

## **ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR DIARIA A PARTIR DE IMÁGENES NASA-POWER CON DISTINTOS ÍNDICES DE CLARIDAD**

**S. Sayago<sup>1</sup>, G. Ovando<sup>1</sup>, M. Bocco<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>FCA – Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

e-mail: mbocco@gmail.com

*Recibido 25/07/17, aceptado 26/09/17*

**RESUMEN:** La radiación solar (RS) es la principal fuente de energía renovable de la Tierra. Las imágenes satelitales permiten su estimación continua por su cobertura espacio-temporal. Las condiciones de la atmósfera, nubosidad, ocasionan atenuación de la radiación solar en su trayecto hacia la superficie lo cual permite definir distintos índices de claridad ( $K_T$ ). El objetivo fue evaluar y comparar la RS diaria proveniente de NASA-POWER con la registrada en estaciones meteorológicas de España, considerando distintos rangos de  $K_T$ . La RS diaria fue registrada en el período 2000-2016, en nueve estaciones distribuidas en toda España. Los resultados muestran que los valores de  $R^2$  superaron, para todas las estaciones, el 0,90 con un rango de %RECM entre 10 y 17  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ . Si se considera el índice de claridad los valores provenientes del satélite estiman con menor precisión cuando disminuye  $K_T$ .

**Palabras clave:** radiación solar global, transparencia atmosférica, modelo, ajuste.

### **INTRODUCCIÓN**

La radiación solar (RS) es el recurso de energía renovable más importante del planeta, debido a su naturaleza inagotable y abundante disponibilidad global (Jamil and Akhtar, 2017). Este recurso de energía limpia, puede emplearse en numerosas aplicaciones como el diseño y arquitectura de estructuras y dispositivos basados en la energía solar, estudios en meteorología, climatología, hidrología, agronomía y ciencias ambientales, entre otros. Para un mejor uso de los sistemas que aprovechan este tipo de energía, es necesario evaluar la disponibilidad de RS en la región de interés (Almorox et al., 2017; Huld, 2017).

A pesar de la importancia de contar con datos de RS, su adquisición y registro no es simple. Su medición requiere el uso de equipamientos específicos tales como piranómetros y pirheliómetros, los cuales tienen costosos requerimientos de mantenimiento y calibración. Como señalan Will et al. (2013), la carencia de datos suficientes de radiación solar en cantidad y calidad es bastante generalizada; no siempre existe un organismo que centralice la información proveniente de estaciones meteorológicas automáticas, verifique la consistencia de los datos y calibre regularmente los sensores. Como una alternativa para sortear estos inconvenientes, se han desarrollado varios modelos empíricos: Ångström–Prescott, Hargreaves y Samani, Bristow y Campbell, entre otros (Besharat et al., 2013). También se han evaluado modelos estocásticos y de redes neuronales (Raichijk, 2008; Sayago et al., 2011).

Visto entonces que la disponibilidad de mediciones de radiación solar es espacial y temporalmente inadecuada para muchas aplicaciones, las imágenes provenientes de satélites de órbita polar o geostacionarios resultan una solución potencial a este problema (Journée and Bertrand, 2010). Por lo cual la teledetección es una forma eficaz para obtener datos de radiación global con continuidad temporal y homogeneidad espacial (Liang, 2004). En la actualidad existe una gran cantidad de conjuntos de datos de RS basados en información satelital, de acceso gratuito, los cuales tienen alta resolución espacial y temporal.

En tal sentido, Whitlock et al. (2007) emplearon estimaciones de radiación global del producto NASA - Prediction of World Energy Resources (POWER) para compararlas con valores observados de 27 estaciones meteorológicas pertenecientes a la Organización Meteorológica Mundial de todo el planeta, para condiciones de días despejados. White et al. (2011) compararon valores diarios de radiación global de NASA – POWER con datos observados de 295 estaciones de Estados Unidos.

Almorox et al. (2017), compararon valores mensuales de radiación global del producto CERES con los observados por diferentes estaciones meteorológicas de España. También para España, López y Batlles (2014) presentaron un modelo paramétrico para estimar radiación solar global considerando datos provenientes del sensor MODIS y Polo (2015) presentó una metodología que estima radiación solar desde el satélite geostacionario Meteosat y generó mapas de esta variable.

Las condiciones de la atmósfera y en especial la cobertura nubosa, ocasionan la atenuación de la radiación solar extraterrestre en su trayecto hacia la superficie del planeta. Esta disminución de energía se evalúa a través del índice de claridad o de transparencia atmosférica ( $K_T$ ) que se calcula como el cociente entre la radiación solar global y la radiación solar extraterrestre (Kosmopoulos et al., 2017).

El objetivo del presente estudio es evaluar y comparar, considerando distintos grados de transparencia de la atmósfera, la radiación solar proveniente de NASA-POWER con aquella registrada en distintas estaciones meteorológicas de España, con el fin de establecer la pertinencia de los datos estimados a partir de satélites, para sitios donde no se tiene información meteorológica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Datos meteorológicos*

Los valores de radiación solar global diaria ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) se obtuvieron para el período, desde enero 2000 hasta diciembre de 2016 (6267 días), de las estaciones meteorológicas que se presentan en la Tabla 1.

Comunidad Autónoma	Provincia	Estación	Latitud N (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)	Total datos registrados
Extremadura	Badajoz	Badajoz	38,89	-7,01	175	5448
Cataluña	Barcelona	Barcelona	41,39	2,20	6	5616
Andalucía	Granada	Base Aérea	37,14	-3,63	687	5830
Andalucía	Huelva	Ronda Este	37,28	-6,91	19	4245
Castilla y León	León	Virgen del Camino	42,59	-5,65	916	5325
La Rioja	La Rioja	Logroño	42,45	-2,33	353	5984
Madrid	Madrid	Ciudad Universitaria	40,45	-3,72	664	6267
Murcia	Murcia	Murcia	38,00	-1,17	61	6187
Cataluña	Tarragona	Tortosa	40,82	0,49	50	4681

*Tabla 1: Estaciones meteorológicas, con datos de radiación solar registrada.*

En la Tabla 1 se observan también el número de datos registrados para cada una de las estaciones consideradas. Como puede observarse en la Figura 1, estas estaciones están distribuidas en el norte, centro y sur del país, contemplando diferentes ambientes en lo referido a proximidad al mar y altitud.

Se consideró el índice de transparencia o claridad  $K_T$  para clasificar el tipo de día, el cual se calculó según:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (1)$$

Donde:  $H$  es la irradiación global diaria y  $H_0$  la irradiación solar extraterrestre diaria ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ).

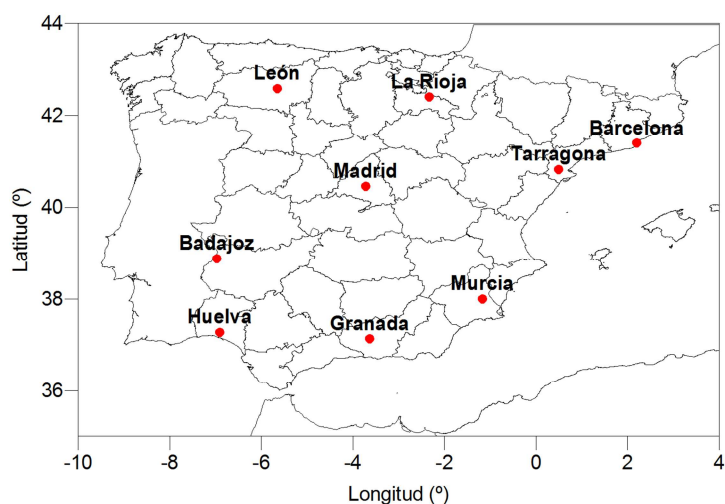


Figura 1: Ubicación de las estaciones meteorológicas en las provincias seleccionadas de España.

El tipo de día se clasificó de acuerdo a los rangos del índice de claridad  $K_T$  (Tabla 2) propuestos por Iqbal (1983) e Ianz y Kudish (2008). El valor de  $K_T$  mínimo se ha establecido a partir de los valores calculados en Sancho Ávila et al. (2012), así para Europa suroccidental el valor umbral mínimo es de 0,03, valor que se registra bajo condiciones de cielo cubierto con nubosidad espesa y muy abundante. Por otro lado, la radiación global diaria no tiene que superar el valor teórico estimado para la radiación solar extraterrestre.

Tipo de día	Rango de $K_T$
Claro	$0,7 \leq K_T < 0,9$
Parcialmente nuboso	$0,3 \leq K_T < 0,7$
Nuboso	$0,03 \leq K_T < 0,3$

Tabla 2: Clasificación del tipo de día para distintos rango del índice de claridad.

Los datos empleados provienen de la Red radiométrica de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) que tiene como finalidad la medición de la radiación solar. Todos los sensores se calibran cada dos años en las instalaciones del Centro Radiométrico Nacional usando sensores patrones referenciados con el *World Standard Group* de Davos, los cuales se emplean para establecer la Referencia Radiométrica Mundial (WRR). A finales del año 2006 se obtuvo la certificación ISO 9001.

La radiación global horizontal es la radiación solar recibida sobre un ángulo sólido de  $2\pi$  estereorradianes sobre una superficie horizontal. Las estaciones AEMET están equipadas, para las medidas de la radiación global con piranómetros Kipp & Zonen modelos CMP-11 y CMP-21 que utilizan el principio de detección termoeléctrica mediante una termopila (AEMET, 2017).

#### Datos del Producto NASA-POWER

La información de radiación global satelital utilizada en el presente trabajo fue obtenida de NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (NASA-POWER) (<https://power.larc.nasa.gov/cgi-bin/agro.cgi?email=agroclim@larc.nasa.gov>). NASA provee un conjunto de datos meteorológicos de superficie y de energía solar estimados a partir de información satelital y modelos. Los datos de radiación global están disponibles desde el año 1983, y fueron estimados a partir del balance de radiación superficial (Surface Radiation Budget - SRB V 3.0) hasta el año 2007 La irradiancia total de SRB se usa conjuntamente con múltiples algoritmos para calcular flujos superficiales difusos,

normales directos y de superficies inclinadas para obtener un amplio rango de estimaciones. Estos valores de RS fueron validados con observaciones de superficie durante todo el período contemplado (Stackhouse et al., 2016). Desde 2008 a la actualidad, para contemplar las observaciones de nuevos satélites, se emplearon diferentes versiones del modelo del proyecto *Fast Longwave And SHortwave Radiative Fluxes* (FLASHFlux) para estimar la radiación global a partir del sensor CERES que opera en distintos satélites de NASA, y mide, entre otras, la radiación solar reflejada y la emitida por la Tierra desde el tope de la atmósfera. El sensor CERES cuenta con tres canales, uno de onda corta que mide brillo solar reflejado en la región 0,3 – 5  $\mu\text{m}$ , otro de medición de radiación infrarroja emitida por la Tierra, entre 8-12  $\mu\text{m}$  y un tercero que da cuenta del espectro total de radiación saliente de la Tierra.

La resolución espacial de los datos utilizados en este trabajo fue de 1° de latitud/longitud, con una resolución temporal diaria. Del período total de tiempo que se consideró en este estudio, se registraron datos faltantes del satélite en las estaciones correspondientes a las provincias de Badajoz (6), Barcelona (5), Granada (6), Huelva (5), León (5), La Rioja (5), Madrid (6), Murcia (6) y Tarragona (7).

### *Estadísticos para evaluar el ajuste*

Como el objetivo del trabajo es evaluar la adecuación de los datos de NASA-POWER se contrastó la radiación solar resultante del mismo con cada una de las estimaciones provenientes de los datos meteorológicos en forma independiente. Para ello se calcularon los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y el porcentaje de la raíz del error cuadrático medio (%RECM) definido como:

$$\%RECM = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{sRi} - R_{sNPi})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{sRi}} \quad (2)$$

Donde:  $R_{sRi}$  indica la radiación en el día  $i$  registrada en la estación meteorológica y  $R_{sNPi}$  es la radiación en el día  $i$  informada por el satélite NASA-POWER y  $n$  el total de días con datos por estación.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En primer lugar se cuantificaron, para cada una de las estaciones en las comunidades autónomas seleccionadas, los días que corresponden a los distintos rangos de  $K_T$ . Los valores de radiación mínimos y máximos registrados y provenientes de NASA-POWER, según sea el día claro, parcialmente nuboso o nuboso y para cada estación se presentan en la Tabla 3, abarcando todo el período de tiempo comprendido en el presente trabajo.

La mínima radiación registrada, si se considera el tipo de claridad del día, para días parcialmente nubosos y nubosos alcanza, en promedio, un 43% y 10% de la correspondiente a días claros, respectivamente; porcentaje que se reduce a 31% y 7% si se tiene en cuenta los datos de NASA-POWER. En cambio, esta relación entre los valores de radiación máxima registrada en las estaciones consideradas presenta valores porcentuales más elevados (90% y 37%) y en el caso de NASA-POWER se cuantifican 97% y 64%, respectivamente (Tabla 3).

La variabilidad de la radiación registrada en las estaciones es mayor para los valores mínimos que para los máximos, y particularmente en los días nubosos. Los valores de NASA-POWER muestran un

comportamiento similar con la diferencia que también se presenta una variabilidad considerable en los valores de radiación máxima para días con  $K_T$  menores a 0,3.

Provincia	Estación	Nº Días	Mínima Registrada	Máxima Registrada	Mínima NASA-POWER	Máxima NASA-POWER
<b>Día claro (<math>0,7 \leq K_T &lt; 0,9</math>)</b>						
Badajoz	Universidad	1949	9,90	32,50	7,60	33,00
Barcelona	CMT	1040	8,90	31,00	7,40	32,50
Granada	Base Aérea	2164	10,70	32,50	7,80	32,90
Huelva	Ronda Este	1607	10,70	32,20	9,00	33,20
La Rioja	Logroño Agoncillo	1164	8,40	32,20	4,80	32,80
León	Virgen del Camino	1732	8,40	33,20	4,20	33,30
Madrid	Ciudad Universitaria	2112	9,30	33,10	2,30	33,30
Murcia	Murcia	1966	10,30	32,80	6,30	32,10
Tarragona	Tortosa	1072	9,10	32,30	6,80	32,70
<b>Día parcialmente nuboso (<math>0,3 \leq K_T &lt; 0,7</math>)</b>						
Badajoz	Universidad	2894	4,30	29,10	1,80	32,90
Barcelona	CMT	3943	3,80	29,20	2,60	32,00
Granada	Base Aérea	3132	4,60	29,10	1,60	31,80
Huelva	Ronda Este	2308	4,60	29,10	2,20	31,70
La Rioja	Logroño Agoncillo	3644	3,60	29,20	1,50	31,90
León	Virgen del Camino	2795	3,60	29,20	2,40	31,90
Madrid	Ciudad Universitaria	3425	4,00	29,20	1,50	31,60
Murcia	Murcia	3733	4,50	29,10	1,80	31,10
Tarragona	Tortosa	3012	3,90	29,20	2,20	32,40
<b>Día nuboso (<math>0,03 \leq K_T &lt; 0,3</math>)</b>						
Badajoz	Universidad	599	1,00	12,50	0,60	27,00
Barcelona	CMT	628	0,50	12,00	0,30	18,60
Granada	Base Aérea	528	1,00	11,90	0,60	18,20
Huelva	Ronda Este	325	0,90	11,90	0,40	16,70
La Rioja	Logroño Agoncillo	1171	0,50	12,20	0,30	23,80
León	Virgen del Camino	793	0,70	12,00	0,80	16,40
Madrid	Ciudad Universitaria	724	0,50	12,30	0,30	19,90
Murcia	Murcia	482	0,70	12,20	0,30	21,20
Tarragona	Tortosa	590	0,40	12,40	0,20	28,60

Tabla 3: Número de días y valores de radiación solar mínimos y máximos ( $MJm^{-2} d^{-1}$ ) registrados y provenientes de NASA-POWER para estaciones de España, según índice de claridad.

Los valores del coeficiente de determinación entre la radiación solar proveniente de NASA-POWER y registrada superaron, para todas las estaciones consideradas el valor de 0,90 (Tabla 4), lo cual indica un muy buen ajuste en general. Ahora bien, si se considera el índice de claridad se infiere que los valores provenientes del satélite estiman con distinta precisión según la nubosidad del día (Figuras 2, 3 y 4).

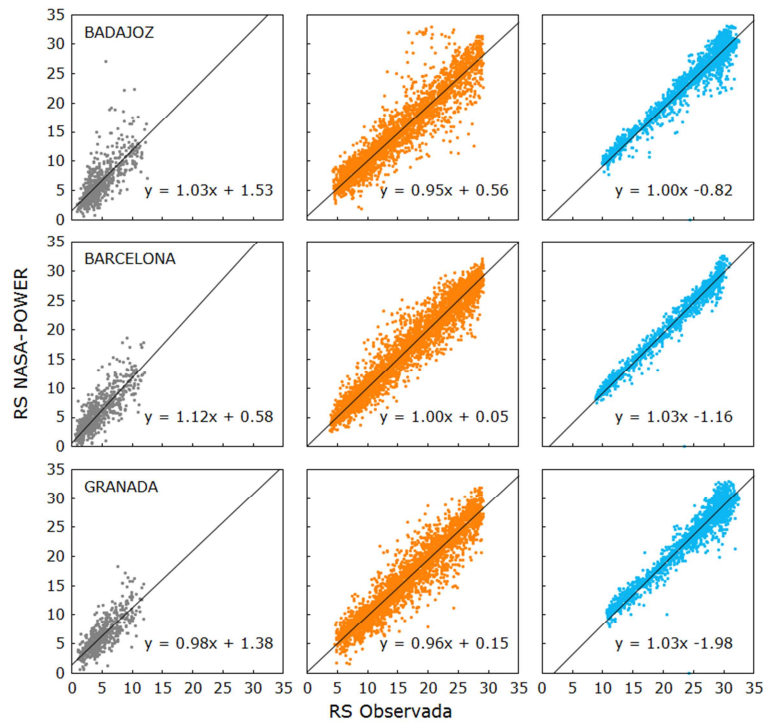


Figura 2: Gráfico de dispersión entre la radiación solar registrada y estimada por NASA-POWER según índice de claridad, para las provincias de Badajoz, Barcelona y Granada (En gris los días nublados, en naranja los días parcialmente nublados y en celeste los días claros).

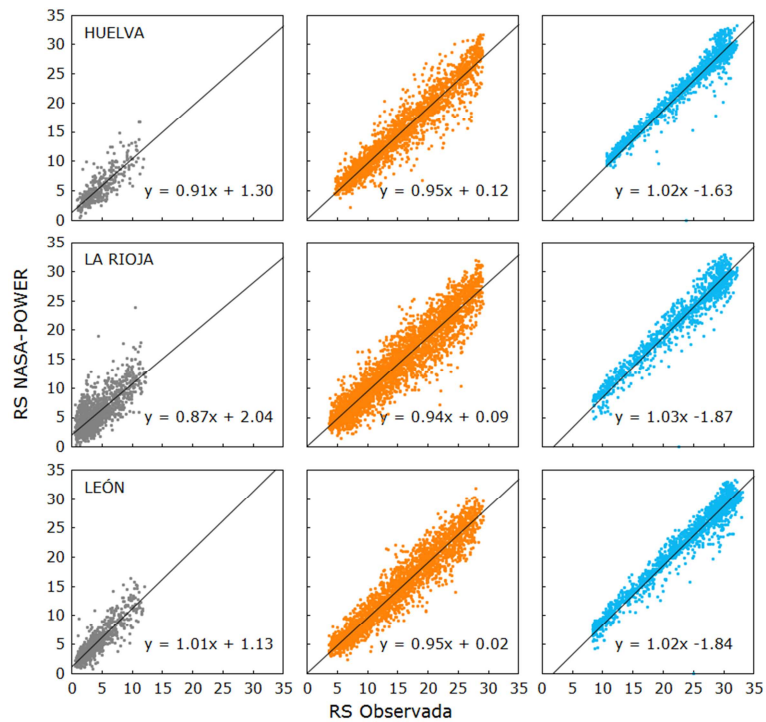


Figura 3: Gráfico de dispersión entre la radiación solar registrada y estimada por NASA-POWER según índice de claridad, para las provincias de Huelva, La Rioja y León (En gris los días nublados, en naranja los días parcialmente nublados y en celeste los días claros).

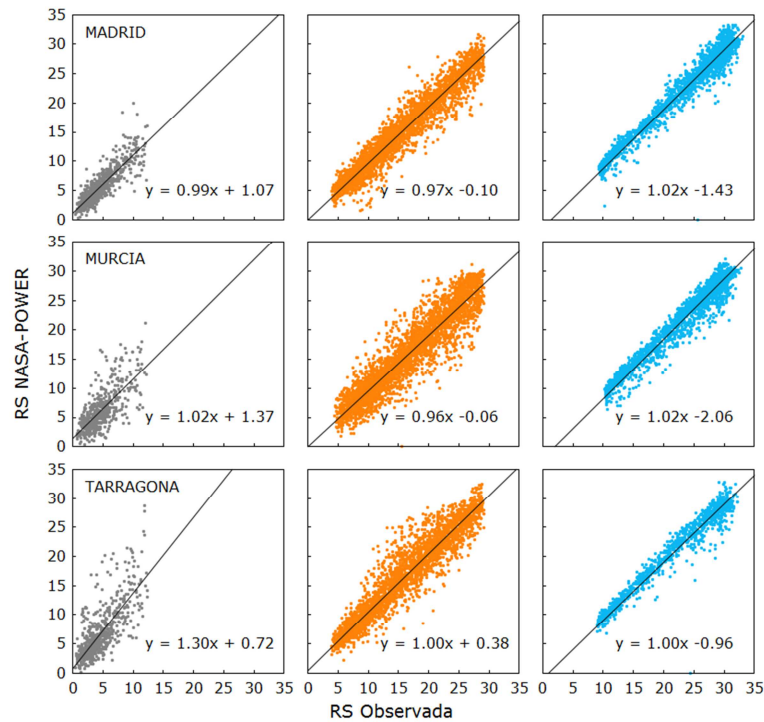


Figura 4: Gráfico de dispersión entre la radiación solar registrada y estimada por NASA-POWER según índice de claridad, para las provincias de Madrid, Murcia y Tarragona (En gris los días nublados, en naranja los días parcialmente nublados y en celeste los días claros).

En particular, para días con  $K_T > 0,7$  se observa que  $R^2$  alcanza valores de 0,97 y, en promedio, para días parcialmente nublados se obtuvieron  $R^2 = 0,90$ . En cambio, los coeficientes de ajuste cuando se comparan la radiación solar registrada y proveniente del satélite para los días nublados, esto es  $K_T < 0,3$ , sólo supera el 0,75 en las estaciones de las provincias de Madrid y León; en el otro extremo y para este tipo de día el ajuste mínimo alcanza el 0,51 y 0,53 en Badajoz y Murcia. En las restantes estaciones el coeficiente de determinación es también bajo, encontrándose entre 0,56 y 0,66.

Provincia	$R^2$				%RECM			
	Total	Días claros	Días poco nublados	Días nublados	Total	Días claros	Días poco nublados	Días nublados
Badajoz	0,93	0,95	0,87	0,53	12,87	6,60	15,93	60,07
Barcelona	0,95	0,97	0,94	0,66	11,57	5,58	11,57	50,61
Granada	0,95	0,95	0,90	0,62	11,12	7,25	13,33	43,29
Huelva	0,95	0,96	0,91	0,64	10,57	6,74	13,21	38,35
La Rioja	0,92	0,94	0,89	0,56	16,70	8,26	16,73	58,18
León	0,96	0,96	0,92	0,77	12,04	7,84	13,57	43,27
Madrid	0,96	0,96	0,93	0,75	10,61	6,90	12,33	39,88
Murcia	0,92	0,95	0,87	0,51	13,62	8,41	15,59	60,31
Tarragona	0,91	0,96	0,90	0,56	15,39	7,31	14,71	82,34

Tabla 4: Coeficiente de determinación y porcentaje de la raíz del error medio cuadrático, para el ajuste entre la radiación solar registrada y proveniente de NASA-POWER, total y según índice de claridad para período 2000-2017.

Los valores de ajuste total son similares a los presentados por Linares-Rodríguez et al. (2013), quienes al estimar radiación solar diaria en Andalucía, España, obtuvieron un valor de  $R^2$  de 0,97; estos autores utilizaron datos del satélite METEOSAT 9 del año 2008, como entrada de una red neuronal artificial y validaron con datos observados de 18 estaciones meteorológicas. Lu et al. (2011) también emplearon redes neuronales con información del satélite MTSAT para estimar radiación solar diaria en China y al validar con información del período junio 2008 – mayo 2009 en 83 estaciones meteorológicas,

obtuvieron un valor de  $R^2$  de 0,83. Cuando se analizan los resultados para días con cielo claro los valores obtenidos en nuestro estudio son consistentes con los coeficientes de determinación obtenidos por diferentes autores, quienes también obtienen  $R^2$  en el rango de 0,94 a 0,97 (Lu et al., 2011; Wang et al., 2015).

El porcentaje de la raíz del error cuadrático medio entre los valores registrados en las distintas estaciones meteorológicas y los estimados por NASA-POWER toma valores entre 10,6 y 16,7%, valores inferiores a los reportados por Lu et al. (2011) quienes para China, obtuvieron un valor de %RECM igual a 21,9%. Linares-Rodríguez et al. (2013), usando información del satélite Meteosat 9 y de 83 estaciones en Andalucía (España) presentaron un coeficiente de determinación de 0,98 y un %RECM de 6,74 para 18 estaciones de validación seleccionadas. Quesada-Ruiz et al. (2015) usando imágenes del Meteosat (MSG) y redes neuronales artificiales estimaron valores horarios de RS con %RECM del 22% para todas las condiciones de nubosidad.

Si se consideran las categorías seleccionadas según los valores de  $K_T$ , se observa una marcada diferencia entre los errores porcentuales. Mientras que para los días claros el valor de %RECM se encuentra entre 5,5-8,5%, para todas las estaciones consideradas en este trabajo; en los días parcialmente nublados éstos se ubican en el rango 11,5-16,7%. En los días nublados el porcentaje de error presenta un marcado incremento, con valores entre 38,3-82,3% y con comportamientos diferenciados según las estaciones meteorológicas.

Para las estaciones de Granada, Huelva, León y Madrid, la proporción del error entre los días claros y los nublados es 1:5 aproximadamente, para La Rioja y Murcia asciende a 1:7, Badajoz y Barcelona suben a 1:9 y finalmente en Tarragona alcanza 1:11. Las estaciones de Madrid, León y Granada se encuentran a mayor altitud, en el caso de Huelva, que aunque está a menor altitud, presenta un elevado porcentaje de días despejados respecto del total (37%, Tablas 1 y 2). Por otro lado, Tarragona presenta precipitaciones superiores a los 500 mm y un porcentaje de días despejados de 23%. Las diferencias en los resultados, en función de las tres condiciones de claridad analizadas, no se explican solamente en función de la localización geográfica o los parámetros climáticos, por lo cual se deberá profundizar el estudio para analizar la influencia de otros factores como el albedo superficial, la distribución más o menos uniforme de las nubes y su naturaleza y la rugosidad y pendiente de la superficie, entre otros (Wang et al., 2015; Roupioz et al., 2016; Tang et al., 2016).

Linares-Rodríguez et al. (2013), consideraron las condiciones de nubosidad con diferentes límites de índice de claridad, días despejados  $K_T > 0,8$  y nubosos  $K_T < 0,5$ , y a partir de éstas el %RECM fue de 5,13 % y 21,2%, respectivamente. Quesada-Ruiz et al. (2015) presentaron valores de %RECM de 42% para condiciones de cielo cubierto, obteniendo menores errores estadísticos en sitios con poca nubosidad (Sur-Sureste de España) y mayores en lugares más nubosos (norte de España).

A pesar de los elevados valores del error para los días nublados, en la mayoría de las localidades analizadas, la proporción de estos días en el total de datos registrados en el período considerado, es relativamente baja y se encuentra entre 8 y 13%, con excepción de La Rioja y León que presentan valores de 15 y 20%, respectivamente (Tablas 1 y 2).

## CONCLUSIÓN

La radiación solar registrada en distintas estaciones radiométricas que cubren toda España y su comparación con la obtenida a partir de imágenes satelitales del producto NASA-POWER, permite concluir que es posible estimar esta variable de manera confiable. Esta afirmación está fundamentada por los elevados coeficientes de determinación y bajos errores obtenidos en este trabajo. Si se evalúa la RS diaria, considerando la transparencia atmosférica, se observa que los estadísticos evaluados disminuyen si el índice de claridad es bajo; por lo cual en regiones con abundante nubosidad se debe tener precaución en el empleo de la información satelital.

La amplia disponibilidad temporal (más de 25 años de producto) y su continua actualización y mejora, hacen de NASA-POWER un importante recurso de información a escala regional, o global, para



diferentes aplicaciones. Finalmente, los resultados obtenidos cobran relevancia ya que la instalación de estaciones meteorológicas con suficiente densidad es costosa, y su distribución espacial resulta compleja en determinadas condiciones geográficas.

Si bien este trabajo demuestra que la radiación obtenida del satélite es confiable para utilizar a nivel local en España, sería deseable disponer de series temporales de radiación solar medida y registrada en estaciones de Argentina a fin de confirmar la utilidad de NASA-POWER en nuestro país.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por compartir los datos que permitieron la realización de este trabajo a J. Almorox (Universidad Politécnica de Madrid) y J.A. Arnaldo (Universidad Complutense de Madrid).

## REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2017). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España. Disponible en: <http://www.aemet.es/es/portada>
- Almorox, J., Ovando, G., Sayago, S. and Bocco, M. (2017). Assessment of surface solar irradiance retrieved by CERES. *International Journal of Remote Sensing* 38, 12, 3669–3683.
- Besharat, F., Dehghan, A. and Faghieh, A. (2013). Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 798–821.
- Huld, T. (2017). PVMAPS: Software tools and data for the estimation of solar radiation and photovoltaic module performance over large geographical areas. *Solar Energy* 142, 171–181.
- Ianetz, A. and Kudish, A. (2008). A method for determining the solar global and defining the diffuse and beam irradiation on a clear day. *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*, 1<sup>a</sup> Ed., pp. 93-113. Springer Verlag, Berlin.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to solar radiation*, 1<sup>a</sup> Ed., pp. 408. Academic Press, New York.
- Jamil, B. and Akhtar, N. (2017). Comparison of empirical models to estimate monthly mean diffuse solar radiation from measured data: Case study for humid-subtropical climatic region of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, C, 1326-1342.
- Journée, M. and Bertrand, C. (2010). Improving the spatio-temporal distribution of surface solar radiation data by merging ground and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment* 114, 2692–2704.
- Kosmopoulos, P., Kazadzis, S., Taylor, M., Bais, A., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Keramitsoglou, I. and Kiranoudis, C. (2017). Estimation of the solar energy potential in Greece using satellite and ground-based observations. *Perspectives on Atmospheric Sciences*, pp. 1149-1156. Springer International Publishing. Switzerland.
- Liang, S. (2004) *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. 1<sup>a</sup> Ed., pp. 534. John Wiley & Sons, NJ, USA.
- Linares-Rodríguez, A., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D. and Tovar-Pescador, J. (2013). An artificial neural network ensemble model for estimating global solar radiation from Meteosat satellite images. *Energy*, 61, 636-645.
- López, G., and Batlles, F. (2014). Estimating Solar Radiation from MODIS Data. *Energy Procedia*, 49, 2362–2369.
- Lu, N., Qin, J., Yang, K. and Sun, J. (2011). A simple and efficient algorithm to estimate daily global solar radiation from geostationary satellite data. *Energy*, 36, 5, 3179-3188.
- Polo, J. 2015. Solar Global Horizontal and Direct Normal Irradiation Maps in Spain Derived from Geostationary Satellites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 130 -131, 81-88.
- Quesada-Ruiz, S., Linares-Rodríguez, A., Ruiz-Arias, J., Pozo-Vázquez, D. and Tovar-Pescador, J. (2015). An advanced ANN-based method to estimate hourly solar radiation from multi-spectral MSG imagery. *Solar Energy*, 115, 494-504.
- Raichijk, C. (2008). Estimación de la irradiación solar global en Argentina mediante el uso de redes neuronales artificiales. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 22, 1–6.
- Roupioz, L., Jia, L., Nerry, F. and Menenti, M. (2016). Estimation of Daily Solar Radiation Budget at Kilometer Resolution over the Tibetan Plateau by Integrating MODIS Data Products and a DEM. *Remote Sensing*, 8, 6, 504.

- Sancho Ávila, J., Riesco Martín, J., Jiménez Alonso, C. Sánchez de Cos Escuin, M., Montero Cadalso, J. y López Bartolomé, M. (2012). Atlas de Radiación Solar en España Utilizando Datos del SAF de Clima de EUMETSAT, pp 162. Agencia Estatal de Meteorología, Madrid.
- Sayago, S., Bocco, M., Ovando, G. y Willington, E. (2011). Radiación solar horaria: modelos de estimación a partir de variables meteorológicas básicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 11.51–11.57.
- Stackhouse Jr., P., Chandler, W., Zhang, T., Westberg, D., Barnett, A. and Hoell, M. (2016). Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology Version 3.2.0, pp. 76. NASA, Langley Research Center.
- Tang, W., Qin, J., Yang, K., Liu, S., Lu, N. and Niu, X. (2016). Retrieving high-resolution surface solar radiation with cloud parameters derived by combining MODIS and MTSAT data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 4, 2543-2557.
- Wang, L., Lü, D. and He, Q. (2015). The impact of surface properties on downward surface shortwave radiation over the Tibetan Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32, 6, 759-771.
- White, J. Hoogenboom, G., Wilkens, P., Stackhouse Jr., P. and Hoel, J. (2011). Evaluation of Satellite-Based, Modeled-Derived Daily Solar Radiation Data for the Continental United States. *Agronomy Journal* 103, 4, 1242–1251.
- Whitlock, C., Gupta, S., Zhang, T., Chandler, W., Stackhouse, P., Hinkelman, L. and Long, C. (2007). Clear-Sky Shortwave Surface Radiation Intensities Over The Globe. *American Solar Energy Society*, in Proceedings of the Solar Conference Solar, 36th ASES Annual Conference, 1-8.
- Will, A., Bustos, J., Bocco, M., Gotay, J. and Lamelas, C. (2013). On the use of niching genetic algorithms for variable selection in solar radiation estimation. *Renewable Energy* 50, 168-176.

## ABSTRACT

Solar radiation (RS) is the main source of renewable energy on Earth. The satellite images allow its continuous estimation by its space-time coverage. The conditions of the atmosphere, cloudiness, cause attenuation of the solar radiation in its path towards the surface which allows defining different indices of clarity ( $K_T$ ). The objective was to evaluate and compare the daily RS from NASA-POWER with the one registered in meteorological stations of Spain, considering different ranges of  $K_T$ . The daily RS was registered in the period 2000-2016, in nine stations distributed throughout Spain. The results show that the values of  $R^2$  were, for all the stations, above 0.90 with a range of % RECM between 10 and 17  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ . If the clarity index is considered, the values from the satellite estimate with less precision when  $K_T$  decreases.

**Keywords:** global solar radiation, atmospheric transparency, model, fitting.