \simeq 81.81 \text{ W/m}^2$ ,  $RMSD \simeq 111.48 \text{ W/m}^2$ ,  $S \simeq 108.75 \text{ W/m}^2$  y  $MBE \simeq 37.45 \text{ W/m}^2$ ,  $MAE \simeq 63.55 \text{ W/m}^2$ ,  $RMSD \simeq 94.29 \text{ W/m}^2$ ,  $S \simeq 86.32 \text{ W/m}^2$  respectivamente, mientras que el modelo Heliosat-4 presenta  $MBE \simeq 50.99 \text{ W/m}^2$ ,  $MAE \simeq 87.62 \text{ W/m}^2$ ,  $RMSD \simeq 127.01 \text{ W/m}^2$ ,  $S \simeq 115.27 \text{ W/m}^2$ , esto indica una clara ganancia de los modelos locales, lo que es esperable.

La utilización de las imágenes satelitales GOES para la estimación de la GHI promete ser una gran alternativa, aun dadas las características topográficas y climáticas en la zona de estudio, a través de este estudio evaluando los modelos Cano et al. y SUNY, se han identificado los valores que podrían ser considerados como una base a mejorar en cualquier otra implementación en la misma región. Es importante resaltar que tanto CANO como SUNY son modelos simples dentro del ámbito del modelado de irradiancia solar estimada por satélites.

## AGRADECIMIENTOS

Se mantiene anónimo para la revisión doble ciego

## REFERENCIAS

- Alonso-Suárez, R. (2017). *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. Tesis de doctorado. Universidad de la República (Uruguay)*. Tesis doctoral, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.
- Ayompe, L. y Duffy, A. (2014). An assessment of the energy generation potential of photovoltaic systems in cameroon using satellite-derived solar radiation datasets. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7:257–264.
- Cano, D., Monget, J., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., y Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37(1):31–39.
- Cao, M., Chen, M., Liu, J., y Liu, Y. (2022). Assessing the performance of satellite soil moisture on agricultural drought monitoring in the north china plain. *Agricultural Water Management*, 263:107450.
- Dreus, A., Beyer, H., y Rindelhardt, U. (2008). Quality of performance assessment of pv plants based on irradiation maps. *Solar Energy*, 82(11):1067–1075.
- Huld, T., Müller, R., y Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating pv performance in europe and africa. *Solar Energy*, 86(6):1803–1815.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Laguarda, A. (2021). *Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre. Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre. Tesis de doctorado. Universidad de la República (Uruguay)*. Tesis doctoral, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería.
- Laguarda, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2018). Modelo semi-empírico simple de irradiancia solar global a partir de imágenes satelitales goes.
- Ledesma, R. D., Salazar, G. A., y de Castro Vilela, O. (2022). Argpv2 un modelo práctico para la estimación de ghi en sitios de altura. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26:283–289.
- Losos, D. (2021). Beginner's guide to goes-r series data. how to acquire, analyze, and visualize goes-r series data.
- Miranda, D. R. D. (2023). Procedimento de classificação e regressão aplicado ao site adaptation da radiação solar. *UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO DE TECNOLOGIA E*

GEOCIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES.

- Moltoni, A., Clemares, N., Gorandi, E., y Moltoni, L. (2016). Enarsol. red de medición de radiación solar interconectada. *III Congreso Argentino de Ingeniería y IX Congreso Argentino de la Enseñanza en Ingeniería, Resistencia, Argentina*.
- Moussu, G., Diabate, L., Obrecht, D., y Wald, L. (1989). A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 10(7):1207–1225.
- Nollas, F. M., Salazar, G. A., y Gueymard, C. A. (2023). Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance. *Renewable Energy*, 202:40–55.
- Perez, R., Ineiche, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., y Vignola, R. G. F. (2002a). A new operational model for satellite-derived irradiances: Description and validation. *Solar Energy*, 73:307–317.
- Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., y Vignola, F. (2002b). A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, 73(5):307–317.
- Polo, J., Wilbert, S., Ruiz-Arias, J., Meyer, R., Gueymard, C., Súrri, M., Martín, L., Mieslinger, T., Blanc, P., Grant, I., Boland, J., Ineichen, P., Remund, J., Escobar, R., Troccoli, A., Sengupta, M., Nielsen, K., Renne, D., Geuder, N., y Cebeacauer, T. (2016). Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. *Solar Energy*, 132:25–37.
- Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Gschwind, B., 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., Lefèvre, M., y Wald, L. (2004). The method heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2):159–169.
- Salazar, G., Alonso-Suárez, R., Cirigliano, A. L., y Ledesma, R. (2021). Evaluación del proceso de adaptación al sitio aplicado a la irradiancia solar global medida en la ciudad de Salta, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 25.
- Salazar, G. y Gueymard, C. (2019). Comparación de valores de irradiancia global medida en sitios de altura en Argentina contra bases de datos satelitales.
- Salazar, G., Gueymard, C., Galdino, J. B., de Castro Vilela, O., y Fraidenraich, N. (2020). Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117:109478.
- Salazar, G. A., Fraidenraich, N., de Oliveira, C. A. A., de Castro Vilela, O., Hongn, M., y Gordon, J. M. (2017). Analytic modeling of parabolic trough solar thermal power plants. *Energy*, 138:1148–1156.
- Sengupta, M., Habte, A., Wilbert, S., Gueymard, C., y Remund, J. (2021). Best practices handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications: Third edition. Technical report, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).
- Vignola, F., Grover, C., Lemon, N., y McMahan, A. (2012). Building a bankable solar radiation dataset. *Solar Energy*.
- Volante, J., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M., Viglizzo, E., y Paruelo, J. (2012). Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154:12–22. Ecosystem Services and Land-Use Policy.
- W., X. y Schmit, T. (2018). Goes-16 abi level 1b and cloud and moisture imagery (cmi) release full validation data quality product performance guide for data users. Dirección URL: <[https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2021-08/GOES-16\\_ABI-L1b-CMI\\_Full-Validation\\_ProductPerformanceGuide\\_v2.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/2021-08/GOES-16_ABI-L1b-CMI_Full-Validation_ProductPerformanceGuide_v2.pdf)> [consulta: 12 de agosto de 2023].

## **ADVANCES IN THE ESTIMATION OF SOLAR IRRADIANCE IN THE PROVINCES OF SALTA AND JUJUY USING GOES-16 SATELLITE IMAGES**

**ABSTRACT:** The estimation of solar irradiance through satellite images is an efficient way to measure solar radiation across large geographic areas. Satellites have the capacity to regularly capture data at predetermined intervals over extended periods, thereby establishing a comprehensive temporal and spatial information foundation for climate monitoring purposes. This study presents initial findings pertaining to the estimation of solar irradiance in the provinces of Salta and Jujuy, employing imagery from the GOES-16 satellite. Two straightforward models, based on a cloudiness index, are assessed for their efficacy in estimating solar irradiation at three specific locations within the provinces of Salta and Jujuy, utilizing imagery from the GOES-16 satellite.

**Keywords:** solar energy, GOES 16, SUNY, cano