

Atlas de radiación solar en la región del Noroeste Argentino basado en datos de reanálisis

SILVERO, Cristóbal ^{1,2}; MEDINA, Franco ^{1,2,3}
ZOSSI, Bruno ^{1,2,3}; ELIAS, Ana ^{1,2,3}

¹ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - LIANM (FACET, UNT).

² Universidad Nacional de Tucumán- CONICET. Instituto de Física del Noroeste Argentino (INFINOA),

³ Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Tucumán, Argentina.

Resumen

El estudio del recurso solar resulta crucial para evaluar la disponibilidad de energía y dimensionar adecuadamente las tecnologías destinadas a su aprovechamiento. En muchas regiones, como el Noroeste Argentino (NOA), que es el área de enfoque de este trabajo, no se cuenta con una red adecuada de estaciones meteorológicas que permitan trabajar con datos observacionales directos. Ante esta limitación, las bases de datos de reanálisis emergen como una alternativa viable. En este contexto, la elaboración de atlas solares juega un rol esencial en el impulso hacia sistemas energéticos más sostenibles. En este trabajo, a partir de 24 años de datos (2000-2023) de tres diferentes bases de datos de reanálisis, se elaboraron atlas de la irradiación solar promedio en la región y se hizo un análisis comparativo entre estas tres bases. Los resultados confirman que el NOA dispone de un gran potencial solar, lo que la convierte en una zona especialmente atractiva para el desarrollo de la energía fotovoltaica. El atlas resalta la viabilidad de instalar parques solares en la región, proporcionando información clara sobre las áreas óptimas para proyectos de energía renovable.

Palabras clave: radiación solar, reanálisis, energía solar.

Atlas of surface solar radiation in the northwestern region of Argentina using reanalysis database

Abstract

The study of the solar resource is crucial to evaluate the availability of energy and to adequately dimension the technologies for its use. In many regions, such as Northwest Argentina (NOA), which is the focus area of this work, there is no adequate network of meteorological stations to work with direct observational data. Given this limitation, reanalysis databases emerge as a viable alternative. In this context, the development of solar atlases plays an essential role in the drive towards more sustainable energy systems. In this work, based on 24 years of data (2000-2023) from three different reanalysis databases, atlases of the average solar irradiance in the region were elaborated and a comparative analysis was made between these three databases. The results confirm that the NOA has a great solar potential, which makes it a particularly attractive area for the development of photovoltaic energy. The atlas highlights the feasibility of installing solar parks in the region, providing clear information on the optimal areas for renewable energy projects.

Key words: solar radiation, reanalysis, solar energy

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. También está la limitación de la cobertura en el tiempo y de los períodos con mediciones disponibles. Actualmente, existen varios productos globales en cuadrículas, o grillas, 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).

Los datos del reanálisis, en general, se han utilizado en numerosos estudios de caracterización y variabilidad de diversos parámetros, sobre todo en regiones donde las mediciones de superficie, a pesar de ser más precisas, tienen una cobertura espacial y temporal limitada, como es el nuestro (Morales-Moraga et al., 2019, Peng et al., 2019).

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un atlas de irradiancia solar en la región del Noroeste Argentino (NOA), que podría servir como herramienta para identificar en primera aproximación áreas óptimas para el aprovechamiento de la energía solar. Con este propósito se presentan valores promedio del período 2000-2023 de la irradiancia solar en superficie en la región del NOA utilizando tres bases de datos diferentes de reanálisis: NCEP/NCAR R1 (Kalnay et al., 1996), MERRA

V2, y ERA5, seguido de un análisis comparativo entre estas bases. A estos atlas habrá que acompañarlos luego, junto con el testeo en base a algunos puntos con datos experimentales, con mapas adicionales de nubosidad, desviación estándar, y otras variables, necesarias en la determinación de una región para el aprovechamiento de la energía solar y el dimensionamiento de las tecnologías necesarias.

Datos

Los datos utilizados corresponden a las variables de cada uno de los tres reanálisis seleccionados: NCEP/NCAR R1, MERRA V2 y ERA5, que corresponden al valor de irradiancia solar medida por radiómetro en superficie, durante el período 2000-2023. Se describe a continuación cada una de estas variables.

Los datos de flujo de radiación solar directa en superficie, dwsrf (downward solar radiation flux) del reanálisis NCEP/NCAR R1, en (W/m^2), provistos por la NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, se obtuvieron del sitio <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>. El dwsrf indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal en la superficie de la Tierra y se considera una buena aproximación del valor que mediría un piranómetro. El reticulado tiene una resolución de 1.8° en latitud \times 1.8° en longitud considerando la región del NOA comprendida entre los $20^\circ S$ y $30^\circ S$ en latitud, y $70^\circ O$ y $60^\circ O$ en longitud. Esto resulta en una grilla de 5 puntos en latitud \times 6 en longitud (=30 puntos). Estos límites comprenden en realidad una región extendida que definimos en función de los valores de retícula disponibles en la base de datos de este reanálisis. Los datos obtenidos corresponden a valores promedio mensual del promedio diario de radiación solar. Los datos del ERA5 utilizados corresponden a la radiación solar en superficie hacia abajo, ssrd (Surface solar radiation downwards), en (J/m^2), disponibles en:

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>.

Este reanálisis cuenta con una base de datos desde 1940 hasta el presente, y proporciona estimaciones horarias de ssrd con una resolución de latitud-longitud de 0.25° (41 valores de latitud \times 41 valores de longitud=1681 puntos). El ssrd indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal

en la superficie de la Tierra y se refiere la suma de la radiación solar directa y difusa en el plano. Es decir que es equivalente al valor de la radiación que mediría un piranómetro (<https://codes.ecmwf.int/grib/param-db/169>).

Los datos de ssrd se dividieron en 3600, para pasar de (J/m²) a (W/m²). Dado que estos valores corresponden a valores de irradiancia horarios, se estimaron a partir de ellos los valores promedios diarios, seguido del cálculo de los valores promedio mensual.

Los datos de MERRA V2 utilizados corresponden al flujo superficial neto descendente de onda corta, SWGNT (Surface Net Downward Shortwave flux), en (W/m²), que en buena aproximación es equivalente al valor de la radiación que mediría un piranómetro. Estos datos están disponibles en: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2>. La resolución espacial en este caso es de 0.5° en latitud x 0.625° en longitud (21 valores de latitud x 17 valores de longitud=357 puntos). Los datos obtenidos, al igual que en el caso de NCEP/NCAR, corresponden a valores promedio mensual del promedio diario de radiación solar.

Metodología

Para la creación de los atlas se eligió presentar los datos promedios mensuales y anual con la resolución espacial original de cada reanálisis utilizando mapas de colores discretos. Si bien en general los mapas de variables meteorológicas se muestran con curvas de nivel continuas, esto introduce supuestos de interpolación, que pueden no reflejar la variabilidad real de los datos entre los puntos de la grilla, sobre todo cuando hay fuertes gradientes de elevación como es el caso del NOA. Los mapas de colores discretos en cambio, respetan la naturaleza discreta de los datos de la grilla y representa visualmente cada celda de la grilla con un valor constante, evitando la interpolación. Con este tipo de mapas queremos también diferenciar las resoluciones de las tres bases de reanálisis que se analizaron.

Para el análisis comparativo se eligieron tres métodos estadísticos: el error absoluto medio (MAE, por las siglas en inglés de Mean Absolute Error), el error medio relativo (MRE, por las siglas en inglés de Mean Relative Error) y el coeficiente de correlación de Pearson (r)

(Gueymard, 2014; Chicco y Warrens, 2021; Silvero et al., 2023), dados por:

$$MAE = \frac{\sum |y - x|}{n} \quad (1)$$

$$MRE = \frac{\sum (y - x)}{n} * 100 \quad (2)$$

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3)$$

donde x corresponde a los datos de referencia, y a los datos alternativos que se quieren comparar, y n es el número de datos de cada serie.

La comparación en este caso es una comparación de valores promedios considerando la distribución espacial de la radiación. Se consideró como valor de referencia a los datos de radiación de ERA5, basados en un trabajo reciente de comparación de datos de radiación en Tucumán medidos en la ubicación (26.8°S, 65.1°O), en el período 2017-2018, en el cual ERA5 resulta, en función de los mismos estadísticos de comparación, más adecuado que NCEP/NCAR (Silvero et al., 2023).

El MAE mide la magnitud promedio de los errores en el conjunto de datos, sin tener en cuenta su signo, indicando en promedio cuánto difieren las predicciones de los valores reales. Un MAE bajo indica un modelo más preciso. El MRE mide la magnitud promedio de los errores relativos entre las predicciones y los valores reales, usado para evaluar la precisión en términos relativos de un conjunto de datos. El MRE se expresa generalmente como porcentaje. Un MRE positivo además indica sobreestimación de valores, y un valor negativo una subestimación del valor real. El coeficiente de correlación de Pearson, r, mide el grado de linealidad de la asociación entre x e y. Es decir que mide cuan similar es la variación de ambas series. Está limitado entre 1 y -1, donde 1 es el valor óptimo en nuestro caso indicando que ambas variables varían de forma idéntica. Se destaca que, en este caso, la variabilidad es espacial.

Dado que las grillas de los reanálisis considerados no coinciden, previo a estimar los estadísticos se realizó una interpolación bilineal de las grillas de ERA5 y del MERRA V2 para obtener los valores correspondientes en los puntos del grillado de NCEP/NCAR (reanálisis con menor resolución). Es decir que en este estudio n=30.

Resultados

Para mostrar los resultados obtenidos, se eligieron en el caso de los valores mensuales, un mes por estación del año: enero (verano), julio (invierno), abril (otoño) y octubre (primavera). La Fig. 1 muestra los atlas, o mapas, de los valores promedio mensual de la irradiancia solar en superficie para las tres bases de datos de reanálisis. La Fig. 2 muestra los promedios anuales.

En todos los casos se observa un gradiente longitudinal de radiación decreciente de oeste a este esperable en función del gradiente de relieve de la región. En el caso del gradiente latitudinal, decreciente de norte a sur, coincide también con lo que se espera en función del alejamiento respecto del ecuador geográfico a medida que aumenta la latitud.

La Tabla 1 presenta los estadísticos de comparación de los reanálisis NCEP/NCAR R1 y MERRA V2 con ERA5, para el caso de valores mensuales y anual. Se observa claramente que los valores de radiación de MERRA V2 son más comparables con ERA5 que los valores de NCEP/NCAR, los cuales en general sobreestiman los valores de radiación en la región (Silvero et al., 2023). Con respecto a la variabilidad espacial, si bien NCEP/NCAR presenta valores de r superiores a los de MERRA en los meses de invierno, en el promedio anual MERRA nuevamente es más comparable con ERA5.

Conclusiones

En este trabajo se elaboraron mapas de irradiancia solar global en superficie para la región del NOA considerando valores promedios mensual y anual en base a los datos provistos por tres reanálisis: ERA5, MERRA V2 y NCEP/NCAR. Se consideró el período 2000-2023 para estimar los promedios. Se hizo además un análisis comparativo considerando a ERA5 como referencia. Aunque lo ideal sería realizar esta evaluación con datos obtenidos directamente de mediciones, la falta de esos valores en la región nos llevó a usar los datos de este reanálisis como base para la comparación.

En cuanto a la variación espacial, para NCEP/NCAR, los valores de r fluctúan entre 0.72 y 0.90 a lo largo de los meses. En el caso del promedio anual resulta 0.89. Por su parte, MERRA V2 presenta una variación de r entre

0.78 y 0.85, alcanzando el valor 0.89 en el caso del promedio anual, en coincidencia con NCEP/NCAR. Ambos reanálisis muestran un patrón similar en el gradiente de variación latitudinal y longitudinal, lo cual concuerda con la tendencia esperada en la región, donde las elevaciones hacia el oeste y la ubicación al sur del ecuador influyen en la disminución progresiva de la radiación hacia el este y el sur, respectivamente.

En cuanto a los valores absolutos de radiación, MERRA V2 ofrece resultados más cercanos a los de ERA5 en comparación con NCEP/NCAR. Esto se refleja en los valores de MAE y MRE, que son consistentemente menores en todos los meses del año y en el promedio anual, como se evidencia en las Figuras 1 y 2, y en la Tabla 1. Para MERRA V2, el MAE varía entre 20 y 36 W/m^2 , mientras que para NCEP/NCAR se sitúa entre 34 y 60 W/m^2 . El MRE de MERRA V2 es, en promedio, de -5%, frente al 20% de NCEP/NCAR, lo que sugiere una sobreestimación notable de la radiación en la región del NOA por parte de NCEP/NCAR, algo que ya se notó en el trabajo de Silvero et al. (2023).

Con respecto a la disponibilidad de atlas del recurso solar en nuestro país y en la región, existen atlas de radiación solar para Argentina publicados como los provistos por Grossi Gallegos y Righini (2007) y Carmona et al. (2016, 2018), y los disponibles en la red, como por ejemplo el Global Solar Atlas (<https://globalsolaratlas.info/>) del Banco Mundial. Específicamente, para la región del NOA, Laspiur et al. (2013), utilizando los datos de la base satelital SWERA, y Ceballos et al. (2023), con modelo satelital GL1.2, también proveen mapas. En este contexto nuestro trabajo pretende aportar datos adicionales en una región con escasas mediciones. Como trabajo a futuro, además de hacer una validación con una base de datos experimentales lo más denso posible en cuanto a cobertura espacial, y también temporal, se planea hacer un análisis comparativo con los trabajos mencionados, y sobre todo con valores de radiación a partir de mediciones satelitales. También incorporar el análisis de nubosidad y de radiación para condiciones de cielo claro. A pesar de las limitaciones inherentes al uso de reanálisis en lugar de datos observacionales, este análisis sugiere que MERRA V2, junto con ERA5, proporciona estimaciones más precisas de radiación solar en la región del NOA que

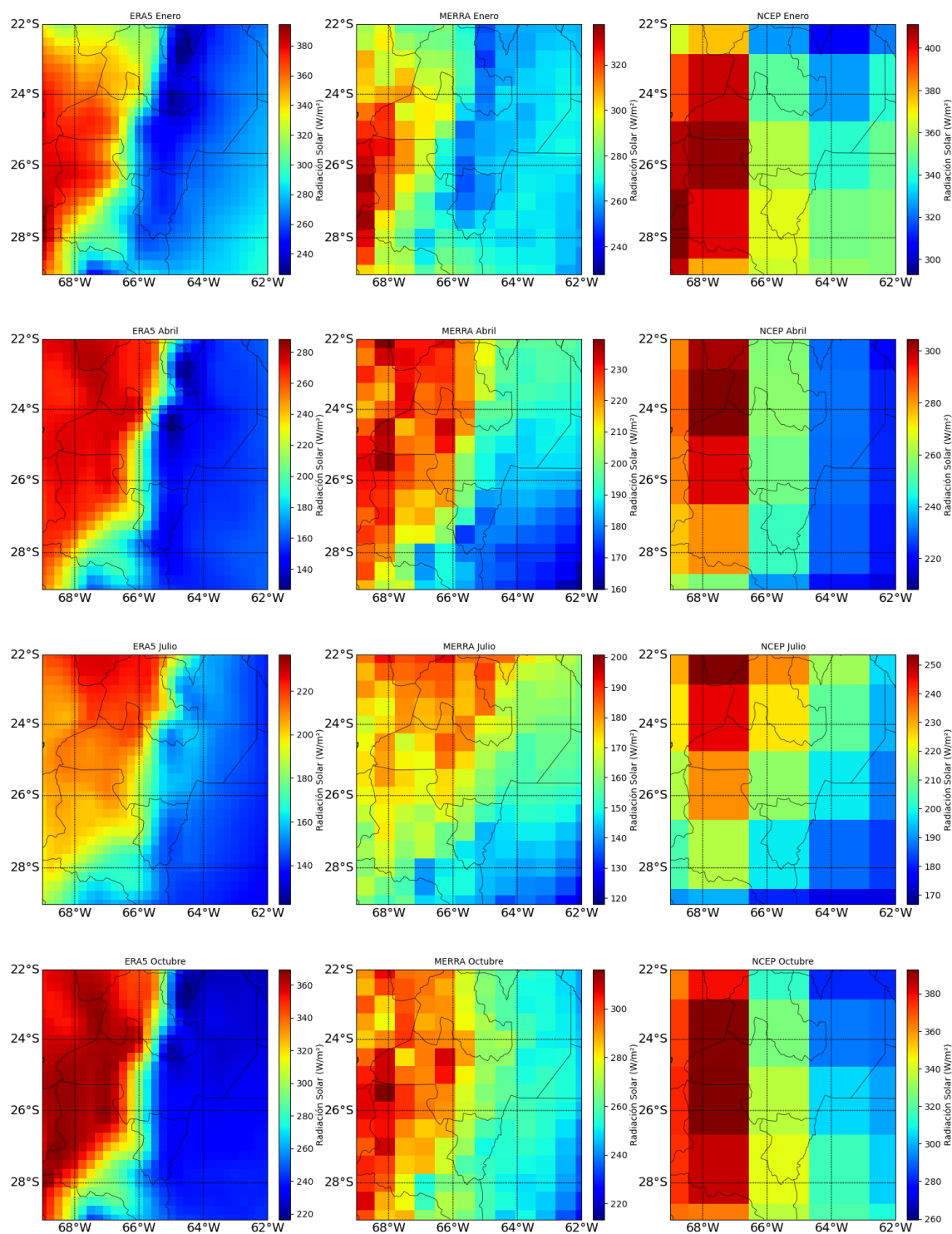


Figura 1: Promedios mensuales de radiación solar en superficie en el período 2000-2023 correspondiente enero (primera fila), abril (segunda fila), julio (tercera fila), y octubre (cuarta fila), utilizando los datos de reanálisis ERA5 (primera columna), NCEP/NCAR R1 (segunda columna) y MERRA V2 (tercera columna).

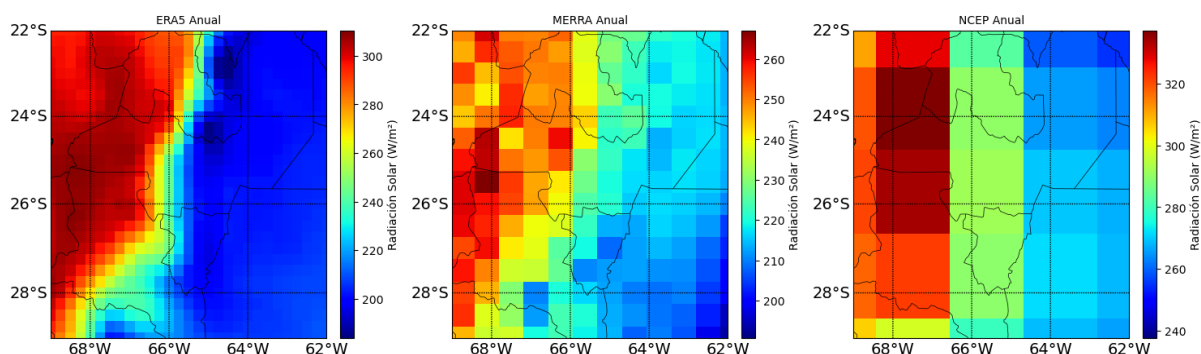


Figura 2: Promedios anuales de radiación solar en superficie en el período 2000-2023 utilizando los datos de reanálisis ERA5 (izquierda), NCEP/NCAR R1 (centro) y MERRA V2 (derecha).

Tabla 1: Estadísticos de comparación (r, MAE y MRE) entre los valores de irradiancia solar promedio en superficie para los meses de enero, abril, julio y octubre, y promedio anual, de las bases de reanálisis NCEP/NCAR R1 y MERRA V2 considerando como referencia los valores de ERA5.

Mes	R ERA5 vs.		MAE (W/m ²) ERA5 vs.		MRE (%) ERA5 vs.	
	NCEP/NCAR	MERRA V2	NCEP/NCAR	MERRA V2	NCEP/NCAR	MERRA V2
Enero	0.72	0.82	54.1	31.1	19.2	-7.2
Abril	0.85	0.85	48.6	28.7	29.2	3.1
Julio	0.89	0.81	35.7	19.9	24.0	-4.5
Octubre	0.83	0.83	49.6	33.4	19.6	-3.7
Anual	0.89	0.89	46.6	22.7	21.4	-4.4

NCEP/NCAR. No obstante, para obtener una validación más exhaustiva, sería necesario incorporar datos medidos en futuros estudios. En conclusión, estos resultados subrayan la relevancia de seleccionar adecuadamente las

bases de datos de reanálisis para estudios relacionados con el clima y la energía, destacando también la importancia de integrar datos observacionales en trabajos futuros para mejorar la precisión de las evaluaciones.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo enmarcado en el Proyecto de UE de INFNOA; PUE 22920200100008CO. Los autores agradecen también el financiamiento provisto por el proyecto PIP 2957.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bosilovich, M.G., Kennedy, J., Dee, D., Allan, R. & O'Neill, A. (2013). On the Reprocessing and Reanalysis of Observations for Climate. In: Asrar, G., Hurrell, J. (eds), Climate Science for Serving Society, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_3

Carmona, F., Orte, F., Rivas, R., Wolfram, E. & Kruse, E.E. (2016). Mapas de radiación solar global de la República Argentina a partir del producto SYN1-CERES, En actas del XVII Simposio Internacional

SELPER 2016. Geotecnologías, herramientas para la construcción de una nueva visión del cambio global y su transformación para un futuro sostenible, Buenos Aires, Argentina, 1-10.

Carmona, F., Orte, P.F., Rivas, R., Wolfram, E. & Kruse, E. (2018). Development and analysis of a new solar radiation atlas for Argentina from ground-based measurements and CERES_SYN1deg data, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Elsevier, 21, 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.003>

Ceballos, J.C., Forciniti, J.D. & Molina, M.L. (2023). Algunas características del régimen de radiación solar global en el noroeste argentino, período 2017-2021. Avances en Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA, 26, 345–356. Disponible en <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/3848>

Chicco D., Warrens M.J. & Jurman G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation, PeerJ Computer Science, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>

Grossi Gallegos, H. & Righini, R. (2007). *Atlas de Energía Solar de la República Argentina*, SECYT-UNLu, Argentina. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/317478062_Atlas_de_Energia_Solar_de_la_Republica_Argentina

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>

Kalnay, E., Kanamitsu M., Kistler, R., Collins, W. et al. (1996). The NCEP/NCAR 40- year reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 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)

Laspiur, R., Salazar, G.A., Zerpa, J. & Watkins, M. (2013). Trazado de mapas medios anuales de energía solar global, directa, difusa y tilt, usando la base de datos de SWERA. Caso de estudio: provincias de Salta y Jujuy, Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA, 17, 47–52.

Morales-Moraga, D., Meza, F.J., Miranda, M. & Gironás, J. (2019). Spatio-temporal estimation of climatic variables for gap filling and record extension using Reanalysis data. Theoretical and Applied Climatology, 137, 1089–1104. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2653-8>

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>

Silvero, C., Medina, F.D., Zossi, B.S., Mansilla, G.A., Heredia, T., Nollas, F. & Elias, A.G. (2023). Comparación entre datos de radiación solar global de Tucumán (26.8°S, 65.1°O) y la base de datos de reanálisis ERA5. Actas de Trabajos Completos Encuentro del E-ICES 18, Decimotavo Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra, Malargüe, Mendoza, 21 al 24 de noviembre de 2023, 240-246.

Zhang, X., Liang, S., Wang, G., Yao, Y., Jiang, B. & Cheng, J. (2016). Evaluation of the Reanalysis Surface Incident Shortwave Radiation Products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA Using Satellite and Surface Observations. Remote Sens., 8, 225. <https://doi.org/10.3390/rs8030225>

Zhang, X., Lu, N., Jiang, H. et al. (2020). Evaluation of Reanalysis Surface Incident Solar Radiation Data in China. Scientific Reports 10, 3494. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60460-1>

AUTORES

SILVERO, Cristóbal

Es Ingeniero Industrial (FACET, UNT), estudiante del Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería (FACET, UNT), y becario doctoral CONICET enmarcado en el PUE de INFNOA 22920200100008CO (Estudio del recurso solar en el NOA y su aprovechamiento mediante dispositivos semiconductores). Su tema de investigación es "Variabilidad y modelado de la radiación solar en la región del NOA aplicados al aprovechamiento energético".

cristobalivansilvero@gmail.com

MEDINA, Franco

Es Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería (FACET, UNT). Es docente de la FACET y becario postdoctoral CONICET en INFNOA (CONICET-UNT). Su tema de investigación es "Cambios observados y proyectados en la precipitación extrema en el Sudeste de Sudamérica y su asociación con los patrones sinópticos".

fdmedina@herrera.unt.edu.ar

ZOSSI, Bruno

Es Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería (FACET, UNT). Es Investigador Asistente de CONICET en INFNOA (CONICET-UNT).

bzossi@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0002-4197-7876

ELÍAS, Ana

Es Doctora en Física de la UNT. Es Investigadora Principal de CONICET en INFNOA (CONICET-UNT) y Profesora de Física Estadística I y II en la carrera de Licenciatura en Física de la FACET, UNT.

aelias@herrera.unt.edu.ar. ORCID  0000-0001-6271-4891