

# Análisis comparativo entre mediciones de radiación solar en Tucumán (26.8°S, 65.1°O) y las bases de datos de reanálisis ERA5 y NCEP/NCAR

## *Comparative analysis between solar radiation measurements in Tucuman (26.8°S, 65.1°W) and the ERA5 and NCEP/NCAR reanalysis databases*

Cristóbal I Silvero<sup>1,2</sup>, Franco D Medina<sup>1,2</sup>, Bruno S Zossi<sup>1,2</sup>, Gustavo A Mansilla<sup>1,2</sup>, Fernando Nollas<sup>3</sup>, Ana G Elias<sup>1,2</sup>

**Resumen** Las bases de datos de reanálisis constituyen una alternativa para evaluar distintos parámetros meteorológicos en áreas y períodos de tiempo en los cuales no se cuenta con datos medidos, pero requieren una validación previa a través de análisis de comparación y de error respecto a mediciones disponibles. Con este propósito, en este trabajo se realiza un análisis comparativo entre los datos de radiación solar global medidos en superficie en Tucumán (26.8°S, 65.1°O) y los obtenidos a partir de dos bases de datos de reanálisis: ERA5 y NCEP/NCAR. Los datos medidos con una frecuencia minutal fueron obtenidos de la red solarimétrica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, correspondientes a los años 2017 y 2018. Se seleccionaron cinco estadísticos para realizar la comparación, considerando valores acumulados diarios. Los datos obtenidos del reanálisis ERA5 presentan un mejor desempeño que NCEP/NCAR, si bien, en general, ambos sobreestiman los valores medidos. Los estadísticos de error resultan entre  $\sim 10$  y  $25\%$  en el caso de ERA5 y entre  $\sim 40$  y  $50\%$  en el caso de NCEP/NCAR. Con respecto a la detección de la variabilidad de la radiación diaria en los dos años considerados, ERA5 también presenta un mejor ajuste, resultando en un coeficiente de correlación de  $0.9$  en comparación con  $\sim 0.6$  en el caso de NCEP/NCAR.

**Palabras clave** Radiación solar, reanálisis, ERA5, NCEP/NCAR, energía solar.

**Abstract** *Reanalysis databases provide an alternative for evaluating various meteorological parameters in areas and periods where measured data is unavailable, but they require prior validation through comparative and error analysis with available measurements. With this purpose, this study presents a comparative analysis between solar radiation data measured at the surface in Tucumán (26.8°S, 65.1°W) and data obtained from two reanalysis databases: ERA5 and NCEP/NCAR. The measured data, recorded at minute intervals, were obtained from the solarimetric network of the National Meteorological Service (SMN) of Argentina for the years 2017 and 2018. We selected five statistics for the comparison, considering daily accumulated values. ERA5 shows better performance than NCEP/NCAR, although both generally overestimate the measured values. The error statistics range between  $\sim 10\%$  and  $25\%$  for ERA5 and between  $\sim 40\%$  and  $50\%$  for NCEP/NCAR. Regarding the detection of daily radiation variability over the two years considered, ERA5 also shows a better fit, resulting in a correlation coefficient of  $\sim 0.9$  compared to  $\sim 0.6$  for NCEP/NCAR.*

**Keywords** Solar radiation, reanalysis, ERA5, NCEP/NCAR, solar energy.

<sup>1</sup>INFINOA (CONICET-UNT), Tucumán, Argentina. Email: [cristobalivansilvero@gmail.com.ar](mailto:cristobalivansilvero@gmail.com.ar)

<sup>2</sup>Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - LIANM (FACET, UNT), Tucumán, Argentina.

<sup>3</sup>Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Argentina.

## INTRODUCCIÓN

La radiación solar incidente en la superficie es la principal fuente de energía para procesos biológicos, físicos y químicos en la Tierra. Además, es un parámetro esencial en modelos y simulaciones climáticas en general, y es un requisito previo para la planificación y operación eficiente de los sistemas de energía solar. Las mediciones en estaciones terrestres proporcionan la mejor estimación de este parámetro, pero presentan una cobertura espacial heterogénea y son insuficientes en muchas regiones de nuestro planeta por la falta de cobertura espacial. También está la limitación de la cobertura en el tiempo y de los períodos con mediciones disponibles.

Actualmente, existen varios productos globales en cuadrículas con alta resolución espacial provenientes de sensores remotos y reanálisis. La teledetección por satélite es una de las formas más eficaces para obtener la radiación solar en superficie con alta precisión, aunque la cobertura temporal está limitada por el tiempo de tránsito del satélite. En el caso de modelos de reanálisis, sus datos presentan una buena cobertura espacial y series temporales largas, lo que las vuelve una interesante alternativa para algunas regiones (Bosilovich et al., 2013). Sin embargo, la heterogeneidad de las fuentes de datos y las diferencias en los esquemas de asimilación generan errores en los productos de reanálisis de radiación y, por lo tanto, comprender la incertidumbre y las desviaciones de los datos de reanálisis es esencial para su uso adecuado (Zhang et al., 2016, 2020).

Con este propósito, y siguiendo el análisis de Nollas et al. (2022), se extiende el análisis presentado en Silvero et al. (2024). En este caso, se realiza un estudio comparativo entre los datos de radiación solar global medidos en superficie en Tucumán (26.8°S, 65.1°O), durante los años 2017 y 2018, y los obtenidos a partir de dos bases de datos de reanálisis. Estas son: ERA5 (*ECMWF Re-Analysis version 5*), el reanálisis climático más reciente producido por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Hersbach et al., 2020), y NCEP/NCAR R1, producido por el *Physical Sciences Laboratory* (PSL) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Kalnay et al., 1996).

## DATOS

### Datos medidos en Tucumán

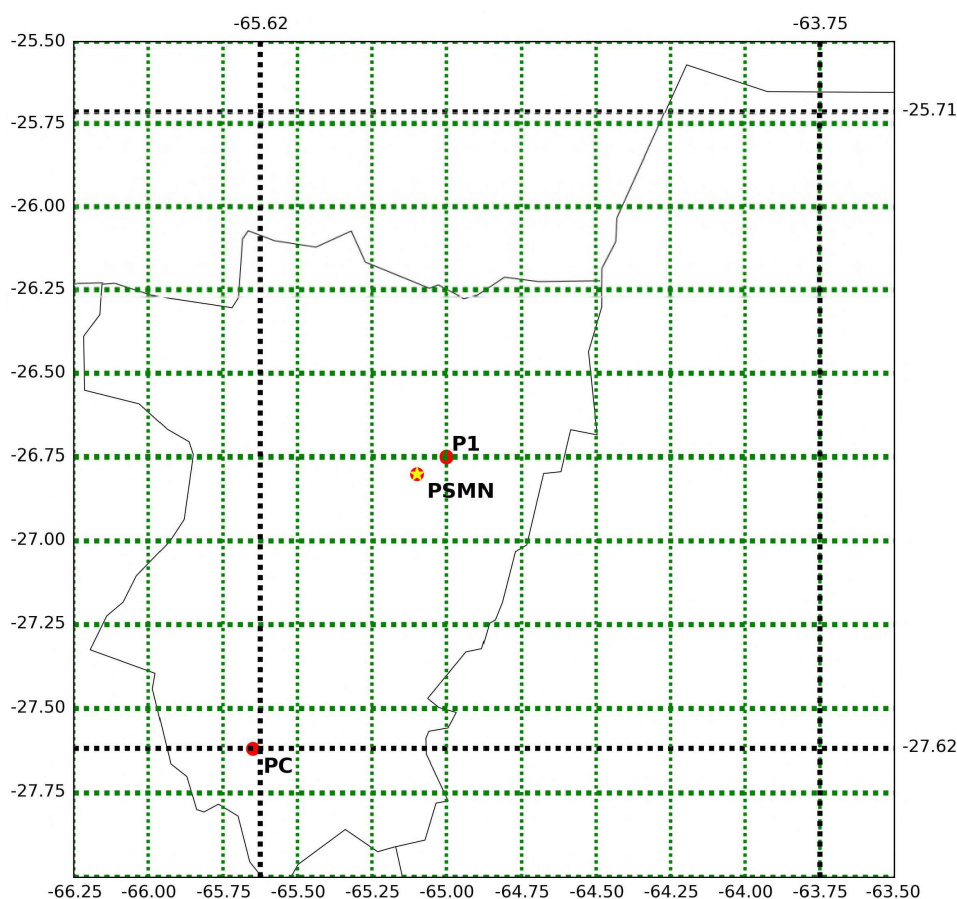
Los datos de radiación total global ( $R_s$ ), expresados en  $W/m^2$ , utilizados en el presente trabajo fueron medidos en superficie por un piranómetro Kipp & Zonen CMP21 que pertenece a la red solarimétrica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina. Los datos corresponden a la estación de Tucumán, cuya ubicación se muestra en la Figura 1, y cuyas coordenadas geográficas y características de la medición se listan en la Tabla 1.

En la serie original de datos, de resolución minutil, se observan valores que superan los  $1400 W/m^2$ , lo cual es incluso mayor que la radiación esperada para cielo claro (sin nubosidad). Este comportamiento en los datos medidos en tierra se explica por la presencia de determinado tipo de nubosidad que genera un efecto óptico que aumenta la radiación solar que alcanza la superficie (Gueymard, 2017). Este fenómeno recibe el nombre de *cloud enhancement* y los datos con estas características no son utilizados en este trabajo debido a que los modelos de ERA5 y NCEP/NCAR no consideran este tipo de fenómenos en sus cálculos.

### Datos obtenidos del reanálisis ERA5

Los datos del ERA5 utilizados corresponden a la radiación solar en superficie hacia abajo (*ssrd, surface solar radiation downwards*), en  $J/m^2$ , para el período 2017-2018. Estos datos están disponibles en <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>. Este reanálisis cuenta con una base de datos desde 1940 hasta el presente, y proporciona estimaciones





**Figura 1.** Ubicación de la estación de Tucumán (PSMN). Las líneas de trazo verdes indican el grilla de ERA5, y las negras las de NCEP/NCAR. Los puntos destacados corresponden a los sitios que se consideran para las comparaciones.

**Tabla 1.** Datos de la estación de Tucumán provista por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina.

Estación	Latitud	Longitud	Elevación [m]	Sensor	Datalogger	Período
Tucumán	-26.8	-65.1	451	CMP21	CR1000	marzo 2017–diciembre 2018

horarias de *ssrd* con una resolución de latitud-longitud de  $0.25^\circ$  (Figura 1).

El *ssrd* indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal en la superficie de la Tierra y se refiere a la suma de la radiación solar directa y difusa en el plano. Se considera que, en buena aproximación, es equivalente al valor modelado de la radiación que mediría un piranómetro (<https://codes.ecmwf.int/grib/param-db/169>). Los datos de *ssrd* se dividieron entre 3600, para pasar de  $J/m^2$  a  $W/m^2$ , y se ajustaron a la hora local de Tucumán considerando  $LT = UT - 3$ .

De los cuatro puntos de la grilla de ERA5 que rodean a la estación del SMN, se seleccionó el punto más cercano a la estación,  $P_1$ , de coordenadas ( $26.75^\circ S, 65.00^\circ O$ ) (Figura 1), junto con el valor interpolado a partir de los cuatro puntos más cercanos utilizando interpolación de distancia inversa ponderada (*IDW*, por *Inverse Distance Weight*).

### Datos obtenidos del reanálisis NCEP/NCAR

Los datos del flujo de radiación solar en superficie (*dswrf*, *downward solar radiation flux*) del reanálisis NCEP/NCAR R1 se obtuvieron del sitio <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>, para el período 2017-2018. El *dswrf* indica la radiación solar de onda corta que

llega a una superficie horizontal en la superficie de la Tierra y también se considera una buena aproximación del valor que mediría un piranómetro.

Las series de datos consisten en cuatro valores por día que corresponden a 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UTC. Representan promedios de períodos de 6 horas que comienzan en la hora indicada (Kalnay et al., 1996). Por ejemplo, el valor a las 12:00 UTC corresponde al promedio de los datos entre las 12:00 y las 17:59 UTC. Dado que el NOA tiene una zona horaria UT – 3, este valor del reanálisis incluye las 12:00 LT de la región (15:00 UTC).

El reticulado de esta base de datos tiene una resolución de latitud-longitud de  $\sim 1.8^\circ$  (Figura 1). De los puntos de la grilla de NCEP/NCAR más cercanos que rodean a la estación del SMN, se seleccionó el punto más cercano a la estación,  $P_C$ , de coordenadas ( $27.62^\circ\text{S}$ ,  $65.62^\circ\text{O}$ ) (Figura 1), junto con el valor interpolado a partir de los cuatro puntos más cercanos utilizando *IDW*.

## METODOLOGÍA

Se realizó un análisis comparativo entre los datos medidos de radiación solar en superficie y los datos de cada reanálisis considerando los estadísticos usados en Silvero et al. (2024), basados en Nollas et al. (2022), y parámetros adicionales (Gueymard, 2014; Medina et al., 2023). Estos estadísticos son: desvío medio relativo (MBD, *Mean Bias Deviation*), desvío cuadrático medio relativo (RMSD, *Root Mean Square Deviation*), desviación absoluta media relativa (MAD, *Mean Absolute Deviation*), coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, *Nash-Sutcliffe Efficiency*), cuyas fórmulas están dadas por:

$$\text{MBD}[\%] = 100 \frac{\sum(y - x)}{n\bar{x}}, \quad (1)$$

$$\text{RMSD}[\%] = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \frac{\sum(y - x)^2}{\bar{x}}}, \quad (2)$$

$$\text{MAD}[\%] = 100 \frac{\sum|y - x|}{n\bar{x}}, \quad (3)$$

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n(\sum x^2) - (\sum x)^2][n(\sum y^2) - (\sum y)^2]}}, \quad (4)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum(x - y)^2}{\sum\left(x - \frac{\sum x}{n}\right)^2}, \quad (5)$$

donde  $x$  corresponde a los datos medidos,  $y$  a los datos obtenidos del reanálisis, y  $n$  es el número de datos de cada serie. Dependiendo de si su signo es positivo o negativo, el MBD mide el sesgo porcentual promedio de  $y$  al sobreestimar o subestimar  $x$ , respectivamente, en relación con el valor promedio de  $x$ . Su valor óptimo es 0.

El RMSD y el MAD corresponden a la desviación porcentual de la base de datos del reanálisis con respecto a la medición, en relación con el valor promedio. El valor óptimo es 0, lo que en este caso indicaría que ambas series son idénticas. La diferencia entre ellos está dada por la contribución de los valores de error individuales al resultado final. En el caso del MAD, la contribución sigue un comportamiento lineal. Esto significa que un error de 10 contribuye el doble que un error de 5. Por otro lado, en el caso del RMSD, los valores muy pequeños (entre 0 y 1) se vuelven aún más pequeños, mientras que los valores más grandes aumentan considerablemente, debido a que la suma se realiza



sobre el cuadrado de las desviaciones. Esto significa que los errores grandes se magnifican.

En el caso de  $r$ , mide el grado de linealidad de la asociación entre  $x$  e  $y$ , que en esta ocasión sería entre la serie de radiación medida y la obtenida del reanálisis. Es decir, mide cuán similar es la variación de ambas series. Está limitado entre 1 y  $-1$ , donde 1 es el valor óptimo, que indica que ambas variables varían de manera perfectamente lineal y en fase.

El NSE determina la magnitud relativa de la "varianza residual" entre el reanálisis y los datos medidos (llamada residual por su analogía con el análisis de regresión) en comparación con la varianza de las mediciones (Nash & Sutcliffe, 1970). Este estadístico varía de  $-\infty$  a 1. Un valor negativo corresponde a una mala estimación de la radiación por parte del reanálisis e implica que el valor medio de la serie de mediciones es un mejor predictor; 0 indica que los datos del reanálisis son tan precisos como la media; y 1 (el valor óptimo) implica una coincidencia perfecta entre reanálisis y radiación medida.

En base al reanálisis NCEP/NCAR, que presenta la resolución temporal más gruesa (valores promedio de 6 horas), se consideró como valor diario el valor acumulado de las 12:00 y 18:00 UT (9:00 y 15:00 LT). Es decir, se consideró la suma de estos dos valores multiplicada por 6, lo que resulta en el valor integrado diario entre las 9:00 y 21:00 LT. En el caso de ERA5, se sumaron los valores entre las 9:00 y 21:00 LT.

Para estimar el valor acumulado de los valores medidos, se calculó primero el promedio horario de los valores entre los minutos 0 y 59 de las horas con cantidad de valores minutas superior al 80 % (6821 valores promedio para el año 2017 y 8390 para el año 2018). Luego, se integró la radiación horaria entre las 9:00 y 21:00 LT, considerando solo los días que al menos tenían 11 horas de medición. Resultaron así 166 valores diarios en 2017 y 234 en 2018 (400 valores totales entre ambos años). Los valores obtenidos se expresaron en unidades de  $\text{Wh/m}^2$ .

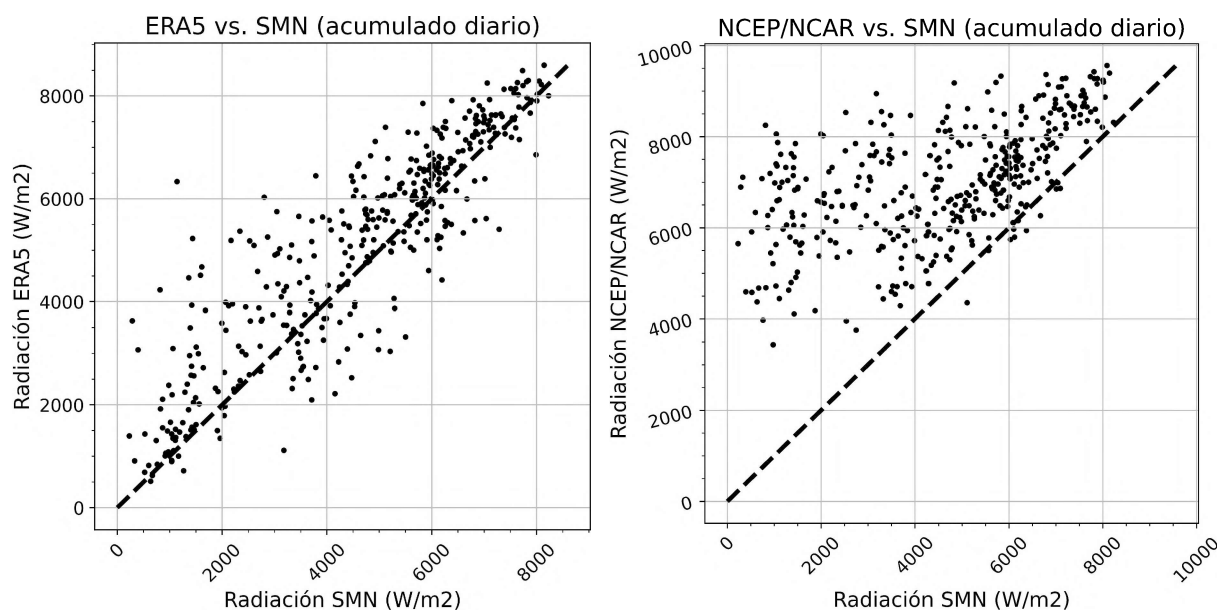
Por último, se realizó el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para comparar las distribuciones de los datos de  $R_s$  medidos con los obtenidos a partir de ambos reanálisis. Este test calcula la distancia máxima entre las funciones de distribución acumulada (ECDF, *Empirical Cumulative Distribution Function*) de las dos muestras comparadas y estima si dicha distancia es lo suficientemente grande para rechazar la hipótesis nula de que ambas series tienen la misma distribución. Se utilizó un valor de  $p$  de 0.05 (nivel de significancia al 5%), por lo que un valor menor indicará que las distribuciones de ambas series son estadísticamente diferentes.

## RESULTADOS

La Figura 2 muestra las gráficas de dispersión entre los valores obtenidos a partir de las mediciones de  $R_s$  del SMN y cada una de las bases de datos de los reanálisis con los puntos más cercanos, donde se muestra también la primera bisectriz de cada gráfica. La dispersión considerando los puntos interpolados es similar a la que se observa en la Figura 2. La Tabla 2 muestra los resultados de los distintos indicadores estadísticos para cada caso.

La Figura 3 muestra el histograma junto con la ECDF de los valores de  $R_s$  medidos y los obtenidos a partir del reanálisis NCEP/NCAR, considerando el punto más cercano ( $P_C$ ), y la Figura 4 para el punto interpolado. A partir de las figuras y de los valores del estadístico K-S y de  $p$  que se listan en la Tabla 2, se concluye que las distribuciones son estadísticamente diferentes.

La Figura 5 muestra el histograma junto con la ECDF de los valores de  $R_s$  medidos y los obtenidos a partir del reanálisis ERA5, considerando el punto más cercano ( $P_1$ ), y la Figura 6 para el punto interpolado. En este caso, si bien las figuras muestran distribuciones con mayor similitud que en el caso de NCEP/NCAR, a partir de los valores del estadístico K-S y de  $p$  que se listan en la Tabla 2, se concluye que las distribuciones son estadísticamente diferentes.



**Figura 2.** Gráficas de dispersión del valor de radiación solar acumulado diario entre las 9:00 y 21:00 LT obtenido del SMN y los valores correspondientes a las bases de datos del reanálisis ERA5 (izquierda) y NCEP/NCAR (derecha). La línea de trazos negra indica la primera bisectriz.

**Tabla 2.** Valores de los estadísticos de comparación entre los datos diarios del SMN, el punto  $P_1$  e interpolado de ERA5, y  $P_C$  e interpolado de NCEP/NCAR.

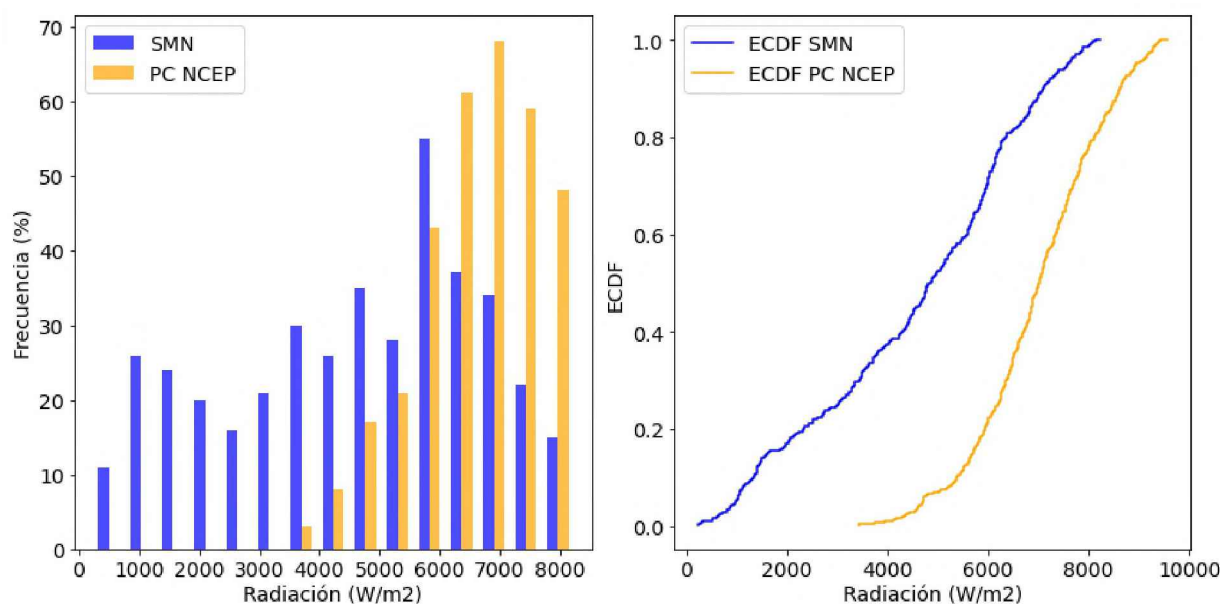
Parámetro	SMN- $P_1$	SMN-Interp-ERA5	SMN- $P_C$	SMN-Interp-NCEP
MBD	10.82	10.06	53.74	47.73
MAD	17.69	17.47	53.43	48.53
RMSD	23.99	23.72	65.39	60.25
$r$	0.89	0.88	0.56	0.59
NSE	0.72	0.73	-1.05	-0.74
Estadístico K-S	0.122	0.105	0.525	0.465
$p$ -valor K-S	0.005	0.024	0.000	0.000

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De acuerdo a los valores de los cinco estadísticos de comparación analizados, la base de datos de este reanálisis ERA5 presenta un mejor acuerdo con los datos medidos que NCEP/NCAR, si bien ambos sobreestiman, en general, las mediciones. Los estadísticos de error (MBD, MAD y RMSD) resultan entre  $\sim 10$  y  $25\%$  en el caso de ERA5 y entre  $\sim 50$  y  $65\%$  en el caso de NCEP/NCAR. Con respecto a la detección de la variabilidad de los valores diarios en el período analizado, ERA5 también presenta un mejor ajuste, resultando en un  $r$  de  $\sim 0.9$  en comparación con  $\sim 0.6$  en el caso de NCEP/NCAR. Los valores de NSE indican, en el caso de NCEP/NCAR, que el simple valor promedio de la radiación resulta una mejor predicción que los valores obtenidos de este reanálisis. Esto se explicaría por la significativa sobreestimación promedio reflejada por el valor de MBD en este caso.

En cuanto al uso del punto más cercano y al punto interpolado, si bien los estadísticos de comparación resultan con valores similares para cada reanálisis, se observa una leve mejora al considerar los puntos interpolados respecto del punto de la grilla más cercano al punto de medición.

La sobreestimación por parte de ambos reanálisis se detecta también a través de la comparación de los valores promedios obtenidos para todo el período, los cuales resultan  $\sim 4500$ ,  $5000$  y  $7000$  Wh/m<sup>2</sup> en el caso de las observaciones, ERA5 y NCEP/NCAR, respectivamente.

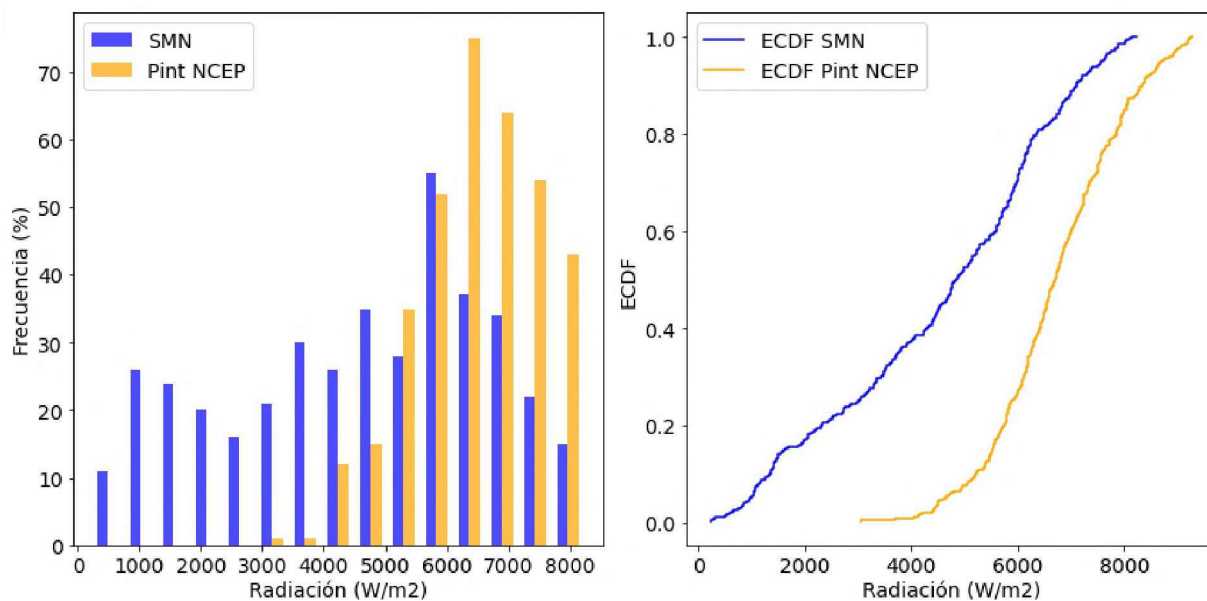


**Figura 3.** Izquierda: Histograma comparativo de la frecuencia de la  $R_s$  diaria medida (azul) y estimada por el reanálisis NCEP (naranja), para el punto  $P_C$  entre las 09:00 y 21:00 LT. Frecuencia expresada como porcentaje del total de observaciones. Derecha: Función de distribución empírica acumulada (ECDF) de la radiación solar diaria medida (azul) y estimada por el reanálisis NCEP ( $P_C$ ) (naranja).

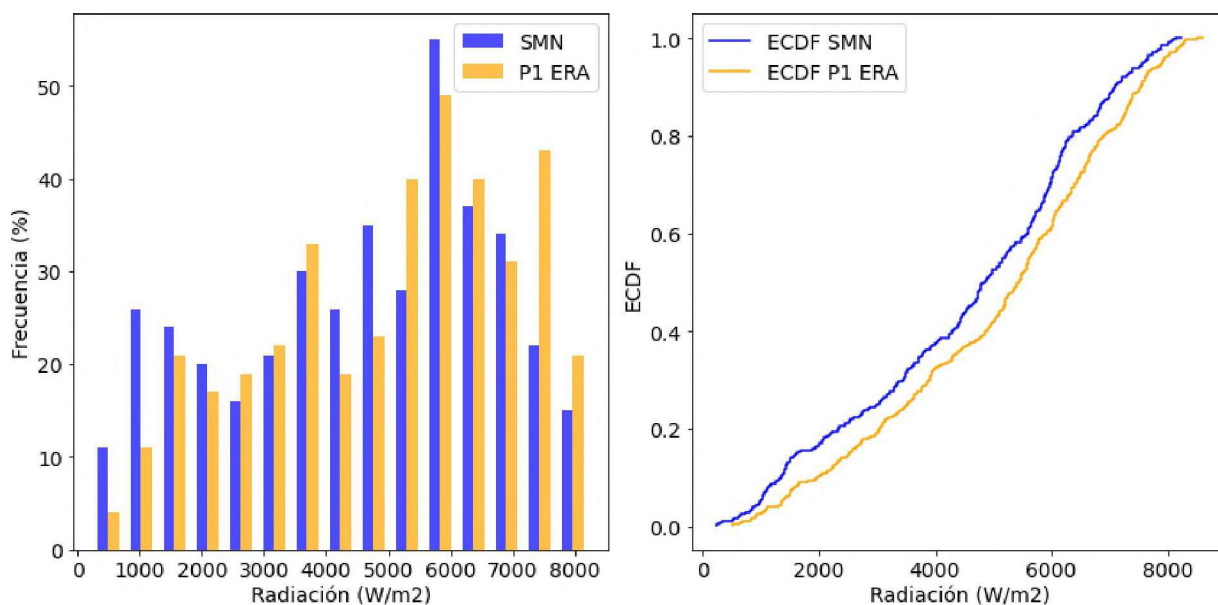
Existen análisis similares realizados para otras regiones del mundo, que muestran resultados de error similares a los aquí obtenidos, sobre todo en cuanto a la sobreestimación por parte de ambos reanálisis, y al mejor acuerdo de los datos con ERA5 comparado con NCEP/NCAR. Por ejemplo, [Sianturi et al. \(2021\)](#) hacen un análisis comparativo entre los valores de radiación medido en cinco estaciones de Indonesia ubicadas entre los  $0^\circ$  y  $8^\circ\text{S}$  de latitud, en el período 2018-2020 y *ssrd* de ERA5, considerando también valores acumulados diarios. Los autores separan los días de acuerdo a tres niveles de nubosidad, a partir de los cuales se pueden estimar los valores promedios para compararlos con los aquí obtenidos. Los estadísticos de error RMSD, MAD y MBD, calculados en términos de valores absolutos, para todos los datos que analizan resultan  $\sim 1.3$ , 1.1 y  $0.5 \text{ kWh/m}^2$ . En nuestro caso, considerando el valor promedio de  $R_s$  estimado a partir de todos los valores acumulados diarios disponibles ( $4500 \text{ Wh/m}^2$ ), para transformar a valores relativos en la Tabla 2 en el caso de la comparación con ERA5, los mismos estadísticos de error resultan  $\sim 1.1$ , 0.8 y  $0.5 \text{ kWh/m}^2$ , es decir muy parecidos a los obtenidos por [Sianturi et al. \(2021\)](#). En el caso del coeficiente de correlación, en Indonesia se observan incluso valores negativos para el caso de  $R_s$  en días cubiertos, de manera que el valor promedio resulta bajo:  $\sim 0.3$ . La mejor correlación se da para días claros, alcanzando valores de  $\sim 0.65$  en tres de las cinco estaciones. Los dos restantes no presentan días sin cobertura nubosa en todo el período. Esto se explica por la ubicación ecuatorial de la región. En el caso de Tucumán, que se ubica en una región subtropical con mayor proporción de días claros, si bien se utilizaron los valores diarios sin discriminación, este coeficiente asciende a  $\sim 0.9$ .

Otro ejemplo es el trabajo de [Tahir et al. \(2021\)](#), quienes analizan dos estaciones de Pakistán abarcando el período 2015-2017. Los autores realizan la comparación con las bases de reanálisis del NCEP, considerando directamente los valores promedios de 6 horas que se extraen de este reanálisis. En el caso de NCEP/NCAR, los valores de RMSD, MAD y MBD resultan  $\sim 60$ , 35 y 30 % para una de las estaciones, y  $\sim 70$ , 40 y 40 % para la segunda. El acuerdo es similar al caso de Tucumán, donde estos estadísticos de error resultan  $\sim 65$ , 50 y 50 %, respectivamente (Tabla 2). Los autores fundamentan la sobreestimación en ambas estaciones por la incorrecta representación de la nubosidad y del contenido de aerosoles en la atmósfera. Sin embargo, los valores del coeficiente de correlación superan 0.9 en ambos casos, mientras que en el nuestro es de  $\sim 0.6$ . Como estos trabajos mencionados, existen numerosos más ([Peng et al., 2019](#); [Tong et al., 2023](#); [Wilczak et al.,](#)





**Figura 4.** Izquierda: Histograma comparativo de la frecuencia de la radiación solar diaria medida (azul) y estimada por el reanálisis NCEP (naranja), para el punto interpolado, entre las 09:00 y 21:00 LT. Frecuencia expresada como porcentaje del total de observaciones. Derecha: Función de distribución empírica acumulada (ECDF) de la radiación solar diaria medida (azul) y estimada por el punto interpolado del reanálisis NCEP (naranja).

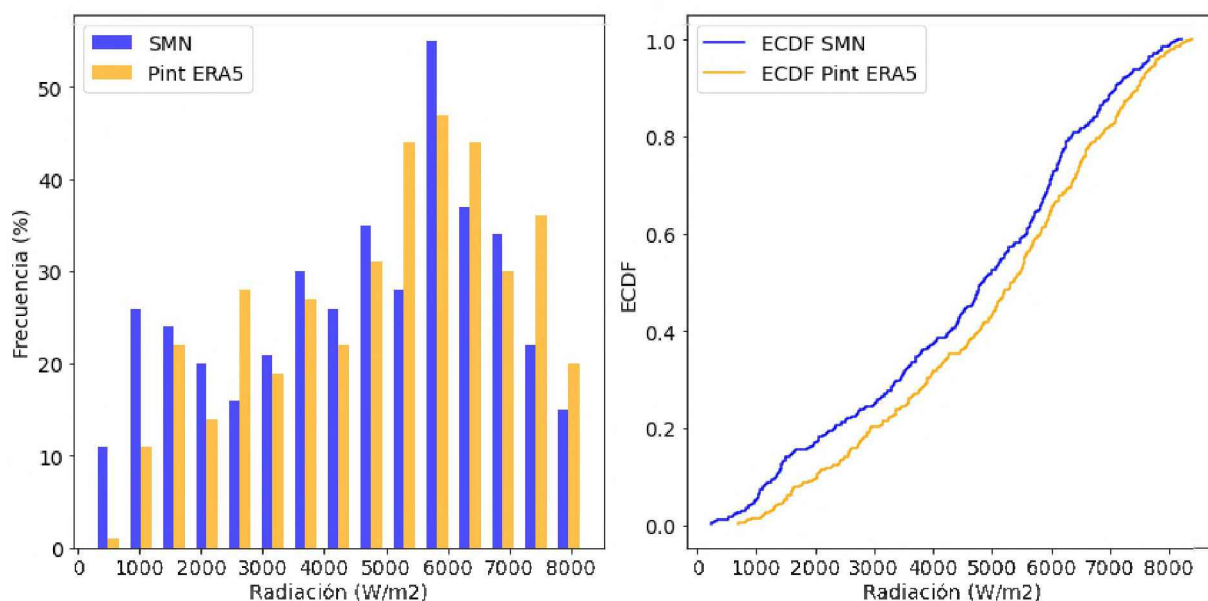


**Figura 5.** Izquierda: Histograma comparativo de la frecuencia de la  $R_s$  diaria medida (azul) y estimada por el reanálisis ERA5 (naranja), para el punto  $P_1$  entre las 09:00 y 21:00 LT. Frecuencia expresada como porcentaje del total de observaciones. Derecha: Función de distribución empírica acumulada (ECDF) de la radiación solar diaria medida (azul) y estimada por el reanálisis ERA5 ( $P_1$ ) (naranja).

2024, por ejemplo).

El test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) se usó para comparar las distribuciones de  $R_s$  diaria medida, y las estimadas por los reanálisis. Para el caso de NCEP/NCAR usando tanto el punto más cercano como el interpolado, se rechaza la hipótesis nula, es decir que las distribuciones de  $R_s$  medida y la estimada por el reanálisis son estadísticamente diferentes. En el caso del reanálisis ERA5, también para la comparación con el punto más cercano y el interpolado, se rechaza la hipótesis nula. Sin embargo, analizando comparativamente las Figuras 5 y 6 con las Figuras 3 y 4, se observa que la





**Figura 6.** Izquierda: Histograma comparativo de la frecuencia de la radiación solar diaria medida (azul) y estimada por el reanálisis ERA5 (naranja), para el punto interpolado, entre las 09:00 y 21:00 LT. Frecuencia expresada como porcentaje del total de observaciones. Derecha: Función de distribución empírica acumulada (ECDF) de la radiación solar diaria medida (azul) y estimada por el punto interpolado del reanálisis ERA5 (naranja).

distribución de los valores de  $R_s$  medidos y la de los obtenidos del reanálisis son más parecidos en el caso de ERA5 que en el caso de NCEP/NCAR.

A futuro, se profundizará este análisis comparativo para caracterizar el error que se obtiene al utilizar los datos de las bases de reanálisis a través, no solo de la extensión del período analizado y el incremento del número de estaciones, sino incorporando el análisis discriminando por grado de nubosidad. Será de referencia el análisis planteado por Sianturi et al. (2021), proponiendo factores de corrección, como en el caso de Tahir et al. (2021), que permitirían incorporar los valores del reanálisis con mayor confiabilidad al estudio de la radiación solar en la región.

**Agradecimientos** Trabajo enmarcado en el Proyecto del INFINOA: PUE 22920200100008CO. Los autores agradecen también el financiamiento provisto por el proyecto PIP 2957, y del Servicio Meteorológico Nacional por los datos brindados y la colaboración en la confección de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Bosilovich, M. G., Chaudhuri, A. H., & Rixen, M. (2013). Earth system reanalysis: Progress, challenges, and opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, ES110–ES113. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00191.1>
- 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. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1024–1034. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117>
- Gueymard, C. A. (2017). Cloud and albedo enhancement impacts on solar irradiance using high-frequency measurements from thermopile and photodiode radiometers. part 1: Impacts on global horizontal irradiance. *Solar Energy*, 153, 755–765. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.004>
- Hersbach, H., Bell, B., & Berrisford, P. e. a. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., & Collins, W. e. a. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437–470. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)

- Medina, F., Zossi, B., Bossolasco, A., & Elias, A.** (2023). Performance of CHIRPS dataset for monthly and annual rainfall indices in Northern Argentina. *Atmospheric Research*, 283, 106545. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106545>
- Nash, J. & Sutcliffe, J.** (1970). River flow forecasting through conceptual model. part 1-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nollas, F., Luccini, E., Orte, P., & Skansi, M. e. a.** (2022). Comparación entre datos de radiación solar de tres bases de datos de reanálisis y mediciones en superficie en Argentina. *Libro de resúmenes extendidos del XIV CONGREGMET 2022*. [http://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2023/02/LibroActas\\_compressed.pdf](http://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2023/02/LibroActas_compressed.pdf)
- Peng, X., She, J., Zhang, S., Tan, J., & Li, Y.** (2019). Evaluation of multi-reanalysis solar radiation products using global surface observations. *Atmosphere*, 10, 42. <https://doi.org/10.3390/atmos10020042>
- Sianturi, Y., Sopaheluwakan, A., & Sartika, K.** (2021). Evaluation of ECMWF model to predict daily and monthly solar radiation over Indonesia region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 893, 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012074>
- Silvero, C., Medina, F., & Zossi, B. e. a.** (2024). Comparación entre datos de radiación solar global de Tucuman (26.8°S, 65.1°O) y la base de datos de reanálisis ERA5. Enviado, noviembre 2023.
- Tahir, Z., Asim, M., & Azhar, M. e. a.** (2021). Correcting solar radiation from reanalysis and analysis datasets with systematic and seasonal variations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100933. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100933>
- Tong, L., He, T., Ma, Y., & Zhang, X.** (2023). Evaluation and intercomparison of multiple satellite-derived and reanalysis downward shortwave radiation products in China. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 1853–1884. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2212918>
- Wilczak, J., Akish, E., Capotondi, A., & Compo, G.** (2024). Evaluation and bias correction of the ERA5 reanalysis over the United States for wind and solar energy applications. *Energies*, 17, 1667. <https://doi.org/10.3390/en17071667>
- Zhang, X., Liang, S., & Wang, G. e. a.** (2016). Evaluation of the reanalysis surface incident shortwave radiation products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA using satellite and surface observations. *Remote Sensing*, 8, 225. <https://doi.org/10.3390/rs8030225>
- Zhang, X., Lu, N., Jiang, H., & Yao, L.** (2020). Evaluation of reanalysis surface incident solar radiation data in China. *Scientific Reports*, 10, 3494. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60460-1>