

## EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL HELIOSAT-4 Y MCCLEAR EN DOS SITIOS DE ARGENTINA

### EVALUATION OF THE HELIOSAT-4 AND MCCLEAR MODELS FOR SOLAR GLOBAL IRRADIATION ESTIMATE AT TWO SITES IN ARGENTINA

A. R. Lusi<sup>\*1,2</sup>, F. Orte<sup>1,2</sup>, R. Alonso Suárez<sup>3</sup>, R. D'Elía<sup>1</sup> y E. Wolfram<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) Godoy Cruz 2290 – (C1425FQB) CABA – Argentina

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones CEILAP (CITEDEF-CONICET) Juan Bautista de La Salle 4397 – (B1603ALO) Villa Martelli – Prov. Buenos Aires – Argentina

<sup>3</sup>Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, UDELAR, Montevideo – Uruguay

<sup>4</sup>Servicio Meteorológico Nacional (SMN) Av. Dorrego 4019 – (C1425GBE) CABA – Argentina

Recibido: 27/03/2023; Aceptado: 09/06/2023

La información de radiación solar estimada por satélite es necesaria para la evaluación del riesgo financiero de proyectos de energía solar en emplazamientos arbitrarios. Estas estimaciones deben ser evaluadas contra mediciones terrestres de calidad para asegurar la confiabilidad de la información. En este trabajo, las estimaciones 15-minutales de Irradiancia Global Horizontal (GHI) del modelo Heliosat-4 para toda condición de cielo y del modelo McClear para condición de cielo despejado fueron evaluados contra mediciones terrestres en dos estaciones de la red Saver-Net (<http://www.savernet-satreps.org>): Pilar (Córdoba) y Villa Martelli (Buenos Aires). La determinación de los periodos despejados se realizó a partir de las mediciones, utilizando un índice de la claridad del cielo y la variabilidad entre mediciones consecutivas a escala minuter. Se encontró un sesgo próximo a -5,5 % para el modelo Heliosat-4 en los dos sitios evaluados y de 1,15 % y -0,73 % para el modelo McClear en Pilar y Villa Martelli, respectivamente. Además, el desvío cuadrático medio relativo (rRMSD) para el modelo McClear arrojó un valor cercano al 2 % y el modelo Heliosat-4 resultó en aproximadamente un 20 % en ambos sitios.

*Palabras Clave:* GHI, CAMS, Radiación solar, Red Saver-Net.

Satellite-derived solar radiation information is necessary for assessing the financial risk of solar energy projects at arbitrary locations. These estimates must be evaluated against high-quality ground measurements to ensure the reliability of the information. In this work, 15-minute Global Horizontal Irradiance (GHI) data from the Heliosat-4 model for all-sky conditions and the McClear model for clear-sky conditions were evaluated against ground-based measurements at two Saver-Net stations (<http://www.savernetsatreps.org>): Pilar (Córdoba) and Villa Martelli (Buenos Aires). Clear sky detection of the measurements was done using the modified clarity index and analysing the variability of consecutive measurements. A bias close to -5.5 % was found for the Heliosat-4 model at both sites and 1.15 % and -0.73 % for the McClear model in Pilar and Villa Martelli, respectively. Furthermore, the relative root mean square error (rRMSD) was 2 % and 20 % for the McClear and Heliosat-4 models, respectively at both sites.

*GHI, CAMS, Solar radiation, Saver-Net network.*

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2023.34.3.76>



ISSN 1850-1168 (online)

## I. INTRODUCCIÓN

La capacidad instalada mundial de sistemas solares fotovoltaicos ha crecido en forma sostenida durante los últimos 20 años. La generación de energía solar no cesa en su crecimiento y un factor crucial por sobre otras tecnologías ha sido su rápida reducción de costos durante la última década, dando mayor competitividad sobre otros tipos de energías renovables [1]. Argentina cuenta con un recurso excepcional en la región del Noroeste y Cuyo, con un promedio de más de 2000 kWh/m<sup>2</sup> de irradiación global horizontal al año, e incluso fuera de esa región, presenta una disponibilidad de recurso solar más que aceptable si se lo compara con otros países con alto desarrollo fotovoltaico como Japón, Vietnam, Ucrania, Alemania y Corea del Sur [2]. Diversas políticas públicas adoptadas en el país acompañan el creci-

miento de la energía solar [3], sin embargo, la incorporación de grandes volúmenes a la matriz de producción implica un desafío para la administración del sistema eléctrico.

Los proyectos de energía solar demandan una gran inversión por lo que se requiere una evaluación de recurso confiable. Es decir, los inversores deben contar con datos fiables de radiación solar, entre otros aspectos, para poder predecir con precisión el rendimiento de una planta y su riesgo financiero [4, 5]. La información de radiación solar basada en mediciones satelitales es una herramienta necesaria para evaluar el recurso en emplazamientos arbitrarios, pero en ausencia de verificación contra medidas en tierra de calidad controlada cercanas al sitio específico carecen de la confiabilidad, lo que puede conducir a una estimación imprecisa de la producción media esperada de la planta y de su potencial flujo de caja. En este sentido, la comparación con mediciones de tierra es necesaria.

\* anabelalusi@gmail.com

Se pueden diferenciar tres categorías de modelos satelitales para la estimación de la irradiación solar: los modelos estadísticos o empíricos, los modelos físicos y los modelos híbridos. Los modelos empíricos son aquellos que dependen de una serie de parámetros ajustables a partir de datos registrados en superficie. Los modelos físicos intentan describir en detalle o a través de diferentes aproximaciones los procesos de transferencia radiativa en el sistema Tierra-Atmósfera. Para ello requieren un conocimiento detallado del estado de la atmósfera y su composición local, y su desempeño depende de la calidad con que se conozcan estas variables. Tal información no siempre está disponible, lo cual es una de sus principales desventajas. Además, los modelos físicos más detallados son muy intensivos computacionalmente como para ser usados en tiempo real (no operacionales). La mayor ventaja de estos modelos frente a los estadísticos es que son más factibles de ser aplicados sobre un territorio en el cual no se cuenta con buenos datos medidos como para realizar un ajuste local. En contraposición, los modelos empíricos requieren pocas variables de entrada y usualmente son más simples, y potencialmente más precisos sobre un territorio, si se cuenta con medidas de calidad [6]. Los modelos híbridos utilizan una base física pero algunos coeficientes deben ajustarse estadísticamente a las mediciones del terreno, por lo que se encuentran en una categoría intermedia. En este trabajo se aborda la evaluación local de un modelo de naturaleza física, cuyas estimaciones están disponibles para descarga en el portal del Copernicus Atmosphere Monitoring (CAM5) [7].

Para evaluar modelos en condiciones de cielo despejado se requiere implementar una estrategia de filtrado para dicha condición. Existen diferentes metodologías para determinar los períodos de cielo despejado desde mediciones de radiación en superficie [8], ya sea mediante inspección visual de los registros [9], discretización a través de un valor umbral del índice de claridad ( $k_t$ ) [10-16], es decir, de la relación GHI y la irradiancia extraterrestre en un plano horizontal, relación entre la irradiancia difusa y global [17] o a través de un valor umbral en la Turbidez de Linke [18, 19], entre otros. Perez y otros modificaron el  $k_t$  para evitar la dependencia con la altura solar y utilizarlo como un indicador más confiable de la condición de cielo, lo que se conoce como índice de claridad modificado ( $k_t^*$ ) [20]. Este índice se calcula a partir de la relación de  $k_t$  y de la masa de aire (m) [21] como:

$$k_t^* = \frac{k_t}{1,031 \times \exp\left(\frac{-1,4}{0,9 + \frac{9,4}{m}}\right) + 0,1} \quad (1)$$

A partir de  $k_t^*$ , Ineichen [22] definió tres zonas para caracterizar la condición de cielo en promedios de rango 10-minutal: cielo claro ( $0,65 < k_t^* \leq 1$ ), intermedio ( $0,30 < k_t^* \leq 0,65$ ) y nuboso ( $0 < k_t^* \leq 0,30$ ). No obstante, en este trabajo la discriminación se realizará a escala minutal, por lo que el enfoque anterior no es suficiente, y debe además agregarse la variabilidad local de la serie para realizar la categorización.

El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño de las estimaciones 15-minutales de GHI disponibles públi-

camente en el CAM5. Se evalúa el modelo McClear [23] para condiciones de cielo despejado y el modelo integrado Heliosat-4 ante toda condición de cielo [24]. La evaluación se realiza en dos estaciones de la red de radiación solar Saver-Net [25]: Pilar (Córdoba, Argentina) y Villa Martelli (Buenos Aires, Argentina). Este artículo está organizado de la siguiente manera: la Sec. II describe los sitios de estudio correspondientes a la red de monitoreo y el procesamiento de los datos. La Sec. III describe las características de los modelos evaluados y presenta las métricas de desempeño utilizadas. Por último, la Sec. IV presenta los resultados y la discusión, y la Sec. V las conclusiones.

## II. MEDICIONES TERRESTRES

Las mediciones terrestres de GHI corresponden a Pilar (Córdoba): 31,68°S, 63,87°O, 330 m s.n.m. y Villa Martelli (Buenos Aires): 34,58°S, 58,48°O, 25 m s.n.m.. La ciudad de Pilar se encuentra ubicada al sudeste de la ciudad de Córdoba, en la región centro de Argentina, mientras que Villa Martelli se encuentra en la zona norte del Gran Buenos Aires, provincia de Buenos Aires, situada en la región centro-este de Argentina. Los datos fueron registrados con piranómetros Kipp&Zonen CMP-21 en el rango de onda corta en un plano horizontal con un tiempo de adquisición de un minuto. La incertidumbre típica reportada para estos instrumentos es menor a  $\pm 2\%$  para los totales diarios [26]. El análisis se realizó durante el periodo 2019-2020.

Para asegurar la calidad del conjunto de datos se realizaron diferentes análisis. Por un lado, las medidas de altura solar menores a 7° fueron descartadas del set de datos, ya que representan una porción del día donde los valores de GHI son bajos, y la incertidumbre relativa de la medida es más alta, por lo que se suelen descartar para fines de evaluación de modelos. Por otro lado, se inspeccionaron las series temporales con el fin de detectar periodos defectuosos. Además, se examinaron los valores de GHI y  $k_t$  con el ángulo cenital y se realizaron diagramas solares con el objetivo de hallar y descartar muestras alteradas por la presencia de sombra.

Para la selección de periodos de cielo claro en el set de datos terrestres, se calculó el  $k_t^*$  y la variabilidad entre las muestras ( $\sigma = std(\Delta k_t^*)$ ), para un entorno de  $\pm 2$  muestras de la muestra objetivo). Las mediciones en la zona de  $0,65 < k_t^* \leq 1$  y baja variabilidad ( $\sigma < 0,01$ ) fueron seleccionadas. De esta forma se detectaron los minutos despejados en las mediciones. Luego, en los periodos 15-minutales de detección de cielo claro consecutivo, se realizó un promedio para obtener un valor medio correspondiente a la ventana temporal, y así poder realizar la comparación con el modelo McClear.

## III. MODELOS Y MÉTRICAS

Las estimaciones de GHI para condición de cielo despejado se obtuvieron mediante el método McClear, que computa irradiaciones directas y globales de onda corta a nivel de superficie. El McClear es un modelo físico que utiliza las propiedades de los aerosoles, el vapor de agua y la columna total de ozono producidos por el proyecto MACC (Monitoring Atmosphere Composition and Climate) como insumo para la simulación de transferencia radiativa en la

atmósfera a través del libRadtran [27, 28]. El portal del CAMS (<https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-mcclear>) ofrece cobertura geográfica mundial y frecuencia temporal de 1 minuto, 15 minutos, 1 hora, 1 día y 1 mes. La evaluación en este trabajo se realizó a escala 15-minutal.

Las estimaciones de GHI para toda condición de cielo se generaron con el método Heliosat-4. Este método proporciona la irradiación global y sus componentes directa y difusa en plano horizontal. Es un modelo físico que se compone de dos sub-modelos: el modelo McClear (presentado con anterioridad) y el modelo McCloud que agrega al anterior el efecto de la nubosidad. Al igual que el McClear, está basado en el modelo de transferencia radiativa libRadtran. La información sobre nubosidad se deriva de las imágenes del satélite Meteosat de Segunda Generación (MSG) en una resolución temporal de 15 minutos [23]. El CAMS (<https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>) ofrece para estos datos igual cobertura geográfica que el campo de visión del satélite MSG, es decir, en términos generales, Europa, África, Océano Atlántico, Oriente Medio y parte de Sudamérica (-66° a 66° en ambas latitudes y longitudes). La información está disponible desde el 01/02/2004 hasta dos días antes a la fecha de consulta. Al igual que para el modelo McClear los datos de GHI para toda condición de cielo pueden obtenerse con una frecuencia de 1 minuto, 15 minutos, 1 hora, 1 día y 1 mes. En este trabajo se utilizaron los datos de escala 15-minutal.

Para la evaluación de los modelos se utilizaron tres métricas de rendimiento principales: el desvío promedio o sesgo (MBD), el desvío cuadrático medio (RMSD) y el desvío medio absoluto (MAD). La primera métrica mide el sesgo sistemático de las estimaciones en comparación con las mediciones, mientras que las otras dos métricas miden la dispersión de las desviaciones con distinta ponderación. Además, por completitud, se analizó el coeficiente de correlación de Pearson (R).

El MBD, RMSD y MAD se definen como:

$$\text{MBD} = \frac{1}{N} \sum_i^N e_i \quad (2)$$

$$\text{RMSD} = \left[ \frac{1}{N} \sum_i^N e_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\text{MAD} = \frac{\sum_i^N |e_i|}{N} \quad (4)$$

donde  $N$  es el número de pares de medidas ( $y_i$ ) y estimativos ( $\hat{y}_i$ ), y  $e_i$  son los residuos  $\hat{y}_i - y_i$ . Estos indicadores pueden expresarse en términos relativos (rMBD, rRMSD y rMAD) como porcentaje de la media de las medidas  $\langle y_i \rangle$ .

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 presenta las métricas de desempeño obtenidas en la evaluación de los modelos McClear y Heliosat-4 en los dos sitios de estudio.

El modelo McClear presenta una alta correspondencia con las mediciones terrestres de cielo despejado. La Fig. 1 (a,b) muestra los gráficos de dispersión de la comparación

TABLA 1: Resultados de las métricas de desempeño.

Métricas	McCclear		Heliosat-4	
	Pilar	Villa Martelli	Pilar	Villa Martelli
N	152529	149590	29551	31065
rMBD (%)	1,15	-0,73	-5,38	-6,00
rRMSD (%)	2,15	2,33	21,01	19,25
rMAD (%)	1,69	1,84	13,69	13,1
R	1,00	1,00	0,95	0,96

modelo-medición y el ajuste lineal obtenido, donde se observa una dispersión baja y valores de pendiente de 1,01 y 0,99, y de ordenada al origen de 4,12 y 3,82 para Pilar y Villa Martelli, respectivamente. La mayoría de las observaciones se encuentran alrededor de la línea de ajuste perfecto ( $x=y$ ), y la dispersión en esa zona es baja. Se observa un muy buen desempeño del modelo con valores porcentuales de sesgo y desvío cuadrático medio bajos y similares para ambos sitios. Pilar presenta un valor de rMBD de 1,15% y un rRMSD de 2,15%, mientras que en Villa Martelli se observa un rMBD de -0,73% y un rRMSD de 2,33%. El rMAD también presenta valores bajos y similares para Pilar y Villa Martelli (1,69% y 1,84% respectivamente). En ambos sitios se observa una muy buena correlación con valores de  $R=1,00$ . Los valores de rRMSD obtenidos ( $\sim 2,33\%$ ) están por debajo de los reportados en evaluaciones previas en la región (3-5%) [29] realizadas en condición de cielo despejado para un minuto en varias estaciones de la Baseline Surface Radiation Network (BSRN) [30], mientras que el coeficiente de correlación presenta una leve mejora. El mejor desempeño encontrado aquí está asociado a una discriminación minuciosa de las condiciones de cielo claro en base a la medida minutal. El procedimiento basado en  $k_t^*$  y sigma asegura que ningún minuto con nubosidad ingresa en el promedio 15-minutal, algo que trabajos previos no realizan. Este resultado sugiere que la calidad de la detección de las muestras despejadas es un factor importante en la evaluación de este tipo de modelos, y es un aspecto interesante para trabajo futuro.

La evaluación del modelo Heliosat-4 para condición de todo cielo también muestra un buen desempeño en las dos estaciones estudiadas. La Fig. 1 (c) y (d) presenta los gráficos de dispersión de la comparación modelo-medición. En este caso, la mayoría de los puntos de color que indican la densidad de datos también se encuentran cercanas a la línea  $x=y$ . Como es de esperar, la correspondencia entre los valores disminuye cuando se incluye la nubosidad, presentando una mayor dispersión que la evaluación del modelo McClear. La comparación presenta desvíos negativos, con valores de rMBD de -5,38% y -6,00%, y rRMSD de 21,01% y 19,25% para Pilar y Villa Martelli, respectivamente. El rMAD obtenido es de 13% aproximadamente para ambos sitios. Comparaciones previas de las estimaciones de Heliosat-4 con mediciones terrestres en 13 estaciones de la BSRN que se ubican en el campo de visión del MSG y realizadas para distintas regiones climáticas han sido reportadas por el CAMS. Estas evaluaciones han presentado valores de rRMSD entre 15% y 20% para estaciones en climas desérticos y mediterráneos, y entre el 26% y 43% en climas lluvioso con inviernos suaves para frecuencias tem-

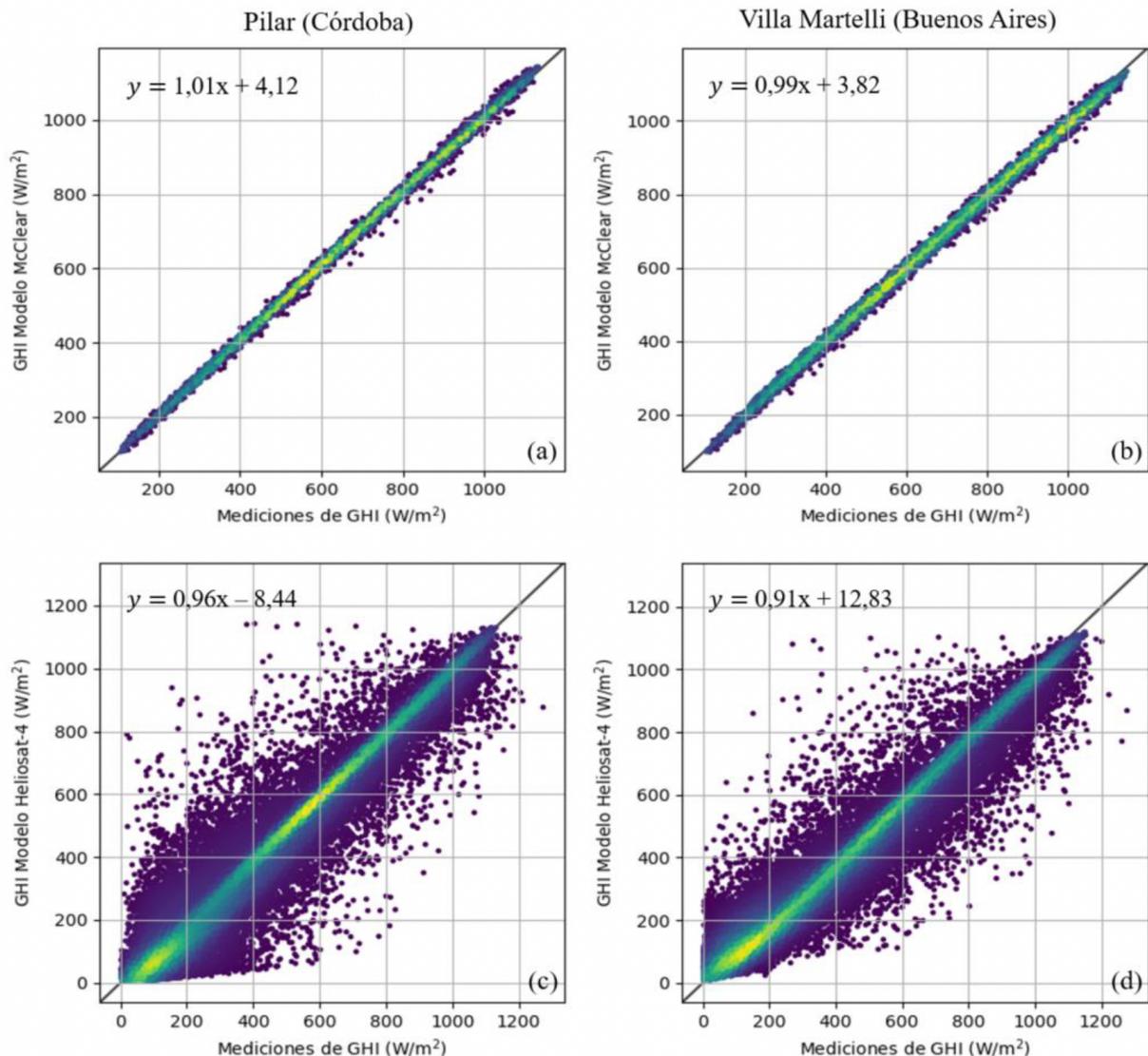


FIG. 1: Diagramas de dispersión para los estimativos de los modelos McClear (arriba) y Heliosat-4 (abajo) contra mediciones terrestres en los sitios de Pilar (izquierda) y Villa Martelli (derecha) de la red Saver-Net. La línea negra representa la recta  $x=y$  mientras que la escala de color indica la densidad de puntos de las mediciones de GHI. Los colores más brillantes indican una alta densidad y los más oscuros una menor densidad de muestras.

porales de 15 minutos [23]. Los coeficientes de correlación reportados varían entre 0,91 y 0,97. Además, trabajos de comparaciones a escala 10-minutal en la región [31] indican un rRMSD de alrededor del 21%. Por lo tanto, los valores obtenidos de desempeño en las estaciones de Pilar y Villa Martelli están en correspondencia con los valores de evaluaciones previas.

## V. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la evaluación de desempeño de las estimaciones de GHI del modelo de cielo claro McClear y del modelo de todo cielo Heliosat-4 a través de la comparación con datos de tierra en dos sitios de la región centro-este de Argentina. El análisis se realizó para datos 15-minutales durante los años 2019 y 2020. En ambos sitios la precisión alcanzada por los modelos McClear y Heliosat-4 es buena y las métricas muestran un buen desempeño.

El rRMSD obtenido para la comparación entre el modelo McClear y datos de tierra en condición de cielo despe-

jado resultó del orden de 2% en ambos sitios. El modelo Heliosat-4 reportó un rRMSD del orden del 20% en ambos sitios, un valor también aceptable para la condición de todo cielo. El rendimiento de los modelos en las dos ciudades estudiadas es comparable a los reportados por CAMS para otras regiones y a los encontrados en evaluaciones en otros sitios de la región.

La verificación de información de radiación solar basada en satélites con mediciones terrestres controladas es fundamental ya que habilita a utilizar la información satelital en sitios arbitrarios dentro de la región evaluada, siendo información de incertidumbre caracterizada para inversiones en proyectos de energía solar. A futuro, este análisis se puede profundizar extendiendo la región de análisis a todos los sitios de la red Saver-Net que cubren una amplia extensión del territorio argentino y abarcan diferentes zonas climáticas, y adaptando localmente los estimativos de los modelos a las medidas a través de técnicas de postproceso. Además, se espera incorporar la evaluación de otros modelos de GHI

basados en información satelital al análisis, apuntando hacia un benchmarking nacional.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) por el financiamiento del proyecto Saver-Net y a las instituciones SMN y CITEDEF por el mantenimiento y operación en los nodos de monitoreo de la red. Este trabajo cuenta con la financiación de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en el marco del proyecto PICT-2020-SERIEA-02601. Anabela Rocío Lusi es estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud (DCAAS, UNICEN, Argentina).

## REFERENCIAS

- [1] R. IRENA OECD/IEA. *Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling* inf. téc. (International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2021)).
- [2] *Global Market Outlook for solar power 2021-2025* inf. téc. (SolarPower Europe, 2021).
- [3] *Energías Renovables 2022: se cubrió el 13,9% de la demanda y se inauguraron 8 proyectos por más de 47 MW de potencia instalada* [Argentina.gob.ar](http://Argentina.gob.ar). Ministerio de Economía Argentina. 2023.
- [4] M. Schnitzer, C. Thuman y P. Johnson. *The impact of solar uncertainty on project financeability: Mitigating energy risk through on-site monitoring* en *In Proceedings of the American Solar Energy Society (ASES)* (Denver, Colorado, United States, 2012), 1-5.
- [5] A. C. McMahan, C. N. Grover y F. E. Vignola. Evaluation of resource risk in solar-project financing. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, 81-95 (2013).
- [6] R. Alonso-Suárez. *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales* Tesis doct. (Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2017).
- [7] *Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)* <http://atmosphere.copernicus.eu/>. 2023.
- [8] M. Alia-Martinez, J. Antonanzas, R. Urraca, F. J. Martinez-de-Pison y F. Antonanzas-Torres. Benchmark of algorithms for solar clear-sky detection. *J. Renew. Sustain. Energy* **8** (2016).
- [9] Y. Zhang, X. Li e Y. Bai. An integrated approach to estimate shortwave solar radiation on clear-sky days in rugged terrain using MODIS atmospheric products. *Solar Energy* **113**, 347-357 (2015).
- [10] J. C. Lam y D. H. W. Li. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components. *Build. Environ.* **31**, 527-535 (1996).
- [11] C. C. Y. Ma y M. Iqbal. Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces. *Solar Energy* **31**, 313-317 (1983).
- [12] B. Y. H. Liu y R. C. Jordan. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* **4**, 1-19 (1960).
- [13] A. P. Oliveira, J. F. Escobedo, A. J. Machado y J. Soares. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Appl. Energy* **71**, 59-73 (2002).
- [14] A. de Miguel, J. Bilbao, R. Aguiar, H. Kambezidis y E. Negro. Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area. *Solar Energy* **70**, 143-153 (2001).
- [15] D. T. Reindl, W. A. Beckman y J. A. Duffie. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* **45**, 1-7 (1990).
- [16] J. Chandrasekaran y S. Kumar. Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location. *Solar Energy* **53**, 505-510 (1994).
- [17] R. Rahim, Baharuddin y R. Mulyadi. Classification of daylight and radiation data into three sky conditions by cloud ratio and sunshine duration. *Energy Build.* **36**, 660-666 (2004).
- [18] S. Younes y T. Muneer. Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data-base. *Appl. Energy* **84**, 623-645 (2007).
- [19] C. Rigollier, O. Bauer y L. Wald. On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas — with respect to the heliosat method. *Solar Energy* **68**, 33-48 (2000).
- [20] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals y A. Zelenka. Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy* **45**, 111-114 (1990).
- [21] F. Kasten y A. T. Young. Revised optical air mass tables and approximation formula. *Appl. Opt.* **28**, 4735 (1989).
- [22] P. Ineichen, C. S. Barroso, B. Geiger, R. Hollmann, A. Marsouin y R. Mueller. Satellite Application Facilities irradiance products: hourly time step comparison and validation over Europe. *Int. J. Remote Sens.* **30**, 5549-5571 (2009).
- [23] Z. Qu, A. Oumbe, P. Blanc, B. Espinar, G. Gesell, B. Gschwind, L. Klüser, M. Lefèvre, L. Saboret, M. Schroedter-Homscheidt y L. Wald. Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift* **26**, 33-57 (2017).
- [24] M. Lefèvre, A. Oumbe, P. Blanc, B. Espinar, B. Gschwind, Z. Qu, L. Wald, M. Schroedter-Homscheidt, C. Hoyer-Klick, A. Arola, A. Benedetti, J. W. Kaiser y J.-J. Morcrette. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmos. Meas. Tech.* **6**, 2403-2418 (2013).
- [25] F. Orte, E. Wolfram, E. Luccini, R. D' Elia, A. Lusi, J. Pallota, F. Nollas, F. Carmona, S. Papandrea, M. Cabezas, B. G. Carbajal y A. Mizuno. Saver-Net UV-total solar irradiance monitoring network in Argentina. *Revista Meteorológica* **47**, e016 (2022).
- [26] *CMP21 Piranómetros Secundarios Estándares* <https://www.kippzonen.es/Product/211/CMP21-Piranometro>.
- [27] C. Emde, R. Buras-Schnell, A. Kylling, B. Mayer, J. Gastegger, U. Hamann, J. Kylling, B. Richter, C. Pause, T. Dowling y L. Bugliaro. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geosci. Model Dev.* **9**, 1647-1672 (2016).
- [28] B. Mayer y A. Kylling. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.* **5**, 1855-1877 (2005).
- [29] A. Laguarda, G. Giacosa, R. Alonso-Suárez y G. Abal. Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda. *Solar Energy* **199**, 295-307 (2020).

- [30] A. Ohmura, H. Gilgen, H. Hegner, G. Müller, M. Wild, E. G. Dutton, B. Forgan, C. Fröhlich, R. Philipona, A. Heimo, G. König-Langlo, B. McArthur, R. Pinker, C. H. Whitlock y K. Dehne. Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79**, 2115-2136 (1998).
- [31] A. Laguarda, P. Iturbide, X. Orsi, M. Denegri, S. Luza, B. Burgos, V. Stern y R. Alonso-Suárez. Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente* **48**, 1-9 (2021).