

DOWNSCALING OF SOLAR IRRADIATION FROM SATELLITE MODELS

Antoñanzas Torres, F. ¹; Antoñanzas Torres, J. ¹; Martínez De Pisón Ascacibar, F. J. ¹;
Alía Martínez, M. J. ¹; Perpiñán Lamigueiro, O. ²

¹ Universidad de La Rioja, ² Universidad Politécnica de Madrid

Solar irradiation databases from satellite estimates are based on images taken from satellites with wide spatial resolution. The rising interest on solar energy technologies and climate change generates the necessity of higher spatial resolution of solar irradiation data. The downscaling of satellite estimates provides an alternative to dense pyranometers networks, which are very expensive to maintain. The methodology proposed is based on the shade impact analysed from a digital elevation model of high spatial resolution and the surface reflectivity. This methodology is applied and validated with on-ground measurements in the Iregua river valley in the Spanish region of La Rioja. Eventually, it is generated a map of the annual sum of solar global irradiation for this valley.

Keywords: *Solar global irradiation; Downscaling spatial data; Satellite models*

REDUCCIÓN DE ESCALA EN LA IRRADIACIÓN SOLAR DE LOS MODELOS DE SATÉLITE

Las bases de datos de irradiación solar a partir de estimaciones de satélite se basan en imágenes que toman dichos satélites con una resolución espacial grosera. El aumento del interés en las tecnologías de energía solar y en el cambio climático introducen la necesidad de datos de irradiación con una mayor resolución espacial. Por lo tanto, la reducción de escala supone una alternativa a las caras de mantener redes de piranómetros instalados en estaciones meteorológicas. La metodología que se propone se basa en el análisis de las sombras a partir de un modelo de elevación de alta resolución espacial. Esta metodología se aplica y valida con medidas terrestres en el valle del Iregua en La Rioja. Finalmente, se genera un mapa de la irradiación global anual en este valle.

Palabras clave: *Irradiación solar global; Reducción de escala de datos espaciales; Modelos de satélite*

Correspondencia: manuel-julian.aliam@unirioja.es

1. Introducción

La energía solar fotovoltaica ha visto un desarrollo muy notable en los últimos años en algunas zonas del planeta con alto recurso solar. En muchas ocasiones el acceso a datos fiables de irradiación solar supone un auténtico reto en las fases de promoción, diseño y análisis de riesgos de una nueva central fotovoltaica. Se trata pues de aquellas zonas sin piranómetros instalados cercanos a la ubicación seleccionada y con datos de irradiación a partir de estimaciones de satélite con baja resolución espacial, en los que la propia incertidumbre asociada a la variabilidad intrapixel es demasiado elevada por la influencia de variable micro-climáticas y/o topografía compleja. En este tipo de situaciones, dado el alto coste de instalación y mantenimiento de una estación meteorológica, se suele retrasar su instalación hasta la fase final del diseño o ejecución de la planta fotovoltaica, utilizando en la fase de promoción de la misma medidas de satélite con resolución grosera e incurriendo por lo tanto, en una alta incertidumbre y en un mayor riesgo en el proyecto.

El efecto de la variabilidad de la irradiación solar relacionada con la distancia entre las mediciones ha sido previamente analizado en España a través de estimaciones mediante *krigueado* ordinario y *krigueado* universal, concluyendo que estaciones alejadas más de unos 40 km en topografías complejas no son suficientemente relevantes para elaborar mapas de irradiación precisos (Antonanzas-Torres et al., 2013). La topografía supone un atenuador de considerable importancia sobre la irradiación solar, debido a que las sombras del terreno tienen una influencia directa sobre la irradiación, penalizándola. Sin embargo, el efecto de la topografía no es comúnmente considerado en numerosos estudios de irradiación solar (Moreno et al., 2011; Liu et al., 2009; Abraha & Savage, 2008) debido al alto coste computacional y a la necesidad de disponer de irradiación solar con alta resolución temporal para su cálculo, preferiblemente horaria. Sin embargo, desde recientemente se han liberado bases de datos de irradiación solar derivadas de imágenes de satélite de libre acceso con cobertura global y con resolución temporal diaria y horaria, aunque con reducida resolución espacial ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$, del orden de 40 km en latitudes en torno a 40°). En otras áreas del planeta como Europa y el norte de África se dispone de datos con una resolución espacial algo superior de $0,03^\circ \times 0,03^\circ$. El hecho de que estas bases de datos dispongan de resolución temporal horaria facilita cuantificar el peso de la topografía y reducir significativamente el peso de la misma en el conjunto del pixel de irradiación que proporcionan.

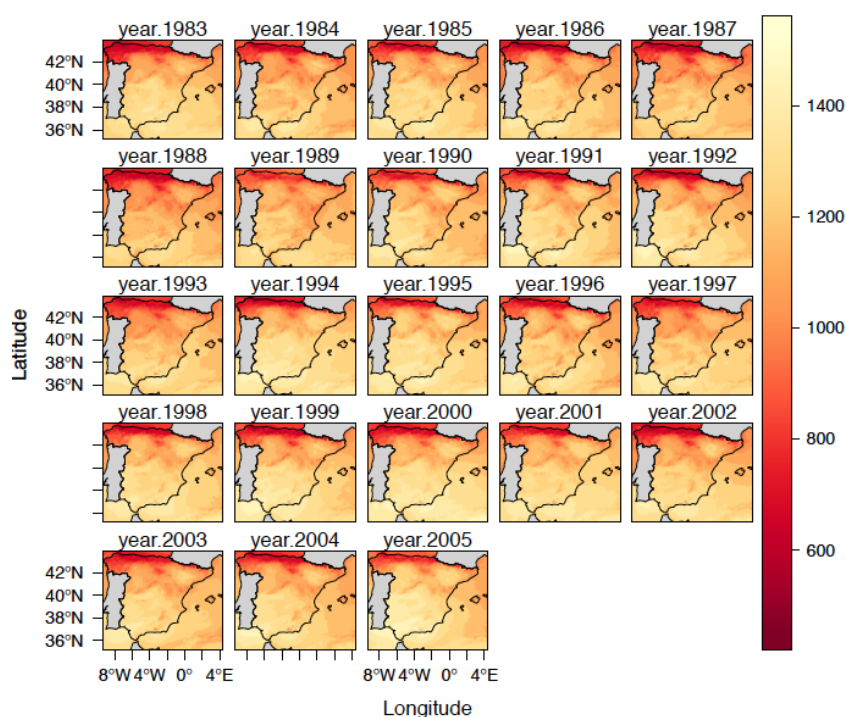
En este estudio se propone emplear la reducción para aumentar la resolución espacial de las estimaciones de irradiación solar y reducir los errores de las mismas asociados a la incertidumbre intrapixel por la influencia de la topografía. La reducción de escala ha sido utilizado con anterioridad en otras disciplinas como hidrología (Chen et al., 2013), agricultura (Zhang, 2005) y también en irradiación solar en el macizo del Mont Blanc (Corripio, 2003) y en Sierra Nevada (Ruiz-Arias et al., 2010), siendo una alternativa a la interpolación geoestadística cuando se disponen de datos en archivos espaciales continuos, en lugar de mediciones puntuales.

Se empleará un modelo digital de elevación (DEM) como variable exógena conocida y de mayor resolución espacial a la hora de realizar la reducción de escala. Los resultados serán validados mediante datos de piranómetros en 3 estaciones meteorológicas con registros horarios en el área de análisis. El estudio se realiza en una zona de alta complejidad topográfica como es el valle del río Iregua en La Rioja (España) con elevaciones entre 400-2000 m.

2. Datos

Los datos de irradiación solar se obtienen de los *climate datasets* del Climate Monitoring Satellite Application Facility (CM SAF, 2013), base de datos de estimaciones de satélite de libre descarga con participaciones de varios institutos meteorológicos europeos empleando imágenes de Meteosat. La resolución espacial en la zona estudiada es de $0,03^\circ \times 0,03^\circ$ (equivalente a unos $3,5 \text{ km} \times 3,5 \text{ km}$) y la resolución temporal disponible es horaria. El análisis se realiza con datos horarios del año 2005 según la Figura 1, ya que es el año con mayor irradiación solar del periodo disponible de CM SAF (1983-2005) y más similar a un año meteorológico típico según lo acontecido durante el periodo 2006-2012. Se utilizan los *climate datasets* correspondientes a irradiación global horizontal (SIS) y a irradiación directa horizontal (SID).

Figura 1: Irradiación directa, SID *climate dataset* de CM SAF



Finalmente, seleccionando el área de estudio de los ficheros de irradiación con mayor alcance espacial, se deriva la irradiación global horizontal anual de los datos de CM SAF con la resolución de $0,03^\circ \times 0,03^\circ$ (Figura 2), cuyo rango oscila entre 1498 y 1606 $\text{kWh/m}^2\text{año}$.

Los datos de 3 estaciones meteorológicas (Logroño, San Román de Cameros y Moncalvillo) con el histórico completo horario de irradiación global horizontal (GHI) del año 2005 se utilizan como validadores de los resultados. Estas tres estaciones presentan un factor de visión celeste (SVF) cercano a la unidad (ausencia de bloqueo de horizonte). Las estaciones meteorológicas seleccionadas disponen de piranómetros de Primera Clase (ISO9060) con un error máximo del 5%.

El modelo digital de elevación se obtiene del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2013) con una resolución de $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$. Como se aprecia en la Figura 3, el valle del Iregua sigue una orientación Sur-Norte y por lo tanto, genera sombras importantes en los amaneceres y atardeceres.

Figura 2: GHI anual (kWh/m²) del área de estudio

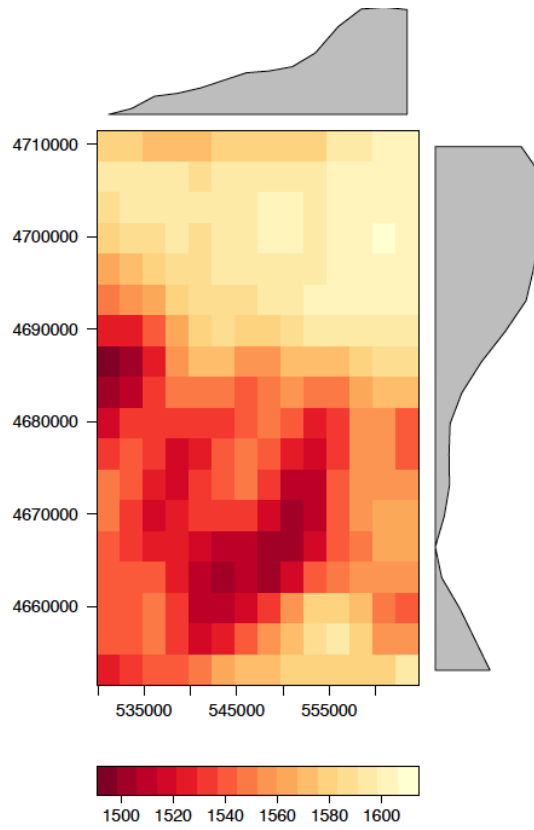
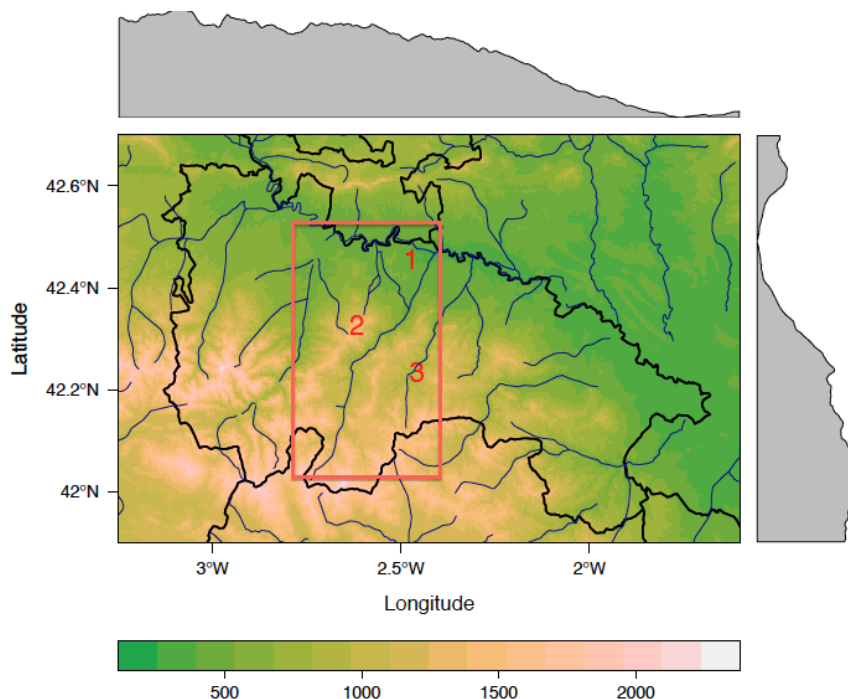


Figura 3: Modelo digital de elevación de la zona de estudio (recuadrada en rojo). Los números se corresponden a las estaciones meteorológicas: Logroño (1), Moncalvillo (2), San Román de Cameros (3)



3. Método

El software utilizado en el estudio es R (R, 2013) y las librerías específicas *raster* (Hijmans & van Etten, 2012) para el cálculo y análisis espacial, *solaR* (Perpiñán, 2012b) para el cálculo de la geometría solar, *parallel* para el paralelizado de cálculos computacionalmente muy costosos y *rasterVis* (Perpiñán & Hijmans, 2012) para la visualización espacial de los resultados.

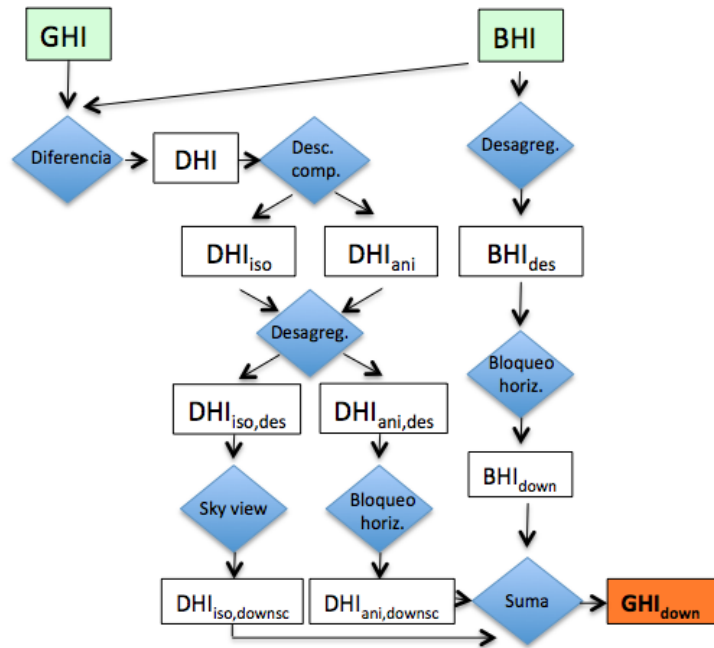
La metodología que se propone en este estudio se muestra en la Figura 4. Partiendo de los inputs de irradiación global horizontal (GHI) e irradiación directa horizontal (BHI) se obtiene la irradiación difusa horizontal en el plano horizontal (DHI). La DHI se descompone en las componentes de irradiación difusa isotrópica (DHI_{iso}) y anisotrópica (DHI_{ani}) según el modelo anisotrópico de Hay & McKay (1985), ecuaciones 1-3. Este modelo se basa en el índice de anisotropía (k_1) definido como la relación entre la irradiancia directa y la irradiancia extra-atmosférica. La irradiación difusa isotrópica considera aquella porción de la irradiación difusa que proviene de un cielo isotrópico y tendrá mayor importancia en aquellos días muy nublados. La irradiación difusa anisotrópica o circunsolar es aquella que proviene del área circunsolar y puede ser analizada como irradiación directa (Perpiñán, 2012a).

$$DHI = DHI_{iso} + DHI_{ani} \quad (1)$$

$$DHI_{iso} = DHI \cdot (1 - k_1) \quad (2)$$

$$DHI_{ani} = DHI \cdot k_1 \quad (3)$$

Figura 4: Metodología empleada en la reducción de escala



Las dos componentes de la irradiación difusa y la irradiación directa se desagregan con la resolución del DEM (UTM 200 m x 200 m). Sin embargo, dado que la resoluciones del DEM y de la irradiación (0,03 ° x 0,03 °) se encuentran en distintas escalas y el mallado tiene diferente geometría se realiza un post-procesado del desagregado denominado *resample* utilizando interpolación bilineal (Hijmans & Van Etten, 2012). Este proceso es computacionalmente muy costoso y puede ser evitado seleccionando un DEM con igual geometría de mallado que la fuente de irradiación solar.

A partir de este punto comienza el análisis topográfico interactivo con cada una de las componentes desagregadas de la irradiación solar. La DHI_{iso} está limitada por la porción de cielo visible desde cada punto analizado, denotado como factor de visión celeste (SVF) según la ecuación 4 empleada por Ruiz-Arias et al., 2010.

$$SVF = \int_0^{2\pi} \text{sen}^2(\theta_{hor}) d\theta \quad (4)$$

donde θ_{hor} es el ángulo de horizonte entre la dirección del zénit y el horizonte. El SVF se calcula tomando intervalos de θ_{hor} de 5 ° alrededor de los 360 ° de esfera celeste.

Finalmente, la irradiación difusa isotrópica incidente viene indicada en la ecuación 5.

$$DHI_{iso,downsc} = DHI_{iso} \cdot SVF \quad (5)$$

A continuación, se procede a analizar el bloqueo del horizonte de la DHI_{ani} y BHI . Se calcula la geometría solar en valores diez-minútales, particularmente, el ángulo de elevación solar y el azimut solar para la región estudiada con la resolución de los archivos espaciales (raster) de irradiación y posteriormente la media por capas horaria de los valores diez-minútales. De este modo, se obtienen sendos archivos espaciales que serán desagregados y post-procesados con *resample* e interpolación bilineal. La decisión de realizar el desagregado una vez que se ha calculado la geometría solar permite reducir drásticamente el tiempo computacional sin penalizar significativamente los resultados. El θ_{hor} correspondiente al azimut de cada hora del año se compara con el ángulo complementario de la altura solar (ángulo zenital). Si el ángulo zenital es mayor al θ_{hor} implica que existe bloqueo del horizonte y por lo tanto, no se recibe ni BHI ni DHI_{ani} . Finalmente, la suma de las componentes $DHI_{ani,downsc}$, $DHI_{iso,downsc}$ and BHI_{downsc} constituye la irradiación global horizontal (GHI).

4. Resultados

El factor visión es un indicador que permite entender de forma numérica en qué medida se reduce la DHI_{iso} . En la Figura 5- Izquierda se visualiza la orografía distinguida entre la zona norte de la imagen correspondiente al valle del Ebro y la zona sur relativa a la Sierra de Cameros con rangos de SVF entre 0,73 y 1. Aquéllas zonas con color más oscuro indican una menor proporción de cielo visible.

En la Figura 5- Derecha se muestra la suma anual de la irradiación global en el plano horizontal tras la reducción de escala con una resolución de 200 m x 200 m. La variación de la GHI en el área de estudio está en el rango de 994 a 1580 kWh/m²año.

La Tabla 1 muestra los resultados de las estimaciones de GHI de CM SAF sin reducción de escala (GHI_{cmsaf}) y posteriores a la reducción de escala (GHI_{down}). Se selecciona el error relativo (rE) como estadístico de análisis en la validación según la ecuación 6.

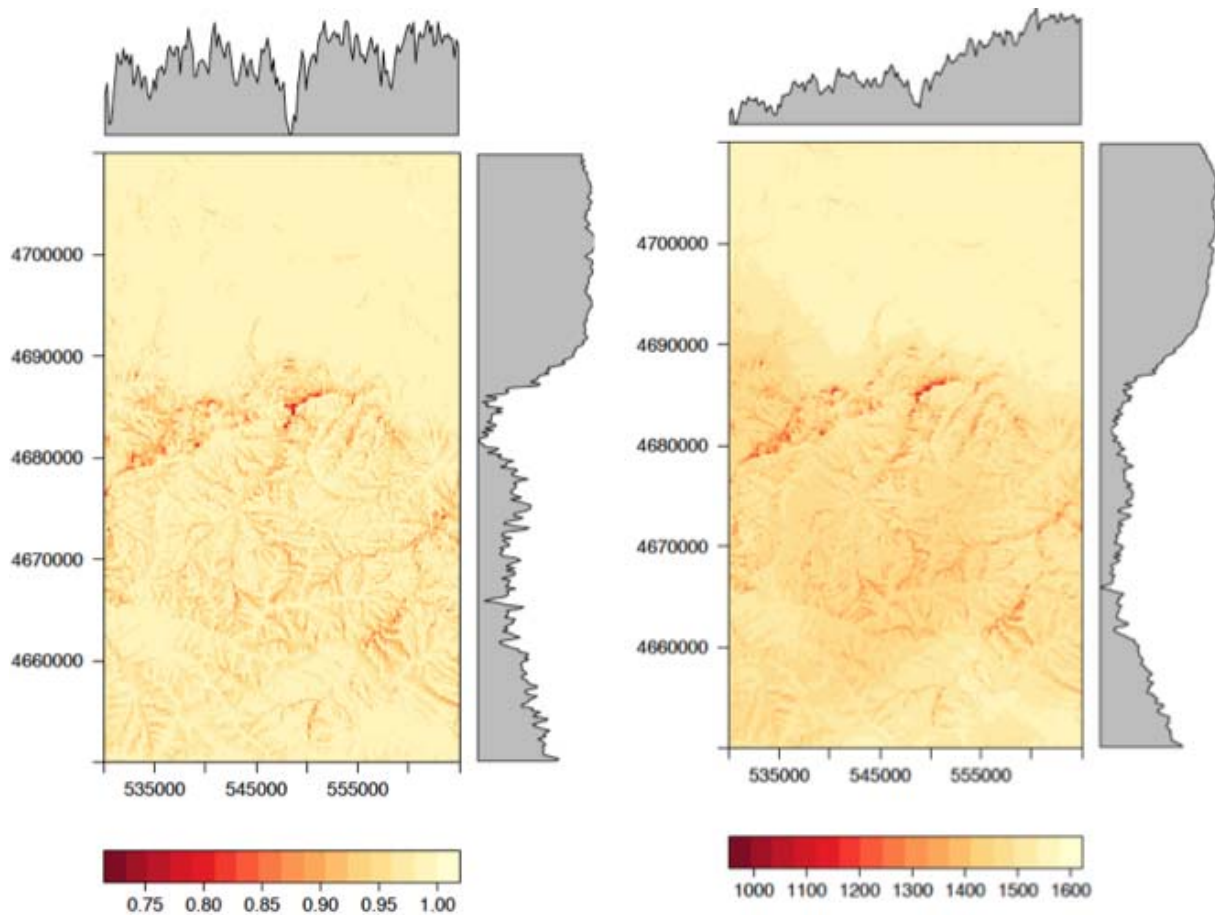
$$rE = \frac{GHI_{est} - GHI_{med}}{GHI_{med}} \quad (6)$$

Los errores se ven reducidos en las tres estaciones a pesar del alto SVF, por el cual un factor unidad supondría la no aplicación de la metodología de bloqueo de horizonte explicada en el apartado de Método. En el caso de la estación de Logroño el error se reduce por debajo de la tolerancia del piranómetro (5%).

Tabla 1. Comparativa de resultados

| Estación | SVF | GHI_{med} | GHI_{cmsaf} | GHI_{down} | rE_{cmsaf} | rE_{down} |
|-------------|--------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| Logroño | 0.9985 | 1504 | 1592 | 1559 | 5.8% | 3.6% |
| Moncalvillo | 0.9995 | 1330 | 1498 | 1473 | 12.6% | 10.7% |
| San Román | 0.9754 | 1504 | 1537 | 1488 | 2.2% | -1.1% |

Figura 5: Izquierda: SVF. Derecha: Reducción de escala de GHI anual en kWh/m²



5. Conclusiones

La importancia de conocer con precisión la irradiación solar en un punto o área geográfica es fundamental para la promoción y el desarrollo de la tecnología solar fotovoltaica. En general, el acceso a datos fiables de irradiación solar medidos con piranómetros en estaciones meteorológicas es muy complicado y se requiere que dichas estaciones se encuentren instaladas a pocos kilómetros de la ubicación y sus piranómetros calibrados anualmente. Las estimaciones derivadas de imágenes de satélite suponen una alternativa a las estaciones meteorológicas, siendo su resolución espacial en muchas áreas del planeta muy grosera, no así su resolución temporal que puede ser horaria.

La reducción de escala ha supuesto una herramienta útil a la hora de reducir los errores entre las estimaciones de satélite y las mediciones de piranómetros en el valle del Iregua, teniendo en cuenta el bloqueo del horizonte y el factor SVF. Se señala que las estaciones meteorológicas donde se ha validado el estudio se encuentran ubicadas en zonas muy despejadas y a pesar de ello, se ha reducido el error anual en un 2% (Moncalvillo y Logroño), como consecuencia de un mejor ajuste de la DHI_{iso} .

6. Agradecimientos

Este proyecto ha sido parcialmente financiado mediante una beca FPI de la Universidad de La Rioja (FPI-UR-2012) y mediante el proyecto del Instituto de Estudios Riojanos (IER) con título *Análisis y modelización espacio-temporal de la irradiación solar en La Rioja mediante técnicas geo-estadísticas bio-inspiradas*.

7. Referencias

- Abraha, M., & Savage, M. (2008). Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (3), 401–416.
- Antonanzas-Torres, F., Cañizares, F., & Perpiñán, O. (2013). Comparative assessment of global irradiation from a satellite estimate model (CM SAF) and on-ground measurements (SIAR): A Spanish case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 248–261.
- Chen, J., Brissette, F.P, Chaumont, D., & Braun, M. (2013). Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *Journal of Hydrology*, 479 (4), 200-214.
- CM SAF. (2013). The satellite application facility on climate monitoring facility. /<http://www.cmsaf.eu/>
- Corripio, J. (2003). Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and solar radiation modelling in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 17, 1-23.
- Hay, J.E., & McKay, D.C. (1985). Estimating solar irradiance on inclined surfaces: A review and assessment of methodologies. *International Journal of Solar Energy*, 3, 203.
- Hijmans, R.J., & van Etten, J. (2012). raster: geographic analysis and modeling with raster data, R package version 1.9-82, /<http://CRAN.R-project.org/package=raster/>
- IGN. (2013). Instituto Geográfico Nacional. /www.ign.es/
- Liu, X., Mei, X., Li, Y., Wang, Q., Jensen, J. R., Zhang, Y., & Porter, J. R. (2009). Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (9), 1433 – 1446.
- Moreno, A., Gilabert, M., & Martínez, B. (2011). Mapping daily global solar irradiation over Spain: A comparative study of selected approaches. *Solar Energy*, 85 (9), 2072 – 2084.
- Perpiñán, O. (2012a). *Energía solar fotovoltaica*. Versión 1.25. <http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>
- Perpinán, O. (2012b). solaR: solar radiation and photovoltaic systems with R. *Journal of Statistical Software*, 50 (9), 1–32.
- Perpinan, O., & Hijmans R. (2012). rasterVis: visualization methods for the raster package, R package version 0.10-9; /<http://CRAN.R-project.org/package=rasterVis>.
- R. (2013). R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0; /<http://www.R-project.org>

Ruiz-Arias, J., Cebecauer, T., Tovar-Pescador, J., & Suri, M. (2010). Spatial disaggregation of satellite-derived irradiance using a high-resolution digital elevation model. *Solar Energy*, 84, 1644-1657.

Zhang, X.C. (2005). Spatial downscaling of global climate model output for site-specific assessment of crop production and soil erosion. *Agricultural and Forest Meteorology*, 135 (1-4), 215-229.