

TEMPERATURA DEL MAR EN EL MEDITERRÁNEO: TENDENCIAS Y PATRONES ESPACIALES (1982-2016)

Francisco PASTOR GUZMAN, José Antonio VALIENTE PARDO, José Luis PALAU ALOY

Área de Meteorología y dinámica de contaminantes. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo

paco@ceam.es

RESUMEN

Los océanos juegan un papel crucial en el sistema climático global, siendo de vital importancia conocer su evolución pasada y sus escenarios climáticos de futuro. En este marco, el mar Mediterráneo resulta singular al ser un mar cuasi-cerrado con escaso intercambio de masas de agua con otros mares. Estudios previos han mostrado la importancia de la temperatura superficial del mar en el desarrollo de episodios de lluvias torrenciales en el Mediterráneo occidental o su papel en olas de calor registradas en Europa. En este trabajo se analiza la serie de datos de temperatura superficial del mar obtenida a partir de observaciones satelitales entre 1982 y 2016. Para este periodo se ha encontrado un valor positivo para la tendencia temporal promedio de la temperatura superficial del Mediterráneo a partir de sus valores diarios. También se ha elaborado una distribución espacial de la temperatura superficial del mar a partir de un análisis clúster a partir de los promedios mensuales. Se ha podido determinar la existencia de dos modos principales de distribución espacial en invierno y verano. El modo invernal se corresponde con una distribución norte-sur de gradiente positivo hacia el sur de la cuenca mediterránea mientras que el patrón de verano muestra una distribución completamente distinta. Durante los meses de verano se observan zonas diferenciadas que no responden a ningún patrón latitudinal o longitudinal, incluso con valores similares de temperatura en zonas distantes entre sí. Con este estudio, queda de nuevo patente la consideración que merece la cuenca mediterránea como "punto caliente" en lo referente al cambio climático.

Palabras clave: temperatura superficial del mar, cambio climático, tendencia, patrón espacial.

ABSTRACT

Oceans play a key role in energy storage in the global Earth–Ocean–Atmosphere system. Within this framework, the knowledge of past evolution and future trends of sea surface temperature is crucial for the future climate scenarios. Previous studies have highlighted the role of sea surface temperature as an important ingredient for the development and/or intensification of heavy precipitation events in the Western Mediterranean basin but have also highlighted its role in heat waves in Europe. In this study, a consistent warming trend has been found for daily sea surface temperature

data series derived from satellites (1982–2016) for the whole Mediterranean region and for different temporal scales, from daily to monthly, seasonal and decadal estimates. Additionally, spatial clustering analysis has been run to look for its spatial structure. Two main distribution modes have been found for sea surface temperature in winter and summer, while spring and fall show transitional regimes. Winter mode shows a north-to-south increasing gradient banded structure while summer regime presents a set of well-differentiated areas. Results from this study confirm the definition of the Mediterranean basin as a hot-spot for climate change

Key words: sea surface temperature, climate change, trend, spatial pattern

1. INTRODUCCIÓN

Según el Quinto Informe del IPCC (2013) la mayor parte del inventario global de energía se almacena en los océanos; se calcula que más del 90% del cambio en el balance energético global en el periodo de 1971 a 2010 se ha almacenado en los océanos mediante su calentamiento. Además, en las previsiones a corto o medio plazo se estima como muy probable el incremento de la temperatura superficial del mar (TSM) en escenarios de futuro (Kirtman et al, 2013).

En los últimos años se han publicado diferentes estudios investigando la relación entre la TSM y las lluvias torrenciales en el Mediterráneo, bien desde la modelización numérica (Pastor et al. 2001, Lebeaupin et al. 2006, Katsafados et al. 2011, Miglietta et al. 2011, Pastor et al. 2015) o buscando correlaciones estadísticas (Bozkurt and Sen, 2011) y en diferentes zonas de la cuenca mediterránea (Turuncoglu, 2015).

Adicionalmente, la TSM del Mediterráneo se ha vinculado a otros eventos meteorológicos como las inundaciones en Europa central (Volosciuk, 2016) o el Sahel (Rowell 2003) o la ola de calor de 2003 también en Europa central (Feudale y Shukla 2007, 2011a, 2011b).

Con estos precedentes, resulta evidente el interés de conocer los patrones de comportamiento temporal y espacial de la TSM tanto del pasado como del futuro como referencia para indicar posibles tendencias futuras de fenómenos meteorológicos de impacto como las lluvias torrenciales u otros. A tal fin, se han utilizado para este trabajo las series temporales de satélite más largas disponibles para el estudio de la TSM y su evolución en los últimos 30 años.

2. MÉTODOS

Para este estudio se ha utilizado la serie temporal de TSM, disponible para el periodo 1982-2016, de la base de datos GHRSSST Level 4 AVHRR_OI Global Blended Sea Surface Temperature Analysis. Estos datos se obtuvieron del National Centers for Environmental Information (NCEI) distribuidos a través del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC) en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA.

Los datos de satélite se obtienen mediante interpolación de diferentes fuentes como el sensor AVHRR del satélite o plataformas de observación in situ como boyas (Banzon, 2016), siendo analizados conjuntamente e interpolados con una precisión de 0.4 K o mayor siguiendo los estándares GHRSSST. De esta manera se obtiene un campo

continuo de valores con 0.25 grados de resolución espacial desde el 1 de septiembre de 1981 hasta la actualidad, con resolución temporal diaria. Para la región mediterránea se ha extraído un total de 4248 puntos con valores de TSM durante 12784 días en el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1982 y el 31 de diciembre de 2016.

A partir de este conjunto de datos se ha elaborado una climatología mensual para los valores de TSM y su anomalía durante todo el periodo de estudio. También se ha llevado a cabo un análisis estadístico de tipo clúster a los datos agregados mensualmente con el objetivo de discernir aquellas áreas de la cuenca mediterránea con patrones de TSM similares. Para ello se ha utilizado la técnica “clustering large applications” (CLARA) desarrollada por Kaufman y Rouseeuw (1990) e implementada en el lenguaje de análisis estadístico R (R Core Team, 2017). Esta técnica consiste en seleccionar subconjuntos de datos, en lugar de utilizar la base de datos completa, y aplicar métodos de particionamiento a dicha muestra. A continuación se calculan las disimilaridades de cada punto del conjunto completo de datos con el particionado anteriormente calculado para asignar los puntos a los diferentes clúster del sistema, asignando una función de coste. Este procedimiento se lleva a cabo para un número limitado y predefinido de posibles clúster, de manera que finalmente se elige el particionamiento que minimiza la citada función de coste. Finalmente, a partir de las series de datos diarios para cada punto de la cuenca mediterránea se analizaron las tendencias temporales. Para ello, en primera instancia se descompusieron las series temporales para eliminar la componente de estacionalidad y residual de manera que el análisis de tendencia se realizó una vez eliminados estos componentes. En este caso se utilizó la función *tslm* incluida en la librería *forecast* (Hyndman and Khandakar, 2008) en R.

3. RESULTADOS

En primer lugar, a partir del análisis de los datos diarios de TSM se construyó una climatología mensual (Figura 1). En los mapas de TSM mensual se puede observar un ciclo anual propio de un mar de latitudes medias con los valores más bajos en invierno, un ascenso pronunciado en primavera hasta alcanzar su máximo en la parte central del verano. Posteriormente, en otoño se produce un progresivo descenso hasta los valores mínimos de invierno.

Respecto a la distribución espacial de la TSM media mensual, se realizó un análisis clúster para cada mes dentro de la serie 1982-2016. En el análisis de los mapas resultantes se observó que, aún con ligeras diferencias en la extensión o forma de los diferentes clúster, aparecían reiteradamente una serie de patrones a lo largo de toda la serie. De este análisis se dedujo la existencia de dos modos de distribución espacial de TSM bien diferenciados en invierno y verano (Figura 2) separados por regímenes transicionales en primavera y otoño. En el régimen de invierno (Diciembre-Marzo) se observa una distribución latitudinal con gradiente de TSM creciente hacia el sur de la cuenca mediterránea mientras que en el régimen estival se observa la aparición de una serie de áreas acotadas que no siguen ningún patrón uniforme latitudinal o meridional sino que es un patrón formado por áreas bien definidas, incluso con temperaturas similares en áreas distintas con zonas interpuestas entre ellas con valores diferentes.

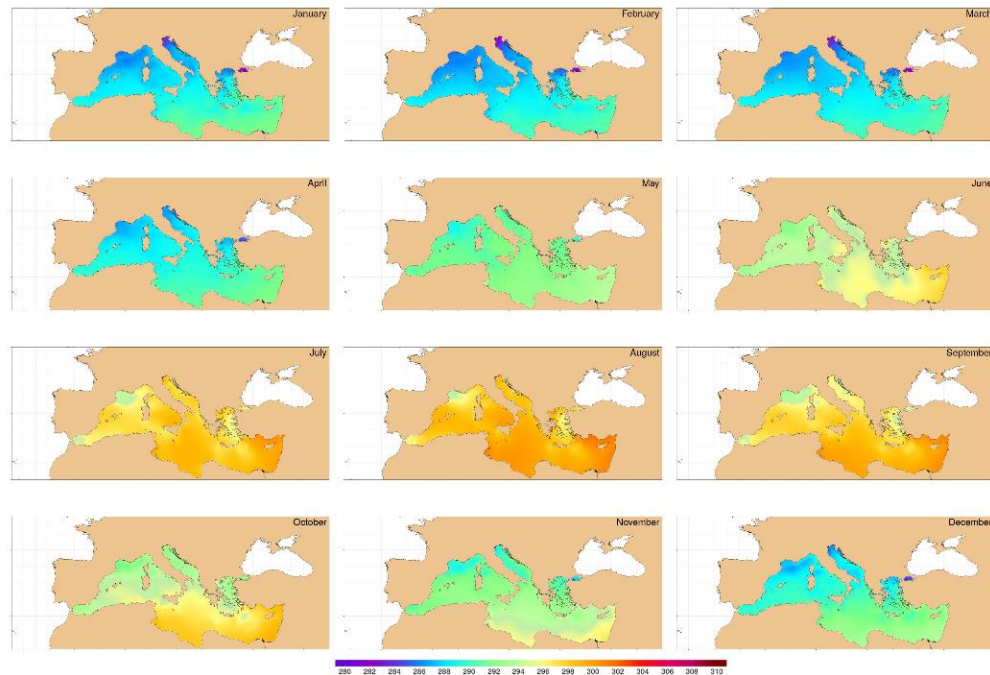


Figura 1. Climatología de TSM media mensual (1982-2016).

Esta distribución puede, en parte, ser atribuida a condicionantes oceanográficos como el afloramiento de aguas frías en el golfo de León o la entrada de agua atlántica hacia el mar de Alborán pero también a efectos meteorológicos como los regímenes de vientos persistentes como la “tramontana” en el golfo de León y los regímenes de brisas estivales en el Mediterráneo occidental o los “etesios” en la cuenca oriental del Mediterráneo.

En última instancia, también se estudió la serie temporal de datos de TSM diarios para cada punto de la base de datos, así como la serie temporal promedio del Mediterráneo. Para ello se descompusieron las series temporales para eliminar la estacionalidad de la serie y los residuos estadísticos, obteniendo la componente principal de fondo para su posterior análisis. De esta manera, se obtuvo la tendencia de la TSM para cada punto del Mediterráneo a partir de los cuales se pudo elaborar un mapa de la variación total de TSM durante el periodo de estudio (Figura 3). Esta figura muestra el aumento de TSM en toda la cuenca mediterránea, siendo más notable en su cuenca oriental y con los valores de ascenso menores en su sector central.

A partir de las series temporales puntuales en toda la cuenca mediterránea se obtuvo una serie temporal promedio para encontrar una tendencia que fuera representativa de toda el área. En la figura 4 se muestra la citada serie temporal, pudiendo observarse el anteriormente citado incremento de TSM con una tendencia lineal de $9.92 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{K/día}$ que corresponden a un incremento total medio de $1.27 \pm 0.12 \text{ }^\circ\text{K}$.

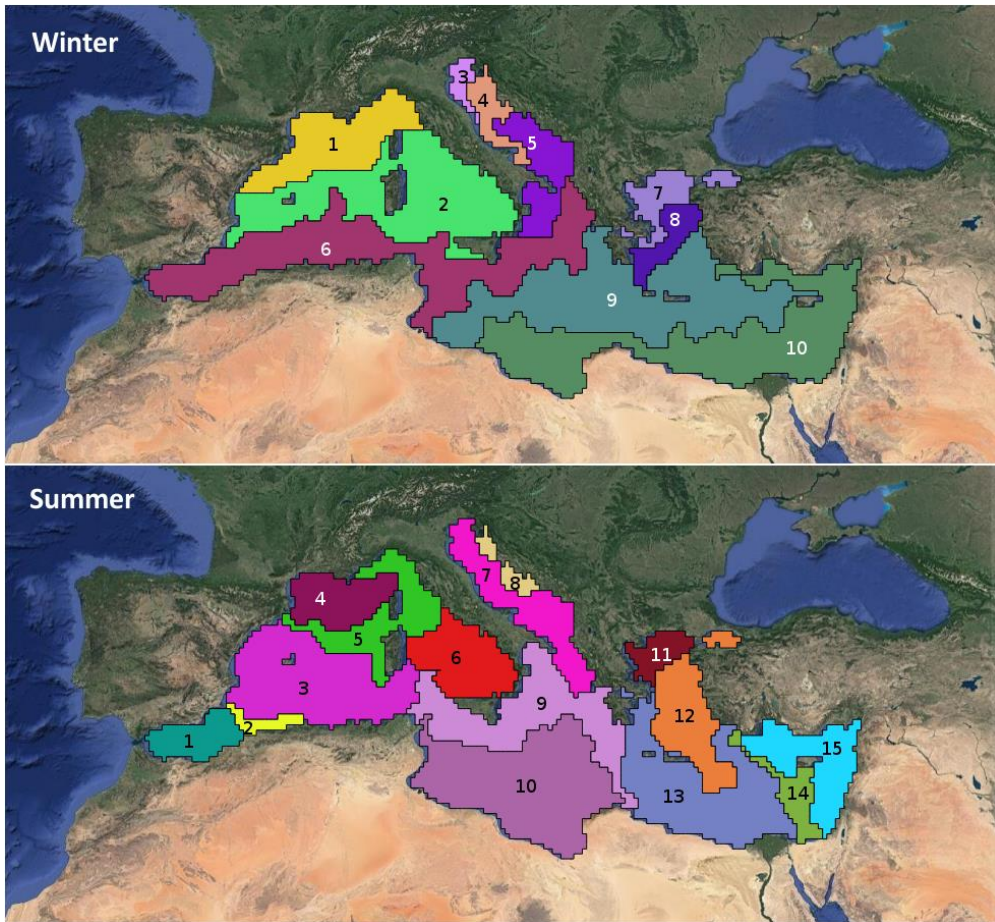


Figura 2. Clúster espacial para la TSM mensual media (1982-2016) para los regímenes de invierno y verano.

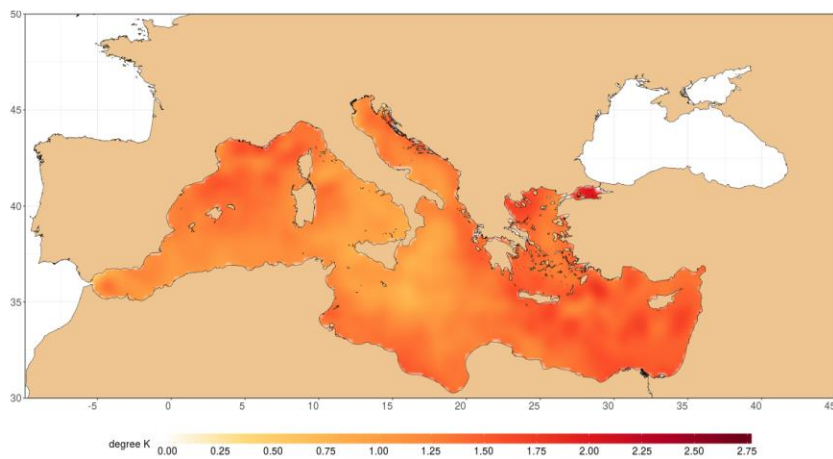


Figura 3. Incremento de la TSM durante el periodo 1982-2016.

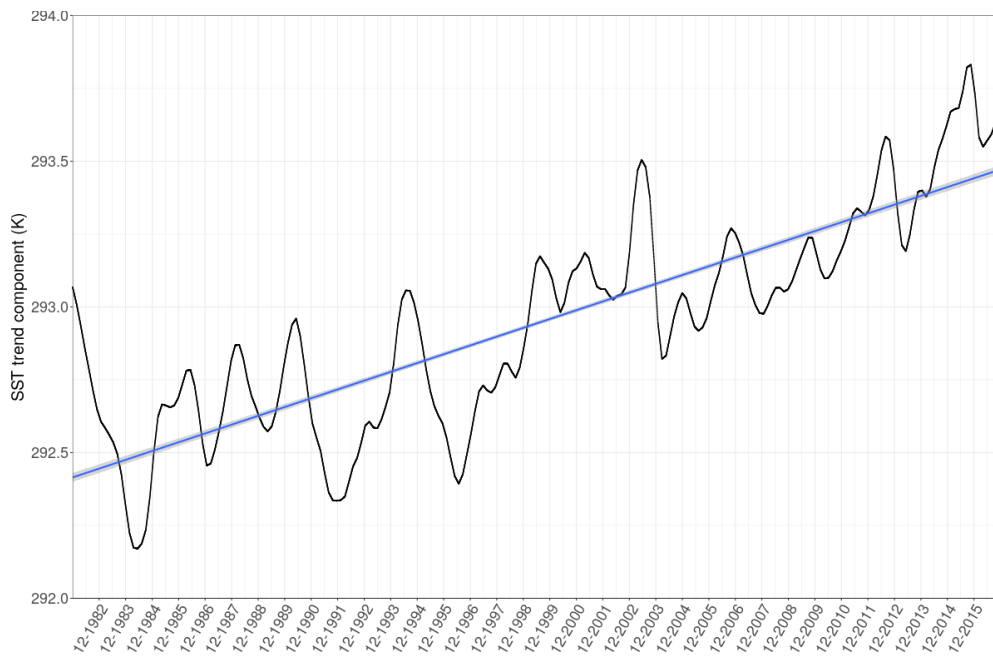


Figura 4. Serie temporal promedio de TSM en la cuenca mediterránea para el periodo 1982-2016.

Además de para la serie temporal de datos diarios, también se calcularon las tendencias decadales, estacionales y mensuales. En estos análisis también se ha obtenido valores positivos para dichas tendencias, siendo más destacable el calentamiento en invierno en la cuenca occidental del Mediterráneo mientras que en verano se observan valores similares de tendencia de TSM tanto en el Mediterráneo occidental como oriental, con los valores menos importantes en el sector central (Italia-Libia).

4. DISCUSIÓN

En los últimos años diferentes estudios científicos han puesto de relieve la importancia de la temperatura superficial del mar en la meteorología mediterránea, especialmente en su influencia en el régimen de precipitaciones. Es, por tanto, necesario un buen conocimiento de su comportamiento tanto espacial como temporal. En este sentido, se ha analizado la base de datos de satélite AVHRR_OI Global Blended Sea Surface Temperature Analysis proporcionada por National Centers for Environmental Information (NCEI) para el periodo 1982-2016.

A partir del análisis de los datos de TSM se ha determinado la existencia de dos modos principales de distribución espacial bien definidos para invierno y verano, con dos periodos de transición en primavera y otoño. En el régimen invernal la TSM se estructura en un gradiente latitudinal con valores de TSM mayores cuanto más al sur de la cuenca mientras que para el régimen estival la distribución de TSM es completamente diferente sin ningún tipo de gradiente de temperatura latitudinal o

meridional sino conformado por áreas diferenciadas con valores de TSM que pueden ser similares en zonas distantes de la cuenca (figura 2).

En lo referente a la evolución temporal de la TSM en el Mediterráneo, se ha puesto de relieve el calentamiento registrado durante las últimas tres décadas (1982-2016) en toda la cuenca mediterránea, siendo aquel más destacable en su cuenca oriental. Esta tendencia al calentamiento se ha evaluado también para las series mensuales, estacionales y decadales, siendo éstos últimos más intensos en los últimos años de la serie, mostrando un aumento consistente de la TSM para todas las épocas del año a lo largo de todo el periodo de estudio. En promedio, la tendencia al calentamiento presenta un valor de $9.92 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{K/día}$, correspondiente a un incremento total medio de $1.27 \pm 0.12 \text{ }^\circ\text{K}$ en el periodo de estudio (1982-2016).

En un estudio reciente (Marullo, 2011) se detectó, a partir de la reconstrucción de una serie de datos de TSM para el periodo 1850-2008, la existencia de un ciclo de oscilación de 70 años en la TSM en el Mediterráneo. De esta manera, el calentamiento observado en este trabajo podría estar inserto en la fase ascendente de la última de estas oscilaciones. No obstante, además de la posible variabilidad natural de la TSM, en los últimos años se han observado en la cuenca mediterránea procesos, como la acumulación de vapor de agua y contaminantes (Millán, 2014), que pueden añadir un factor de calentamiento adicional que se sumaría al mecanismo de calentamiento por el que aquellas zonas marítimas con TSM alta se calentarían más rápidamente (Durack, 2012). Dentro de la tendencia generalizada al incremento de la TSM en la cuenca mediterránea, se ha observado que aquella no es uniforme en toda la cuenca por lo que las posibles implicaciones en los escenarios climáticos futuros pueden ser dispares dentro de la misma cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto de investigación “VERSUS” (CGL2015-67466-R), la Unión Europea a través de los Fondos de Desarrollo Regional (FEDER) y por la Conselleria de Cultura de la Generalitat Valenciana a través del proyecto de investigación “DESESTRES” PROMETEO II/2014/038. Los datos diarios de TSM han sido proporcionados por el National Center for Environmental Information que facilita la base de datos “*GHRSSST Level 4 AVHRR_OI Global Blended Sea Surface Temperature Analysis (GDS version 2) from NCEI. Ver. 2.0*” distribuida a través de NASA EOSDIS Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) at the Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA (<http://dx.doi.org/10.5067/GHGMR-4FJ01>).

REFERENCIAS

Banzon, V., Smith, T. M., Chin, T. M., Liu, C., & Hankins, W. (2016). A long-term record of blended satellite and in situ seasurface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies. *Earth System Science Data*, 8, 165–176. <https://doi.org/10.5194/essd-8-165-2016>.

- Bozkurt, D., & Sen, O. (2011). Precipitation in the Anatolian Peninsula: Sensitivity to increased SSTs in the surrounding seas. *Climate Dynamics*, 36, 711–726. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0651-3>.
- Durack, P. J., Wijffels, S. E., & Matear, R. J. (2012). Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. *Science*, 336, 455–458.
- Feudale, L., & Shukla, J. (2007). Role of Mediterranean SST in enhancing the European heat wave of summer 2003. *Geophysical Research Letters*, 34, L03811.
- Feudale, L., & Shukla, J. (2011a). Influence of sea surface temperature on the European heat wave of 2003 summer. Part I: An observational study. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0788-0>.
- Feudale, L., & Shukla, J. (2011b). Influence of sea surface temperature on the European heat wave of 2003 summer. Part II: A modeling study. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0789-z>.
- Hyndman, R. J., & Khandakar, Y. (2008). Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 26(3), 1–22.
- Katsafados, P., Mavromatidis, E., Papadopoulos, A., & Pytharoulis, I. (2011). Numerical simulation of a deep Mediterranean storm and its sensitivity on sea surface temperature. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1233-2011>.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (1990). *Finding groups in data: An introduction to Cluster analysis*. Hoboken: Wiley.
- Kirtman, B., Power, S.B., Adedoyin, J.A., Boer, G.J., Bojariu, R. et al. (2013). Near-term climate change: Projections and Predictability. In: Stocker, T.F., et al. (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 and New York.
- Lebeaupin, C., Ducrocq, V., & Giordani, H. (2006). Sensitivity of torrential rain events to the sea surface temperature based on high-resolution numerical forecasts. *Journal of Geophysical Research*, 111, D12110. <https://doi.org/10.1029/2005JD006541>
- Marullo, S., Artale, V., & Santoleri, R. (2011). The SST multidecadal variability in the Atlantic-Mediterranean region and its relation to AMO. *Journal of Climate*, 24, 4385–4401. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3884.1>
- Miglietta, M., Moscatello, A., Conte, D., Mannarini, G., Lacorata, G., & Rotunno, R. (2011). Numerical analysis of a Mediterranean ‘hurricane’ over south-eastern Italy: Sensitivity experiments to sea surface temperature. *Atmospheric Research*, 101, 412–426.
- Millán, M. (2014). Extreme hydrometeorological events and climate change predictions in Europe. *Journal of Hydrology*, 518(Part B), 206–224. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.041>
- Pastor, F., Estrela, M., Peñarocha, D., & Millán, M. (2001). Torrential rains on the Spanish Mediterranean coast: Modeling the effects of the sea surface temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 1180–1195.

- Pastor, F., Valiente, J. A., & Estrela, M. J. (2015). Sea surface temperature and torrential rains in the Valencia region: Modelling the role of recharge areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1677-2015>.
- R Core Team. (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Rowell, D. P. (2003). The impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian rainfall season. *Journal of Climate*, 16, 849–862. <https://doi.org/10.1175/1520-0442>.
- Turuncoglu, U. U. (2015). Identifying the sensitivity of precipitation of Anatolian peninsula to Mediterranean and Black Sea surface temperature. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2346-7>.
- Volosciuk, C., et al. (2016). Rising Mediterranean Sea surface temperatures amplify extreme summer precipitation in Central Europe. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/srep32450>