

NUBOSIDAD Y RADIACIÓN SOLAR EN LA PENÍNSULA IBÉRICA ENTRE 1950 Y 2050. DE LAS EVIDENCIAS OBSERVACIONALES A LAS SIMULACIONES CLIMÁTICAS

Josep CALBÓ¹, Aarón ENRIQUEZ-ALONSO¹, Alejandro SANCHEZ-ROMERO¹,
Josep-Abel GONZÁLEZ¹, Arturo SANCHEZ-LORENZO²

¹Universitat de Girona, Departament de Física.

²Instituto Pirenaico de Ecología, Centro Superior de Investigaciones Científicas.

josep.calbo@udg.edu, aaron.enriquez@udg.edu, alejandro.sanchez@udg.edu,

jose.gonzalez@udg.edu, arturo.sanchez@ipe.csic.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión de diversos estudios que describen la evolución de la nubosidad y la radiación solar en superficie en la Península Ibérica desde mediados del siglo XX. Estos estudios se basan mayoritariamente en las observaciones recogidas en las estaciones meteorológicas de superficie, pero para el período más reciente, se utilizan también datos de satélite y de reanálisis. Los estudios revisados muestran una buena coherencia entre ellos, destacando en las series de insolación el fenómeno del *dimming* (1955-1985 aprox.) seguido del *brightening* (1985-2010 aprox.); mientras que la nubosidad muestra un descenso continuo desde los años 1960 a la actualidad, lo que lleva a pensar en un efecto no despreciable de los aerosoles atmosféricos. Presentamos también las proyecciones futuras de la nubosidad total, a partir de los resultados de los modelos globales del CMIP5. Las proyecciones muestran un progresivo descenso de la nubosidad que debería provocar un aumento de la radiación solar durante los próximos decenios.

Palabras clave: *Dimming* y *brightening*, radiación solar en superficie, insolación, nubosidad total, proyecciones climáticas.

ABSTRACT

This paper presents a review of several published studies that describe the evolution of cloud cover and surface solar radiation in the Iberian Peninsula since the mid-twentieth century. These studies are based mainly on ground observations taken at meteorological stations, but for the most recent period satellite data and reanalysis data have also been used. The reviewed studies show good consistency between them. The phenomenon of dimming (1955-1985 approx.) followed by brightening (1985-2010 approx.) is clearly detected in sunshine duration series. In cloudiness series, we observe a continuous decline of total cloud cover from the 1960s until today, which suggests a non-negligible effect of atmospheric aerosols. We also present future projections of total cloudiness, based on results of global climate models included in CMIP5. Projections show a progressive decrease in cloudiness which should drive increased solar radiation during the coming decades.

Key words: Dimming and brightening, surface solar radiation, sunshine duration, total cloud cover, climate projections.

1. INTRODUCCIÓN

Los trabajos de investigación sobre el cambio climático, bien sean análisis de series históricas para analizar las tendencias, bien sean las proyecciones hacia el futuro, están por lo general centrados en dos variables, la temperatura y la precipitación. Sin embargo es obvio que otras variables muestran tendencias decenales, por lo que su análisis tiene también interés. El presente estudio se centra en dos de ellas: la radiación solar y la nubosidad. En realidad, ambos factores son piezas clave en el balance energético del planeta, siendo el primero el principal flujo energético, que viene modulado por el segundo. Por otra parte, la variabilidad de la radiación solar, a corto y largo plazo, también tiene interés en el sector energético, dado el aumento de instalaciones solares térmicas y fotovoltaicas en todo el mundo.

En lo que se refiere a la radiación solar, y a escala global, el cambio más relevante que se ha producido en las últimas décadas es el conocido como *global dimming* y *brightening*. Estos dos términos se refieren respectivamente a un período (entre 1960 y mediados de 1980) en el que se registró un descenso claro de la radiación solar en superficie, de forma generalizada en muchas áreas de la Tierra; y a otro período, desde los años 1980 hasta el presente, durante el cual la radiación solar ha ido aumentando en la mayor parte de las regiones estudiadas (Wild, 2009). Los cambios en la nubosidad deben haber jugado un papel importante en estas variaciones de la radiación solar en superficie, pero se encuentra que la nubosidad no ha seguido patrones de cambio tan claros ni tan extendidos por toda la Tierra. En realidad, el oscurecimiento y posterior recuperación de la radiación se manifiesta incluso si se analizan únicamente los días despejados. Ello lleva a especular que los cambios en la carga de aerosoles atmosféricos pueden ser también fundamentales para explicar los cambios en la radiación solar (Wild, 2012).

En cuanto a las proyecciones climáticas, los resultados más conocidos son los que, generados por los modelos que formaron parte del CMIP5 (el proyecto de intercomparación de modelos climáticos, en su quinta fase), indican un aumento de la temperatura media del planeta para el próximo siglo. Dependiendo del escenario (o rigurosamente, del “*representative concentration pathway*”, RCP) y del modelo, el aumento para finales del siglo XXI se encontraría entre 0,3 y 4,8°C (IPCC, 2013), aunque para mediados de siglo el rango sería más estrecho, debido a la inercia climática y al largo tiempo de residencia de los gases con efecto invernadero de origen antropogénico. En cualquier caso, menos conocidas son las proyecciones para la radiación solar o para la nubosidad, aunque ambas variables están incluidas en los modelos climáticos. Aún menos conocimiento se tiene de dichas proyecciones para áreas relativamente pequeñas como puede ser la Península Ibérica.

En el Grupo de Física Ambiental de la Universitat de Girona se está investigando desde hace unos 10 años la evolución de la nubosidad y la radiación solar (incluyendo como variable aproximativa la insolación, es decir las horas de sol registradas con un heliógrafo), en particular sobre la Península Ibérica, y utilizando como datos básicos los recogidos por los observatorios meteorológicos convencionales. En el presente

trabajo se recogen diversos resultados de esta línea de investigación, la mayoría de ellos ya publicados de forma independiente. Además, se incorporan algunos resultados más recientes, como son aquéllos obtenidos a partir de bases de datos globales, de reanálisis, o de satélites, así como una estimación de la evolución del espesor óptico de los aerosoles a partir de la insolación. Por último, se hace una incursión en la descripción de los resultados de modelos climáticos en cuanto a la nubosidad, para la Península Ibérica, se refiere.

2. DATOS Y MÉTODOS

La mayor parte de los resultados que se presentarán en el siguiente apartado provienen de trabajos ya publicados (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2007; 2009; 2012; 2013; Enriquez-Alonso *et al.*, 2015; Sanchez-Romero *et al.*, 2016). En todas estas referencias se detalla el origen de los datos utilizados. En resumen, la mayor parte de los datos han sido facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) y provienen de las observaciones tomadas en las estaciones meteorológicas españolas (incluyendo a menudo alguna en las Islas Baleares pero descartando casi siempre aquéllas de las Islas Canarias). Estos datos incluyen insolación total en base diaria, nubosidad total (tres observaciones al día), y radiación solar (global sobre superficie horizontal, en base diaria). Dependiendo de la estación y de la variable, las series son más o menos largas, existiendo para insolación y nubosidad alguna serie desde segundo tercio del siglo XIX, mientras que las de radiación se inician hacia los años 1980. En algunos casos se han incluido también datos de estaciones portuguesas y/o del sur de Francia, obtenidos directamente de los servicios meteorológicos o de la base de datos europea ECA&D (*European Climate Assessment and Dataset*). En la estimación del espesor óptico de los aerosoles se han utilizado datos de la red AERONET, formada por diversos observatorios que disponen de heliofotómetros Cimel.

En uno de los trabajos se han utilizado datos provenientes de reanálisis y también datos basados en observaciones desde satélite. Concretamente, se trata de los reanálisis ERA-Interim del ECMWF, MERRA de la NASA, y CFSR del NCEP. En cuanto a los satélites, se han tomado los datos del proyecto ISCCP, que integra imágenes de satélites polares y geoestacionarios; así como de los productos CLARA y PATMOS-x, ambos basados en imágenes de los sensores AVHRR a bordo de satélites de órbita polar, pero tratados por agencias europeas y norteamericanas respectivamente. En cuanto a las simulaciones climáticas, corresponden a las salidas de los modelos que tomaron parte en el CMIP5 (el proyecto de intercomparación de modelos asociado al quinto informe del IPCC). En concreto, los resultados que se presentan a continuación corresponden a 37 de dichos modelos, que son los que proporcionaban salidas de proyecciones futuras para los escenarios RCP 4.5 y 8.5. Pueden encontrarse más detalles sobre los modelos climáticos en lo que se refiere a la nubosidad en Enriquez-Alonso (2016).

En todos los casos, e independientemente de la resolución temporal inicial, los datos se han reducido a base mensual, y luego a anual. En este proceso se han descartado datos obviamente erróneos. Los resultados en el presente trabajo se dan solo en base anual, aunque en los artículos originales a menudo existen análisis en base estacional. Puesto que el principal interés está en la descripción de la evolución de-

cenal, se ha trabajado con anomalías, en lugar de los valores “absolutos” originales. Así, se han obtenido las anomalías como la diferencia entre el valor mensual (o anual) y el correspondiente valor medio para un período de referencia (siempre que ha sido posible, este período es de 30 años, habitualmente, 1971-2000). También se han utilizado las anomalías relativas (es decir, la mencionada diferencia dividida por el mismo valor medio) o las desviaciones relativas (es decir, el cociente entre cada valor y el valor medio del período de referencia). En los resultados que se muestran en el presente estudio, las series de anomalías de todas las estaciones tratadas han sido combinadas para obtener una serie media que consideramos representativa de la Península Ibérica. Previamente, se ha comprobado la homogeneidad temporal de dichas series, básicamente mediante la aplicación de test de homogeneidad relativos (es decir que incorporan comparación con series cercanas). Cuando se indica alguna tendencia decadal, esta se refiere por lo general a la tendencia lineal inferida por el método de Mann-Kendall; las tendencias se consideran significativas a partir de un nivel de significación del 90% (es decir, $p < 0.1$).

3. RESULTADOS

3.1. Evolución pasada de la nubosidad, insolación y radiación solar

En un primer trabajo (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2007), se analizaron las series históricas de insolación para 72 estaciones peninsulares, para el período 1930-2004. La Figura 1 ha sido extraída de aquel trabajo, y resume la principal conclusión que se alcanzó: en la Península Ibérica, el período de oscurecimiento (*dimming*) se extiende entre los años 1950s y 1985, y es seguido por un período de aumento de la luminosidad solar (*brightening*) desde esa fecha y hasta al menos el principio del nuevo milenio.

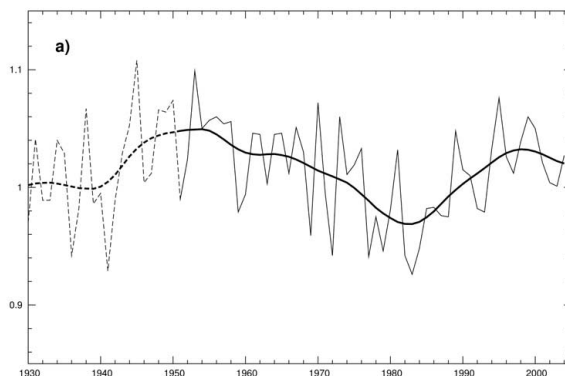


Fig. 1. Serie media insolación (desviaciones relativas a la media del período 1971-2000) junto con la curva suavizada por medio de un filtro de pasa-bajo. La línea discontinua indica un número de estaciones bastante inferior para los años anteriores a 1951. Fuente: Sanchez-Lorenzo *et al.* (2007).

En un posterior trabajo (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2012), se consiguieron un total de 39 series de nubosidad en España, algunas de las cuales disponibles desde el año

1865. El análisis de la serie media (ver Figura 2) mostró que para todo el periodo analizado (1866-2010), la tendencia es positiva (+0.44% por decenio) de acuerdo con lo que se había observado mayoritariamente durante el siglo XX en varias zonas de la Tierra. Ahora bien, desde los años 1960 la nubosidad presentó un claro descenso, con una tendencia negativa de -0.80% por decenio en el periodo 1961-2010.

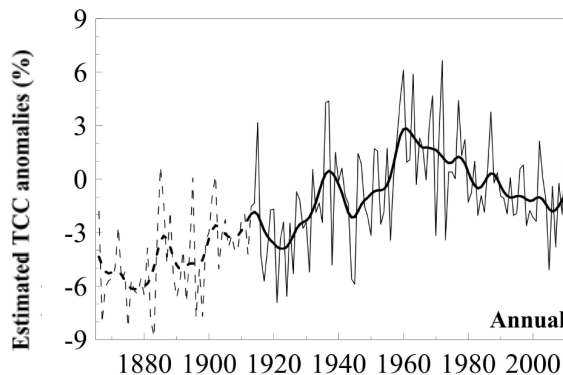


Fig. 2. Serie media de las anomalías de nubosidad total respecto a la media del período 1971-2000. La línea discontinua indica que antes de 1913 el número de observatorios es notablemente inferior. La línea gruesa corresponde a la curva suavizada por un filtro de pasa-bajo. Fuente: Sanchez-Lorenzo *et al.* (2012).

Para el período del *dimming/brightening* se combinaron las dos evoluciones previas, es decir las de la insolación y de la nubosidad. Para tener una buena cantidad de datos (unas 70 estaciones), se restringió el análisis al período 1961-2004. La Figura 3, tomada de Sanchez-Lorenzo *et al.* (2009) resume el resultado de esta investigación. Así, las series de nubosidad e insolación están, como era de esperar, altamente –y negativamente– correlacionadas ($|r| \sim 0.8-0.9$); pero lo más notable es el desacuerdo entre las tendencias de una y otra variable en los años 1961-1980, cuando la insolación decrece mientras que la nubosidad también decrece. Este resultado apuntaba a algún otro fenómeno (como puede ser la variación en el contenido de aerosoles atmosféricos) como causa parcial de la evolución de la insolación. De hecho, otros autores llegan a conclusiones similares cuando analizan, para otras partes del mundo, la evolución de la radiación solar tomando solo los días despejados.

Como ya se ha comentado, los datos de radiación solar en la Península Ibérica son bastante más escasos (tanto su extensión temporal como su distribución en el espacio) que los de insolación y nubosidad. En realidad, esto es cierto también a escala global: apenas había piranómetros instalados antes del primer Año Geofísico Internacional (1957-58), y no se generalizó su uso hasta los años 1980. Para España, se consiguieron 13 series de calidad con casi 30 años (1985-2012) de datos de radiación global. La serie media representada en la Figura 4 muestra perfectamente el fenómeno del *brightening*, ya que la tendencia al aumento de la radiación es clara: concretamente, para el período indicado, la tendencia lineal es significativa y alcanza los $+3.9 \text{ Wm}^{-2}$ por decenio (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2013). Entre las 13 estaciones incluidas, no había ninguna del este peninsular (Aragón, Cataluña, Valencia), pero recientemente

hemos reconstruido la serie de radiación solar para una estación situada en esta área, Girona, entre los años 1987-2014, y se ha obtenido una tendencia creciente de la radiación global bastante similar ($+2.5 \text{ W m}^{-2}$ por decenio; Calbó *et al.*, 2016).

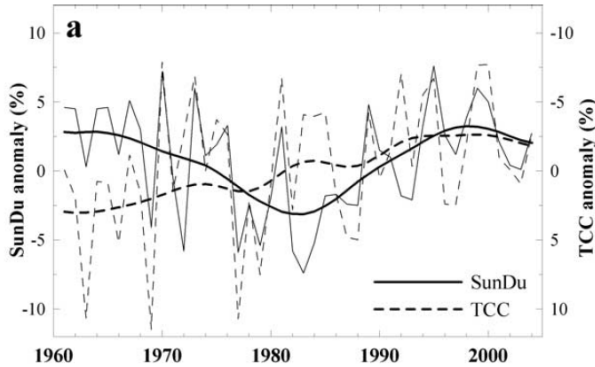


Fig. 3. Evolución de la insolación (SunDu) y de la nubosidad total (TCC) en la Península Ibérica, para el periodo 1961-2004. Valores anuales, expresados como anomalías relativas a la media del periodo 1971-2000. El eje de la nubosidad está invertido. Fuente: Sanchez-Lorenzo *et al.* (2009).

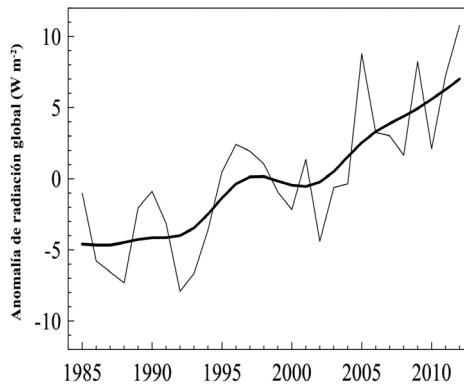


Fig. 4. Serie media de anomalías de radiación solar global en superficie en España. Fuente: modificada y actualizada de Sanchez-Lorenzo *et al.* (2013).

Además de las observaciones originales tomadas directamente de las estaciones meteorológicas, actualmente existen otras fuentes de datos que ya permiten llevar a cabo análisis climáticos. Entre éstas destacan los reanálisis, es decir, bases de datos que integran diversas fuentes de datos (observaciones superficiales, radiosondeos, datos de satélite, y otros sistemas de teledetección), dándoles coherencia física y cobertura global mediante el uso de algún modelo meteorológico. Por otra parte, las imágenes tomadas por diversos sensores situados en satélites artificiales permiten también mejorar la cobertura espacial y la resolución temporal de las observaciones. En Enriquez-Alonso *et al.* (2015) se compararon varias de estas fuentes de datos, para

la zona mediterránea y en concreto para la nubosidad. Puesto que se trataba de una intercomparación, se utilizó el período 1984-2009, que es común a todas las fuentes. De ese trabajo se han extraído los valores de las celdas que cubren la Península Ibérica (entre las longitudes 8.75°W-3.75°E y las latitudes 37-43°N), que son los que se muestran en la Figura 5. Se observa de nuevo que todas las bases de datos producen resultados bastante coherentes, mostrando la disminución de la nubosidad en el período analizado. Destaca la gran coherencia entre los tres reanálisis, así como una tendencia negativa muy importante para el caso de CLARA.

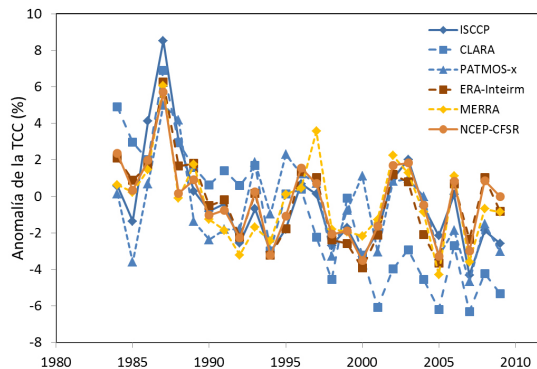


Fig. 5. Anomalías de la nubosidad total (TCC) sobre la Península Ibérica, según datos de diversos reanálisis y proyectos basados en datos de satélites. Fuente: elaboración propia, a partir de datos utilizados en Enríquez-Alonso et al. (2015).

3.2. Evolución futura de la nubosidad, según modelos climáticos

En cuanto a la evolución futura, presentamos a continuación unos resultados relativos a la nubosidad total, sobre la Península Ibérica. En primer lugar, se han elegido los 37 modelos climáticos del CMIP5 que ofrecen tanto simulaciones “históricas” como simulaciones hacia el futuro con los escenarios “moderado” (RCP4.5) y “alto” (RCP8.5) en emisiones. Se ha calculado, y se presenta en la Figura 6, la serie media de nubosidad total de todos estos modelos (“multimodel mean”). En lo que se refiere al período pasado (1984-2005) la tendencia hacia la disminución de la nubosidad es bastante clara, y sigue notablemente bien lo que se encontraba en los trabajos anteriores, basados en observaciones de superficie, de satélite, o de reanálisis. Concretamente, aquí se obtiene una tendencia, significativa al 95%, de -0.37% por decenio. Es obvio que la variabilidad interanual es mucho menor, lo que es lógico dado que se está mostrando la media de varios modelos, que reduce la variabilidad que sí muestran cada uno de ellos de forma independiente.

Una vez comprobado que los modelos climáticos reproducen suficientemente bien el comportamiento observado de la nubosidad (en la tesis doctoral de Enríquez-Alonso, 2016, aparecen más detalles sobre este tema), se han obtenido también los resultados de los modelos para dos escenarios futuros. También en la Figura 6 se presentan estas evoluciones futuras, hasta el año 2050. Es evidente que los mode-

los climáticos proyectan una clara disminución de la nubosidad total en la Península Ibérica. En realidad, esta disminución es muy parecida para los dos escenarios considerados: -0.35 y -0.48% por decenio. Estos valores de la tendencia indican que la nubosidad disminuiría, entre 2000 y 2050, alrededor de un 2% en términos absolutos de cobertura nubosa, lo que si consideramos una nubosidad media en la Península de cerca de un 50%, significa un descenso relativo del 4%. Aunque no se presenta en la figura, hay que comentar que si se analiza la evolución de la nubosidad proyectada por los modelos climáticos hasta finales de siglo, la diferencia entre ambos escenarios se amplía notablemente. Concretamente, la tendencia durante todo el siglo XXI es de -0.22% por decenio para el escenario RCP4.5 y de 0.55% por decenio para el RCP8.5.

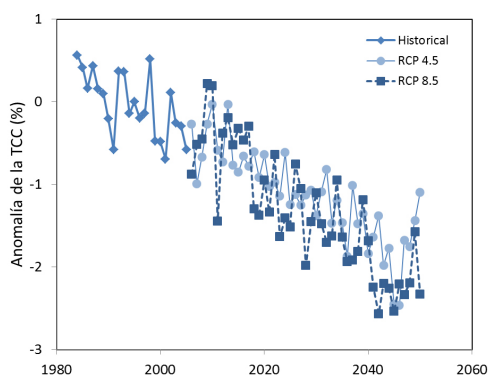


Fig. 6. Anomalías de la nubosidad total (TCC) sobre la Península Ibérica, según las simulaciones climáticas de los modelos participantes en el CMIP5.
Fuente: elaboración propia, a partir de datos utilizados en Enríquez-Alonso et al. (2016).

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

El fenómeno del *dimming* (1950-1980 aproximadamente) y *brightening* (1980-presente, aproximadamente) se presenta de forma evidente en la Península Ibérica. Se ha detectado en las series de insolación, y también (la parte del *brightening*) en las series de radiación global. La nubosidad total también ha presentado, durante el siglo XX y hasta principios de siglo actual, una evolución bastante marcada, con una clara tendencia a la disminución desde los años 1960. Esta tendencia se recoge en los datos de observaciones superficiales, pero también en los reanálisis y las observaciones desde satélites. Además, los modelos climáticos también reproducen dicha disminución de la nubosidad, al menos desde los años 1980.

La disminución de la nubosidad podría explicar el *brightening* en el período post-1980. Por el contrario, la disminución de la insolación durante los decenios previos no se corresponde con un aumento de nubosidad, sino que se produjo en un marco en que ésta también disminuía. Por lo tanto, hay que buscar una explicación adicional, y ésta se encuentra en la posible variación de la carga de aerosoles, con una tendencia a aumentar debido al crecimiento económico e industrial en los decenios posteriores a la Segunda Guerra Mundial, hasta que, al menos en los países occidentales, entran en acción regulaciones que limitan la emisión de contaminantes, lo que conlleva una disminución

de los aerosoles antropogénicos. Ahora bien, las observaciones directas de carga de aerosoles son escasas antes de la época de los satélites o de la generalización de instrumentos como los heliofotómetros, es decir, antes de los años 1990. Por ello el trabajo de Sanchez-Romero *et al.* (2016) abordó la estimación de la carga de aerosoles (específicamente, de su espesor óptico, AOD) a partir de datos de insolación (para días sin nubes), que se correlacionaron con medidas directas mediante instrumentos Cimel de la red AERONET. Extrapolando hacia el pasado las relaciones entre AOD e insolación obtenidas, se obtuvo una estimación de la evolución del AOD medio para España, desde el año 1960 (ver Figura 7). Así, se destaca un aumento de los aerosoles en el período de *dimming*, y una disminución para el período de *brightening*. En realidad, Mateos *et al.* (2014) mostraron que una cuarta parte del *brightening* más reciente puede deberse a la disminución de los aerosoles, siendo el resto responsabilidad de la menor nubosidad.

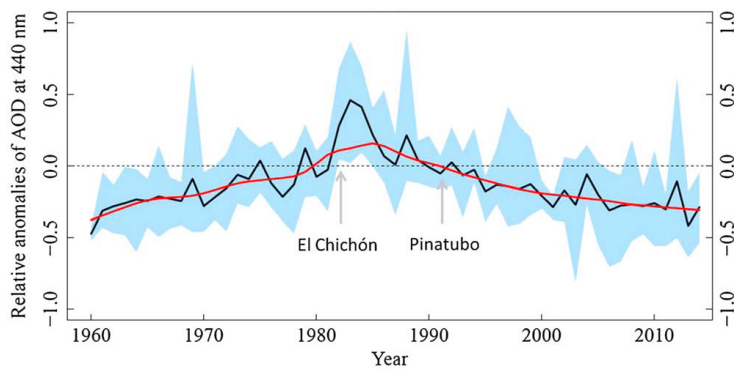


Fig. 7. Anomalías relativas del espesor óptico de los aerosoles (AOD) derivado a partir de la insolación, para ocho estaciones en España, incluyendo dos en las Islas Canarias. Fuente: Sanchez-Romero *et al.* (2016).

Los modelos climáticos indican que la disminución de la nubosidad total en la Península Ibérica detectada en los últimos decenios continuará en el futuro. Tal y como muestra el trabajo de Wild *et al.* (2015) ello conllevará un aumento de la radiación solar global, que este último trabajo cuantifica en 1.15 Wm^{-2} por decenio. No obstante, hay que tener en cuenta que la nubes en la Península Ibérica a menudo se producen por efectos de mesoescala, y por lo tanto, las proyecciones con modelos climáticos globales deberían tomarse con precaución, y profundizar en el tema mediante el uso de modelos climáticos regionales, que describan bien la orografía y la interacción tierra-mar, u otras técnicas de regionalización (*downscaling*).

AGRADECIMIENTOS

El conjunto de trabajos revisados en el presente artículo se ha llevado a cabo en el marco de proyectos financiados por el Ministerio responsable de políticas de investigación. Actualmente, la investigación del grupo viene financiada por el proyecto NUBESOL (CGL2014-55976-R). El quinto autor disfruta de una beca Juan de la Cierva. Agradecemos también a todos los proveedores de datos, en particular a la Agencia Estatal de Meteorología.

REFERENCIAS

- Calbó, J., González, J.-A., Sanchez-Lorenzo, A. (2016). Building global and diffuse solar radiation series and assessing decadal trends in Girona (NE Iberian Peninsula). *Theor. Appl. Climatol.* doi: 10.1007/s00704-016-1829-3
- Enriquez-Alonso, A., Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J., González, J.-A., Norris, J. (2015). Cloud cover climatologies in the Mediterranean obtained from satellites, surface observations, reanalyses, and CMIP5 simulations: validation and future scenarios. *Clim Dyn.* doi: 10.1007/s00382-015-2834-4.
- Enriquez-Alonso, A. (2016). Evaluación de modelos climáticos: El comportamiento de la variable nubosidad. Tesis doctoral, Universitat de Girona.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. En: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 33 p.
- Mateos, D., Sanchez-Lorenzo, A., Antón, M., Cachorro, V.E., Calbó, J., Costa, M.J., Torres, B., Wild, M. (2014) Quantifying the respective roles of aerosols and clouds in the strong brightening since the early 2000s over the Iberian Peninsula. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119:10,382–10,393.
- Sanchez-Lorenzo, A., M. Brunetti, J. Calbó, Martin-Vide, J. (2007). Recent spatial and temporal variability and trends of sun-shine duration over the Iberian Peninsula from a homogenized data set. *J. Geophys. Res.*, 112. doi: 10.1029/2007JD008677
- Sanchez-Lorenzo, A. Calbó, J., Brunetti, M., Deser, C. (2009). Dimming/brightening over the Iberian Peninsula: Trends in sun-shine duration and cloud cover and their relations with atmospheric circulation. *J. Geophys. Res.*, 114. doi:10.1029/2008JD011394.
- Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J., Wild, M. (2012). Increasing cloud cover in the 20th century: review and new findings in Spain. *Clim. Past*, 8, 1199–1212.
- Sanchez-Lorenzo A., Calbó, J. Wild, M. (2013). Global and diffuse solar radiation in Spain: Building a homogeneous dataset and assessing their trends. *Glob. Planet. Change*, 100, 343–352.
- Sanchez-Romero, A., Sanchez-Lorenzo, A., González, J.-A., Calbó, J. (2016) Reconstruction of long-term aerosol optical depth series with sunshine duration records. *Geophys. Res. Lett.*, 1296–1305.
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114. doi: 10.1029/2008JD011470.
- Wild, M. (2012). Enlightening global dimming and brightening. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 27–37.
- Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., Müller, B. (2015). Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Sol. Energy*, 116, 12–14.