

Radiación solar a partir de datos satelitales

Silvina Sayago¹, Gustavo Ovando¹ y Mónica Bocco¹

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba (Argentina).

Resumen. La radiación solar es la principal fuente de energía renovable necesaria para que se cumplan diversos procesos en los cultivos. La adquisición y registro de la radiación no es sencilla por lo cual las imágenes satelitales resultan una solución por su cobertura espacio-temporal. El objetivo de estudio fue evaluar la radiación solar reportada por CERES con los registros de distintas estaciones meteorológicas y proponer un modelo de regresión lineal de ajuste; su aplicación se realizó a estaciones ubicadas en distintas comunidades autónomas de España. Los resultados mostraron una buena correlación y adecuación de la evolución espacio-temporal, con estadísticos de ajuste de $R^2=0,98$ y valores de RECM entre 5,9 y 19,9 Wm^{-2} , cuando se aplicó el modelo de regresión para ajustar los datos de CERES. Se puede concluir que la radiación obtenida del satélite es confiable para utilizar a nivel localidad/región cuando no se dispone de información meteorológica.

Palabras clave: CERES, meteorología, radiación solar, regresión lineal.

1 Introducción

La radiación solar incidente es la principal fuente de energía renovable en el planeta, y a nivel agrícola es fundamental para que se produzcan procesos tales como fotosíntesis, evapotranspiración y crecimiento de las plantas, así como para determinar en forma eficiente la necesidad de agua y el rendimiento potencial de un cultivo [1]. Por otra parte su cuantificación es necesaria para distintos modelos de simulación de cultivos [2], [3].

La adquisición y registro de series de radiación solar no es sencilla y su medición requiere el uso de equipamientos específicos. Como señalan [4], la problemática de la carencia de datos suficientes de radiación 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.

La mayoría de las estaciones meteorológicas automáticas proveen datos de temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento. Por esto para estimar la radiación solar se han desarrollado varios modelos empíricos; el

propuesto por Prescott, 1940, uno de los más utilizados, y entre otros los de Hargreaves y Samani, Bristow y Campbell [5]. También se han evaluado modelos estocásticos y de redes neuronales [6].

Como señalan [7], la disponibilidad de mediciones de radiación solar observada es espacial y temporalmente inadecuada para muchas aplicaciones, por lo que las imágenes provenientes de satélites de órbita polar o geoestacionarios pueden resultar una solución potencial a este problema. Así la teledetección proporciona una forma para obtener datos de radiación global con continuidad temporal y homogeneidad espacial [8].

Varias décadas atrás, diversos autores [9],[10] verificaron que los modelos físicos y estadísticos a partir de datos conocidos se correlacionaban con datos de radiación estimados a partir del satélite Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES). Para España, [11] presentaron un modelo paramétrico para estimar radiación solar global considerando datos provenientes del sensor MODIS; [12] también para localidades españolas, presentó una metodología que estima radiación solar desde el satélite geoestacionario Meteosat y generó mapas de esta variable.

Los datos provenientes del producto CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy System) permitieron en los últimos años hacer un gran avance para estimar la radiación solar [13]. Para distintos sitios con datos meteorológicos de China, [14] evaluaron la radiación neta en la superficie estimada por CERES, identificando las fuentes de errores para su posible mejora. [15] compararon estimaciones de radiación global obtenidas a partir de un modelo simple basado en información de MODIS, con datos de CERES y mediciones registradas en sitios distribuidos en distintos continentes. Para India, [16] estimaron distintos flujos de radiación neta diaria con CERES, obteniendo para una cuadrícula de 1° estimaciones con una precisión aceptable. A partir de 15 satélites, incluyendo a CERES, y con datos registrados en aproximadamente 4000 estaciones que cubren todo el territorio de Estados Unidos, durante el período 1998 a 2013, [17] ajustó relaciones para estimar la radiación solar en la superficie terrestre. [5] evaluaron, para distintas estaciones meteorológicas de Argentina, la radiación solar generada por CERES con tres modelos que estiman la misma a partir de datos meteorológicos observados.

El objetivo del presente estudio es evaluar y comparar, para distintas estaciones meteorológicas ubicadas en las zonas norte, central y sur de España, la radiación solar generada por CERES con aquella registrada por distintas estaciones, con el fin de establecer la pertinencia de los datos de CERES para sitios donde no se tiene información meteorológica.

2 Materiales y métodos

2.1 Datos satelitales

La radiación solar proveniente de satélite fue, para el presente trabajo, provista por el instrumento CERES, que opera en distintos satélites de NASA, y mide la radiación solar reflejada y la emitida por la Tierra desde el tope de la atmósfera (http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_INSOL_M). Todos los datos fueron procesados siguiendo lo propuesto por el proyecto Fast Longwave And Shortwave Radiative Fluxes (FLASHFlux- <http://flashflux.larc.nasa.gov/>). CERES cuenta con tres canales, uno de onda corta que mide brillo solar reflejado, otro de medición de la radiación termal emitida por la Tierra y un tercero que da cuenta del espectro total de radiación saliente de la Tierra. La resolución espacial de las imágenes empleadas en este trabajo fue de 0,25° de latitud/longitud, con una resolución temporal mensual (Figura 1) para el período de tiempo Julio 2011 a Julio 2015 (excepto el mes de octubre de 2012 que no se cuenta con datos).



Fig. 1. Radiación solar mensual provista por CERES y correspondiente a marzo de 2015 (Imagen extraída de <http://neo.sci.gsfc.nasa.gov>).

2.2 Modelos y estadísticos propuestos

Se propuso una regresión lineal para el ajuste entre la radiación solar media mensual registrada y la radiación media mensual resultante de la información satelital, de modo de obtener los coeficientes que permitan estimar la primera a partir de la producida por CERES. La evaluación del ajuste se realizó considerando para cada estación los promedios mensuales de radiación registrada y del satélite.

Para evaluar la adecuación de los datos de CERES se calcularon los coeficientes de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el porcentaje de éste último, que se definen por:

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Rs_{reg\ i} - Rs_{sat\ i})^2}{N}} \quad (1)$$

$$\% RECM = \frac{100 N}{\sum_{i=1}^N Rs_{reg\ i}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Rs_{reg\ i} - Rs_{sat\ i})^2}{N}} \quad (2)$$

Donde Rs_{reg} indica la radiación media mensual registrada, Rs_{sat} es la radiación media mensual resultante de la información satelital y N es el número de registros por estación meteorológica.

2.3 Área de aplicación

Para el presente estudio se consideraron tres comunidades autónomas de España en las cuales la radiación solar es medida y registrada en forma diaria en estaciones meteorológicas. Las comunidades de Navarra, Madrid y Murcia fueron consideradas por ubicarse en el norte, centro y sur del país y con un número similar de estaciones con datos (Tabla 1 y Figura 3).

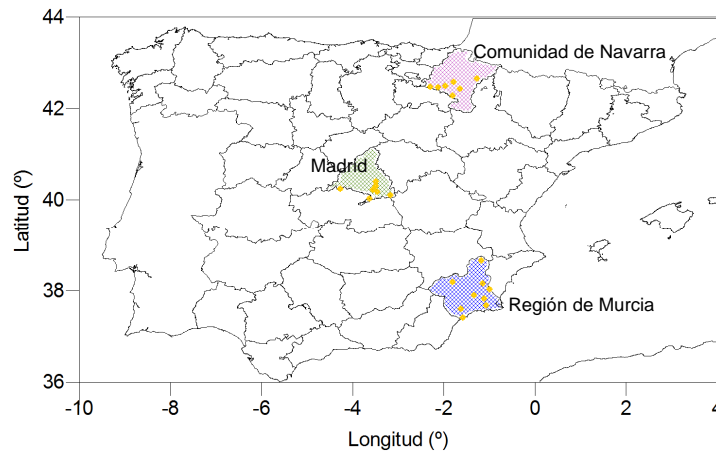


Fig. 3. Estaciones meteorológicas en comunidades autónomas de España donde se registraron los datos de radiación solar.

Tabla 1. Estaciones, por Comunidad, con datos de radiación solar registrada.

Comunidad Autónoma	Estación	Latitud (°)	Longitud(°)
Navarra	Lumbier	42,6645	-1,2758
	Artajona	42,5828	-1,7909
	Lerin	42,5028	-1,9764
	Bargota	42,4769	-2,2993
	Olite	42,4369	-1,6487
	Funes	42,2871	-1,8067
	Sesma	42,4727	-2,1267
Madrid	Aranjuez	40,0410	-3,6304
	Arganda	40,3104	-3,4979
	Chinchón	40,1916	-3,4687
	Fuentidueña de Tajo	40,1071	-3,1755
	San Fernando	40,4113	-3,4966
	San Martín de la Vega	40,2326	-3,5599
	Villa del Prado	40,2503	-4,2729
Murcia	Beniel	38,0338	-0,9999
	Charco de Taray	38,1603	-1,1527
	Corvera	37,8307	-1,1229
	Finca Experimental de Aguilas	37,4181	-1,5922
	La Aljorra	37,6760	-1,0709
	Librilla	37,8987	-1,3384
	Purias-Lorca	37,6011	-1,6295
	Yecla	38,6583	-1,1860
Finca Venta de Ulea-Moratalla	38,1960	-1,8132	

Los datos de radiación fueron provistos por la Agencia Española de Meteorología (AEMET), quienes además proveyeron datos complementarios de temperatura, velocidad de viento, precipitaciones y humedad. Todos los datos fueron obtenidos en forma diaria y promediados mensualmente, para el período de tiempo desde Julio 2011 a Julio 2015.

3 Resultados y discusión

Los valores de radiación mínimos y máximos registrados y provenientes de CERES, para cada comunidad autónoma y todo el período de tiempo considerado en el presente trabajo, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de radiación solar mínimos y máximos promedios (Wm^{-2}) por comunidades autónomas de España.

Comunidad Autónoma	Mínima CERES	Mínima Registrada	Máxima CERES	Máxima Registrada
Navarra	68,98	58,64	353,57	318,67
Madrid	89,71	70,81	402,45	342,68
Murcia	112,12	89,39	404,20	334,27

Si se agrupan las estaciones latitudinalmente, se pueden observar valores mínimos y máximos promedios registrados más extremos en las estaciones ubicadas más al norte (Navarra) y al sur (Murcia), siguiendo la influencia de la variación anual de la declinación solar, en concordancia con [18].

Los valores del coeficiente de determinación entre la radiación solar estimada por CERES y registrada superaron, para todas las estaciones consideradas el valor de 0,98 (Tabla 3), lo cual indica un excelente ajuste. Para estaciones distribuidas en todo el mundo y considerando datos de CERES, [19] reportaron ajustes con radiación registrada de $R^2 = 0,97$ y de 0,95 cuando consideran únicamente estaciones de China.

Los valores de RECM obtenidos para las regiones de España, consideradas en este trabajo, se encuentran en el orden de los que presentaron [14] que reportaron, en promedio, $\text{RECM} = 34,58 \text{ Wm}^{-2}$ a partir de la información provista por CERES para el período 2000 a 2007 en China.

A partir de 15 satélites con datos registrados en aproximadamente 4000 estaciones en Estados Unidos, durante el período 1998 a 2013, [17] obtuvo para el ajuste entre radiación solar registrada y la provista por CERES un valor de RECM de $10,6 \text{ Wm}^{-2}$ (promedio para todo el país), si bien este autor sólo consideró los meses de verano de los años que trabajaron.

Tabla 3. Coeficientes de determinación (R^2) y de raíz de error cuadrático medio (RECM) para la relación entre radiación solar registrada y provista por CERES, en las distintas estaciones de las comunidades autónomas de España.

Comunidad Autónoma	Estación	R^2	RECM (Wm^{-2})
Navarra	Lumbier	0,99	17,87
	Artajona	0,99	27,57
	Lerin	0,99	24,03
	Bargota	0,99	36,18
	Olite	0,99	20,54
	Funes	0,99	20,16
	Sesma	0,99	32,56
Madrid	Aranjuez	0,99	41,43
	Arganda	0,99	39,70
	Chinchón	0,99	45,60
	Fuentidueña de Tajo	0,99	40,97
	San Fernando	0,99	43,72
	San Martín de la Vega	0,98	44,98
	Villa del Prado	0,99	38,58
Murcia	Beniel	0,99	50,40
	Charco de Taray	0,98	44,03
	Corvera	0,98	50,01
	Finca Experimental de Aguilas	0,99	49,83
	La Aljorra	0,99	50,14
	Librilla	0,99	52,28
	Purias-Lorca	0,99	50,05
	Yecla	0,99	45,73
Finca Venta de Ulea-Moratalla	0,99	45,64	

Observando las diferencias entre los valores máximos y mínimos de radiación solar registrada y provista por CERES y los valores de RECM, que se presentan para las distintas estaciones en la Tabla 3, se analizó la evolución temporal de la radiación de ambas fuentes. Se muestran, a modo de ejemplo, en la Figura 3 los gráficos correspondientes a tres estaciones ubicadas al norte, centro y sur del país.

Los anteriores análisis demostraron que los datos de CERES presentan un cambio de igual proporción en los valores de la radiación informada, si bien respetaban la estacionalidad de la radiación. Estas diferencias fueron observadas también por [20], quienes informaron que los efectos de las diferencias espacio-temporales entre cualquier satélite y la información de superficie podría en parte explicar los errores de las estimaciones en la radiación y que, por otra parte, las sobreestimaciones sistemáticas de los datos satelitales podrían deberse también a los aerosoles y sus complejas interacciones con las nubes.

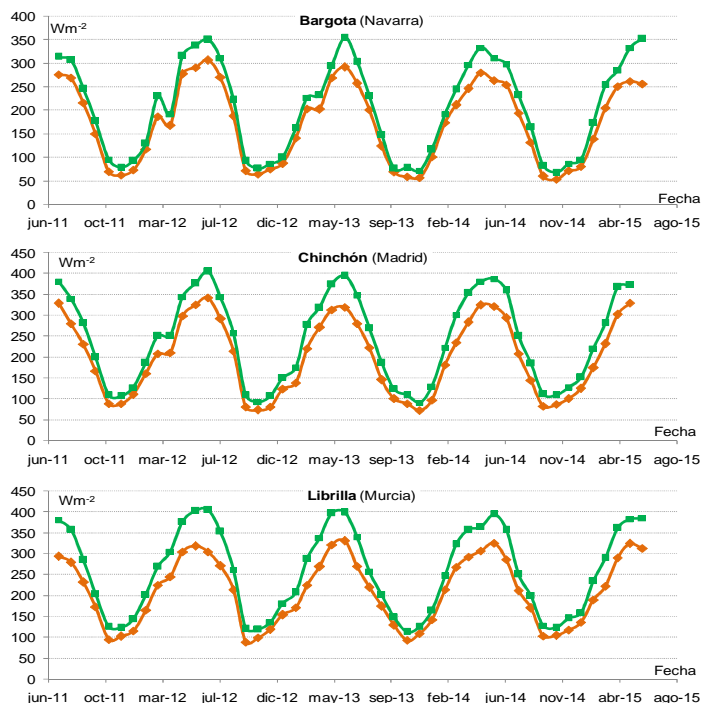


Fig. 3. Evolución temporal de la radiación solar registrada (—) y proveniente de CERES (—) para estaciones seleccionadas de España, período Julio 2011 – Julio 2015.

Considerando las relaciones observadas se propuso un ajuste a partir de una regresión lineal que permite una calibración para los datos de CERES con pendiente igual a 1,775 y ordenada al origen de 0,639.

Aplicando los coeficientes de la ecuación de ajuste a la radiación informada por CERES, se calcularon nuevamente los valores de RECM y el porcentaje que éste representa sobre el promedio de los datos registrados en todo el período considerado (Tabla 4). El estadístico RECM muestra una disminución que, en promedio, supera el 78% para las comunidades de Madrid y Murcia y el 46% para Navarra, con la excepción de la estación meteorológica de Lumbier que no presenta mejoras aún con el ajuste aplicado a los datos de CERES.

Tabla 4. Valor y porcentaje del estadístico de ajuste raíz de error cuadrático medio (RECM) para la relación entre radiación solar registrada y la provista por CERES ajustada por la regresión propuesta, en las estaciones de las comunidades autónomas de España.

Comunidad Autónoma	Estación	RECM (Wm ⁻²)	% RECM
Navarra	Lumbier	19,24	10,18
	Artajona	10,74	6,09
	Lerin	13,39	7,75
	Bargota	9,62	5,62
	Olite	17,00	8,90
	Funes	18,79	9,83
	Sesma	8,99	5,14
Madrid	Aranjuez	7,27	3,63
	Arganda	9,32	4,67
	Chinchón	9,04	4,59
	Fuentidueña de Tajo	5,91	2,93
	San Fernando	8,51	4,33
	San Martín de la Vega	13,06	6,62
	Villa del Prado	7,22	3,61
Murcia	Beniel	12,28	5,88
	Charco de Taray	6,91	3,18
	Corvera	14,90	6,97
	Finca Experimental de Aguilas	13,44	6,37
	La Aljorra	11,44	5,40
	Librilla	12,95	6,20
	Purias-Lorca	11,65	5,53
	Yecla	7,19	3,41
	Finca Venta de Ulea-Moratalla	9,03	4,27

Los porcentajes de error que muestran la RECM son muy inferiores a los que [12] logró para estaciones de España en el período 2001 a 2007 utilizando información del satélite geoestacionario Meteosat. Para estaciones ubicadas al norte del país, en iguales latitudes que las de Navarra en el presente trabajo presentó un %RECM = 10,83 %; para Madrid este autor informó %RECM = 10,3 % y para estaciones con latitudes que se corresponden con la región de Murcia presentó en promedio un %RECM = 12,05 %.

Para los datos de CERES ajustados por el modelo de regresión se muestran en la Figura 4 su evolución temporal conjuntamente con la radiación registrada para las mismas estaciones utilizadas en la Figura 3 de modo comparativo a fin de evaluar la exactitud del ajuste propuesto en el modelo.

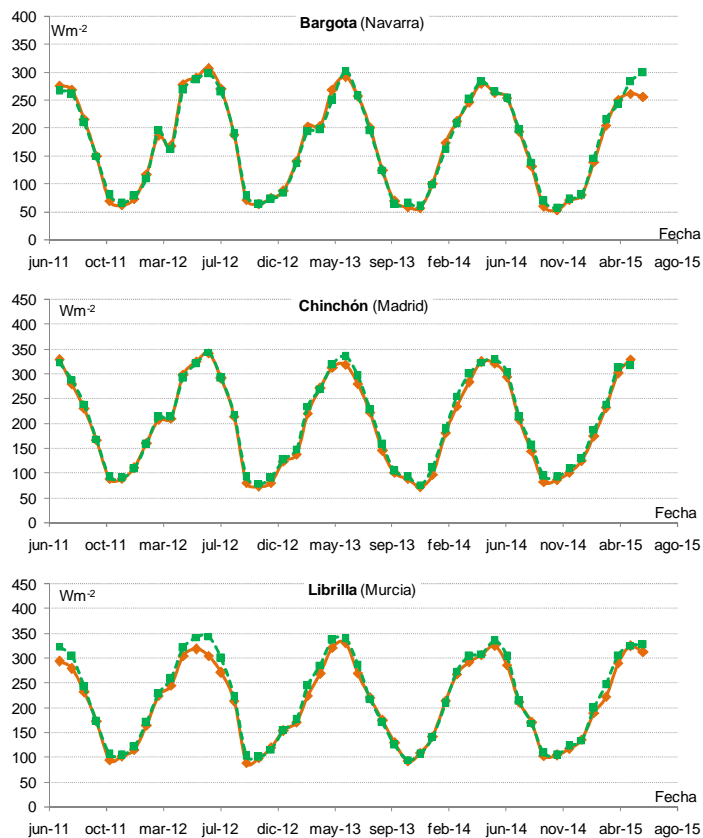


Fig. 4. Evolución temporal de la radiación solar registrada (—) y proveniente de CERES ajustada con coeficientes de regresión (—) para estaciones seleccionadas de España, período Julio 2011 – Julio 2015.

4 Conclusiones

Los resultados encontrados en este trabajo, aseguran que es posible emplear la radiación solar proveniente de CERES como sustituto en caso de no poseer registros de esta variable.

En general los valores de radiación producidos por CERES sobreestiman a los registrados en distintas estaciones meteorológicas, concordando sin embargo en la serie temporal por lo cual es necesario la realización de una corrección lineal. Una vez aplicada esta corrección, se obtuvieron muy buenos ajustes entre la radiación estimada a partir de información satelital con aquella registrada en estaciones meteorológicas.

5 Consideraciones

A futuro nos proponemos, de disponer de series temporales de radiación solar medida y registrada en estaciones de Argentina, evaluar y adecuar el modelo de regresión de manera tal que permita utilizar CERES en nuestro país y particularmente como insumo de modelos de cultivos.

Agradecimientos

Al Dr. Javier Almorox de la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos (UPM) por el aporte de la serie completa de datos de radiación que permitieron el desarrollo de este trabajo.

Referencias

1. Almorox, J., Bocco, M. y Willington, E.: Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renewable Energy* 60, 382–387. (2013).
2. Hunt, L.A., Kuchar, L. and Swanton, C.J.: Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 91, 293–300. (1998).
3. Liang, S.L., Wang, K.C., Zhang, X.T. and Wild, M.: Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3, 225–240. (2010).
4. Will, A., Bustos, J., Bocco, M., Gotay, J. and Lamelas, C.: On the use of niching genetic algorithms for variable selection in solar radiation estimation. *Renewable Energy* 50, 168–176. (2013).
5. Ovando, G., Sayago, S. y Bocco, M.: Radiación solar: modelos para estimarla a partir de imágenes de CERES. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 3, 08.01-08.09. (2015).
6. Sayago, S., Bocco, M., Ovando, G. y Willington, E. Radiación solar horaria: modelos de estimación a partir de variables meteorológicas básicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15, 11.51–11.57. (2011).
7. Journée, M. and Bertrand, C.: Improving the spatio-temporal distribution of surface solar radiation data by merging ground and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment* 114, 2692–2704. (2010).
8. Liang, S.: *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. 534 p. John Wiley & Sons, NJ, USA. (2005)
9. Tarpley, J.: Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J. Appl. Meteor* 18, 1172-1181. (1979).
10. Gautier, C.; Diak G. and Masse, S.: A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *J. Appl. Meteor.* 19, 1005–1012. (1980).
11. López, G. y Batlles, F.J.: Estimating Solar Radiation from MODIS Data, *Energy Procedi* 49, 2362-2369. (2014).
12. Polo, J.: 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. (2015).

13. Smith, N.P., Thomas, S., Shankar, M., Hess, P.C., Smith, N.M., Walikainen, D.R., Wilson, R.S. and Priestley, K. J. Assessment of the clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) instrument performance and stability on the Aqua, Terra, and S-NPP spacecraft. P SPIE Earth Observing Systems XX 9607, 96070T-96070T-10 (2015).
14. Pan, X., Liu, Y. and Fan, X. Comparative Assessment of Satellite-Retrieved Surface Net Radiation: An Examination on CERES and SRB Datasets in China. *Remote Sensing* 7, 4899–4918. (2015).
15. Chen, M., Zhuang, Q. and He, Y.: An Efficient Method of Estimating Downward Solar Radiation based on the MODIS observations for the use of Land Surface Modeling. *Remote Sensing* 6, 7136-7157. (2014).
16. Sai Krishna, S.; Manavalan, P. and Rao, P.: Estimation of net radiation using satellite based data inputs. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-8*, 307-313. (2014).
17. Slater, A.G.: Surface solar radiation in North America: a comparison of observations, reanalyses, satellite, and derived products. *Journal of Hydrometeorology* 17, 401–420. (2016).
18. Kiehl, J. and Trenberth, K.: Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 197-208. (1997)
19. Zhang, X.; Liang, S.; Wild, M. and Jiang, B.: Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. *Remote Sensing of Environment* 165, 186-202. (2015).
20. Xia, X. ; Wang, P.; Chen, H. and Liang, F.: Analysis of downwelling surface solar radiation in China from National Centers for Environmental Prediction reanalysis, satellite estimates, and surface observations. *J. Geophys. Res.* 111(D09103), 1–9. (2006).