



MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL DE LA REPUBLICA ARGENTINA A PARTIR DEL PRODUCTO SYN1-CERES

Carmona, F.^{1,2}, Orte, P.F.³, Rivas, R.^{1,4}, Wolfram, E.^{2,3} y Kruse, E.²

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 7000 Tandil, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina

³ CEILAP-UNIDEF (CITEDEF-CONICET) Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina

⁴ Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), Buenos Aires, Argentina

facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar

RESUMEN

Hoy en día, poder cuantificar la radiación solar global a nivel de superficie en la Argentina es fundamental para proyectos de desarrollo de energía solar, cálculos de evapotranspiración, proyectos de arquitectura eco-sustentable, entre otros fines ambientales. Para ello, básicamente es posible seguir dos caminos: 1) contar con una amplia red de estaciones solarimétricas que midan la radiación solar global en superficie e interpolar los valores registrados, o 2) utilizar datos de satélite para obtener mapas de todo el país y validar con un número reducido de sitios de medida en tierra. En el presente trabajo se optó por la segunda opción, es decir, desarrollar mapas de la radiación solar global mensual promedio de la Argentina generados a partir de un producto de satélite. Para obtener los mapas se utilizó una serie de 16 años de datos del producto SYN1-CERES (2000 - 2015), el cual provee valores promedio espacial y temporal de flujos de radiación y características de las nubes. Con el objetivo de validar los datos de radiación solar global del producto SYN1-CERES, estos fueron comparados con mediciones en tierra registradas en cuatro sitios de monitoreo del proyecto SAVER-Net y otro conjunto de datos registrados en Tandil por el Grupo de Teledetección del IHLLA (GT-IHLLA). Los mapas elaborados muestran la variación espacio-temporal de la radiación solar global en la Argentina. Las comparaciones con los pirómetros solares en superficie muestran diferencias relativas del orden del 10% a escala diaria y de tan solo 3% a escala mensual, y prácticamente sin sesgo. A modo de conclusión, es posible afirmar que los mapas que se presentan en este trabajo servirán de gran ayuda para diferentes propósitos científico-técnicos, donde las comparaciones con datos registrados en tierra evidencian la utilidad y fiabilidad del producto CERES utilizado.

PALABRAS CLAVE: TELEDETECCIÓN, PRODUCTO SYN1-CERES, RADIACIÓN SOLAR GLOBAL, PROYECTO SAVER-NET

ABSTRACT

Nowadays, being able to quantify the global solar radiation at surface in Argentina, it is crucial for the development of projects related with solar energy, calculation of evapotranspiration, eco-

sustainability architecture projects, among other environmental issues. Thus, it is possible to follow two ways for carrying out these kind of studies: 1) analyze a wide ground based solar radiation network spread along our country that allow a geographical interpolation to cover the whole country, or 2) use satellite data to obtain global solar radiation maps and validate these product with a few number of ground based solar instruments to ensure the reliability of that product. In this work, we have chosen the second way, to studying the global solar radiation in Argentina by mean of the development of maps of the monthly average global solar radiation using satellite products, specifically, using the SYN1-CERES product since 2000 to 2015 (16 years), which provides spatial and temporal average values of radiation fluxes and cloud characteristics. With the aim to validate the CERES data of global solar radiation, these were compared with ground based measurements in the time overlap of both instruments, in four monitoring sites of the SAVER-Net project and an additional site established in Tandil, which belongs to the Grupo de Teledetección del IHLLA (GT-IHLLA). The developed maps show the spatial and temporal variation of global solar radiation in Argentina. Comparisons with ground based pyranometers present relative differences of around 10% at daily scale and only 3% at monthly scale for all sites, while the biases can be neglected. Therefore, it is possible to conclude that the developed maps could be very useful for different technical and scientific purposes, and the comparison with ground based data demonstrates the reliability of SYN1-CERES product used.

KEYWORDS: REMOTE SENSING, SYN1-CERES PRODUCT, GLOBAL SOLAR RADIATION, SAVER-NET PROJECT

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, poder cuantificar la radiación solar global a nivel de superficie en la Argentina es fundamental para proyectos de desarrollo de energía solar, cálculos de evapotranspiración, proyectos de arquitectura eco-sustentable, entre otros fines ambientales. Para ello, básicamente es posible seguir dos caminos, contar con una amplia red de estaciones solarimétricas que midan la radiación solar global en superficie e interpolar los valores registrados, o utilizar datos de satélite para obtener mapas de todo el país y validar la información con un número reducido de sitios de medida en tierra.

En el primer caso, en Argentina existen varios trabajos para cuantifican la radiación solar en superficie, los cuales principalmente utilizan datos de terreno e interpolación para generar mapas sobre el territorio argentino. En éste sentido, un interesante trabajo fue desarrollado por el Dr. Hugo Grossi Gallegos el cual presentó un Atlas de radiación solar en superficie a partir de la interpolación de datos registrados en terreno (Grossi Gallegos (1998), Grossi Gallegos y Righini (2007)). Para éste tipo de trabajos es necesario contar con una amplia red de estaciones de terreno, lo cual es costoso de mantener. Además, dadas las características del extenso territorio argentino y la distribución de las nubes, los métodos de interpolado no aseguran un producto de calidad en zonas con baja densidad de estacones.

En segundo lugar, existe la posibilidad de utilizar datos de satélite para generar mapas con una mejor representación espacial, siendo de gran utilidad en zonas con baja o nula densidad de



medidas de terreno. En esta línea se lleva a cabo el presente trabajo, donde los objetivos son **(a)** validar el producto de satélite SNY1-CERES de *radiación solar global* con datos registrados en cinco sitios de medidas de la República Argentina (cuatro sitios de monitoreo del proyecto SAVER-Net y otro conjunto de datos registrados en Tandil por el *Grupo de Teledetección* del IHLLA) y, **(b)** obtener los mapas mensuales promedio de la radiación solar global (2000 - 2015) para todo el territorio argentino.

En la siguiente sección se presenta el área de aplicación, datos utilizados y los métodos empleados en este trabajo. A continuación, se muestran los resultados de la validación del producto de satélite y los mapas elaborados. Finalmente, se presentan las conclusiones más relevantes.

MATERIAL Y MÉTODOS

Instrumentos y datos utilizados

Para obtener los mapas mensuales de la radiación solar global se utilizó una serie de 16 años de datos del producto de satélite SYN1-CERES (2000 - 2015). El sensor de satélite CERES (acrónimo del inglés *Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) posee una resolución espacial en vista nadir de 10 km del CERES sobre el satélite TRMM, y de 20 km del CERES sobre los satélites Terra y Aqua. Específicamente, el producto SYN1-CERES se elabora a partir de los datos registrados por el sensor CERES y provee valores promedio espacial (regional, global) y temporal (diario, mensual, etc) de flujos de radiación y nubes con un grado de resolución espacial (Wielicki *et al.*, 1996).

Para determinar la calidad del producto de satélite de radiación solar global, cinco sitios de terreno se utilizaron en la validación. Cuatro sitios de medida corresponden al proyecto SAVER-Net (registros de medida 2014-2015), ubicados en las ciudades de Villa Martelli (34,5° S, 58,5° O), Neuquén (39° S, 68,1° O), Comodoro Rivadavia (45,9° S, 67,5° O) y Río Gallegos (51,3° S, 69,3° O), y el quinto conjunto de datos de validación corresponde a datos registrados en el partido de Tandil (37,3° S, 59,1° O), durante diferentes campañas experimentales (2006-2015), por el Grupo de Teledetección del IHLLA (GT-IHLLA) (Carmona *et al.*, 2016).

En Villa Martelli la radiación solar global se registró con un piranómetro CMP-21 (Kipp & Zonen, 305 – 2800 nm), mientras que en Neuquén, Comodoro Rivadavia y Río Gallegos se registraron datos con piranómetros CM11 (Kipp & Zonen, 305 – 2800 nm). Por otro lado, en Tandil se registró la radiación solar global con un piranómetro CM3 (Kipp & Zonen, 305 – 2800 nm), el cual forma parte de un radiómetro neto CNR-1 (Carmona *et al.*, 2011).

Procesado y análisis de la información

En primer lugar, se obtuvieron los promedios diarios y mensuales de los registros de terreno de radiación solar global para validar el producto de satélite. En cuanto a los datos de satélite, se descargaron del sitio Web <http://ceres.larc.nasa.gov/> las series de datos promedio diario correspondiente a los píxeles ubicados en cada una de las coordenadas de instalación de los equipos de terreno. Para analizar los resultados de las comparaciones, entre los datos de terreno y del producto de satélite, se utilizaron los estadísticos básicos de desviación media o sesgo (*BIAS*), error cuadrático medio (*RMSE*), *RMSE* porcentual ($PRMSE = 100 * [RMSE / \overline{Rs} \downarrow]$), siendo $\overline{Rs} \downarrow$

la media de los valores observados) y el coeficiente de determinación (r^2) con la pendiente (b) y ordenada al origen (a) de la regresión lineal.

Una vez validado el producto, se elaboraron los mapas promedio mensual de la radiación solar global. Para ello se consideraron 182 imágenes mensuales del producto SYN1-CERES, entre los meses de marzo del 2000 y noviembre de 2015. Para el procesamiento de la información se utilizaron los programas Panoply (<http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>) y ENVI 5.3. En la siguiente sección, se muestran los mapas elaborados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se llevaron a cabo las comparaciones de los promedios diarios de las medias de radiación solar global registradas en terreno y los valores extraídos del producto SYN1-CERES para cada una de las cinco zonas de validación. En la siguiente Tabla se presentan los resultados obtenidos, donde en cada sitio de medida se indica entre paréntesis el número de pares de datos considerados (N).

Tabla. 1. Resultados estadísticos de las comparaciones diarias entre los valores de radiación solar global extraídos del producto SYN1-CERES y las medidas de terreno.

Sitio	MBE [Wm ⁻²]	RMSE [Wm ⁻²]	PRMSE [%]	a [Wm ⁻²]	b	r ²
Villa Martelli (N = 281)	3	16	9	14	0,932	0,970
Neuquén (N = 445)	-1	20	9	20	0,905	0,974
Comodoro Riv. (N = 429)	3	20	10	10	0,961	0,962
Río Gallegos (N = 363)	6	18	12	11	0,963	0,971
Tandil (N = 1521)	1	19	9	9	0,96	0,962

De acuerdo a la Tabla 1, se observan muy buenos acuerdos entre los valores medidos de radiación solar global y aquellos extraídos del producto de satélite, con coeficientes de determinación por encima de 0,96 en todos los casos, errores de a lo sumo 20 W m⁻² y prácticamente sin sesgos.

En este caso, es de suma importancia destacar que los errores encontrados no están asociados principalmente a la calidad del producto, sino más bien a su resolución espacial. En este sentido, se debe tener en cuenta que se están comparando medidas de sitios puntuales con valores extraídos del producto de satélite con una resolución de 1 grado, lo cual en el mejor de los casos equivale a un píxel con área de aproximadamente 10000 km², aumentando dicha área a medida que nos movemos hacia latitudes más lejanas al Ecuador.

Además de trabajar en una escala promedio diaria, en este trabajo se realizó una comparación a escala mensual entre los valores medidos en terreno y extraídos del producto de satélite, siendo ésta última la que más importa para los objetivos del trabajo. En este caso se logró obtener un conjunto de pares de datos de N = 101, siendo prácticamente la mitad de los pares de datos correspondientes a Tandil y la otra mitad repartidos en los otros cuatro sitios. A continuación se presentan los resultados de la validación del producto de satélite a escala mensual.

Tabla 2. Resultados estadísticos de las comparaciones mensuales entre los valores de radiación solar global extraídos del producto SYN1-CERES y las medidas de terreno.

Variable	MBE [W m ⁻² (kWh m ⁻²)]	RMSE [W m ⁻² (kWh m ⁻²)]	PRMSE [%]	a [W m ⁻² (kWh m ⁻²)]	b	r ²
R _{s↓} (N = 101)	1 (0,04)	6 (0,14)	3,0	3,0 (0,07)	0,99	0,996

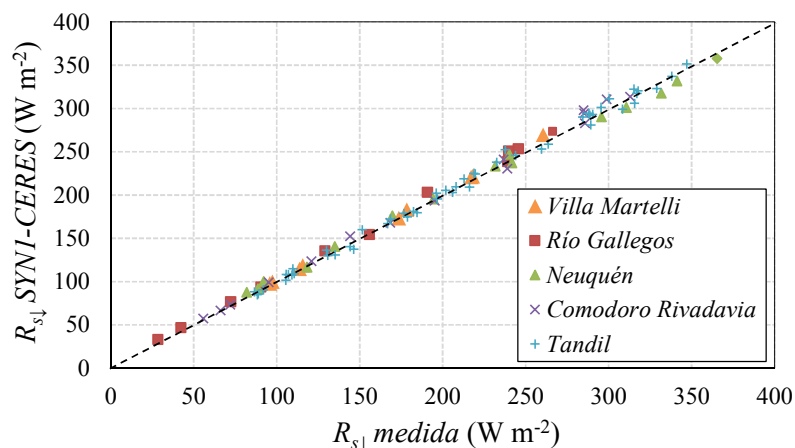


Figura 1. Valores promedio mensual de la radiación solar global extraídos del producto SYN1-CERES versus valores medidos en terreno. La recta 1:1 se indica en la gráfica.

En la Tabla 2, se muestran los resultados estadísticos para la validación a escala mensual. Los resultados se presentan en unidades de Wm⁻² y kWh m⁻², ésta última unidad generalmente utilizada en trabajos de aprovechamiento energético de energía solar. Los resultados estadísticos muestran errores de 6 Wm⁻² (0,14 kWh m⁻²), prácticamente sin sesgo y acuerdo casi perfecto entre los valores medidos y aquellos extraídos del producto de satélite ($r^2 = 0,996$). En la Figura 1 se muestra la validación del producto utilizado para la elaboración de los mapas mensuales de radiación solar global, donde se destaca la baja dispersión de los datos en torno a la recta 1:1.

Finalmente, a continuación se muestran los mapas que se elaboraron en el presente trabajo. Para mejorar la calidad visual de la información se utilizó un filtro de interpolación bilineal y una paleta de colores generada en el programa ENVI 5.3. Los resultados podrán consultarse en mejor calidad en la página Web del GT-IHLLA (<http://teledeteccion.wixsite.com/gtihlla>).

Como es de esperar, mayores valores de radiación solar en superficie se encuentran en los meses de enero y diciembre, con valores por encima de los 9 kWh m⁻² sobre el noreste argentino, y mínimos en meses de invierno. Además de la lógica distribución vertical de la radiación solar debido a la latitud y otros patrones relacionados a la orografía, se observan en ciertas zonas cercanas diferencias significativas en la radiación que llega a la superficie, lo cual se puede relacionar con la distribución de las nubes. En este sentido, el análisis de la variación espacial de la radiación por la nubosidad, y su efecto en el balance radiativo, se estudiará próximamente en detalle como parte de trabajos de cooperación entre el GT-IHLLA e investigadores del CEILAP.

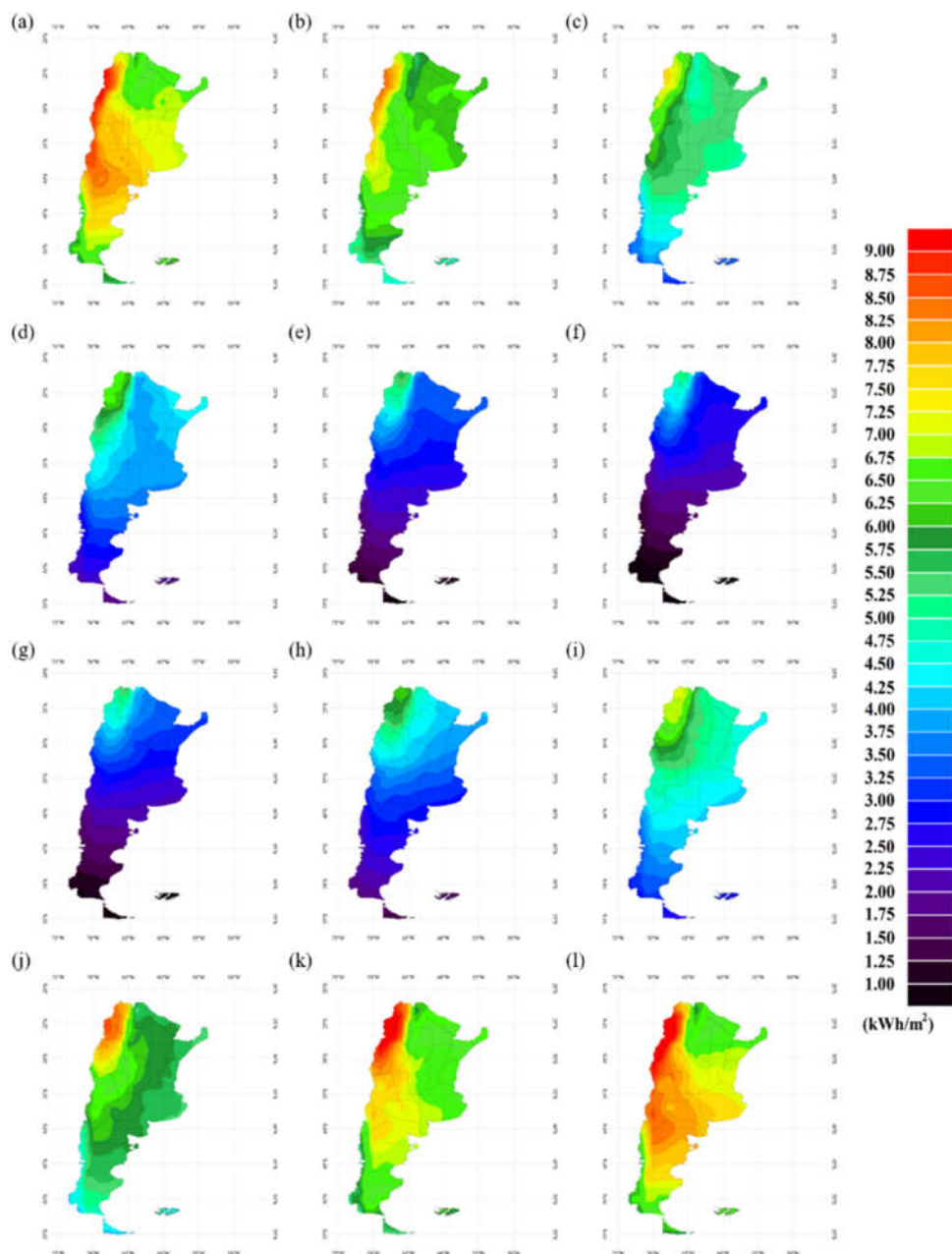


Figura 2. Mapas promedio mensual de la radiación solar global generados con el producto SYN1-CERES para la República Argentina: **(a)** enero, **(b)** febrero, **(c)** marzo, **(d)** abril, **(e)** mayo, **(f)** junio, **(g)** julio, **(h)** agosto, **(i)** septiembre, **(j)** octubre, **(k)** noviembre y **(l)** diciembre.

CONCLUSIONES

En éste trabajo se validó el producto SYN1-CERES de radiación solar global y se elaboraron los mapas promedio mensual para todo el territorio argentino, resaltándose la capacidad del producto para reproducir las variaciones espacio-temporales. Las comparaciones con datos de terreno confirmaron la buena calidad del producto de satélite, con errores del orden del 10 % a escala diaria y de tan solo 3 % a escala mensual, sin desviaciones y con buenos acuerdos entre valores medidos en terreno y aquellos extraídos desde el producto de satélite. En resumen, se



puede afirmar que los mapas que se presentan aquí servirán de gran ayuda para diferentes propósitos científico-técnicos, donde las comparaciones con datos registrados en tierra evidencian la utilidad y fiabilidad del producto de satélite utilizado. En este sentido, se pretende seguir trabajando en cooperación entre investigadores del CEILAP y el GT-IHLLA para analizar con mayor detalle los resultados preliminares obtenidos y analizar el efecto de la nubosidad en la radiación solar, en particular, y sobre el balance radiativo en general.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se realizó gracias a fondos otorgados por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, y gracias al proyecto SAVER-Net financiado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y la Agencia de Ciencia y Tecnología del Japón (JST), 2013-2017). Los datos CERES fueron obtenidos desde el “Atmospheric Science Data Center de la NASA Langley Research Center”.

BIBLIOGRAFÍA

- Carmona, F., R. Rivas, D. Ocampo, J. Schirmbeck y M. Holzman, 2011. Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. *Aqua – LAC, Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean*, vol. 3, nro. 1. ISSN 1688-2873.
- Carmona, F., Rivas, R. y Kruse, E. 2016. Estimating daily net radiation in the FAO Penman-Monteith method. *Theoretical and Applied Climatology*. First online: 03 March 2016, pp 1-7, DOI: 10.1007/s00704-016-1761-6. ISSN 0177-798X.
- Grossi Gallegos H., 1998. Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, pp. 33-42.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. 2007. Atlas de energía solar de la República Argentina”,. Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 74 páginas + 1 CD-ROM, mayo de 2007 (ISBN 978-987-9285-36-7), Registro de la Propiedad Intelectual No. 554247 del 15 de marzo de 2007.
- Wielicki, B. A., B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, R. B. Lee III, G. L. Smith, and J. E. Cooper, 1996: Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 853-868.

Actas XVII Simposio Internacional SELPER 2016

Eds.: Sione, W. F.; Viva Mayer, F. M.; Antes, M. E. y Serafini, M.C.
