

Ponencia 2

*Variabilidad climática y
extremos*

EVOLUCIÓN DEL CALENTAMIENTO EN LA TRANSICIÓN TROPICAL DEL HURACAN OPHELIA

Carlos CALVO-SANCHO¹, Richard ROTUNNO², Ana MONTORO-MENDOZA^{1,3}, Juan Jesús GONZÁLEZ-ALEMÁN⁴, Mauricio LÓPEZ-REYES^{5,6} y María Luisa MARTÍN¹

¹ *Departamento de Matemática Aplicada, Escuela de Ingeniería Informática, Universidad de Valladolid, Segovia.*

² *National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, US.*

³ *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Geociencias (IGEO), Madrid, España.*

⁴ *Departamento de Desarrollo y Aplicaciones, Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Madrid, España.*

⁵ *Instituto de Astronomía y Meteorología (IAM), Departamento de Física, Universidad de Guadalajara, México.*

⁶ *Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid, España.*

carlos.calvo.sancho@uva.es

RESUMEN

Los ciclones con características tropicales presentan una gran amenaza para la sociedad europea debido a los impactos asociados. En la última década, se ha observado un incremento de este tipo de ciclones anómalos, la mayoría originándose a partir de una transición tropical (TT) proceso por el cual un ciclón baroclino se transforma en un ciclón barotrópico. Un ejemplo es el Huracán Ophelia en 2017, el ciclón tropical más intenso (categoría 3), cuya ciclogénesis tropical fue una TT. En este trabajo se estudia la evolución del calentamiento del centro del sistema, como efecto generador de procesos mesoescales en la última etapa de la TT de Ophelia. Este trabajo profundiza en el conocimiento de la evolución del calentamiento del centro de un sistema que está experimentando un proceso de transición tropical. Se ha simulado el Huracán Ophelia con el modelo WRF-ARW con resolución horizontal de 1 km. Los resultados muestran que el sistema tiene tres fases diferenciadas en función de su naturaleza térmica: 1) fase de naturaleza fría baroclina del ciclón; 2) fase de comienzo del proceso de transición tropical, donde el sistema comparte características baroclinas y barotrópicas; 3) fase de calentamiento continuo en la última etapa de la transición tropical y primera intensificación del ciclón tropical, asociado a la actividad convectiva.

Palabras clave: Transiciones Tropicales, Ciclón Tropical, Huracán, Procesos Mesoescalares.

ABSTRACT

Cyclones with tropical characteristics pose a major threat to European society due to the associated impacts. An increase in this type of anomalous cyclone has been observed over the last decade, most of them resulting from a tropical transition (TT) process, in which a baroclinic cyclone transforms into a barotropic cyclone. An example is Hurricane Ophelia in 2017, the most intense tropical cyclone (CAT3) whose tropical cyclogenesis was a TT. In this work, we study the evolution of the heating of the center of the system as a generating effect of mesoscale processes in the final stage of Ophelia's TT.

This work deepens the knowledge of the evolution of the heating of the center of a system undergoing a TT process. Hurricane Ophelia was simulated with the WRF-ARW model at a horizontal resolution of 1 km. The results show that the system has three distinct phases depending on its thermal nature: 1) a phase of cold baroclinic nature of the cyclone; 2) a phase at the beginning of the TT process, where the system shares baroclinic and barotropic characteristics; 3) a phase of continuous warming in the last phase of the TT and first intensification of the tropical cyclone, associated with convective activity.

Key words: Tropical Transitions, Tropical Cyclone, Hurricane, Mesoscale processes.

1. INTRODUCCIÓN

Los ciclones tropicales son ciclones de núcleo cálido puramente barotrópico y diabáticos. La gran mayoría de los casos tienen un origen barotrópico, por ejemplo, a partir de ondas del este, bajas o vaguadas tropicales (McTaggart-Cowan et al., 2013). Sin embargo, existen una serie de precursores baroclinos que favorecen la ciclogénesis tropical si las condiciones atmosféricas ambientales son apropiadas. Uno de estos posibles precursores son las transiciones tropicales (TT). La TT es una forma de ciclogénesis tropical asociada con precursores extratropicales donde un ciclón baroclino evoluciona y transiciona a un ciclón tropical cuando es afectado por una perturbación en niveles altos en latitudes medias (p.ej., Davis y Bosart 2003, 2004; Calvo-Sancho et al., 2022).

Los ciclones tropicales formados vía TTs tienen una mayor probabilidad de afectar al área occidental europea, dado que se desarrollan en latitudes subtropicales y medias. De hecho, en los últimos años se ha registrado un aumento de la amenaza de ciclones tropicales con este tipo de génesis en Europa occidental. Uno de ellos fue el Huracán Ophelia en 2017, que estuvo cerca de impactar en la península ibérica, y afectó gravemente a Irlanda (Moore, 2021) y a la comunidad autónoma de Galicia. Este tipo de ciclones tienen un impacto muy alto en la sociedad, los sistemas ecológicos y la economía, produciendo riesgos y daños generalizados. Los daños más comunes suelen estar relacionados con las infraestructuras, agricultura, turismo y pérdidas humanas (Peduzzi et al., 2012; Lenzen et al., 2019). Por lo tanto, mejorar el conocimiento de los procesos mesoescalares de estos eventos produciría un importante beneficio socioeconómico, principalmente en las regiones de la península ibérica y Europa occidental (Galarneau et al., 2015).

La presente contribución analiza la evolución del calentamiento del centro del sistema, como efecto generador de procesos mesoescalares que favorecen la TT. Para ello, se ha simulado el Huracán Ophelia a alta resolución en los instantes previos y posteriores a la TT que tuvo lugar (Fig. 2a).

2. MÉTODOS

Para la simulación de Ophelia se ha utilizado el modelo numérico de predicción meteorológica WRF-ARW versión 4.5 (Skamarock et al., 2019) utilizando el análisis del *ECMWF-IFS* como condiciones iniciales, con una resolución horizontal de 0.1° , una resolución vertical de 137 niveles híbridos y una resolución temporal de 6 h. El Huracán Ophelia se ha simulado en un período de 96 h para recoger el período previo y posterior a su TT. Asimismo, se han considerado las primeras 6 h de la simulación como *spin-up*. Se han definido dos dominios anidados utilizando 1000×1000 puntos de malla (Fig. 1) y 65 niveles verticales sigma. La resolución horizontal de los dominios es de 3 y 1 km, respectivamente. Las parametrizaciones físicas del modelo WRF-ARW utilizadas son las recomendadas por la guía WRF para la simulación de ciclones tropicales, así como en distintos trabajos (Quitián-Hernández et al., 2021; Calvo-Sancho et al., 2023a, b, c). Los esquemas de parametrizaciones utilizados son: el esquema de onda corta y larga *RRTM* (Mlawer et al., 1997), el modelo de superficie terrestre *Unified Noah* (Tewari et al., 2004), el modelo de capa superficial del MM5 revisado (Jiménez et al., 2012), el modelo de capa límite planetaria de *Yonsei University* (YSU; Hong et al., 2006) y el esquema de microfísica WRF Single-moment 6-class (WSM 6-class; Hong y Lim, 2006). La convección profunda es resuelta explícitamente por el modelo.

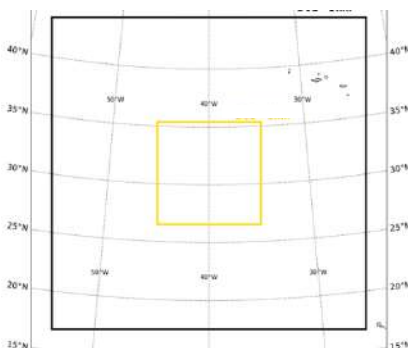


Fig. 1: Dominios anidados utilizados en el modelo WRF-ARW: D1 (D2) recuadrado en negro (amarillo).

Para el análisis del calentamiento del centro del sistema, se han seleccionado las siguientes variables: componentes del viento u y v , temperatura, temperatura potencial y temperatura potencial equivalente. Se ha hecho una transformación de estas variables de proyección cartesiana a cilíndrica $[(u, v) = (u_c \cos \phi + v_c \sin \phi, v_c \cos \phi - u_c \sin \phi)]$, siendo u_c y v_c las componentes del viento en

proyección cartesiana, u y v las componentes del viento en proyección cilíndrica (o velocidad radial y tangencial, respectivamente), y ϕ el azimut o ángulo azimutal. El cambio de proyección del resto de variables seguirá el mismo procedimiento.

Para determinar la evolución del calentamiento en el centro del sistema en los instantes previos y posteriores a la TT de Ophelia se ha obtenido la temperatura potencial (θ) máxima en $r = 0$ (es decir, el máximo de θ en altura) y temperatura potencial equivalente (θ_e) máxima en $z = 0$ (es decir, el máximo de θ_e en superficie). Se han calculado valores del coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables durante la evolución del sistema.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del Huracán Ophelia

El Huracán Ophelia se desarrolló en el Atlántico Norte central y evolucionó hacia el Atlántico Norte oriental debido a la circulación del oeste (Fig. 2a). Los primeros instantes del sistema estuvieron caracterizados por una depresión aislada en niveles altos y una baja baroclina en superficie (Fig. 2b), en yuxtaposición con temperaturas superficiales del mar cálidas ($> 26^\circ\text{C}$).

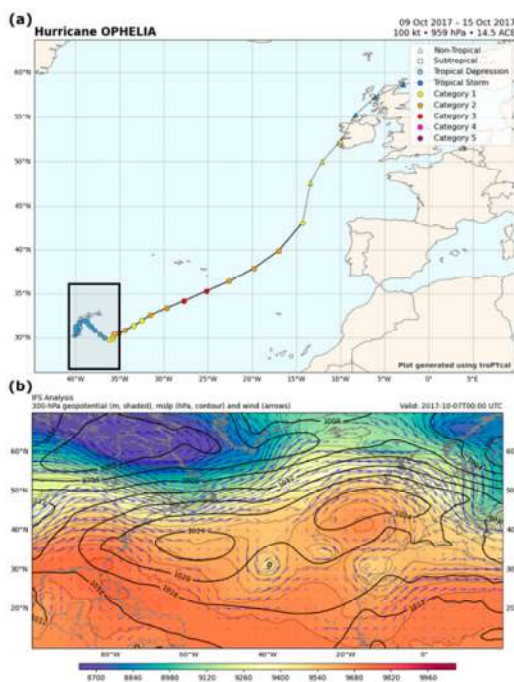


Fig. 2: (a) Trayectoria e intensidad del Huracán Ophelia en 2017. El recuadro negro indica el área donde sucedió la TT y área de simulación correspondiente a la Figura 1. (b) Geopotencial y viento a 300 hPa (sombreado) y presión a nivel del mar (contornos) el 7 de octubre de 2017 a las 00 UTC obtenidos del análisis ECMWF-IFS.

Esta situación sinóptica favoreció alta actividad convectiva que desencadenó la TT. El sistema transicionó a ciclón tropical, intensificándose hasta un huracán de categoría 3, siendo el sistema más tropical cuya ciclogénesis fue una TT (Calvo-Sancho et al., 2022).

3.2. Calentamiento del sistema

En las TTs existen diferentes forzamientos dependiendo de la fase del proceso, siendo los forzamientos de procesos diabáticos y de convección húmeda profunda los predominantes para que el ciclón adquiriera naturaleza barotrópica. Los resultados de Calvo-Sancho et al. (2023a) y los mostrados en la presente comunicación son semejantes desde diferentes puntos de vista.

En la Figura 3 se muestra la evolución temporal de la TT Ophelia mediante cortes transversales de la temperatura potencial centrados en el ciclón y la Figura 4 muestra la relación y evolución temporal del máximo de θ en $r = 0$ y máximo de θ_e en $z = 0$. Los resultados muestran que predomina una naturaleza fría en los primeros instantes del sistema, tanto en superficie como en altura, y no se aprecia calentamiento en esta fase (Fig. 3a y 4). Es decir, en los primeros instantes domina una naturaleza baroclina de núcleo frío del sistema.

Como se ha mencionado en la introducción, la situación sinóptica y la alta temperatura superficial del mar favorecieron el inicio y el mantenimiento de la convección húmeda profunda. La TT comienza cuando el sistema inicia su calentamiento y los procesos diabáticos empiezan a cobrar importancia (Rotunno y Emanuel, 1987; Calvo-Sancho et al., 2023a), compartiendo características tanto de un ciclón baroclino como de un ciclón barotrópico (Fig. 3b y 4). No obstante, dado que comparten características de naturaleza fría y cálida, en estos pasos temporales se producen períodos de enfriamiento en la TT (Fig. 4).

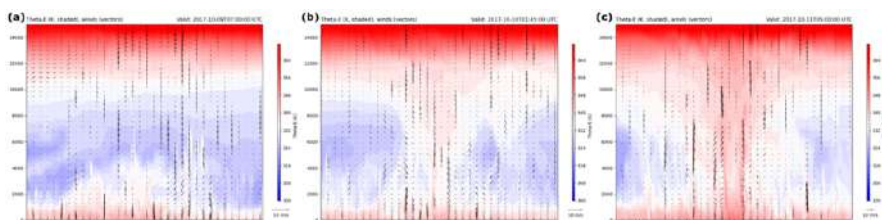


Fig. 3: Corte transversal de temperatura potencial centrado en el ciclón en distintas fases de la TT: (a) ciclón baroclino, (b) ciclón híbrido, (c) ciclón tropical.

Sin embargo, el centro del ciclón se calienta en la última etapa de la TT (Fig. 3c), dado que existe una relación positiva entre la θ en $r = 0$ y la θ_e en $z = 0$ (Fig. 4). Asimismo, este calentamiento y relación continúa cuando el ciclón se transforma en un ciclón tropical puro (último instantes analizados del huracán).

El coeficiente de correlación de Pearson entre va variando en función de la fase temporal que se analice. En general, existe una correlación significativa positiva $r = 0.7$ (p -valor < 0.05). Sin embargo, existe una correlación significativa mucho más

fuerte ($r = 0.92$; p -valor < 0.001) en las últimas etapas de la TT y la primera intensificación del Huracán Ophelia.

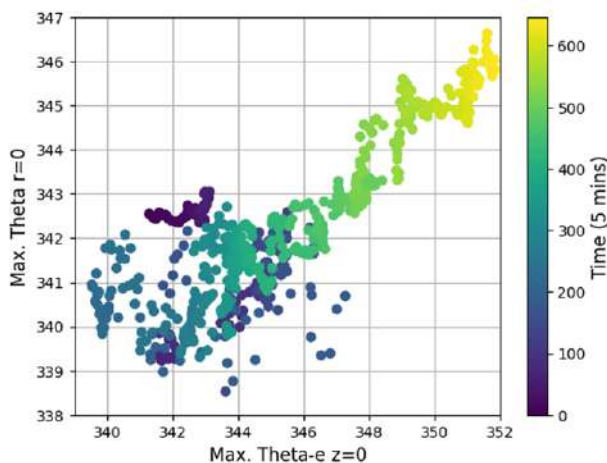


Fig. 4: Evolución temporal y relación entre el máximo de θ en $r = 0$ y máximo de θ_e en $z = 0$.

4. CONCLUSIONES

Este estudio analiza la evolución del calentamiento del centro de la TT del Huracán Ophelia en 2017. La evolución térmica del sistema presenta tres fases diferenciadas: 1) fase previa a la TT; 2) proceso de la TT; 3) última etapa de la TT y primera intensificación del ciclón tropical. En los instantes previos a la TT, el sistema presenta naturaleza fría baroclina. La TT comienza a desarrollarse cuando el sistema inicia su calentamiento y comparte características extratropicales y tropicales. Sin embargo, aparece un período de ligero enfriamiento que puede estar relacionado con una relajación del proceso de TT. Cuando los procesos diabáticos y la actividad convectiva predominan, el sistema comienza a calentarse, siendo ligeramente más efectivo el calentamiento en niveles bajos. Por lo tanto, el ciclón se transforma en un ciclón tropical.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está parcialmente financiado por los proyectos de investigación PID2023-146344OB-I00 (CONSCIENCE). Este trabajo también tiene el apoyo de los Proyectos Especiales del ECMWF SPESMART y SPESVALE. Carlos Calvo-Sancho agradece el contrato otorgado por el Ministerio de Ciencia e Innovación – Programa FPI (PRE2020-092343).

REFERENCIAS

- Calvo-Sancho, C., González-Alemán, J.J., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., Farrán, J.I., Martín, M.L., 2022. An environmental synoptic analysis of tropical transitions in the central and Eastern North Atlantic. *Atmospheric Research* 278, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106353>
- Calvo-Sancho, C., Bolgiani, P., Subias, Á., Sastre, M., González-Alemán, J. J., & Martín, M. L. (2023a). Horizontal kinetic energy analysis of tropical transition simulations with the WRF and HARMONIE-AROME models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 149(756), 2655-2677.
- Calvo-Sancho, C., Qutián-Hernández, L., González-Alemán, J. J., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., & Martín, M. L. (2023b). Assessing the performance of the HARMONIE-AROME and WRF-ARW numerical models in North Atlantic Tropical Transitions. *Atmospheric Research*, 291, 106801.
- Calvo-Sancho, C., Qutián-Hernández, L., Bolgiani, P., González-Alemán, J. J., Santos-Muñoz, D., & Martín, M. L. (2023c). Assessment of HARMONIE-AROME in the simulation of the convective activity associated to a subtropical transition using satellite data. *Atmospheric Research*, 290, 106794.
- Davis, C.A., Bosart, L.F., 2003. Baroclinically Induced Tropical Cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.* 131, 2730–2747. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2730:BITC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2730:BITC>2.0.CO;2)
- Davis, C.A., Bosart, L.F., 2004. The TT problem: Forecasting the tropical transition of cyclones. *BAMS*. 85, 11, 1657-1662. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-85-11-1657>
- Galarneau, T.J., McTaggart-Cowan, R., Bosart, L.F., Davis, C.A., 2015. Development of North Atlantic Tropical Disturbances near Upper-Level Potential Vorticity Streamers. *Journal of the Atmospheric Sciences* 72, 572–597. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0106.1>
- Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly weather review*, 134(9), 2318-2341.
- Hong, S. Y., & Lim, J. O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), 129-151.
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., & García-Bustamante, E. (2012). A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly weather review*, 140(3), 898-918.
- Lenzen, M., Malik, A., Kenway, S., Daniels, P., Lam, K.L., Geschke, A., 2019. Economic damage and spillovers from a tropical cyclone. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 137–151. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-137-2019>
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- Moore, P. (2021). An analysis of storm Ophelia which struck Ireland on 16 October 2017. *Weather*, 76(9), 301-306.

- Peduzzi, P., Chatenoux, B., Dao, H., De Bono, A., Herold, C., Kossin, J., Mouton, F., Nordbeck, O., 2012. Global trends in tropical cyclone risk. *Nature Clim Change* 2, 289–294. <https://doi.org/10.1038/nclimate1410>
- Quitíán-Hernández, L., Bolgiani, P., Santos-Muñoz, D., Sastre, M., Díaz-Fernández, J., González-Alemán, J. J., ... & Martín, M. L. (2021). Analysis of the October 2014 subtropical cyclone using the WRF and the HARMONIE-AROME numerical models: Assessment against observations. *Atmospheric Research*, 260, 105697.
- Rotunno, R., & Emanuel, K. A. (1987). An air–sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 44(3), 542-561.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... & Huang, X. Y. (2019). A description of the advanced research WRF version 4. *NCAR tech. note ncar/tn-556+ str*, 145.
- McTaggart-Cowan, R., Galarneau, T.J., Bosart, L.F., Moore, R.W., Martius, O., 2013. A Global Climatology of Baroclinically Influenced Tropical Cyclogenesis. *Monthly Weather Review* 141, 1963–1989. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00186.1>.

ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE LAS OLAS DE FRÍO EN LA PROVINCIA DE ALICANTE (1947-2016)

David CORELL¹, Adrián REVERT², María José ESTRELA², Juan Javier MIRÓ², Sara ARRIBAS¹, Raquel NICLÓS¹ y M. Yolanda LUNA³

¹*Departamento de Geografía. Universidad de Valencia.*

²*Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universidad de Valencia.*

³*Departamento de Desarrollo y Aplicaciones. Agencia Estatal de Meteorología.*

david.corell@uv.es, majoesna@uv.es

RESUMEN

Este estudio analiza las olas de frío en la provincia de Alicante durante el periodo 1947-2016, utilizando el test de Mann-Kendall para detectar tendencias mediante la definición de ola de frío de AEMET. Durante los 70 años analizados se registraron 93 olas de frío, acumulando 465 días bajo esta situación. Aunque para todo el periodo no se detecta una tendencia significativa, el análisis por subperiodos revela un descenso significativo entre 1947-1981 y un aumento significativo desde 1982. Las olas de frío más duraderas se concentran antes de 1990, destacando el episodio de febrero de 1956 (15 días). Sin embargo, también se han registrado eventos significativos en décadas recientes, como el de febrero de 2012 (12 días). La duración media ha disminuido desde 6 días en las primeras décadas hasta menos de 4,5 días en las más recientes. En cuanto a la intensidad, no se observa una tendencia clara, registrándose las temperaturas más bajas (-17°C) en 2006. El análisis espacial muestra tendencias significativas en el 42 % de los observatorios, con un patrón diferenciado: descenso de días fríos en zonas litorales y de montaña, mientras que las llanuras y valles del interior muestran una tendencia hacia el incremento. Estos resultados sugieren la importancia de los factores topográficos en la distribución de las temperaturas extremas y corroboran algunas de las conclusiones de los últimos informes del IPCC, que señalan que el calentamiento global no solo incrementa los valores medios de temperatura sino también su variabilidad, manteniendo la posibilidad de eventos fríos extremos.

Palabras clave: ola de frío, eventos extremos, tendencias, cambio climático, impactos.

ABSTRACT

This study analyses cold waves in the province of Alicante during the period 1947-2016, using the Mann-Kendall test to detect trends and applying the AEMET cold wave definition. During the 70 years analysed, 93 cold waves were recorded, accumulating 465 days under this situation. Although no significant trend is detected for the whole period, the analysis by sub-periods reveals a significant decrease between 1947-1981 and a significant increase since 1982. The longest lasting cold waves are concentrated before 1990, with the episode of February 1956 (15 days)

standing out. However, significant events have also been recorded in recent decades, such as in February 2012 (12 days). The average duration has decreased from 6 days in the first decades to less than 4,5 days in recent decades. In terms of intensity, no clear trend is observed, with the lowest temperatures (-17°C) recorded in 2006. Spatial analysis shows significant trends in 42 % of the observatories, with a differentiated pattern: decreasing cold days in coastal and mountain areas, while inland plains and valleys show an increasing trend. These results suggest the importance of topographic factors in the distribution of extreme temperatures and corroborate some of the conclusions of the latest IPCC reports, which indicate that global warming not only increases average temperature values but also their variability, maintaining the possibility of extreme cold events.

Key words: cold wave, extreme events, trends, climate change, impacts.

1. INTRODUCCIÓN

La acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera está provocando un incremento de la temperatura global del planeta sin precedentes desde que se tienen registros instrumentales. Ello ha promovido que la comunidad científica centre sus investigaciones en analizar el impacto que este ascenso térmico está causando o puede producir en el futuro sobre nuestro planeta, siendo esta línea de investigación imprescindible para predecir el devenir de la sociedad actual.

No obstante, el calentamiento global no sólo se está traduciendo en un progresivo desplazamiento de los valores de tendencia central de temperatura (media, mediana, etc.) hacia valores más elevados, sino que también está causando un incremento de la varianza, de modo que, aunque los valores extremos se incrementan notablemente en el caso de los valores cálidos, siguen produciéndose valores extremos fríos (Martín Vide et al., 2008). A modo de ejemplo, Sigró et al. (2008), en un estudio sobre el área mediterránea de la Península Ibérica, determinó que entre los años 1901 y 2005 se produjo una disminución más notable de la frecuencia de días fríos, determinados por el percentil del 10 % (P10), que de días muy fríos (determinados por el percentil del 2 % (P02)), siendo a su vez más significativa la disminución de las máximas bajas ($-8,8$ días/año) que de las mínimas bajas ($-5,7$ días/año). Los resultados de dicho estudio coinciden con algunas de las conclusiones de los últimos informes del IPCC (IPCC, 2023) que indican que los valores muy fríos (extremos) no están disminuyendo tanto como los fríos (extremos moderados), por lo que el riesgo de que sigan apareciendo situaciones de ola de frío sigue existiendo en la actualidad, a pesar del calentamiento global.

Un ejemplo que corrobora lo mencionado anteriormente podría ser lo acontecido en el centro peninsular tras el paso de la borrasca Filomena en enero de 2021. Durante dicho episodio de frío extremo, el tiempo anticiclónico posterior a las fuertes nevadas favoreció unas temperaturas mínimas extremadamente bajas en el interior peninsular. Unido a ello, el albedo de la nieve también tuvo un impacto sobre las temperaturas registradas, ya que redujo el calentamiento diurno y agudizó el enfriamiento nocturno de las noches despejadas. Esto se tradujo en mínimas inferiores a -25°C en algunos municipios de Teruel y Guadalajara (AEMET, 2021). En la Comunidad Valenciana,

los valores más fríos se alcanzaron en el interior de Castellón, donde se registraron -26,1 °C en Vistabella del Maestrazgo y -25,2 °C en El Toro (AVAMET, 2021). Los registros mencionados alcanzaron, si no récords históricos de temperatura mínima, valores muy próximos a ellos.

Por todo ello, el objetivo fundamental de este trabajo es analizar la evolución de las olas de frío en la provincia de Alicante durante un periodo de 70 años (1947-2016), a partir de datos de observación en superficie procedentes de una densa red de estaciones meteorológicas. Para ello, se analiza la evolución temporal, la duración, la intensidad y la afección espacial de las olas de frío.

2. MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Se ha seleccionado la provincia de Alicante, situada al sudeste de la Península Ibérica, como área de estudio (figura 1). Se trata de un área, bañada por el mar Mediterráneo por el este, que posee un relieve abrupto en la parte norte y noroeste, con altitudes que alcanzan los 1500 m. Las importantes diferencias de altitud condicionan contrastes térmicos en la temperatura media anual y la orientación del relieve condiciona grandes contrastes en las precipitaciones. El clima del ámbito de estudio es mayormente mediterráneo. Se trata de un clima subtropical, caracterizado por inviernos moderados y veranos calurosos, y por poseer un periodo seco durante el verano. Con respecto a las temperaturas, existe un marcado contraste entre las tierras del litoral y sur de la provincia, y las del interior. En el litoral los inviernos son suaves y los veranos cálidos, con medias anuales alrededor de los 18 °C. En el interior, oscilan entre 13 y 15 °C debido a inviernos más fríos, con heladas nocturnas, y a veranos más suaves. El sector del Alt Vinalopó, más alejado del mar, es una zona de transición hacia la meseta, con una mayor continentalidad y un importante número de heladas.

2.2. Base de datos

Para este estudio, se ha utilizado los datos de observación en superficie de 92 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de la provincia de Alicante (figura 1) gestionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) y el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). Todos los datos han sido sometidos a un proceso de homogenización y relleno de datos faltantes, según la metodología descrita por Miró et al. (2015), lo que ha permitido disponer de series completas de temperatura mínima del periodo 1947-2016 (70 años) en todos los observatorios empleados.

2.3. Definición de Ola de frío

Para la identificación de los episodios de ola de frío se ha utilizado la definición de AEMET (2018), que establece que una ola de frío es “un episodio de al menos tres días consecutivos, en que como mínimo el 10 % de las estaciones consideradas registran mínimas por debajo del percentil del 5 % (P05) de su serie de temperaturas mínimas diarias de los meses de enero y febrero del periodo 1971-2000”.

En base a esta definición, en primer lugar, se ha calculado el P05 de la temperatura mínima de enero y febrero del periodo 1971-2000 para cada una de las 92 estaciones meteorológicas. Posteriormente, se han identificado todas las olas de frío del periodo 1947-2016, teniendo en cuenta todas aquellas situaciones en las que el 10 % de las estaciones consideradas registraron mínimas inferiores a dicho percentil durante un mínimo de tres días consecutivos. Teniendo en cuenta que algunas olas de frío se han desarrollado en dos meses o años diferentes, se ha considerado asignar estas olas al mes o año en que terminaron.

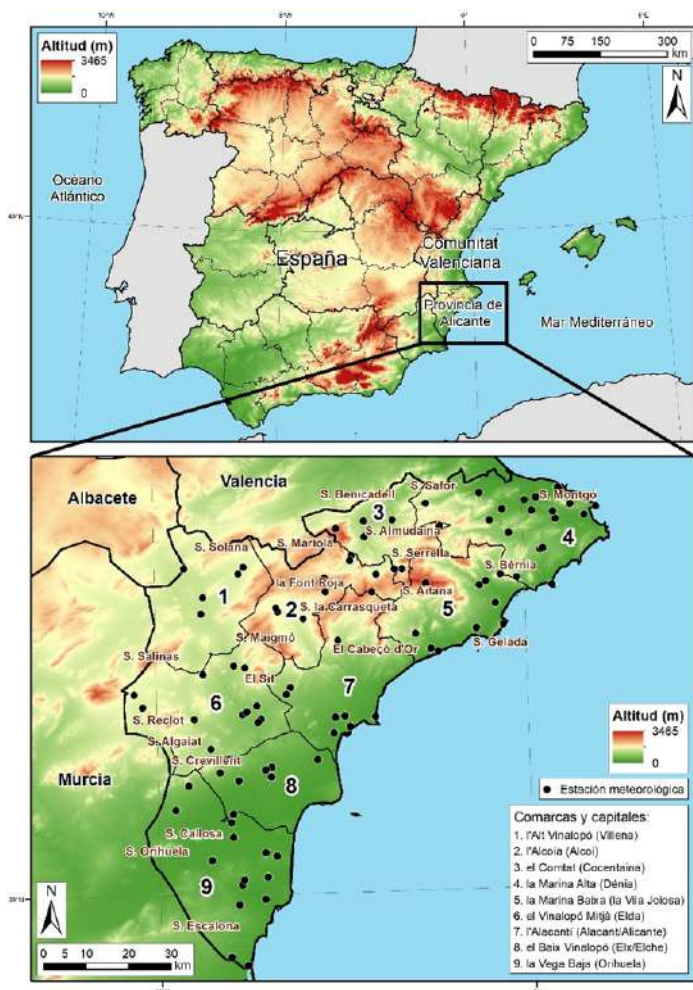


Fig. 1: Área de estudio. Los puntos de color negro representan las estaciones meteorológicas utilizadas. Fuente: elaboración propia.

2.4. Métodos estadísticos utilizados

Para determinar la presencia de tendencias estadísticamente significativas de la serie, se aplicó la prueba de tendencias de Mann-Kendall (Kendall, 1962; Mann, 1945) para los niveles de significación estadística $\alpha = 0,1$, $\alpha = 0,05$ y $\alpha = 0,01$. Esta prueba resulta particularmente apropiada para detectar tendencias monótonas en series de datos meteorológicos, ya que no requiere que los datos sigan una distribución específica ni es sensible a valores atípicos. A su vez, se ha calculado la estimación de pendiente de Sen (Gilbert, 1987), que proporciona una cuantificación fiable de la magnitud del cambio temporal sin verse afectada por valores puntuales muy anómalos. Ambas pruebas son herramientas estadísticas robustas y ampliamente aceptadas y utilizadas en el análisis de datos climáticos. Para la realización de estos cálculos se utilizó la herramienta informática MAKESENS 1.0 (Salmi et al. 2002).

3. RESULTADOS

En total, se han registrado 93 olas de frío en la provincia de Alicante en los 70 años analizados que transcurren entre 1947 y 2016, lo que supone un promedio anual de 1,3 olas de frío. Ello ha supuesto que el área de estudio ha permanecido 465 días bajo esta situación de frío extremo.

La figura 2 representa el número anual de días que han sido catalogados como “ola de frío” en el área analizada. Como se puede observar, tanto en los primeros años del periodo analizado (1954, 1956 y 1965), como en la década más reciente (2005, 2010 y 2012), se han registrado años con al menos 18 días de ola de frío. Durante el resto de años analizados, no se han superado los 13 días con presencia de ola de frío. Es también reseñable que en 15 de los 70 años no se computó ningún día con ola de frío, destacando el periodo de 3 años consecutivos comprendido entre 1975 y 1977, con ausencia de este fenómeno. A su vez, la figura muestra una tendencia plana (línea discontinua), lo que indica que no se observa una variación en el número anual de días con ola de frío a lo largo del tiempo. El test de Mann-Kendall, el cual no se muestra en la figura, confirma que no existe tendencia estadísticamente significativa.

Sin embargo, al dividir la muestra en dos periodos de 35 años, 1947-1981 y 1982-2016 y se calcula la media móvil de 5 años para cada uno de los años analizados, los resultados varían (figura 3). Durante el primer periodo analizado, se observa una tendencia al descenso del número anual de días con ola de frío, la cual es estadísticamente significativa al 95 %. Durante los primeros años de la serie, los promedios se situaban próximos a 14 días, descendiendo con el tiempo, en primer lugar, hasta valores entre 8-10 días, y, finalmente, por debajo de 6 días. Por el contrario, el periodo más reciente muestra una tendencia positiva, estadísticamente significativa al 90 %, lo que indica que, desde principios de los años 80, el número de días con ola de frío ha aumentado. Como se puede apreciar, durante los años 80 el promedio de días con ola de frío se encontraba próximo a 6 días, mientras que en los últimos años analizados se han registrado valores próximos a 10 días.

La figura 4 recoge, para cada década del periodo analizado, la duración media de las olas de frío, así como la temperatura mínima promediada de todos los observatorios afectados. Con respecto a la duración de las olas de frío (línea discontinua de la figura), se observa que ha disminuido con el paso del tiempo. Las olas de frío más

largas fueron registradas en las primeras décadas del periodo y tuvieron una duración, en promedio decadal, de entre 5 y 6 días por cada ola de frío. Este valor se ha ido reduciendo con el paso del tiempo y en las décadas más recientes, es inferior a 4,5 días. Sin embargo, al analizar la intensidad de las olas de frío a partir de la temperatura mínima, en promedio, de todos los observatorios afectados en cada ola de frío, no se observa que se hayan producido cambios, mostrando la gráfica una forma de dientes de sierra, alternando décadas con olas de frío más frías con otras con temperaturas más elevadas (figura 4, línea continua). De entre todas las décadas, destaca la comprendida entre 1997 y 2006, en la que se ha registrado el valor promedio más bajo, con una temperatura mínima media de 0,5 °C.

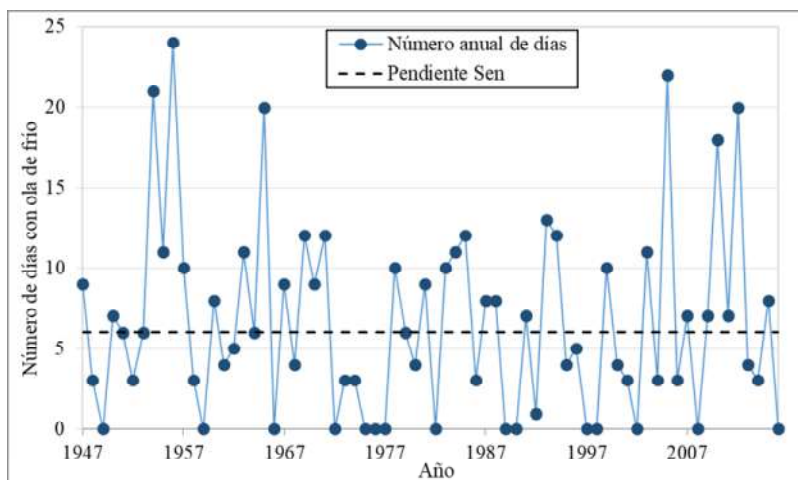


Fig. 2: Número anual de días con ola de frío en la provincia de Alicante durante el periodo 1947-2016. La línea discontinua muestra la tendencia calculada mediante el estimador de pendiente de Sen.

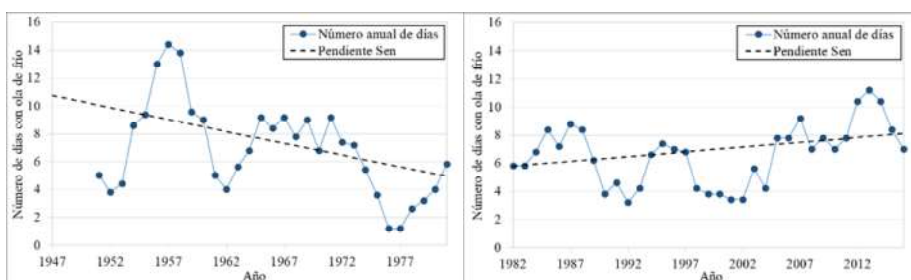


Fig. 3: Número anual de días con ola de frío (media móvil de 5 años) en la provincia de Alicante durante los periodos 1947-1981 (izquierda) y 1982-2016 (derecha). La línea discontinua muestra la tendencia calculada mediante el estimador de pendiente de Sen.

En cuanto a su persistencia temporal, la tabla 1 recoge las 12 olas de frío de más de 9 días de duración. La ola de frío de mayor extensión temporal se registró entre los días

9 y 23 de febrero de 1956 y duró 15 días, afectando en alguno de ellos al 100 % de las estaciones analizadas y con una temperatura mínima absoluta de $-16,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que indica la intensidad de la misma. La mayor parte de estas olas de frío tan persistentes han sido registradas con anterioridad a la década de los 90, aunque en décadas recientes también han estado presentes. Ejemplo de ello es la ola de frío registrada entre el 8 y el 19 de febrero de 2012, que duró 12 días. En cuanto a la intensidad, cabe destacar que las dos olas de frío que han registrado los valores más bajos de temperatura mínima absoluta han tenido lugar en la década de los 2000. En concreto, durante la ola de frío registrada entre el 25 de enero y el 2 de febrero de 2005 se alcanzó una temperatura de $-16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en alguno de los observatorios, mientras que en la observada entre los días 28 y 30 de enero de 2006, el termómetro llegó hasta $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (esta ola de frío no aparece en la tabla 1 ya que su duración fue de solo 3 días).

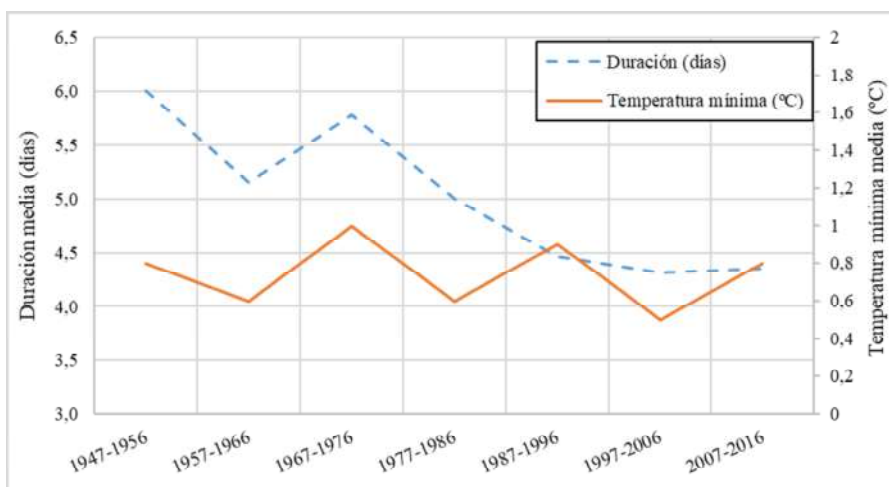


Fig. 4: Duración media (línea discontinua) de las olas de frío y temperatura mínima diaria media (línea continua) registrada por todos los observatorios afectados en cada ola de frío computada, agrupados por décadas.

La figura 5 muestra, para cada observatorio, la tendencia, durante el periodo 1947-2016, del número anual de días cuya temperatura mínima ha sido inferior a P05 de su serie de temperaturas mínimas diarias. En ella se aprecia que, en 39 de los 92 observatorios, se ha detectado una tendencia estadísticamente significativa, lo que supone el 42 % del total de estaciones analizadas. A su vez, se observa que los observatorios que muestran una tendencia negativa, es decir, un descenso del número anual de días por debajo del P05, se sitúan principalmente en zonas litorales (sobre todo entre l'Alacantí y el sur de la Marina Alta) y en zonas de montaña. Por el contrario, la mayor parte de los 15 observatorios en los que se ha detectado una tendencia al incremento de este tipo de días fríos se localizan en llanuras y valles del prelitoral e interior (el Vinalopó, el Comtat, los valles de la Marina Alta, etc).

Inicio dd/mm/aa	Final dd/mm/aa	Dura- ción (días)	Día extensión espacial máxima dd/mm/aa	Extensión espacial máxima (%)	Día más frío dd/mm/aa	Temp. mín. absoluta día más frío (°C)
09/02/56	23/02/56	15	13/02/56	100,0	11/02/56	-16,0
23/12/70	05/01/71	14	02/01/71	97,8	01/01/71	-12,9
01/01/54	13/01/54	13	10/01/54	76,1	10/01/54	-9,8
06/01/85	17/01/85	12	10/01/85	100,0	07/01/85	-12,7
08/02/12	19/02/12	12	12/02/12	98,9	12/02/12	-10,3
27/01/63	06/02/63	11	03/02/63	97,8	03/02/63	-9,1
12/01/57	21/01/57	10	17/01/57	98,9	17/01/57	-10,0
08/02/83	17/02/83	10	14/02/83	98,9	13/02/83	-13,1
25/01/47	02/02/47	9	27/01/47	72,8	27/01/47	-10,0
14/02/53	19/02/53	9	16/02/53	75,0	16/02/53	-7,8
11/12/67	19/12/67	9	13/12/67	97,8	12/12/67	-11,1
25/01/05	02/02/05	9	27/01/05	100,0	28/01/05	-16,5

Tabla 1: Olas de frío de mayor duración registradas en la provincia de Alicante entre los años 1947 y 2016. Fuente: elaboración propia.

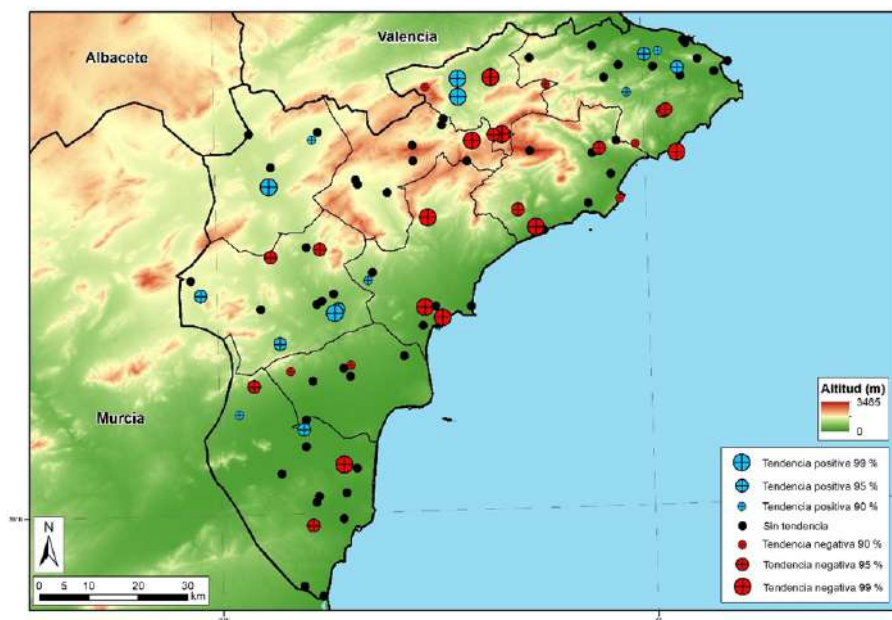


Fig. 5: Distribución espacial de la tendencia (1947-2016) en el número de días anuales con temperatura mínima inferior al percentil del 5% de la serie de temperaturas mínimas diarias de los meses de enero y febrero de cada observatorio y del periodo 1971-2000, en la provincia de Alicante. Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en relación al número de olas de frío en la provincia de Alicante durante el periodo 1947-2016 muestran un promedio de 1,3 olas de frío anuales y un total de 465 días bajo esta situación en 70 años e indican que, si bien estos eventos son relativamente poco frecuentes, constituyen un fenómeno climático relevante en la zona de estudio.

El análisis temporal revela una ausencia de tendencia significativa en el número total de días con ola de frío durante todo el periodo. Sin embargo, el estudio por subperiodos muestra una evolución más compleja: una tendencia decreciente estadísticamente significativa en 1947-1981, seguida de una tendencia positiva en 1982-2016. Este dato puede llamar la atención, ya que, la década de los 70, coincide con la época de mayor anomalía negativa de la temperatura media registrada en la Comunidad Valenciana en las últimas décadas (AEMET, 2022). Sin embargo, ello se debe a que, en dicha década, la anomalía negativa de la primavera, el verano y el otoño fue mucho más acusada que la registrada los meses invernales, los más propensos a las olas de frío.

Un resultado destacable del estudio indica la disminución de la duración de las olas de frío. Durante las primeras décadas, las olas de frío tenían una duración aproximada de 6 días, mientras que en épocas recientes este número ha descendido a valores alrededor de 4,5 días. Sin embargo, episodios como el registrado en febrero de 2012 de 12 días de duración, indican que, a pesar de la reducción en la duración media, la variabilidad natural del clima sigue permitiendo la ocurrencia de eventos persistentes. La disminución en su duración media contrasta con el mantenimiento de su intensidad, como demuestra la alternancia de décadas con olas más o menos frías sin una tendencia clara. Este mantenimiento de la intensidad se confirma con el registro de las temperaturas más bajas del periodo (-17°C) en años recientes (2006) y reafirman algunas de las conclusiones de Sigró et al. (2008) y de los últimos informes del IPCC (IPCC, 2023).

El análisis espacial de tendencias señala el incremento del número de días con ola de frío en zonas de valle y llanuras prelitorales e interiores (dependientes de las inversiones térmicas para registrar sus mínimas más bajas), mientras que las zonas litorales y de alta montaña (dependientes de las advecciones frías para registrar sus mínimas más bajas), han mostrado tendencias al descenso. Los resultados de Miró et al. (2015) refuerzan nuestros hallazgos sobre la variabilidad térmica a escala local en la provincia de Alicante: . pese al calentamiento global generalizado, las temperaturas mínimas invernales han descendido en valles y llanuras interiores, áreas propensas a inversiones térmicas bajo condiciones anticiclónicas, mientras se incrementan en zonas elevadas y fuera de las depresiones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto de investigación PID2020-118797RB-I00 financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033 (Ministerio de Ciencia e Innovación), y del proyecto de investigación PROMETEO/2021/016 financiado por la Conselleria d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat Digital de la Generalitat Valenciana.

REFERENCIAS

- AEMET-Agencia Estatal de Meteorología (2018): Olas de frío en España desde 1975. Recuperado de: http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/Olas_frio/Olas_Frio_ActualizacionOct2018.pdf. Última consulta el 22/10/2024.
- AEMET-Agencia Estatal de Meteorología (2021). Los récords de frío tras la borrasca Filomena y el calentamiento global (2021). Recuperado de <https://aemetblog.es/2021/01/12/los-records-de-frío-tras-la-borrasca-filomena-y-el-calentamiento-global/>. Última consulta el 22/10/2024.
- AEMET-Agencia Estatal de Meteorología (2022). Anomalía de la temperatura media anual en España (1950-2022). Recuperado de https://x.com/AEMET_CValencia/status/1605554836463820800. Última consulta el 22/10/2024.
- AVAMET-Asociación Valenciana de Meteorología (2021). Temperaturas mínimas en la Comunidad Valenciana el 12/01/2021. Recuperado de <https://www.avamet.org/mx-meteoxarxa.php?id=2021-01-12>. Última consulta el 22/10/2024.
- Gilbert, R.O. (1987). Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold.
- IPCC-Panel Intergubernamental del Cambio Climático (2023). Sexto informe de síntesis sobre cambio climático. Recuperado de https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Última consulta el 22/10/2024.
- Kendall, M. (1962). Rank Correlation Methods. Charles Griffin Book Series.
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245–259. <https://www.jstor.org/stable/1907187>.
- Martín Vide, J., Olcina, J., Estrela M.J. (2008). Cambio climático y riesgos en el área mediterránea. En Estrela M.J. (Ed.), *Riesgos climáticos y cambio global en el Mediterráneo español ¿Hacia un clima de extremos?* (pp. 15-25). Colección Interciencias, Centro Francisco Tomás y Valiente UNED Alzira-Valencia, CEAM.
- Miró, J.J., Estrela, M.J., Olcina Cantos, J. (2015). Statistical downscaling and attribution of air temperature change patterns in the Valencia region (1948–2011). *Atmos Res*, 156, 189-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.003>.
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., Amnell, T. (2002). Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by the Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates—The Excel Template Application MAKESENS. En *Publications on Air Quality*, 31.
- Sigró, J., Brunet, M., Aguilar, E., Saladié, Ó. (2008). Variaciones temporales en los índices de extremos térmicos en el patrón SEES (South-Eastern and Eastern Spain) de la red SDATS (Spanish Daily Adjusted Temperature Series). En Estrela M.J. (Ed.), *Riesgos climáticos y cambio global en el Mediterráneo español ¿Hacia un clima de extremos?*, Valencia (pp. 77-95). Colección Interciencias, Centro Francisco Tomás y Valiente UNED Alzira-Valencia, CEAM.

CARACTERIZACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MÍNIMAS EN CANARIAS (1950-2023)

Jordan CORREA GONZÁLEZ¹, Pedro DORTA ANTEQUERA¹, Abel LÓPEZ
DÍEZ¹, Jaime DÍAZ PACHECO¹ y Nerea MARTÍN RAYA¹

¹*Cátedra Universitaria de Reducción del Riesgo de Desastres y Ciudades
Resilientes. Universidad de La Laguna*

jcorrea@ull.edu.es, pdorta@ull.edu.es, alopezd@ull.edu.es,
jdiazpac@ull.edu.es, nmartinr@ull.edu.es

RESUMEN

En este trabajo se estudia la distribución espacial de las temperaturas mínimas en Canarias, así como su evolución en las últimas décadas. Para ello, se analizan los registros diarios de temperatura mínima entre 1950 y 2023 de cincuenta y tres estaciones meteorológicas cuyo emplazamiento resulta representativo de las compartimentadas condiciones climáticas de Canarias. Se emplea la información del reanálisis atmosférico de *ERA5-Land* para reconstruir y homogeneizar las series, realizándose con posterioridad una interpolación para cartografiar las condiciones térmicas de la totalidad del archipiélago. Los resultados muestran la gran influencia que ejerce la altitud sobre la temperatura en Canarias, de modo que las costas —<300 m.s.n.m.— promedian una temperatura mínima media mensual, en el período de análisis, de 18°C, mientras que las cumbres —>1 200 m.s.n.m.— registran una media de 8°C. Esta graduación térmica según la elevación insular se manifiesta, asimismo, en la distribución de la temperatura mínima absoluta —por debajo de -20°C en los sectores culminantes de algunas islas y por encima de 10°C en áreas litorales cálidas—, así como en la evolución temporal de la variable. En este sentido, a pesar de identificarse un calentamiento generalizado en toda Canarias, el incremento de las mínimas en las cumbres —0.2°C por década y, en algunos puntos, 0.3°C— es muy superior al de las costas —menos de 0.1°C en determinadas zonas—.

Palabras clave: temperatura mínima, Canarias, cambio climático, gradiente térmico

ABSTRACT

This paper studies the spatial distribution of minimum temperatures in the Canary Islands, as well as their evolution over the last decades. For this purpose, we analyse the daily minimum temperature records between 1950 and 2023 from fifty-three weather stations whose location is representative of the compartmentalised climatic conditions of the Canary Islands. Information from the *ERA5-Land* atmospheric reanalysis is used to reconstruct and homogenise the series, and interpolation is then performed to map the thermal conditions of the entire archipelago. The results show the great influence of altitude on temperature in the Canary Islands, so that the coasts —<300 m.a.s.l.— average a monthly minimum temperature of 18°C during the analysis period, while the summits —>1 200 m.a.s.l.— record an average of 8°C. This

thermal gradation according to island elevation is also evident in the distribution of the absolute minimum temperature —below -20°C in the culminating sectors of some islands and above 10°C in warm coastal areas—, as well as in the temporal evolution of the variable. In this sense, although a generalised warming has been identified throughout the Canary Islands, the increase in minimum temperatures at the summits — 0.2°C per decade and, at some points, 0.3°C — is much higher than on the coasts —less than 0.1°C in certain areas—.

Keywords: minimum temperature, Canary Islands, climate change, thermal gradient

1. INTRODUCCIÓN

De manera recurrente, el análisis del cambio climático y, en concreto, del calentamiento global, se ha centrado en el estudio de los extremos térmicos por sus indudables impactos sobre la población, los cultivos o los ecosistemas, entre otros (Hay et al., 2016; Khan et al., 2024). Así, las temperaturas máximas conforman un indicador apetecible y fácilmente interpretable tanto en el mundo académico como en el mediático. Abundan, en este sentido, los trabajos orientados al análisis de las temperaturas máximas —actuales y proyectadas—, así como la utilización de índices térmicos basados en esta variable para analizar situaciones de elevado estrés ambiental (El Kenawy et al., 2011).

Sin embargo, este tradicional interés por el estudio de la temperatura culminante de cada día —o de una serie completa, en el caso de la máxima absoluta— no menoscaba la relevancia creciente de las temperaturas mínimas, presentes también en variadas investigaciones e índices climáticos (Miró et al., 2016; Pithan & Schatt, 2024). El importante aumento de los valores mínimos que, de acuerdo con la comunidad científica (IPCC, 2021), se está produciendo en diversas regiones del planeta, presenta consecuencias importantes en diferentes sectores y ámbitos. Destacan, de este modo, los impactos sobre el bienestar y la salud de la ciudadanía (Otani et al., 2021), el confort turístico (Miró & Olcina, 2020; Dorta et al., 2024), los ciclos hidrológicos (Zhang et al., 2013) o la productividad agrícola (Fatima et al., 2020), entre otras repercusiones. La dimensión e implicaciones de todas ellas requiere de la realización de análisis científicos que evalúen la magnitud de los cambios registrados en esta variable a escalas espacialmente apropiadas para la adopción de medidas de adaptación eficaces y ajustadas a las características ecológicas y socioterritoriales de cada lugar.

Las islas Canarias presentan una muy notable diversidad ecológica como consecuencia de una marcada heterogeneidad climática. A la compartimentación inherente a su condición archipelágica se suman factores como la orientación de las laderas en relación con los vientos alisios, la presencia de la corriente marina fría de Canarias o, con especial significación, el relieve. La influencia de este último sobre las condiciones ambientales de Canarias se vincula, además de a la mentada orientación diferencial de las laderas insulares, a lo accidentado de su orografía y, sobre todo, a la considerable altitud que alcanzan algunas de sus islas —por encima de $1\,400$ m.s.n.m. en cinco de ellas—. Cabe mencionar, asimismo, que a barlovento de los alisios de las islas más montañosas se despliega, durante la mayor parte del año,

un manto de estratocúmulos que aporta a dichas vertientes frescor y humedad de manera relativamente constante. En definitiva, resultan acusados los contrastes ambientales —higrotérmicos, pluviométricos, eólicos, de insolación, etc.— entre islas, franjas altitudinales y vertientes, circunstancia que condiciona la distribución faunística y florística, el poblamiento humano y el emplazamiento de las distintas actividades productivas.

Por otra parte, en lo que concierne específicamente al cambio climático, este constituye un fenómeno con especial incidencia en los espacios insulares (Duvat et al., 2017). El grado de vulnerabilidad de las islas se ha señalado superior por razones de muy diversa índole; cuentan, por definición, con un territorio particularmente limitado y aislado, se hallan muy expuestas a procesos como el aumento del nivel del mar y su nivel de diversificación económica es escaso —dependiendo, en muchos casos, de la práctica turística—. Además, sus posibilidades de mitigación y adaptación son exiguas y, como ocurre en Canarias, su elevada densidad de población dificulta la gestión de los riesgos asociados a las transformaciones climáticas actuales. En el entorno de la región estudiada, las investigaciones apuntan a un incremento térmico más importante en las mínimas que en las máximas, así como a una paulatina y menos significativa reducción de las precipitaciones (Martín-Esquivel et al., 2012; Dorta et al., 2018).

Este trabajo, partiendo de la expuesta conveniencia y utilidad socioecológica de analizar la evolución de las temperaturas mínimas y en consideración de la referida compartimentación climática de las islas, presenta los siguientes objetivos: (1) estudiar la distribución de las temperaturas mínimas en Canarias de manera territorial y ambientalmente representativa; y (2) estimar la existencia de tendencias estadísticas en la evolución de dicha variable en las últimas décadas.

2. MÉTODOS

Para satisfacer los objetivos señalados, se han seleccionado los registros diarios de temperatura mínima de 53 estaciones meteorológicas cuya información procede de la Agencia Estatal de Meteorología AEMET—. Estas estaciones se reparten en las ocho islas habitadas de Canarias, localizándose a distintas cotas altitudinales y vertientes (*Fig. 1*).

Conviene señalar los contrastes existentes entre las fechas de inicio de las diferentes series; el observatorio de Izaña, por ejemplo, dispone de una serie centenaria, frente a otros puntos con datos cuya extensión temporal es inferior a una década. Así, con el objetivo de rellenar las series, reconstruir las más breves y poderlas homogeneizar, se han obtenido los datos de temperatura procedentes del reanálisis atmosférico de *ERA5-Land* (Muñoz-Sabater, 2019) entre 1950 y 2023, período de análisis escogido. Siendo esta información de carácter horario, se han descargado los registros de temperatura de cada día entre las 23.00 y las 08.00 horas —intervalo en el que se produce, en más del 90% de los registros, el mínimo térmico diario— de las celdas dispuestas sobre las estaciones meteorológicas o, en su defecto, los de las celdas más próximas a dichos puntos.

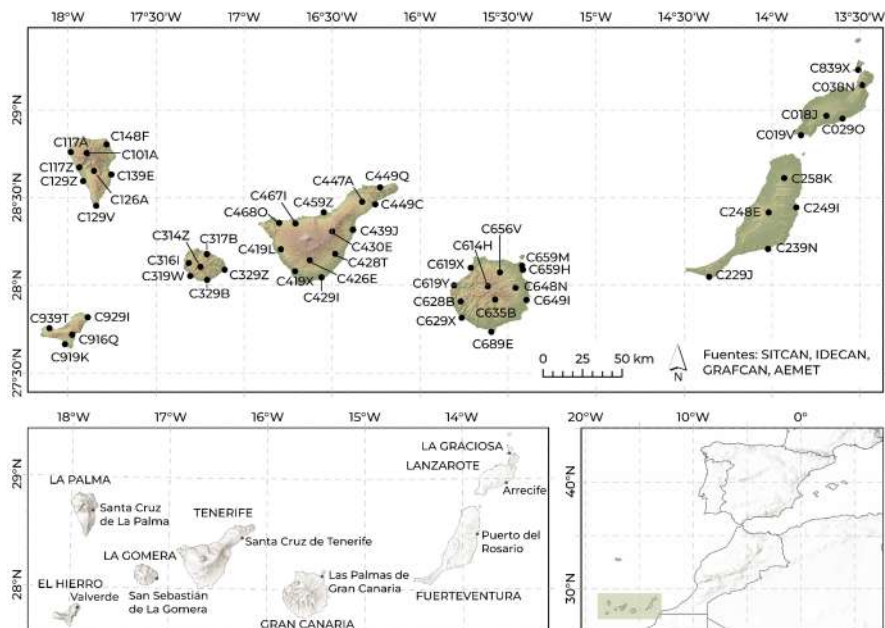


Fig. 1: Estaciones seleccionadas

A continuación, se ha efectuado un análisis tendencial a través del test de *Mann-Kendall*, así como del test no paramétrico conocido como *Sen's slope*, que ha posibilitado la estimación de la magnitud o ritmo de los cambios observados en la temperatura mínima.

Una vez ejecutado dicho procedimiento estadístico, se ha realizado una interpolación de distancia inversa ponderada —IDW— de los resultados de las estaciones para obtener una zonificación adecuada de las temperaturas mínimas en las islas, corrigiendo la predicción espacial de la variable mediante la combinación de la misma con la altitud, introduciendo el gradiente vertical (Fries et al., 2012). Así, se ha utilizado un Modelo Digital del Terreno —MDT— de las islas con un paso de malla de veinticinco metros (SITCAN, 2021).

3. RESULTADOS

El promedio de temperatura mínima media anual entre 1950 y 2023 en Canarias es de 15.6°C. Sin embargo, como ya se ha señalado, existen importantes diferencias espaciales, confirmándose la enorme influencia que ejerce el relieve sobre la temperatura (Fig. 2). En este sentido, las estaciones emplazadas por debajo de 300 m.s.n.m. promedian 18°C, cifra que desciende a 8°C entre aquellas situadas por encima de 1 200 metros. Las veinticinco estaciones meteorológicas con valores medios anuales más elevados se sitúan por debajo de 250 m.s.n.m., mientras que las cuatro con temperaturas más bajas —Vilaflor (C426E), Vallehermoso Alto Igualero (C314Z), Roque de los Muchachos (C101A) e Izaña (C430E)— se ubican por encima

de 1 250 m.s.n.m. Con todo ello, la correlación entre altitud y temperatura mínima es muy alta — $R^2 = 0.87$ — (Fig. 3).

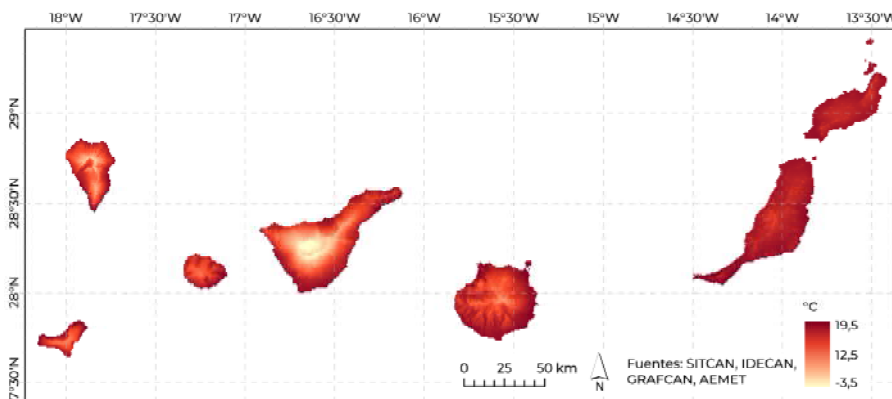


Fig. 2: Temperatura mínima media anual en Canarias (1950-2023)

En diversos sectores costeros de la mayoría de las islas, así como en amplias extensiones de Lanzarote y Fuerteventura, la temperatura mínima promediada a lo largo del período de análisis supera 18,5°C, mientras que, en los espacios interiores de las islas más occidentales, dicho valor es inferior a 10°C e, incluso en los puntos de mayor cota, inferior a 0°C.

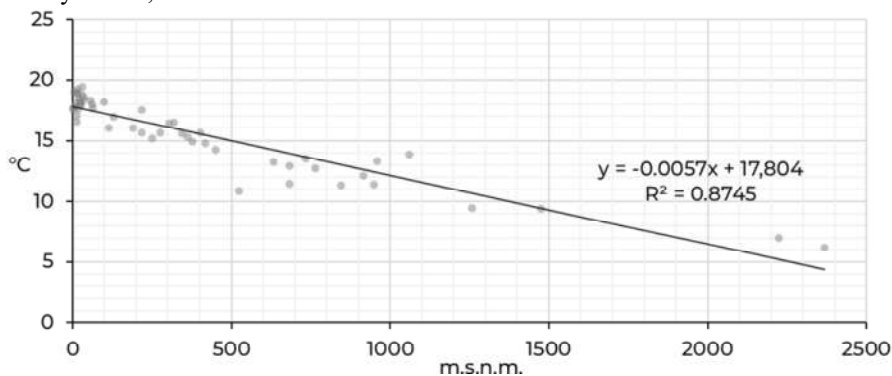


Fig. 3: Relación entre la temperatura mínima media anual (1950-2023) y la altitud de las estaciones

En lo que concierne a la temperatura mínima absoluta, se observan, de nuevo, grandes contrastes espaciales; en apenas ocho de las cincuenta y tres estaciones se han registrado, en alguna ocasión, valores negativos —cinco por encima de 1 000 m.s.n.m. y las tres restantes por encima de 800 metros—. En Izaña —C430E—, El Paso —C126A—, Vallehermoso Alto Igualero —C314Z— y el Roque de Los Muchachos —C101A—, la mínima absoluta se encuentra por debajo de -5°C. Por el contrario, en emplazamientos costeros como Las Palmas de Gran Canaria —C659M—, San Sebastián de La Gomera —C329Z—, Frontera —C939T—, Fuencaliente —C129V—

, Maspalomas —C629X— o La Graciosa —C839X—, el mínimo de temperatura desde 1950 ronda, o supera, en algunos casos, los 10°C (Fig. 4). En la práctica totalidad de las estaciones, el valor térmico más bajo se registra entre enero y marzo.

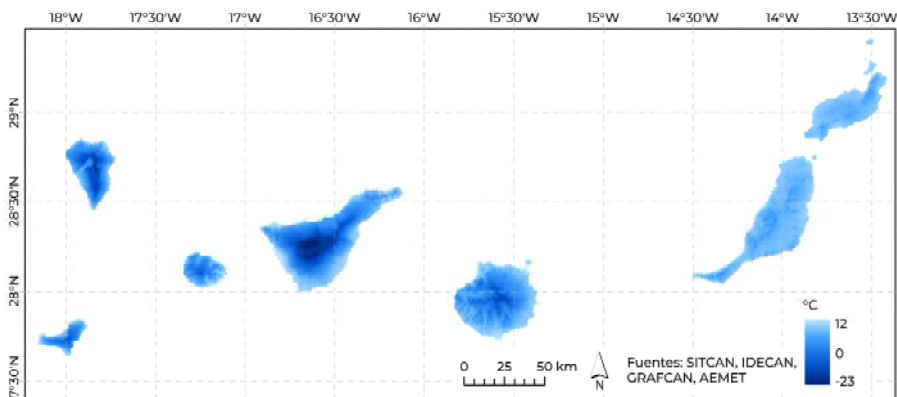


Fig. 4: Temperatura mínima absoluta en Canarias (1950-2023)

Por su parte, el análisis de la evolución temporal de la temperatura mínima en las islas refleja un calentamiento generalizado en todo el archipiélago (Fig. 5). A pesar de este extendido calentamiento, el aumento registrado en las últimas siete décadas guarda una estrecha relación con la altitud — $R^2 = 0.72$ — (Fig. 6). Las costas y las islas orientales —Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa— han experimentado una menor variación en las mínimas frente a los sectores de medianías y, sobre todo, a las cumbres, donde el incremento térmico llega a triplicar el del litoral en algunos puntos. Hasta 1975, aproximadamente, las tendencias son muy débiles e, incluso, en algunas estaciones se tiende hacia un ligero enfriamiento que contrasta con el paulatino aumento térmico experimentado desde la década de 1980 hasta la actualidad.

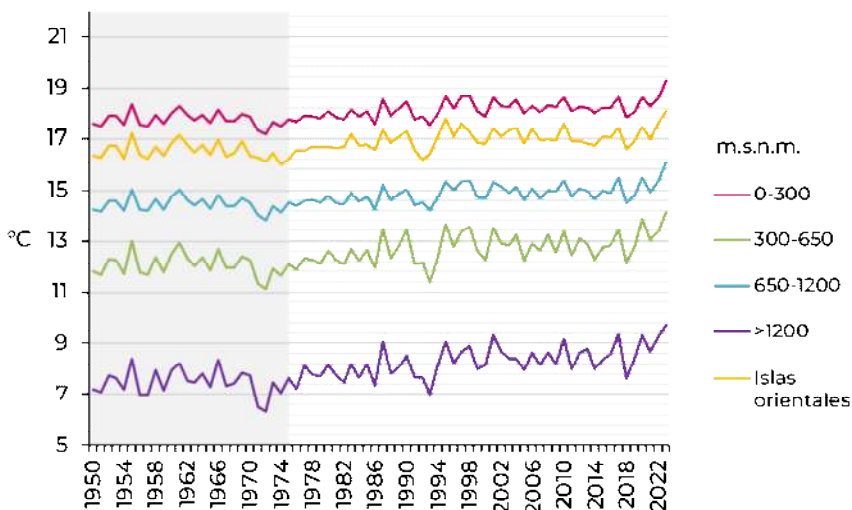


Fig. 5: Evolución de la temperatura mínima media anual en Canarias por franjas altitudinales (1950-2023)

En todo caso, en las 53 estaciones estudiadas se identifica, a partir de la aplicación del *test de Mann-Kendall*, una tendencia creciente significativa entre 1950 y 2023 cuyo grado de confianza estadística excede el 99%. En cuanto al ritmo de aumento, destacan puntos de cumbre y medianías como Izaña —C430E—, San Bartolomé de Tirajana —C635B—, Vallehermoso - Alto Igualero —C314Z—, Tejeda —C614H—, Vilaflor —C426E—, o el Roque de Los Muchachos —C101A—, todos ellos emplazados por encima de los 900 m.s.n.m. y con un calentamiento superior a 0.2°C por década —es decir, más de 1.5°C en todo el período de análisis—. Incluso, se reconocen sectores insulares a gran elevación cuyo calentamiento decadal se sitúa en el entorno de 0.3°C. En el extremo opuesto, con aumentos térmicos significativos, pero de menor magnitud, se encuentran estaciones fundamentalmente de costa donde el ritmo de incremento por decenio es ligeramente inferior a 0.1°C —menos de 0.75°C a lo largo de las siete décadas—: Las Palmas de Gran Canaria —C659M—, Taganana —C449Q—, los aeropuertos de El Hierro —C929I— y La Gomera —C329B—, Agaete —C619X—, Puerto de la Cruz —C459Z—, etc. —Figura 5—.

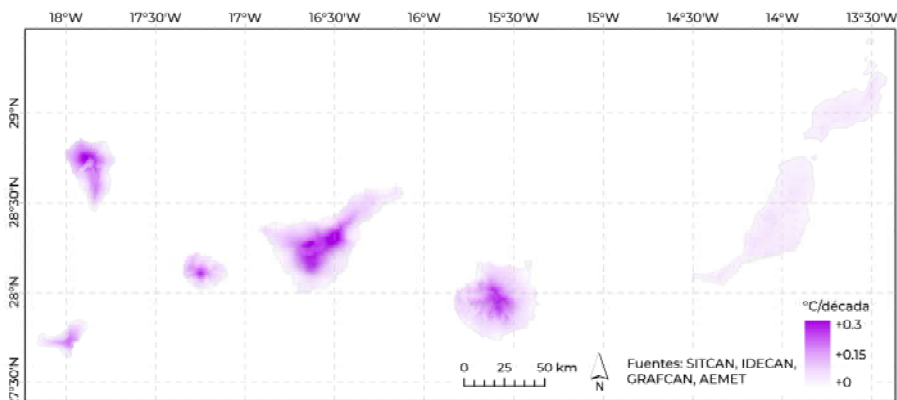


Fig. 6: Evolución de la temperatura mínima media anual en Canarias (1950-2023)

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis estadístico de los valores térmicos mínimos en Canarias refleja una alta compartimentación geográfica, cuestión ya conocida pero en la que se profundiza con gran precisión en este trabajo, al haber empleado un elevado número de estaciones meteorológicas con series largas (74 años de datos), y en virtud del método empleado. Los resultados obtenidos, que desarrollan y actualizan lo expuesto por otros autores, confirman la enorme importancia del relieve en la distribución de las temperaturas en el archipiélago, tanto en lo que se refiere a su orientación (especialmente en relación con la presencia constante de los vientos alisios) como, sobre todo, a su altitud que determina la coexistencia de valores extremos muy inferiores a los 0°C y otros por encima de 10°C en apenas unos pocos kilómetros. No obstante, resulta importante el

hecho de que las temperaturas mínimas, medias y extremas en los sectores costeros de Canarias son las más altas de todo el país, y en ellas, tal y como indican publicaciones recientes, se registra el mayor número de noche tropicales (Correa et al., 2024).

Probablemente, la principal aportación de esta investigación remita al análisis de las tendencias en el actual contexto del cambio climático. Como se ha expuesto, se han analizado los registros térmicos de una gran variedad de estaciones cuyas series se homogeneizan y completan haciendo uso de información proveniente de reanálisis atmosférico. Los resultados obtenidos, además, se encuentran en consonancia con los datos ofrecidos por otros trabajos ya publicados que han empleado series más cortas (Martín-Esquivel et al., 2012). Así, la presente investigación ha demostrado, con un alto grado de consistencia estadística, el importante calentamiento nocturno que se está produciendo en Canarias. Este se ha producido en todo el territorio de forma generalizada, pero, una vez más, existen sustanciales diferencias geográficas. El principal factor que determina el mayor o menor calentamiento remite a la altitud, de manera que existe una altísima correlación entre la cota altitudinal y la velocidad del ascenso térmico. Esta circunstancia se observa de forma especialmente patente al comparar los resultados de los observatorios del litoral con los ubicados en la alta montaña; la magnitud del calentamiento es el triple en estos últimos sectores frente a los primeros.

Aunque, como se ha evidenciado, el gradiente térmico altitudinal resulta ser un factor determinante para comprender la distribución de las temperaturas en el archipiélago, la inversión térmica de subsidencia de los vientos alisios desempeña un papel esencial, explicando el marcado calentamiento en cotas altas. De este modo, la presencia de dicho fenómeno implica un alejamiento efectivo de la influencia oceánica a partir de cierta altitud, lo que ocasiona un incremento térmico mucho más pronunciado por encima de la señalada inversión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a J.A. Guijarro su asesoramiento durante el proceso de control de calidad y homogeneización de las series climáticas.

REFERENCIAS

- Correa, J., Dorta, P., López-Díez, A. & Díaz-Pacheco, J. (2024). Analysis of tropical nights in Spain (1970–2023): Minimum temperatures as an indicator of climate change. *International Journal of Climatology*, 44(9), 3006-3027. <https://doi.org/10.1002/joc.8510>
- Dorta, P., López-Díez, A. & Díaz-Pacheco, J. (2018). El calentamiento global en el Atlántico Norte Suroriental. El caso de Canarias. Estado de la cuestión y perspectivas de futuro. *Cuadernos Geográficos*, 57(2), 27-52. doi: <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5934>
- Dorta, P., Sánchez-Almodóvar, E., López-Díez, A., Díaz-Pacheco, J. & Olcina, J. (2024). Climate Change and Tourism in Spain. The Case of the Canary Islands and the Costa Blanca (Alicante). En Remoaldo, P., Lopes, H., Ribeiro, V. & Alves, J.

- (Eds.), *Tourism and Climate Change in the 21st Century. Advances in Spatial Science* (pp. 143-173). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59431-1_7
- Duvat, V., Magnan, A., Wise, R. M., Hay, J. E., Fazey, I., Hinkel, J., Stojanovic, T., Yamano, H. & Ballu, V. (2017). Trajectories of exposure and vulnerability of small islands to climate change. *WIREs Climate Change*, 8(6). doi: <https://doi.org/10.1002/wcc.478>
- El Kenawy, A., López-Moreno, J.I. & Vicente-Serrano, S.M. (2011). Recent trends in daily temperature extremes over northeastern Spain (1960–2006). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9), 2583-2603. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-11-2583-2011>
- Fatima, Z., Ahmed, M., Hussain, M., Abbas, G., Ul-Allah, S., Ahmad, S., Ahmed, N., Arif-Ali, M., Sarwar, G., ul-Hauqe, E., Iqbal, P. & Hussain, S. (2020). The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options. *Scientific Reports*, 10(18013). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74740-3>
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., & Bendix, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 17–30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.08.004>
- Guijarro, J.A. (2024). Guía de uso del paquete de R *climatol* (versión 4.1.1). Retrieved from/Recuperado de <https://www.climatol.eu/climatol4.1.1-es.pdf>
- Hay, J. E., Easterling, D., Ebi, K. L., Kitoh, A., & Parry, M. (2016). Introduction to the special issue: Observed and projected changes in weather and climate extremes. *Weather and Climate Extremes*, 11, 1-3. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.006>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Retrieved from/Recuperado de https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- Khan, F., Liou, Y.-A., Spöck, G., Wang, X. & Ali, S. (2024). Assessing the impacts of temperature extremes on agriculture yield and projecting future extremes using machine learning and deep learning approaches with CMIP6 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104071>
- Martín-Esquível, J. L., Bethencourt, J., & Cuevas-Agulló, E. (2012). Assessment of global warming on the island of tenerife, canary islands (spain). trends in minimum, maximum and mean temperatures since 1944. *Climatic Change*, 114(2), 343–355. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0407-7>
- Miró, J., Olcina, J., Estrela, M.J. & Caselles, V. (2016). Confort climático, cambio climático y actividad turística en Alicante. En Olcina, J., Rico-Amorós, A.M. & Moltó, E. (Eds.), *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio. Libro de Actas del X Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología* (pp. 667-678). doi: <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-63>
- Miró, J.J. & Olcina, J. (2020). Cambio climático y confort térmico. Efectos en el turismo de la Comunidad Valenciana. *Investigaciones Turísticas*, 20, 1-30. doi: <https://doi.org/10.14198/INTURI2020.20.01>

- Muñoz-Sabater, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Otani, S., Ishizu, S., Masumoto, T., Amano, H., & Kurozawa, Y. (2021). The Effect of Minimum and Maximum Air Temperatures in the Summer on Heat Stroke in Japan: A Time-Stratified Case-Crossover Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18041632>.
- Pithan, F. & Schatt, L. (2024). Diurnal Temperature Range Trends Differ Below and Above the Melting Point. *Geophysical Research Letters*, 51(17). doi: <https://doi.org/10.1029/2024GL109751>
- SITCAN (2021). Modelo Digital de Terreno (MDT) de 25x25 metros. Retrieved from/Recuperado de <https://opendata.sitcan.es/dataset/modelo-digital-de-terreno-mdt-de-25x25-metros>
- Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P., & Xiao, M. (2013). Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle. *Global and Planetary Change*, 111, 57–76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.012>

APLICACIÓN DE LA BASE DE DATOS PALEORIADA A LA INCORPORACIÓN DE LA VARIABILIDAD POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN ESPAÑA

Andrés Díez HERRERO¹, Kelly Patricia SANDOVAL RINCÓN¹, Daniel VÁZQUEZ TARRÍO¹, Ana LUCÍA¹ y María Ángeles PERUCHA ATIENZA¹

¹*Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid*

andres.diez@igme.es, kp.sandoval@igme.es, d.vazqueztarrio@igme.es,
a.lucia@igme.es, ma.perucha@igme.es

RESUMEN

La evaluación preliminar del riesgo de inundación en España, en sus dos primeros ciclos sexenales de desarrollo, se ha basado únicamente en información histórica-documental y sistemática-instrumental. Para incorporar a esta evaluación la variabilidad asociada al cambio climático se hace necesario superar los sesgos consustanciales a estas fuentes información, e integrar de forma complementaria o alternativa la información paleohidrológica. La base de datos de paleoinundaciones en España, PaleoRiada, con cerca de 300 registros de eventos pretéritos de inundación publicados, por su amplia distribución espacial, temporal y temática permite mejorar sustancialmente esta incorporación de la variabilidad del cambio climático. Además, la creación de un visor cartográfico, de libre acceso a través de Internet, permite su utilización por parte de los gestores y técnicos de administraciones públicas, instituciones académicas, centros de investigación y del ámbito de las empresas de consultoría privada. Como demostración de esta utilidad se presentan tres ejemplos de aplicación a la modificación, prolongación y delimitación de áreas de riesgo potencial significativo de inundaciones.

Palabras clave: paleoinundación, base de datos, PaleoRiada, riesgo, inundación, evaluación.

ABSTRACT

The preliminary assessment of flood risk in Spain was based solely on historical-documentary and systematic-instrumental information during the first two six-year of its implementation. To include the variability associated with climate change in this assessment, it is necessary to overcome the biases inherent in these sources of information. Taking into account palaeo-hydrological information provides a complementary or alternative way of doing this. The database of paleofloods in Spain, PaleoRiada, with nearly 300 published records of past flood events, allows us to substantially improve the incorporation of climate change variability due to its wide spatial, temporal and thematic distribution. Furthermore, the creation of a cartographic viewer, freely accessible via the Internet, allows it to be used by managers and

technicians from public administrations, academic institutions, research centres and private consultancy firms. Three examples of application to the modification, extension and delimitation of new areas of significant potential flood risk are presented to illustrate the potential of this database.

Key words: paleoflood, database, PaleoRiada, risk, flood, assessment.

1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

La Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación (EPRI) del primer y segundo ciclos de desarrollo de la Directiva europea relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación (2007/60/CE) siguió en las demarcaciones hidrográficas españolas, para la definición de las Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundaciones (ARPSIs), una metodología que sugería la recopilación de la información fácilmente disponible sobre: topografía y cartografía existente, geomorfología, información histórica, usos del suelo, red e infraestructuras hidráulicas, estudios de inundabilidad, cambio climático y planes especiales de protección civil (Sánchez et al., 2011).

La información histórica en los dos anteriores ciclos de EPRI se ha limitado a la recopilación de: datos del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH), consulta a la guardería fluvial, proyectos de obras y actuaciones de emergencia tras inundaciones, informes sobre eventos extremos y catastróficos, aforos de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) y Anuarios de Aforos, Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIHs) y otras redes instrumentales. A partir del análisis de esta información, fácilmente disponible, se pretendía la identificación de zonas aluviales y torrenciales, así como los principales episodios históricos, todo lo cual ayudase a la preselección de zonas de inundación potencial (ZIPs).

Sin embargo, el uso exclusivo de estas fuentes de información pretérita tiene una serie de limitaciones y sesgos cuando se trata de tener en consideración el cambio climático y global:

- Sesgo temporal: sólo considera eventos pretéritos de inundación de los últimos 2200 años (en el caso de las fuentes documentales históricas, desde la dominación romana) y con cierta fiabilidad de los últimos 100 años (con disponibilidad de aforos); por lo que obvia los cambios climáticos anteriores, de todo el Holoceno, donde se han sucedido periodos cálidos y secos (óptimo climático holoceno) y otros fríos y secos (boreal), donde la frecuencia y magnitud de las inundaciones era diferente a la actual.
- Sesgo espacial: sólo hay registro instrumental en cuencas y ríos monitorizados (con estaciones de aforo y además series largas) o registro documental con focos de producción de materiales impresos (únicamente villas y ciudades importantes con editoriales, imprentas y medios de comunicación).
- Sesgo documental: sólo hay registro de eventos en periodos con alta producción documental (último siglo y medio con la prensa diaria), mientras que en otros periodos no se conserva por escasa producción (periodo visigodo o islámico) o por haber sido destruida (guerras).

- Sesgo de percepción: el registro y relevancia de las inundaciones históricas es variable según comunidades humanas (rurales vs urbanas) y en función de los periodos históricos.
- Sesgo de magnitud: sólo se registran inundaciones históricas de magnitudes intermedias; ni se registran las catastróficas (fuera de rango de las estaciones de aforo y que generan reacción en el registro documental) ni las ordinarias (que apenas producen daños e inundación).

Por ello, la delimitación en la EPRI de las ZIPs usando únicamente información histórica documental puede conducir a una visión parcial y distorsionada de las verdaderas zonas de inundación potencial, sobre todo en condiciones de clima cambiante.

2. OBJETIVO: LAS PALEOINUNDACIONES COMO REGISTRO COMPLEMENTARIO Y ALTERNATIVO

Para paliar esos sesgos, especialmente el sesgo temporal (ampliando el rango hasta miles o decenas de miles de años, en los valores de periodos de retorno del reglamento de seguridad de presas) y espacial (para que cualquier sector del territorio, aforado o no, tenga registro de inundaciones pretéritas) hay que buscar otras fuentes de información que complementen o incluso sean una alternativa a las inundaciones históricas documentales e instrumentales.

Estas fuentes de información novedosas sobre inundaciones pretéritas, que sí que contemplan rangos temporales en los que se han registrado varios cambios climáticos (algunos análogos al calentamiento actual), hay que buscarlas en evidencias empíricas, reconocibles en la Naturaleza, de esos eventos de inundación pasados.

Las paleoinundaciones son eventos de inundación pretéritos (desde hace miles de años a la actualidad) cuya ocurrencia queda registrada en los elementos naturales de la gea (las rocas y sus relieves), la hidrosfera (el agua líquida, nieve o hielo) o la biota (seres vivos).

A partir del estudio de estos efectos naturales de las inundaciones pretéritas surgen los distintos tipos de registros de paleoinundación: geológico-geomorfológicos (sedimentos, marcas y formas), hidrológico-glaciológicos (nieve o hielo) y biológicos-botánicos (árboles y líquenes) (Fig.1; Díez Herrero et al., 2008).

Estos registros aumentan el rango temporal de la información sobre las inundaciones pretéritas en siglos, milenios e incluso decenas de milenios antes del presente; y permiten obtener información de la frecuencia y magnitud de inundaciones del pasado en lugares sin fuentes documentales ni cuencas aforadas. Así lo han entendido en los Estados Unidos de Norteamérica, donde es preceptivo su consulta y uso (Harden et al., 2021).

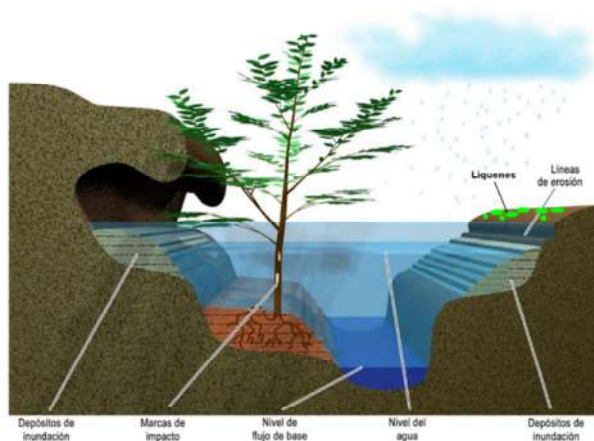


Fig. 1. Tipos de registros de paleoinundaciones (Díez Herrero et al., 2008)

3. METODOLOGÍA: EL REGISTRO DE PALEOINUNDACIONES PUBLICADO EN ESPAÑA

En España se han hecho estudios de paleoinundaciones registradas en elementos naturales desde hace décadas y, de hecho, en la década 1996-2005 se elaboraron dos bases de datos de registros de paleoinundaciones para la cuenca del Tajo (PaleoTagus) y para las cuencas internas de Cataluña (SPHERE-GIS).

Pero en las últimas tres décadas la investigación científica y desarrollo técnico en España han sido de tal magnitud (Jiménez Álvarez, 2021), que varios equipos de centros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), fundamentalmente del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN), Instituto Geológico y Minero de España (IGME) e Instituto de Geociencias (IGEO), y varias universidades españolas (UCM, UCLM, UAM, UJ...) y extranjeras (UBern), han publicado más de 126 textos científicos y técnicos: 117 artículos de revistas (sobre todo internacionales en inglés), 5 capítulos de libros y 4 informes técnicos.

3.1. PaleoRiada: la base de datos georreferenciada de paleoinundaciones publicadas en España

La Dirección General del Agua (DGA, MITERD), conocedora de la existencia de esta importante fuente de información útil para los organismos de cuenca durante la revisión del tercer ciclo de la EPRI, pero difícilmente accesible por encontrarse en publicaciones muy especializadas, en inglés y no fácilmente comprensible salvo para los expertos, encargó al Instituto Geológico y Minero (IGME, CSIC) que, en colaboración con el MNCN (a través de la Subvención de la DGA al CSIC para investigación), buscara todas esas publicaciones sobre paleoinundaciones en España, extrajera la información de interés técnico y elaborase una base de datos georreferenciada de utilidad para la comunidad técnica de gestores del agua (organismos de cuenca, empresas consultoras, autoridades de protección civil, etc.).

PaleoRiada (Diez Herrero, 2021; Diez Herrero et al., 2023; Sandoval Rincón et al., 2023) ha sido diseñada partiendo de un modelo conceptual que comprende tres grupos de entidades que describen las fuentes de información y características temáticas y espaciales de los registros de paleoinundaciones. Estos tres grupos son: (i) Entidades relacionadas de Datos Básicos (BDE); (ii) Entidades relacionadas Geoespaciales (GSE); y (iii) Entidades relacionadas con información Hidrológica (HIE).

PaleoRiada se estructura como una base de datos relacional compuesta de seis tablas, que contienen 40 variables de cada registro:

- Campos básicos del registro (2): Identificación numérica del registro; Nombre abreviado del registro.
- Campos de ubicación espacial de la evidencia (9): Comunidad o ciudad autónoma; Provincia; Municipio; Población o entidad menor; Demarcación hidrográfica; Masa de agua; Código Decimal de Ríos; Área de la cuenca de drenaje (km²) de la corriente fluvial o lago hasta el lugar de la evidencia; Otros datos de la ubicación espacial.
- Campos de caracterización tipológica de la evidencia (4): Tipología de la evidencia paleohidrológica (geológica, hídrica o biológica); Subtipo de la evidencia paleohidrológica (sedimentológica fluvial, sedimentológica lacustre, espeleotema, dendrogeomorfológica, liquenométrica, agua, nieve, hielo... Otro); Sub-subtipo de la evidencia paleohidrológica (depósitos de remanso, descortezado, láminas varvadas, liberación de anchura de anillos... Otro); Otros datos de la tipología de la evidencia.
- Campos de ubicación temporal de la evidencia (8): Tipo de edad (exacta, mínima, máxima, intervalo); Fecha calendario o edad en años antes del presente (BP, referido a 1950); Tipo de calendario de edad (AD, AC, BP), Límite superior del rango de edad, en fecha calendario o en años antes del presente (BP, referido a 1950); Límite inferior del rango de edad, en fecha calendario o en años antes del presente (BP, referido a 1950); Método de datación (arqueológico, documental, radiocarbono, luminiscencia, cosmogénicos, dendrocronológico...); Incertidumbre de la datación; Otros datos de la ubicación temporal de la evidencia.
- Campos de interpretación hidrológica-hidráulica de la evidencia (13): Altitud absoluta del paleonivel alcanzado por la lámina de agua (m s.n.m.); Profundidad o calado de la lámina de agua (m); Velocidad alcanzada por el flujo (m/s); Tipo de dato de caudal: exacto, mínimo, máximo, intervalo; Caudal estimado (m³/s); Límite superior del rango de caudales (m³/s); Límite inferior del rango de caudales (m³/s); Método de estimación del caudal (ecuación de Manning, modelización hidráulica 1D, modelización hidráulica 2D...); Incertidumbre de la estimación del caudal; Tipología del flujo (aguas claras, flujo de derrubios, hiperconcentrado, sin definir), Tipología de la inundación (crecida, avenida súbita), Precipitación umbral (mm en un día), Otros datos de la interpretación hidrológica.
- Campos de información publicada de la evidencia (4): Listado de referencias bibliográficas de trabajos publicados sobre la evidencia; Autor/es de los trabajos y filiación actualizada de los mismos; Año de la primera publicación sobre la evidencia; Otros datos de la publicación de la evidencia.

Está conectada con dos capas vectoriales de polígonos y puntos en formato *shapefile* (ArcGIS ESRI) que permite tanto representarla en un visor espacial web como hacer búsquedas temáticas como espaciales.

3.2. Los registros de PaleoRiada en la actualidad

En la actualidad (a fecha de octubre de 2024) la base de datos PaleoRiada tiene implementado un total de 299 registros de paleoinundaciones publicados sobre el territorio español, que se distribuyen espacio-temporalmente y temáticamente según ha sido analizado por Sandoval Rincón et al. (2023; Figs. 2).

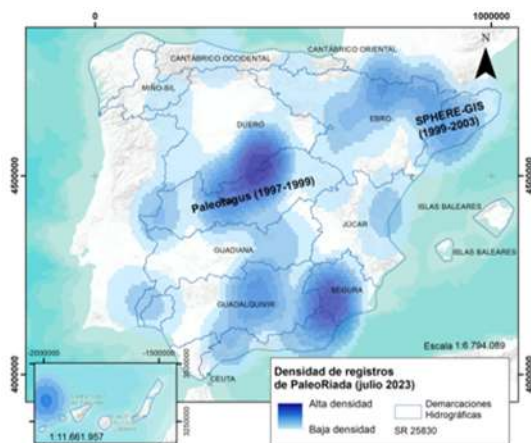


Fig 2. Distribución espacial de la densidad de los registros en la base de datos PaleoRiada (Sandoval Rincón et al., 2023).

3.3. El visor cartográfico de PaleoRiada

Para facilitar la consulta y uso de la base de datos georreferenciada, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC) ha puesto a disposición de los organismos de cuenca y empresas consultoras un visor cartográfico soportado en la aplicación ArcGIS online, que permite la consulta y análisis de la información de todas las tablas y registros simplemente con una conexión a Internet, sin necesidad de disponer de licencia de dicha aplicación. Además, su uso con menús de capas y persianas desplegadas de los registros (Fig. 3) es muy intuitivo y común a cualquier otro visor cartográfico, como el del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

Para ello basta con poner en el navegador la siguiente dirección URL:

<https://sgaicmic.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=047e3ddb46354f5785e59ff06c2cd5eb>

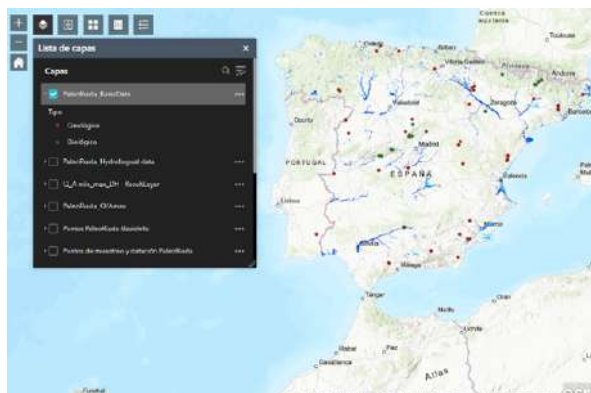


Fig. 3. Ejemplo de la visualización de la base de datos Paleoriada aplicación ArcGIS online.

Igualmente se ha creado una página web-blog en la que se actualizarán las novedades de nuevos registros, funcionalidades de la base de datos o publicaciones divulgativas de su uso y aplicación: www.inundacion.es/paleoriada/

4. RESULTADOS: APLICACIÓN DE PALEORIADA A LA REVISIÓN DE LA EPRI EN EL 3º CICLO

Sin ánimo de interferir en el proceso de revisión y actualización de la EPRI del tercer ciclo, que corresponde únicamente a los organismos de cuenca (y sus empresas adjudicatarias y asesoras), pero sí de ayudar a interpretar cómo la información de la base de datos Paleoriada puede ser útil en la redefinición de las ZIPs y con ello de las ARPSIs, se exponen a continuación tres sencillos ejemplos de consulta de la base de datos en relación con las ARPSIs previamente delimitadas en el primer y segundo ciclo:

4.1. Modificación de una ZIP-ARPSI por existencia de datos de paleoinundaciones

En la demarcación hidrográfica del Guadalquivir, en el río Verde o Guadix a su paso por la localidad de Guadix (Granada), se encuentra una ARPSI delimitada por criterios históricos de la inundación de 1973 (puesto que no hay datos de aforo ni datos documentales anteriores). Tras consultar la base de datos Paleoriada se puede apreciar que, a unos centenares de metros en la orilla izquierda de la ARPSI, hay dos registros de paleoinundaciones (Díez-Herrero et al., 2024): una de edad romana (siglo I d.C.) y otra de edad almohade (siglo XII d.C.), dos periodos cálidos análogos al calentamiento actual. Ambos registros quedan en la cartografía actual fuera de la zona inundable con periodo de retorno de 500 años del río Verde o Guadix, porque en realidad esos eventos fueron producidos por un afluente de éste, la rambla de Almorojo o San Miguel, en la que se propone que se modifique la ARPSI, de igual manera que se han cartografiado otras ramblas afluentes próximas.

4.2. Prolongación de una ZIP-ARPSI por existencia de datos de paleoinundaciones

En la demarcación hidrográfica del Duero, en el río Eresma a su paso por la ciudad de Segovia, se encuentra una ARPSI delimitada por criterios históricos de inundaciones de edificios monumentales (Real Casa de Moneda de Segovia) y otros edificios residenciales en los barrios de San Lorenzo y San Marcos. Tras consultar la base de datos PaleoRiada se puede apreciar que unos centenares de metros aguas abajo del límite inferior del tramo ARPSI se encuentran dos registros de paleoinundaciones pleistocenas (con edades de cerca 40.000 años), correspondientes a periodos interglaciales y con caudales que cuadruplican los máximos caudales registrados en los aforos; además de que se encuentra un azud histórico y un edificio declarado BIC (Molino de los Señores), que aconsejan la prolongación aguas abajo de la ARPSI, incorporando esta información hidrológica y así incorporar los cambios climáticos del Pleistoceno superior-Holoceno.

4.3. Delimitación de una nueva ZIP-ARPSI por la existencia de datos de paleoinundaciones

En la demarcación hidrográfica del Tajo, en el arroyo Cabrera, afluente torrencial del río Alberche por su margen derecha en la cola del embalse del Burguillo (Navaluenga, Ávila), dentro del paraje de Venero Claro se encuentran numerosos registros de paleoinundaciones en un tramo que tiene informaciones torrenciales pretéritas, algunas de las cuales afectaron a instalaciones ganaderas y una colonia infantil de veraneo con numerosos elementos expuestos y vulnerables. Se propondría delimitar una nueva ARPSI para este tramo del arroyo hasta su desembocadura al río Alberche.

5. DISCUSIÓN: INCLUSIÓN DE PALEORIADA EN LA REVISIÓN DE LA EPRI DEL TERCER CICLO (2024) DE LAS DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS

De acuerdo con la Directiva 2007/60/CE, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación; y con el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de riesgos de inundación, la Evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) se elaboró por primera vez en 2011, debiendo revisarse por primera vez en 2018 y, posteriormente, cada 6 años. Por lo tanto, la revisión de la EPRI para el tercer ciclo de implantación de la Directiva de Inundaciones debía realizarse en el año 2024.

Según Anuncio de la Dirección General del Agua, de fecha 2 de septiembre de 2024, se inició el periodo de consulta pública de la revisión y actualización de la evaluación preliminar del riesgo de inundación de las demarcaciones hidrográficas intercomunitarias. El periodo de consulta pública finalizó el día 2 de diciembre de 2024. Toda la documentación se encuentra en la web: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/evaluacion-preliminar-riesgos-inundacion/revision-epri-2024.html>

La mayor parte de las Memorias de revisión de las EPRI de las demarcaciones hidrográficas, sobre todo las intercomunitarias (pero también las intracomunitarias, como Galicia Costa), han incluido como mejora en la delimitación de las ARPSIs la

consulta y análisis de la base de datos PaleoRiada. Incluso alguna de las demarcaciones, como las cuencas del Tajo, Cantábrico Occidental o el Guadalquivir, hacen una recopilación pormenorizada de los registros de PaleoRiada en su demarcación (77, 5 y 5, respectivamente), analizando en detalle si son suficiente criterio para prolongar, ampliar o crear nuevas ARPSIs.

6. CONCLUSIÓN

La inclusión de información paleohidrológica de la base de datos PaleoRiada en el proceso de la evaluación preliminar del riesgo de inundaciones a partir del tercer ciclo permitirá una mejora en la incorporación de la variabilidad asociada al cambio climático. Por ello, las diferentes demarcaciones hidrográficas españolas lo han incluido en sus memorias de evaluación preliminar y esperamos que sea de utilidad en la generación de los estudios y cartografías de peligrosidad y riesgo de inundación en España.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está financiada por las subvenciones 2022-2023 y 2023-2026 firmadas entre la DGA-MITERD y el CSIC, en la que se incluyen las actuaciones 20223TE003 y 20233TE012 (proyecto Tarquín del IGME-CSIC). La participación de una de las autoras ha sido posible gracias a la concesión de la ayuda para la contratación de personal investigador predoctoral en formación PIPF-2022/ECO-24879, financiada por la Comunidad de Madrid. Los autores desean agradecer al resto de los miembros del proyecto Tarquín y a los colaboradores de PaleoRiada, su apoyo y ayuda en el desarrollo de la base de datos.

REFERENCIAS

- Díez Herrero, A. (2021). La dendrogeomorfología como fuente de datos de la frecuencia y magnitud de caudales históricos. En: A. Jiménez Álvarez (Coord.), Paleocreencias y avenidas históricas y su aplicación a la seguridad hidrológica de las presas, *Monografías CEDEX*, M-143 (Capítulo 3, pp. 65-96). Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Servicio de Publicaciones, 224 pp.
- Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Madrid: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Riesgos Geológicos/Geotecnia nº 1, 190 págs.
- Díez Herrero, A., Sandoval Rincón, K.P., López Vinielles, J., Cervel De Arcos, S., Hernández Manchado, J.R., Benito Ferrández, G., Ballesteros Cánovas, J.A., Mateos Ruiz, R.M. (2023). PaleoRiada: la base de datos georreferenciada de las paleoinundaciones en España, para la gestión del espacio fluvial. IV Congreso Ibérico de Restauración Fluvial (RestauraRíos 2023), Toledo 20 a 23 de junio de 2023. Presentación modalidad póster, P3-01. Libro de resúmenes, p. 232.

- Díez-Herrero, A.; Mateos, R.M.; Vázquez-Tarrío, D.; López-Marcos, A.; Brao-González, F.J. (2024). One catastrophic flood every millennium: Synchronicity of extreme floods and global warm periods in the multi-archive record of the Roman theatre of Guadix (Granada, SE Spain). *Global and Planetary Change*, 233 (2024) 104363, 18 pp. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104363>
- Harden, T.M., Ryberg, K.R., O'Connor, J.E., Friedman, J.M., and Kiang, J.E. (2021). *Historical and paleoflood analyses for probabilistic flood-hazard assessments—Approaches and review guidelines*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap. B6, 91 p., <https://doi.org/10.3133/tm4B6>.
- Jiménez Álvarez, A. (Coord.; 2021). *Paleocreencias y avenidas históricas y su aplicación a la seguridad hidrológica de las presas*. Monografías CEDEX, M-143, Madrid, 224 pp.
- Sánchez, F.J. y Lastra, J. (Coords.).(2011). Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 349 pp.
- Sandoval, K.P., Díez Herrero, A., López Vinielles, J., Mateos, R.M., Benito, G., Ballesteros-Cánovas, J.A., Cervel, S., Hernández Manchado, R. (2023). Análisis preliminar tipológico, temporal y espacial de los registros publicados sobre paleoinundaciones en España. En: G. Desir, E. Nadal y D. Regües (Eds.). Libro actas de la XVI Reunión Nacional de Geomorfología, Sociedad Española de Geomorfología, pp. 60-61.

GESTIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS: RETOS EN LOS PAÍSES MENOS DESARROLLADOS

José Antonio GUIJARRO PASTOR

Retirado de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Palma de Mallorca.

Miembro del Expert Team on Data Development and Stewardship de la

Organización Meteorológica Mundial (OMM)

jaguijarro21@gmail.com

RESUMEN

Las observaciones meteorológicas alimentan las bases de datos climáticas, básicas para el estudio del clima y su variabilidad. Sin embargo la gestión de estos datos es muy heterogénea entre los diferentes países. Este artículo presenta la problemática existente en los servicios meteorológico-hidrológicos nacionales (SMHN) de los países menos desarrollados y los proyectos en marcha para, mediante mejoras en dicha gestión, sentar las bases para aumentar el conocimiento del clima local, regional y global.

Palabras clave: control de calidad, relleno de lagunas, homogeneización, sistemas de gestión de datos climáticos.

ABSTRACT

Meteorological observations feed the climatic databases, which are essential for studying the climate and its variability. However, the management of these data varies widely across countries. This article presents the problems existing in the national meteorological-hydrological services of less developed countries and the projects underway to, through improvements in such management, lay the foundations for increasing the knowledge of the local, regional and global climate.

Key words: quality control, gap filling, homogenization, climate data management systems.

1. INTRODUCCIÓN

Los datos observacionales son básicos para el estudio del clima local o regional y su variabilidad, así como para la calibración de los modelos usados para generar proyecciones del clima futuro, piezas clave para una adecuada provisión de servicios climáticos. Pero los países menos desarrollados afrontan graves dificultades para la gestión de sus propios datos, tanto en tareas de preservación y digitalización de observaciones en soporte papel como en la utilización y mantenimiento de sistemas informatizados que permitan la integración de nuevas observaciones en una base de datos, su control de calidad, la homogeneización de sus series y la generación de productos para los distintos sectores económicos y para el público en general.

En los siguientes apartados pasaremos revista a estas necesidades y al apoyo brindado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y muchos de sus países miembros, entre los que cabe citar a España, representada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), organizadora y participante (junto con otras entidades colaboradoras) en cursos de capacitación en diversos aspectos de gestión de datos y generación de escenarios climáticos.

2. RECUPERACIÓN DE DATOS EN RIESGO DE DESAPARICIÓN

Muchos servicios meteorológico-hidrológicos nacionales (SMHN) de países menos desarrollados tienen una parte de sus datos (los de las décadas más recientes) digitalizados, pero los más antiguos todavía se encuentran únicamente en soporte de papel, frecuentemente en condiciones precarias que hacen temer por su supervivencia. La figura 1 presenta imágenes de archivos con diferente grado de organización.



Fig. 1: Ejemplos de archivos de datos climáticos conservados en papel. Fuente: WMO (2016): INDARE (Indian Ocean Data Rescue Initiative). Summary Report. Arusha, United Republic Of Tanzania, 9-14 November 2015.

La OMM ofrece un conjunto de directrices para desarrollar proyectos de recuperación de datos en papel (WMO, 2016), tareas también denominadas de rescate de datos (*data rescue* en inglés, con DARE como acrónimo). Estas tareas se resumen en cuatro apartados:

1. Archivar adecuadamente los documentos para su preservación, inventariando las existencias de los diferentes tipos de formatos y las variables que contienen.
2. Tomar imágenes de los documentos, mediante cámara fotográfica o escáner, aunque éste resulta más lento y puede no ser apto para los formatos de mayores dimensiones. Si se usa una cámara, lo ideal es que pueda transferir las imágenes a un ordenador automáticamente. En todo caso, es necesario verificar que la calidad de las imágenes permitirá la lectura de los datos, y habrá que renombrar los ficheros con un patrón preestablecido que identifique el observatorio, mes y año de los datos y las variables que contiene.
3. Digitalizar los datos contenidos en las imágenes a partir de estas. De este modo se evita una excesiva manipulación de los documentos originales que pondría en riesgo su conservación. Además, las imágenes se pueden distribuir para ser digitalizadas por grupos de personas diferentes, posiblemente dentro de proyectos de ciencia ciudadana o mediante convenios con centros de enseñanza que podrían ofrecerlas como trabajos de fin de curso. (El servicio meteorológico de Irlanda ha tenido experiencias muy exitosas en este sentido).
4. Tras un primer control de calidad, incorporar los datos al sistema de gestión correspondiente, sin olvidar su adecuado mantenimiento (copias de seguridad, adecuación a los cambios tecnológicos, etc).

La coordinación internacional de los proyectos de recuperación de datos climáticos se realiza conjuntamente por la OMM y Copernicus con la colaboración de otras entidades (IEDRO, ACRE, etc). Los diferentes proyectos pueden visualizarse en el portal <https://datarescue.climate.copernicus.eu/>.

En España están digitalizados los datos mensuales y la mayor parte de los diarios, pero todavía quedan series diarias antiguas sin digitalizar, como por ejemplo las primeras décadas de los observatorios de Palma de Mallorca (desde 1862) y Mahón (desde 1863). Sobre estos últimos había incluso incertidumbre sobre su localización, pero se hallan en el Institut Menorquí d'Estudis (IME) y en el Ateneu de Maó. Con una beca del IME se abordó su digitalización, pero únicamente de las precipitaciones (Carreras, 2009), y se hizo directamente desde los documentos originales. Si se hubieran tomado imágenes sería mucho más sencillo digitalizar también las temperaturas. Además, al comparar las sumas mensuales de los datos digitalizados con los valores existentes en la Base Nacional de Datos Climatológicos de AEMET, se observaron algunas discrepancias que no es posible investigar sin volver a examinar las fuentes. La más notoria de ellas es la de noviembre de 1906, cuyo dato mensual, obtenido de los anuarios del Observatorio Central Meteorológico, indica un total de 336 mm, mientras que la suma de los datos diarios digitalizados por Carreras arroja un valor de 33,6 mm, de lo que se deduce que no se reparó en la coma decimal al publicar el dato en el anuario (Guijarro et al., 2017).

Por tanto son necesarias más acciones para completar la digitalización de los datos diarios más antiguos. No contar con el equipamiento óptimo no es excusa: con la cámara de un móvil y un simple ordenador se puede llevar a cabo. La principal

dificultad reside en lo laborioso de la tarea, de ahí la conveniencia de recurrir a iniciativas como las de ciencia ciudadana comentada anteriormente.

3. GESTIÓN DE LOS DATOS CLIMÁTICOS

Lamentablemente, muchos SMHN de los países menos desarrollados que tienen una parte de sus datos ya digitalizados no cuentan con una base de datos operativa, con lo que su información climatológica muchas veces reside en hojas de cálculo tipo Excel. Estas hojas pueden estar muy elaboradas, conteniendo los logotipos de la institución, tablas (a veces coloreadas), e incluso gráficos resumiendo los datos. Esto permite atender las consultas de los valores de diversos parámetros climáticos en meses y años concretos, pero es evidente que obtener series diarias o mensuales de 30 o más años de alguna de las variables de interés supone tener que extraer los datos de un enorme número de ficheros, cuando esta tarea resultaría trivial de contar con un adecuado Sistema de Gestión de Datos Climáticos (SGDC. *Climate Data Management System -CDMS-* en inglés).

La falta de estos sistemas supone no poder desarrollar adecuadamente servicios climáticos y cumplir los compromisos de intercambio de datos. Como ejemplo, en 1935 se acordó en el seno de la Organización Meteorológica Internacional (antecedente de la OMM) la conveniencia de intercambiar datos mensuales de los principales observatorios, para lo que se diseñó el mensaje CLIMAT, que cada país debe transmitir mensualmente al Sistema Mundial de Telecomunicación de la OMM. Sin embargo, en el periodo 2007-2016, más de un 50% de los mensajes de los SMHN menos desarrollados no se recibieron o contenían errores (figura 2).

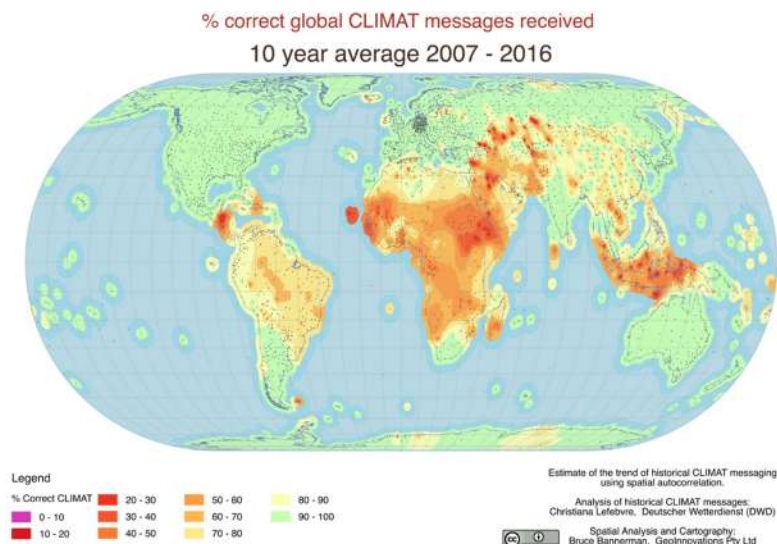


Fig. 2:

Porcentaje de mensajes CLIMAT recibidos correctamente en el periodo 2007-2016.
Fuente: Stuber (2023), *Climate Data Management Systems (CDMS)*, Presentación para un taller de intercambio de datos.

3.1. Sistemas de Gestión de Datos Climáticos

Mientras que los países más avanzados han desarrollado sus propios SGDC, otros han implementado sistemas ya disponibles. En la figura 3 vemos la distribución geográfica de los siete SGDC más utilizados, de los que cerca de la mitad de los instalados corresponden a los tres SGDC de código abierto (CLIDE, CLIMSOFT y MCH).

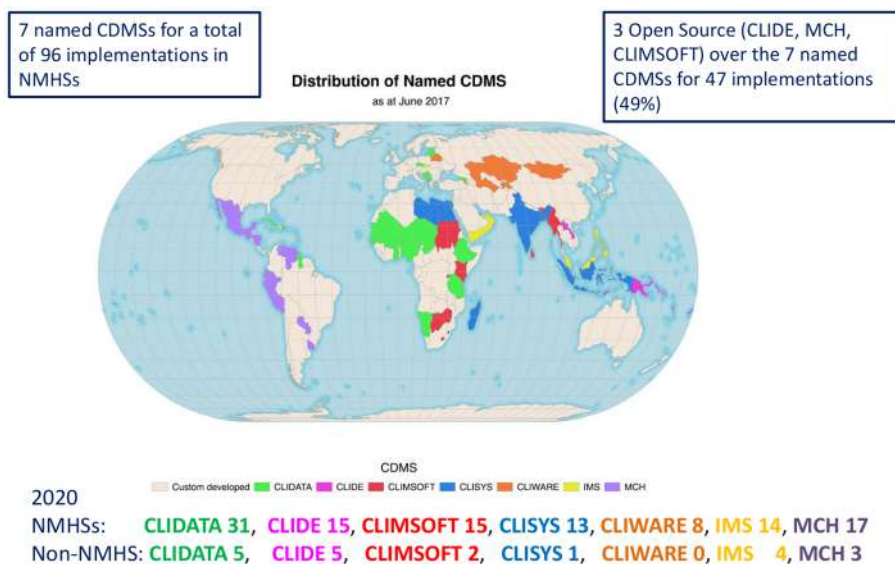


Fig. 3: Distribución geográfica de los siete SGDC más utilizados en países sin sistema propio. Fuente: Stuber (2023), *Climate Data Management Systems (CDMS), Presentación para un taller de intercambio de datos.*

La OMM presta apoyo para la instalación de algunos de estos SGDC y capacitación sobre su uso, pero contribuir a su desarrollo para añadirles funcionalidades supone una multiplicidad de recursos que no resulta sostenible. Debido a eso, la OMM ha iniciado el proyecto OpenCDMS para construir un SGDC de código abierto que cumpla con los requerimientos definidos en la publicación WMO-No. 1103 (WMO, 2014), de modo que en el futuro sea el único sistema al que prestar apoyo para los países que lo soliciten.

3.2. Requerimientos de los CDMS

La citada publicación WMO-No. 1103 establece tres niveles para las especificaciones que debería cumplir cualquier CDMS: requeridos, aconsejables y opcionales. Sintetizando al máximo, estos requisitos se pueden agrupar en:

1. Gobernanza de los datos: Políticas de acceso, trazabilidad, seguridad.
2. Gestión de los datos: Ingestión de datos y metadatos, monitorización de las redes de observación, controles de calidad.
3. Análisis de los datos: Análisis de series temporales, homogeneización, cálculo de variables derivadas e índices climáticos.

4. Presentación de los datos: interfaz gráfica de usuario, búsqueda y descarga de datos y metadatos, generación de mensajes para intercambio internacional, generación de tablas y gráficos (series, diagramas, mapas, etc).

5. Infraestructura: Hardware y sistema operativo, base de datos, redes informáticas, copias de seguridad.

3.3. Contribución de la aplicación informática *climatol*

Esta aplicación, programada en R y cuya versión 1 fue presentada en el IV congreso de la AEC (Guijarro, 2004), ha ido evolucionando a lo largo de estos 20 años, de modo que en su versión 4 (Guijarro, 2024a y 2024b) contiene funciones para facilitar varias de las tareas requeridas o recomendadas para la gestión de datos climáticos, a saber:

1. Nuevos controles de calidad iniciales permiten descartar valores claramente anómalos y series de valores repetidos que perjudicarían el proceso posterior de los datos (figura 4).

2. Homogeneización, relleno de lagunas (figura 5) y detección de datos espacialmente anómalos. (El relleno de datos ausentes se puede proyectar también hacia el futuro usando como referencia series de modelos climáticos).

3. Con las series homogeneizadas y rellenadas permite el cálculo de percentiles extremos, útiles para incorporar a los SGDC umbrales de control de calidad individualizados para cada observatorio y mes del año.

4. A los dos productos gráficos disponibles en las versiones anteriores (rosa de los vientos y climograma de Walthert y Lieth) se han añadido curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de la precipitación, tendencias móviles de periodos de diferente longitud, isopletas horas-meses y meteogramas (figura 6).

Al tratarse de una aplicación de código abierto, estas funciones se pueden incorporar a los SGDC que mantengan esa condición.

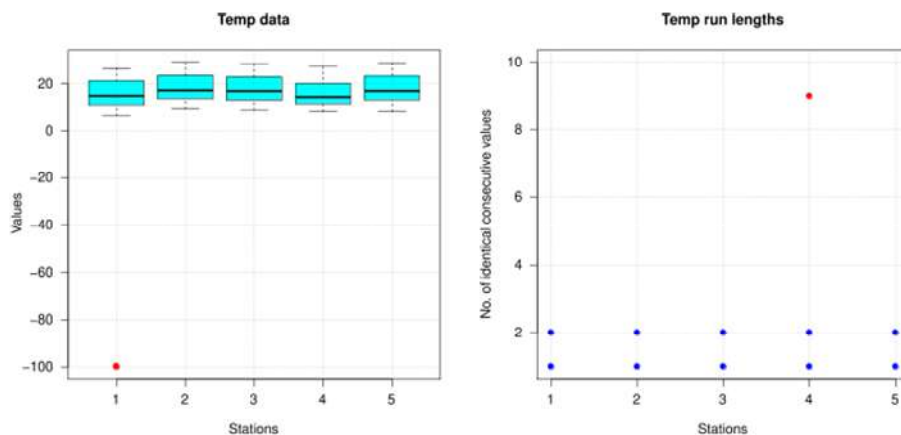


Fig. 4: Controles de calidad iniciales de *climatol* 4.x. Los datos claramente anómalos se eliminan automáticamente. Fuente: Guijarro (2024b).

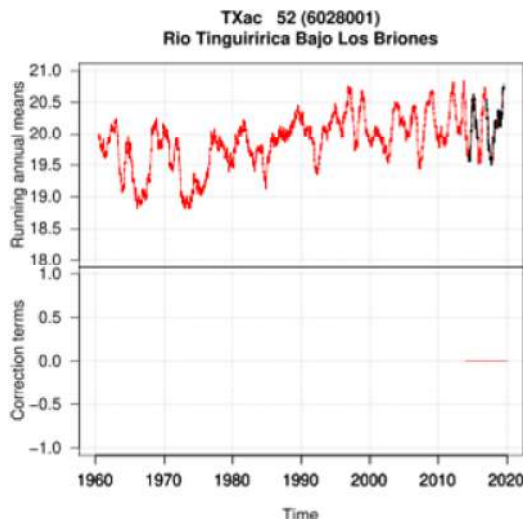


Fig. 5: Serie de temperatura máxima diaria rellena desde 2013 hacia atrás.
Fuente: Producción propia generada en un taller de servicios climáticos celebrado en Santiago de Chile colaborando con la Universidad de Tarragona.

4. CONCLUSIÓN

El apoyo a los SMHN menos desarrollados sigue siendo necesario, no solo para mejorar su funcionalidad a nivel nacional, sino también para aumentar el conocimiento del clima y su variabilidad a nivel global, básicos para la provisión de servicios climáticos.

REFERENCIAS

- Carreras, P. (2009). Sèrie de pluja de Maó del 1864 al 1932 gràcies a Joaquim Carreras i Maurici Hernández. *Actes d'Història de la Ciència i de la Tècnica*, 2:70-78, DOI: 10.2436/20.2006.01.93
- Guijarro, J.A. (2004). Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos. En García-Codron et al. (Eds.), *El clima, entre el Mar y la Montaña*, Asociación Española de Climatología, A-4:493-502.
- Guijarro, J.A. (2024a). Climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products). Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>
- Guijarro, J.A. (2024b). Guía de uso del paquete de R climatol (versión 4.1.1). <https://www.climatol.eu/climatol4.1.1-es.pdf> (recuperado el 15 de octubre de 2024).
- Guijarro, J.A., Jansà, A., Mora, M. y González, V.M. (2017). Data Rescue of two centennial Spanish series (Mahon and Oviedo). 11th EUMETNET Data Management Workshop (Zagreb, 18-20 de octubre).
- WMO (2014). *Climate Data Management System Specifications*. WMO-No. 1131, 166 pp, ISBN 978-92-63-11131-9
- WMO (2016). *Directrices sobre mejores prácticas para el rescate de datos climáticos*. WMO-No. 1182, 36 pp, ISBN 978-92-63-31182-5

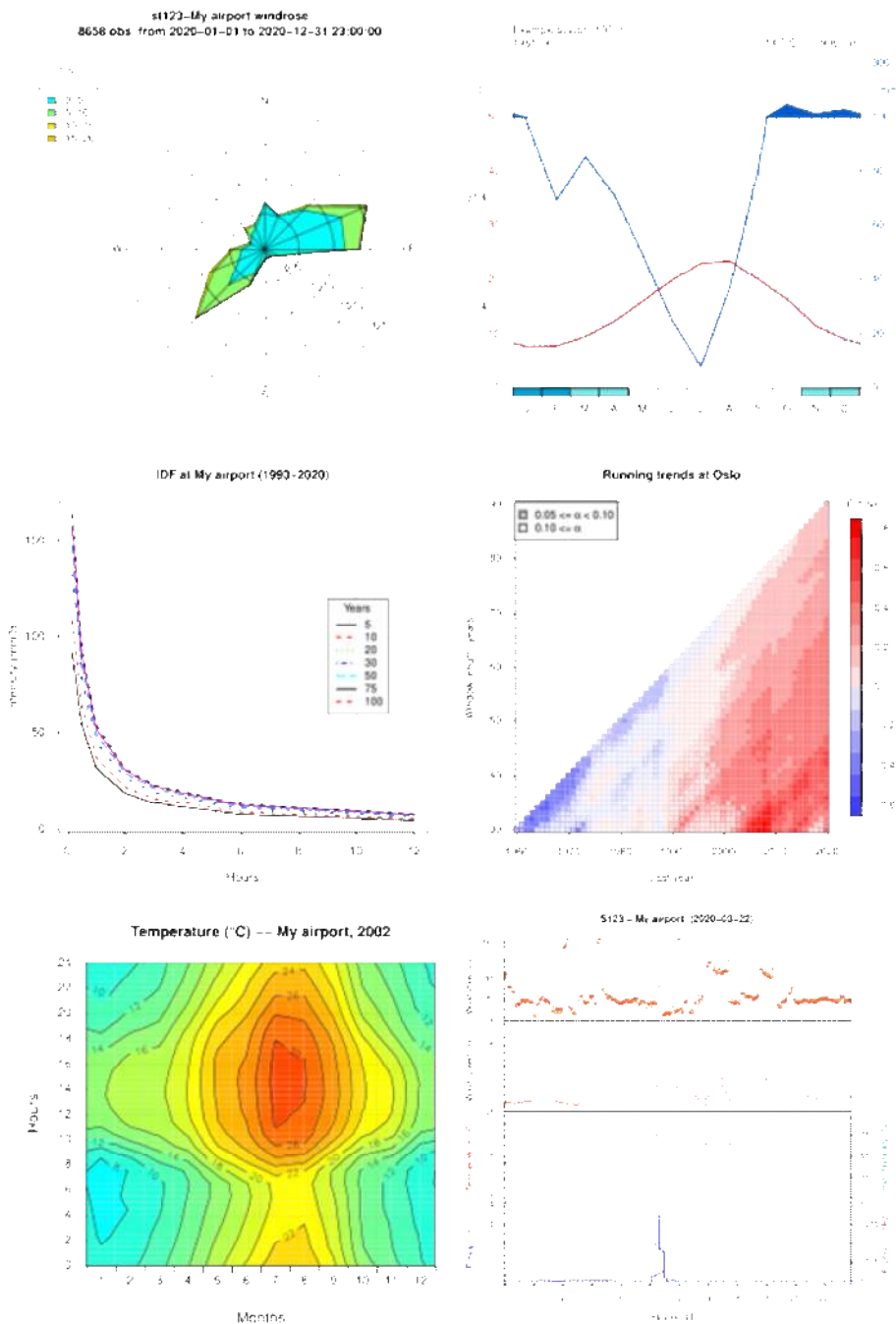


Fig. 6: Productos gráficos de climatol 4.x. Fuente: Guijarro (2024b).

INTERCOMPARISON OF GRIDDED PRODUCTS: A MULTI-DIMENSIONAL PERSPECTIVE

Sixto HERRERA GARCÍA¹, Fidel GONZÁLEZ ROUCO², Roberto SERRANO-NOTIVOLI³, Juan Luis GARRIDO⁴, Santiago BEGUERÍA⁵, José M. GUTIÉRREZ⁶, Pere QUINTANA-SEGUÍ⁷, Maialen ITURBIDE⁶, Esteban RODRÍGUEZ⁸ y Ana MORATA⁸

¹*Applied Mathematics and Computer Science Department, Universidad de Cantabria,*

²*Instituto de Geociencias (IGEO), Universidad Complutense de Madrid (UCM-CSIC),*

³*Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales (IUCA), Universidad de Zaragoza,*

⁴*División de Contaminación Atmosférica, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales Y Tecnológicas (CIEMAT),*

⁵*Estación Experimental de Aula Dei (EEAD), CSIC,*

⁶*Instituto de Física de Cantabria (IFCA), CSIC-Universidad de Cantabria.*

⁷*Observatori de l'Ebre (OE), Universitat Ramon Llull – CSIC.*

⁸*Spanish Meteorological Agency (AEMET).*

sixto.herrera@unican.es, fidelgr@ucm.es, roberto.serrano@unizar.es,
juanluis.garrido@ciemat.es, santiago.begueria@csic.es,
manuel.gutierrez@unican.es, pquintana@obsebre.es,
miturbide@ifca.unican.es, erodriguezg@aemet.es, amoratag@aemet.es

ABSTRACT

Observational uncertainty has become an increasingly significant concern in climate studies. In this context, mainland Spain has several publicly available daily gridded datasets of precipitation, which have been utilized in various regional and national studies. Recent research, like the latest CLIVAR-Spain report, underscores the need for thorough intercomparison among these datasets, highlighting their respective strengths and limitations while discussing findings in light of existing observational uncertainties.

This study seeks to address this issue by performing a comprehensive analysis of 10 gridded datasets of daily precipitation currently available for mainland Spain. It is the first study to conduct an extensive comparison across these datasets, focusing on multiple dimensions: statistical distribution, extreme events and spells.

Our findings indicate that national datasets are more similar to each other than to global or European-wide datasets. While mean values primarily differ in intensity, these differences extend to spatial patterns when extremes or spells are considered, thereby expanding or reducing the affected regions. These variations remain mostly consistent with altitude, with most datasets exhibiting similar behavior, except for E-OBS v27e, EMO-1arcmin, and ERA-Land.

Key words: Interpolation, intercomparison, precipitation, maximum and minimum temperatures, Iberian Peninsula, mainland Spain

1. INTRODUCTION

In recent decades, the Spanish climate research community has made substantial efforts to develop historical datasets for essential meteorological variables, such as precipitation and temperature, across Spain, ensuring high spatial and temporal resolution. To achieve this, researchers have employed various methods, from interpolation-only techniques (SPREAD: Serrano-Notivoli et al., 2017; Iberia01: Herrera et al., 2019a; PTI-Clima: Beguería et al., 2025) to more sophisticated approaches that integrate observational data with outputs from numerical models, such as reanalyses or short-range weather forecasts (ROCIO-IBEB: Peral et al., 2017; SAFRAN and HUMID01: Quintana-Segui et al., 2017). Additionally, global datasets (ERA5-Land: Muñoz Sabater, 2019; CHELSA W5E5: Karger et al., 2023) and European datasets (E-OBS v27e: Cornes et al., 2018; regional reanalysis CERRA-SFC: El-Said et al., 2021; EMO-larcmin: Thiemig et al., 2020) also cover the region, providing useful complements to the national data.

This variety of datasets introduces a new source of uncertainty in analyzing current climate conditions (Burton et al., 2018; Lledó et al., 2024; Newman et al., 2019; Tanarhte et al., 2012) and in calibrating and evaluating climate change projections (Kotlarski et al., 2019; Herrera et al., 2020). Intercomparison studies are essential to assess these datasets, highlighting their differences, limitations, characteristics, and appropriate applications to ensure accurate interpretation of results (Newman et al., 2019).

While most of these products are publicly accessible, there has not yet been a comprehensive intercomparison study assessing their ability to represent various precipitation regimes across the Iberian Peninsula. Existing studies (Quintana-Seguí et al., 2017; Herrera et al., 2019a; Herrera et al., 2019b) have partially addressed intercomparison, usually focusing on describing new datasets rather than thoroughly comparing available products and evaluating the relevant characteristics of each dataset.

This study aims to address this gap and build upon the work by Herrera et al. (2024) on minimum and maximum temperatures, by focusing on precipitation and extreme precipitation events as well as maximum and minimum temperatures. Section 2 outlines the methods and datasets used, Section 3 presents the primary results, and Section 4 discusses the conclusions and implications.

2. METHODS

2.1. Datasets

Table 1 summarizes the main properties of the ten datasets analyzed in this study. These datasets represent three primary methodological approaches:

1. Observation-based interpolation (O), which uses statistical or geostatistical methods to interpolate observed data.
2. Analysis-type (A), which combines observations with numerical model outputs from reanalyses or short-range weather forecasts through optimal interpolation.

3. Reanalysis-based (R), which consists of direct outputs from global or regional reanalyses or calibrated reanalysis products.

Name	Spatial Res.	Temporal Res.	Referencia
SPREAD (O)	5 km	Daily (1950-2012)	Serrano-Notivoli et al. 2017
E-OBS v27e (O)	0.1°	Daily (1951-Present)	Cornes et al. 2018
Iberia01 (O)	0.1°	Daily (1971-2015)	Herrera et al. 2019 ^a
PTI-Clima (O)	0.025°	Daily (1961-2022)	Beguiría et al. 2025
HUMID01 (A)	0.05°	Hourly (1979-2017)	Quintana-Seguí et al. 2017
ROCIO-IBEB (A)	5 km	Daily (1951-2022)	Peral et al. 2017
ERA5-Land (R)	0.1°	Hourly (1950-Present)	Muñoz Sabater, 2019
CHELSA-W5E5 (R)	0.01°	Daily (1979-2016)	Karger et al. 2023
EMO-1arcmin (R)	1.5 km	Daily (1990-2022)	Thiemig et al. 2020
CERRA-SFC (R)	5.5 km	Hourly (1984-2021)	El-Said et al. 2021

Table 1: Gridded datasets considered over the mainland Spain and their main properties: name (approach), spatial resolution, temporal resolution and coverage, and Reference. Global and/or European wide datasets have been highlighted in bold. The datasets have been grouped according to the methods used to build them: observational interpolation (O), analysis-type (A) and reanalysis-based (R) products. Source: Herrera et al., 2024.

2.1.a. Data Availability

The SPREAD datasets are publicly accessible through the Digital.CSIC repository at <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/7393> (Serrano-Notivoli et al., 2016). E-OBS v27e is available through the Copernicus Climate Data Store (Cornes et al., 2020), and Iberia01 is distributed under the Open Database License here: <http://hdl.handle.net/10261/183071> (Herrera et al., 2019b). The ROCIO-IBEB dataset can be accessed via AEMET's data server at https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diaros?w=2. ROCIO-IBEB serves as a reference dataset in this study, as it is developed, maintained, and utilized by AEMET, Spain's official authority for meteorological information and services.

The EMO-1arcmin dataset, currently supported, is provided under a Creative Commons Attribution 4.0 International license and is accessible via the public repository at https://jeodpp.jrc.ec.europa.eu/ftp/jrc-opendata/CEMS-EFAS/meteorological_forcings/EMO-1arcmin/. ERA5-Land is also available through

the Copernicus Climate Data Store at <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land> (Hersbach et al., 2023), following Copernicus product terms. The CHELSA-W5E5 dataset is accessible through the ISIMIP server at <https://chelsa-climate.org/> under the CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication license. CERRA-SFC is available via the Copernicus Climate Data Store at <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-cerra-single-levels>, and this study uses the single-level subset, including both atmospheric and surface quantities. The precipitation forecast for CERRA-SFC was obtained at the analysis time of 00:00 with a 6-hour spin-up, calculating the difference between the 30-hour and 6-hour lead times.

While SAFRAN-Spain (Quintana-Segui et al., 2017) is publicly available for research purposes at <https://www.obsebre.es/en/en-safran>, the HUMID01 dataset has not yet been published, and the PTI-Clima dataset remains undisclosed to the public.

2.2. Data Homogenization

As can be seen in Table 1, each dataset has its own temporal and spatial resolution, including variations in map projections and temporal references. Therefore, all the datasets have been homogenized defining a common grid and time reference to enable effective comparative analysis.

Due to the different nature and temporal resolution of the nine datasets, the differences between them are not only on the spatial dimension but also on the temporal reference, so the common period of the 10 datasets has been considered: 1990-2012.

To ensure a fair comparison between the datasets, we established a common grid that none of the datasets had originally used. We opted for a coarser regular grid covering mainland Spain with a resolution of 0.25°. All datasets were then redefined to fit this grid using a conservative interpolation scheme (Zhuang et al., 2023).

Code	Description	Units	Dimension
pr _{clim}	Mean of daily values	mm	SD
pr _{4-6Nov}	Total precipitation amount in event 4-6 Nov 1997	mm	EE
lds	Average Maximum Length of Dry Spells	days	SS

Table 2: Indices considered for the validation of the different datasets. The reference considered has always been ROCIO-IBEB. The var code refers to the variable considered to obtain the index. SD: Statistical distribution; EE: Extreme events; SS: Spells. Source: Created by the authors for this contribution.

2.3. Intercomparison Parameters

Table 2 outlines the parameters considered, along with the dimensions evaluated for each. To assess the statistical significance of differences in mean values and distribution shapes, the t-test and the Kolmogorov-Smirnov test were used for comparing two samples. Additionally, the percentage of grid points with statistically

significant differences relative to the reference dataset, ROCIO-IBEB, was calculated at a 95% confidence level. For the Kolmogorov-Smirnov test, time series were centered to isolate distribution shape effects from mean differences, which are explicitly addressed by the t-test.

In order to analyze the extreme regime, an extreme precipitation event that occurred in the Iberian Peninsula in November 1997 has been used to evaluate how each dataset reproduces the intensity and spatial pattern, and better understand the uncertainties related to how different datasets can reproduce extreme events. In order to complete the evaluation, a index of spells (lds: average maximum length of dry spells) has been considered, defined as the average of the annual maximum length of consecutive dry days (precipitation ≥ 1 mm).

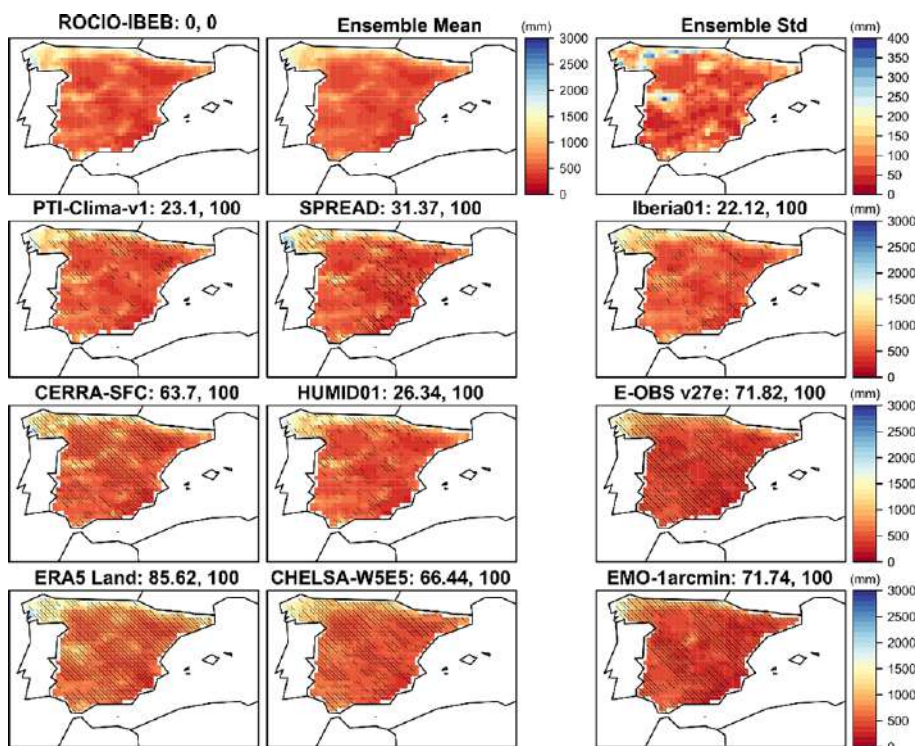


Figure 1. Climatology of annual precipitation for the period 1990-2012 (mm). Grid-points with statistically significant differences (95%) in the mean w.r.t. ROCIO-IBEB according to the t-test results have been hatched. The percentage of the grid-points is also shown for each dataset in the title. Source: Created by the authors for this contribution.

3. RESULTS

The intercomparison results among the datasets are presented below. In all figures, the first row of maps shows the parameter for the reference dataset (ROCIO-IBEB), along with the ensemble mean and standard deviation of the remaining nine datasets. The subsequent rows display the parameter for each of these nine datasets individually.

Figure 1 shows the mean annual precipitation and the percentage of grid cells with statistically significant (95%) differences between both the means and the shapes of the distributions of each dataset compared to the reference, ROCIO-IBEB. Notably, while mean differences are minimal in some cases, higher-moment differences affect the entire domain, as indicated by the Kolmogorov-Smirnov test. Global and European datasets exhibit more substantial differences than the national datasets. Although all datasets show a common spatial pattern, with maximum precipitation in the northern regions and mountain ranges of the Iberian Peninsula, the main discrepancies lie in precipitation amounts, leading to substantial regional variability among datasets.

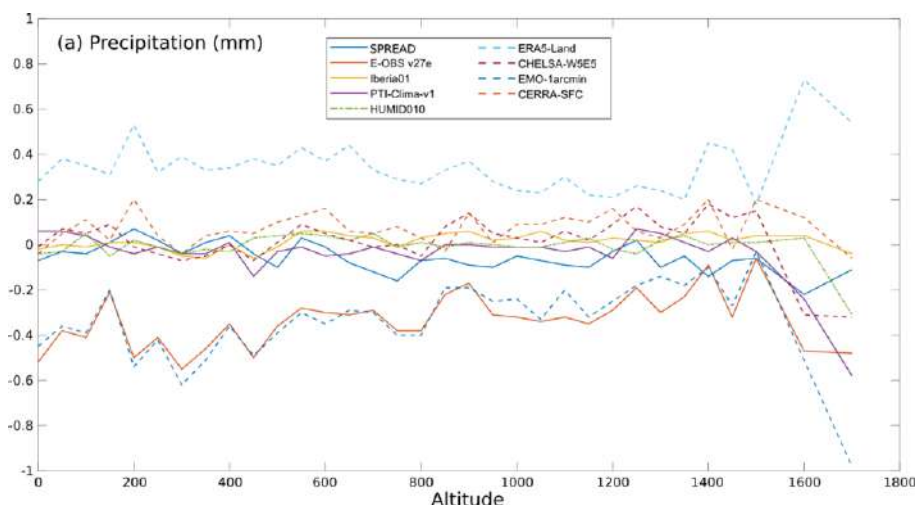


Figure 2: Mean spatial bias depending on the grid cell height for precipitation. All the bias have been obtained using ROCIO-IBEB as reference. Source: Created for this contribution.

When analyzing these differences by altitude (Figure 2), we observe that, although there are some fluctuations, the differences remain relatively stable up to the highest elevations, where they become more pronounced in one direction or another. Most datasets exhibit similar behavior, with the exceptions of E-OBS v27e and EMO-1arcmin, which tend to underestimate precipitation, and ERA-Land, which distinctly overestimates precipitation.

Figure 4 depicts an extreme precipitation event over the Iberian Peninsula in November 1997, characterized by a diagonal pattern of intense rainfall from the southwest to central Iberia, as well as high precipitation in the north, from Asturias to the Pyrenees. With the exception of E-OBS v27e, all interpolation and analysis-type datasets closely reproduce this spatial pattern and intensity. While E-OBS v27e captures part of the spatial pattern, it underestimates intensity due to its less dense observational network compared to other interpolated datasets. Among the reanalysis-based datasets, some pattern displacement results in a dipole effect, with areas of overestimation and underestimation across the peninsula. EMO-1arcmin shows high values in southwestern mainland Spain but mainly concentrated there, while ERA5-Land and CHELSA W5E5 both underestimate the event, capturing parts of the spatial pattern but not the full intensity.

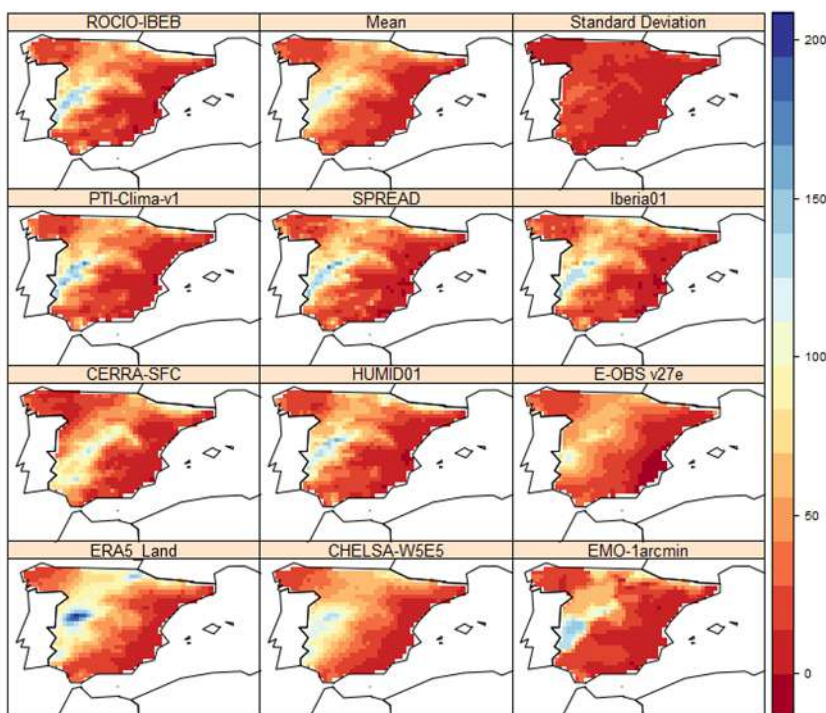


Figure 4. Extreme event of precipitation occurred between November 4th and 6th 1997 (mm). Source: Created by the authors for this contribution.

Figure 5 shows the index lds with the average maximum length of dry spells reflecting two groups of datasets based on their spatial pattern. On one hand, most of the datasets have an incremental gradient from northwest to south-southeast reaching the maximum value in Almeria and the Guadalquivir river basin, in the south-southeastern coast of the Iberian Peninsula. Other datasets (e.g. CERRA-SFC, ERA5

Land or E-OBS v27e) present a more homogeneous pattern with lower values than the rest and/or with a more continuous pattern on the south.

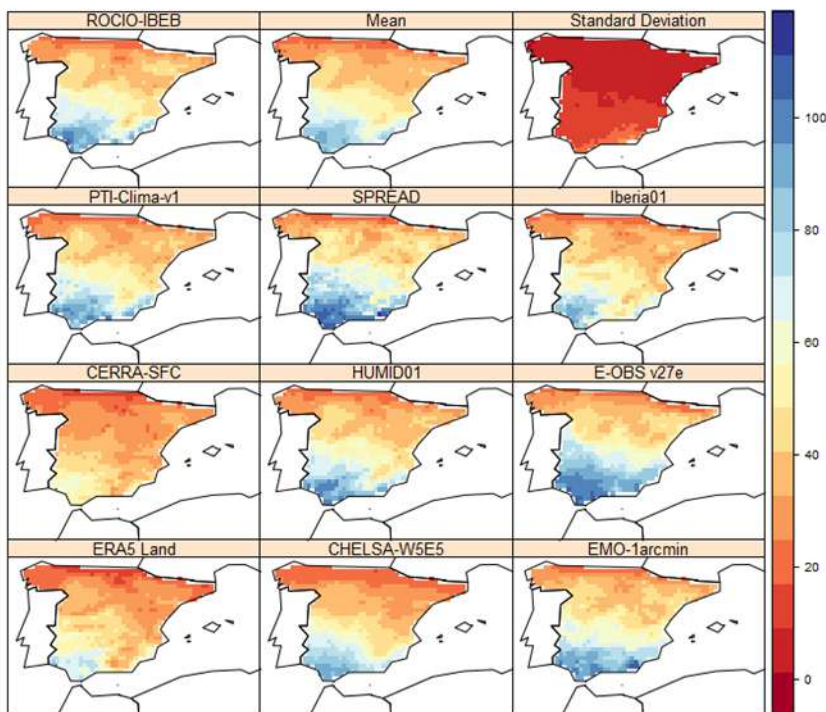


Figure 5. Average Maximum Length of Dry Spells for the period 1990-2012. Source: Created for this contribution.

4. DISCUSIÓN

This study addresses the need for an intercomparison analysis of various existing daily precipitation datasets to assess their strengths, limitations, potential applications, and possible misuses. The findings reveal that, unlike the temperature results shown in Herrera et al. (2024), national datasets tend to be more consistent with each other than with global or European datasets. While the main differences in mean values are related to intensity, these differences also extend to spatial patterns when examining extremes or precipitation spells, thereby expanding or contracting the affected regions.

Notably, the differences remain largely consistent with altitude, with most datasets displaying similar behavior. However, certain exceptions, such as E-OBS v27e, EMO-1arcmin, and ERA-Land, highlight issues potentially stemming from factors beyond the chosen methodology, such as the observational network used in constructing the dataset.

AGRADECIMIENTOS

This research work was funded by the European Commission – NextGenerationEU (Regulation EU 2020/2094), through CSIC's Interdisciplinary Thematic Platform Clima (PTI Clima)/ Development of Operational Climate Services. RSN is funded by grant RYC2021-034330-I funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by “European Union NextGenerationEU/PRTR”. J.M.G. and S.H. acknowledge the support of the Spanish Government through the Agencia Estatal de Investigación (project PID2019-111481RB-I00 - Contribución española al Atlas del IPCC-AR6; Desarrollo y problemas científicos). We acknowledge the data providers in the ECA&D project. Data and metadata available at [url{https://www.ecad.eu}](https://www.ecad.eu).

REFERENCIAS

- Beguiría, S., and colabs. (2025). Undefined. Undefined (In preparation)
- Burton C, Rifai S, Malhi Y., (2018), Inter-comparison and assessment of gridded climate products over tropical forests during the 2015/2016 El Niño. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.*, 373 (1760), 20170406. doi: 10.1098/rstb.2017.0406
- Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. M., & Jones, P. D., (2018), An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 9391-9409. doi: <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Cornes, R., Schrier, G., Besselaar, E.J.M., Jones, P., (2020), E-OBS daily gridded meteorological data for europe from 1950 to present derived from in-situ observations. Technical report, Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, doi: <https://doi.org/10.24381/cds.151d3ec6>
- El-Said, A., Brousseau, P., Ridal, M., Randriamampianina, R., (2021), A new temporally flow-dependent eda estimating background errors in the new copernicus european regional re-analysis (CERRA). *Earth and Space Science Open Archive*, 1-28, doi: <https://doi.org/10.1002/essoar.10507207.1>
- Herrera, S., Cardoso, R.M., Soares, P.M.M., Espírito-Santo, F., Viterbo, P., Gutiérrez, J.M. (2019). Iberia01: a new gridded dataset of daily precipitation and temperaturas over Iberia. *Earth System Science Data*, 1947–1956, doi: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1947-2019>
- Herrera, S., Cardoso, R.M., Soares, P.M.M., Espírito-Santo, F., Viterbo, P., Gutiérrez, J.M., (2019), Iberia01: Daily gridded (0.1 resolution) dataset of precipitation and temperatures over the Iberian peninsula [dataset], DIGITAL.CSIC, doi: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/8641>
- Herrera, S., Soares, P.M.M., Cardoso, R.M., Gutierrez, J.M. (2020). Evaluation of the Euro-CORDEX regional climate models over the iberian peninsula: Observational uncertainty analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (12), 2020-032880, doi: <https://doi.org/10.1029/2020JD032880>
- Herrera, S., González Rouco, F., Serrano-Notivoli, R., Garrido, J.L., Beguería, S., Gutiérrez, J.M., Quintana-Seguí, P., Iturbide, M., Rodríguez, E., Morata, A. (2024), Intercomparison of daily maximum and minimum temperature gridded products over mainland, Submitted to *Climate Change*.

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Hornyi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thpaut, J.-N., (2023), ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Technical report, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Karger, D.N., Lange, S., Hari, C., Reyer, C.P.O., Conrad, O., Zimmermann, N.E., Frieler, K. (2023). CHELSA-W5E5: daily 1 km meteorological forcing data for climate impact studies. *Earth System Science Data*, 15, 2445-2464, doi: <https://doi.org/10.5194/essd-15-2445-2023>
- Kotlarski, S., Szab, P., Herrera, S., Rty, O., Keuler, K., Soares, P.M., Cardoso, R.M., Bosshard, T., Pag, C., Boberg, F., Gutiérrez, J.M., Isotta, F.A., Jaczewski, A., Kreienkamp, F., Liniger, M.A., Lussana, C., Pianko-Kluczyska, K. (2019). Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-european perspective. *International Journal of Climatology*, 39 (9), 3730–3749, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5249>
- Ledó, L., Haiden, T., Chevallier, M. (2024). An intercomparison of four gridded precipitation products over Europe using the three-cornered-hat method. *EGUsphere* ([preprint]), doi: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-807>
- Muñoz Sabater, J. (2019) ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Technical report, Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, doi: <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Newman, A.J., Clark, M.P., Longman, R.J., Giambelluca, T.W. (2019). Methodological intercomparisons of station-based gridded meteorological products: Utility, limitations, and paths forward. *Journal Of Hydrometeorology*, 20, 531-547, doi: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0114.1>
- Peral, C., Navascués, B., Ramos, P. (2017). Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. Technical Report 24, AEMET. [https://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/recursos en linea/publicaciones y estudios/publicaciones/NT 24 AEMET/NT 24 AEMET.pdf](https://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/recursos%20en%20linea/publicaciones%20y%20estudios/publicaciones/NT%2024%20AEMET/NT%2024%20AEMET.pdf) (In Spanish)
- Quintana-Seguí, P., Turco, M., Herrera, S., Míguez-Macho, G. (2017). Validation of a new SAFRAN-based gridded precipitation product for Spain and comparisons to Spain02 and ERA-Interim. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (4), 2187–2201, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-21-2187-2017>
- Serrano Notivoli, R., De Luís, M., Beguería, S., & Saz, M. Á., (2016), SPREAD (Spanish PREcipitation At Daily scale) [Dataset]. Digital.CSIC, doi: <http://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/7393>
- Tanarhte, M., Hadjinicolaou, P., Lelieveld, J., (2012), Intercomparison of temperature and precipitation data sets based on observations in the mediterranean and the middle east. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117 (D12), doi: <https://doi.org/10.1029/2011JD017293>
- Thiemig, V., Ramos Gomes, G.N., Skien, J.O., Ziese, M., Rauthe-Schch, A., Rustemeier, E., Rehfeldt, K., Walawender, J., Kolbe, C., Pichon, D., Schweim, C., Salamon, P., (2020), EMO-1arcmim: A high-resolution multi-variable gridded meteorological data set for Europe (1990-2021). European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset], doi: <https://doi.org/10.2905/0BD84BE4-CEC8-4180-97A6-8B3ADAAC4D26>

Zhuang, J., Dussin, R., Huard, D., Bourgault, P., Banihirwe, A., Raynaud, S., Malevich, B., Schupfner, M., Fernandes, F., Levang, S., J'uling, A., Almansi, M., Scott, O.Z.R., Rondeau, G., Rasp, S., Smith, T.J., Stachelek, J., Plough, M., Manchon, P., Bell, R., Li, X., (2023), xESMF: Universal Regridder for Geospatial Data. Zenodo, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7800141>

CALENTAMIENTO DEL MAR EN LA PENÍNSULA IBÉRICA: MEDITERRÁNEO vs ATLÁNTICO, A PARTIR DE 40 AÑOS DE IMÁGENES DE SATÉLITE

María José LÓPEZ GARCÍA

Departament de Geografia. Universitat de València

maria.j.lopez@uv.es

RESUMEN

El cambio climático reciente afecta especialmente a océanos y mares. En el Mediterráneo, los registros oceanográficos y las observaciones desde satélite evidencian una intensificación del calentamiento en las últimas décadas. En este trabajo presentamos un análisis comparado del calentamiento en las fachadas mediterránea y atlántica de la península ibérica realizado a partir del análisis de imágenes de satélite AVHRR-NOAA y MODIS-Terra para el período 1985-2023. Se han calculado anomalías térmicas mensuales y anuales para distintas subzonas y se han analizado las tendencias espaciales y temporales. Los datos muestran un calentamiento global de +1.43°C en la fachada mediterránea frente a +0.98°C para la zona atlántica, con patrones estacionales similares. En ambas zonas se constata el adelanto e intensificación de la estación estival, si bien en las cuencas atlánticas destaca el incremento térmico en otoño, especialmente en los meses de octubre y noviembre.

Palabras clave: calentamiento global, SST, Mediterráneo, Atlántico, AVHRR-NOAA, MODIS-Terra

ABSTRACT

Recent climate change particularly affects oceans and seas. In the Mediterranean, oceanographic records and satellite observations show an intensification of warming in recent decades. In this paper, we present a comparative analysis of warming on the Mediterranean and Atlantic coasts of the Iberian Peninsula based on the analysis of AVHRR-NOAA and MODIS-Terra satellite images for the period 1985-2023. Monthly and annual thermal anomalies have been calculated for different sub-areas and spatial and temporal trends have been obtained. The data show a global warming of +1.43°C on the Mediterranean basins compared to +0.98°C for the Atlantic zones, with similar seasonal patterns. In both areas, the advance and intensification of the summer season is observed, although in the Atlantic basins the thermal increase in autumn stands out, especially in the months of October and November.

Key words: Global warming, SST, Mediterranean, Atlantic, AVHRR-NOAA, MODIS-Terra

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, está ampliamente aceptado el incremento de la temperatura global del planeta como consecuencia del aumento antropogénico de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2021). En el caso de la temperatura superficial del mar (en adelante SST, por sus siglas en inglés) este aumento es especialmente notable desde la década de los 70. Numerosos estudios (i.e. Trenberth et al., 2007; Belkin et al., 2009) han tratado de cuantificar las tasas de calentamiento, las cuales varían en función del ámbito de estudio, del periodo temporal referido, así como de los métodos de observación utilizados. En el caso del mar Mediterráneo, los informes del Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) a partir de observaciones disponibles desde 1993 (von Schuckmann et al., 2016), señalan una tasa de calentamiento reciente de $0.04^{\circ}\text{C}/\text{año}$, unas 2.5 veces superior al calculado en los océanos ($0.016^{\circ}\text{C}/\text{año}$), siendo la cuenca mediterránea calificada como una zona de “calentamiento rápido”. Estas tasas varían según las subcuencas analizadas, registrándose tasas superiores en las cuencas más orientales (véase una revisión en López García, 2021).

Los estudios de climatología oceánica revisten especial dificultad debido a la escasez de registros para series temporales largas, ya sea procedentes de estaciones marinas costeras, boyas o campañas oceanográficas que suelen tener una duración y extensión limitada. Es por ello que las técnicas de teledetección espacial que proporcionan imágenes térmicas diarias desde los años 80 constituyen un complemento valioso para el análisis de la temperatura del mar. Aunque los sensores a bordo de satélites solamente registran la temperatura de la superficie marina, proporcionan una visión sinóptica, continua y completa de todo el planeta que ha permitido avanzar en el conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de este parámetro. A la serie Tiro-NOAA, sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), iniciada en 1978, le han seguido otros programas como los satélites Terra y Aqua, puestos en órbita por la NASA en 1999 y 2002 respectivamente, que incluyen el sensor MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) capaz de obtener imágenes de SST con una alta resolución temporal (López García, 1991; 2020).

En la península ibérica son muchos los trabajos que, en las dos últimas décadas, se han dedicado al estudio del calentamiento en las aguas mediterráneas tanto a partir de registros oceanográficos (Vargas-Yáñez et al., 2005, 2009, 2010; Salat y Pascual, 2006; Salat et al., 2019) como a partir de observaciones desde satélite (Santoreli et al., 1994; Nykjaer, 2009; López García y Camarasa, 2011; Skliris et al., 2012; Shaltout y Omstedt, 2014; López García, 2015 y 2021; Pastor et al., 2018; Mohamed et al., 2019; Pisano et al., 2020). La mayoría de autores señalan un incremento de la temperatura superficial del mar, especialmente notable desde la década de los 90, con tasas que oscilan entre 0.02 y $0.05^{\circ}\text{C}/\text{año}$ dependiendo de la región y del periodo analizado.

Trabajos pioneros relativos a las cuencas liguro-provenzal, balear y de Alborán y basados en dos décadas de datos (López García y Camarasa, 2011, López García, 2012 y 2015) identificaron diferencias estacionales y regionales en la magnitud del calentamiento del Mediterráneo occidental. Estos estudios identificaron que las tasas más altas de calentamiento se producían durante los meses de primavera-verano en todas las cuencas y apuntaban cambios en la curva de evolución anual de la SST, lo que evidenciaba un proceso de adelantamiento e intensificación de la estación estival.

Las mayores tasas de calentamiento se identificaron en la cuenca liguro-provenzal ($+0.06^{\circ}\text{C}/\text{año}$) y durante el mes de junio. Análisis más recientes basados en series de 35 años de imágenes (López García, 2020) confirman estas tendencias estimando un calentamiento global para las cuencas mediterráneas peninsulares entre 0.6 y 1°C , siendo los meses de junio y julio cuando se registran las tasas de calentamiento más elevadas.

En el caso de las aguas atlánticas que rodean la península ibérica, los estudios disponibles son menos abundantes, especialmente los que incluyen análisis de imágenes térmicas. En la bahía de Vizcaya, De Castro et al. (2009) utilizando datos oceanográficos e imágenes térmicas identifican una alternancia de ciclos de enfriamiento-calentamiento, con un periodo aumento de SST a partir de 1974, con tasas de $+0.22^{\circ}\text{C}/\text{década}$. Los autores observan diferencias estacionales y espaciales en primavera y verano, cifrando un aumento de la SST en 0.54°C en los meses de verano para el período 1985-2006. En las costas portuguesas, otros autores (Biguino et al., 2023) observan un aumento de la SST desde 1982 con variaciones regionales que cifran entre 0.10 y 0.25°C por década, si bien los autores señalan una disminución del calentamiento en la última década.

Este trabajo presenta un análisis de la temperatura superficial del mar realizado para un periodo de casi 40 años a partir del análisis de series de imágenes térmicas mensuales obtenidas por los sensores AVHRR a bordo del satélite NOAA y del sensor MODIS a bordo del satélite Terra. Los datos han sido proporcionados por los servidores de la NASA. El principal objetivo es realizar un análisis comparado de la variabilidad espacial y temporal de la SST entre las cuencas mediterráneas y atlánticas, tratando de identificar si existen patrones comunes en la evolución estacional de las temperaturas y en la magnitud del calentamiento reciente en ambas zonas.

2. MÉTODOS

La serie temporal de imágenes térmicas utilizadas procede de dos misiones de satélite: el sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA para el período 1985-2000 y el sensor MODIS a bordo del satélite Terra para el período 2000-2023. Las imágenes NOAA fueron obtenidas del archivo Pathfinder del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) v.5 y las imágenes MODIS se descargaron del producto “MODIS-Terra Level 3 SST Thermal IR v2019”. En ambos casos, se utilizaron imágenes nocturnas, con resolución espacial de 4 km, corregidas mediante los algoritmos testados y validados por la NASA (ver Vázquez et al., 1998 y Marullo et al., 2007 para AVHRR y Minnet et al., 2003 para MODIS). Los datos están disponibles online en servidor de la NASA (<http://www.earthdata.nasa.gov>).

El empleo de dos series de imágenes distintas requirió un proceso previo de homogeneización. Se procesaron un total de 588 imágenes mensuales, incluyendo el periodo de solapamiento entre ambas series. Para el procesado de las imágenes y la extracción de los valores de temperatura se utilizó el software libre SNAP de la Agencia Espacial Europea.

2.1. Zona de estudio y extracción de datos

El ámbito de estudio analizado incluye las cuencas mediterráneas: ligure-provenzal (CLP), balear (CB), argelina (CAR) y de Alborán (CAL) y las zonas atlánticas (Cantábrico-bahía de Vizcaya (ATLN), Atlántico oriental (ATLW) y Atlántico sur (ATL-S) que abarca la zona de la bahía de Huelva-costa africana) (Figura 1).

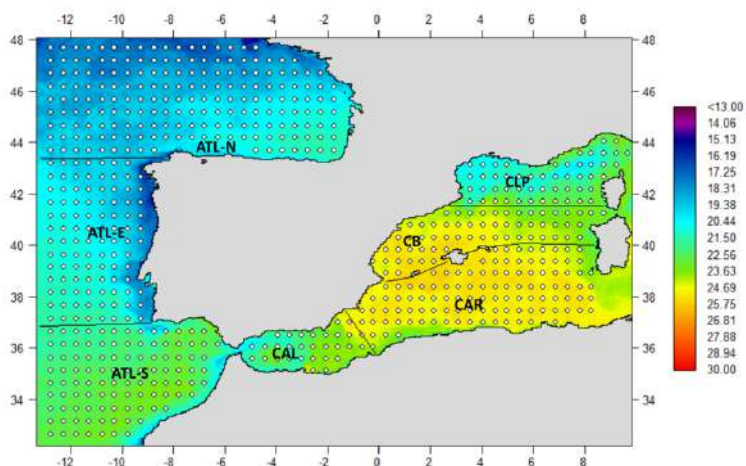


Fig. 1: Ejemplo de las imágenes utilizadas en el estudio. Imagen MODIS-Terra de agosto 2020. Sobre la imagen el muestreo de puntos y las 7 subzonas analizadas

Se diseñó un muestreo de 641 zonas sobre toda el área de estudio (248 muestras en las cuencas mediterráneas y 393 en las atlánticas), y en cada punto de muestreo se extrajeron los valores de temperatura media mensual de 9 píxeles. Este método permite una revisión previa de los datos para eliminar del cálculo los píxeles no válidos que pueden estar afectados por cubierta nubosa o contener valor de calidad dudoso. Una vez extraídos los datos de temperatura de las imágenes, se calcularon los estadísticos básicos (media, desviación estándar, mínimo, máximo) mensuales y anuales correspondientes a cada una de las subzonas señaladas en la Figura 1.

2.2. Homogeneización de las series

La existencia simultánea de imágenes de temperatura mensual procedentes del sensor AVHRR-NOAA y del MODIS-Terra para el período comprendido entre febrero de 2000 y diciembre de 2009 permitió realizar el proceso de homogeneización de ambas series. Un trabajo previo (López García, 2020) que comparaba los datos de SST obtenidos mediante el sensor AVHRR (Panthfinder v5) y el MODIS v14 en las cuencas mediterráneas, concluyó que existía una alta correlación ($R^2 = 0.99$) entre los registros de ambos sensores cuando se obtienen valores promedio a escala regional. No obstante, se observó sobreestimación de la temperatura registrada por el sensor AVHRR ($+0.18^{\circ}\text{C} \pm 0.19^{\circ}\text{C}$, en promedio) respecto a los datos registrados por MODIS. Esta discrepancia era menor durante los meses de invierno y primavera ($+0.09^{\circ}\text{C} \pm 0.13^{\circ}\text{C}$ de enero a mayo) y mayor entre junio y diciembre ($+0.24^{\circ}\text{C} \pm 0.19^{\circ}\text{C}$). La comparación de ambas series permitió calcular factores mensuales de corrección para homogeneizar y unificar las series climáticas.

En la actualidad, el servidor de la NASA proporciona una nueva versión de los datos MODIS (v19) por lo que fue necesario realizar de nuevo la comparación entre series. La Figura 2 muestra las correlaciones obtenidas para las cuencas mediterráneas y atlánticas. Los datos indican que las diferencias entre ambas series se han incrementado con la nueva versión V19 existiendo una diferencia media de $+0.32\text{ °C} \pm 0.19\text{ °C}$ entre los datos de temperatura registrados por el sensor AVHRR y el MODIS. El análisis permitió calcular los factores de corrección mensuales específicos para las cuencas atlánticas y mediterráneas y, con ellos, homogenizar la serie haciendo viable el análisis para el conjunto de la serie (1985-2023).

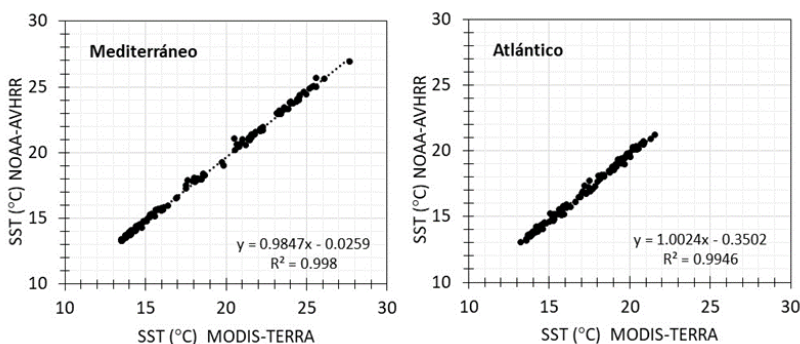


Fig. 2: Correlación entre los datos de SST extraídos a partir de las series AVHRR-NOAA y MODIS-Terra para el periodo de solapamiento (2000-2009). Las gráficas representan los valores medio registrados por ambos sensores en las zonas del Mediterráneo (izqda.) y el Atlántico (dcha.)

2.3. Análisis de la variabilidad espacio-temporal

Para el análisis de tendencias en la serie temporal (1985-2023) se calcularon las anomalías térmicas anuales y mensuales para cada subzona tomando como referencia, respectivamente, el valor medio anual y el valor medio mensual de la serie. Mediante técnicas de regresión lineal se obtuvieron las tasas de calentamiento para cada una de las subzonas, diferenciando entre las tasas anuales y las tasas en cada uno de los meses. Los valores medios mensuales permitieron también el análisis del ciclo anual de temperatura y sus cambios en la serie temporal.

3. RESULTADOS

3.1. Tendencias interanuales y patrones regionales

Las anomalías térmicas anuales para la serie de 40 años muestran una clara tendencia positiva a partir de las dos últimas décadas, tanto en las cuencas mediterráneas como en las zonas atlánticas (Figura 3), con tasas de calentamiento medio similares, más bajas en el Atlántico ($+0.025\text{ °C/año}$) que en el Mediterráneo ($+0.037\text{ °C/año}$). En ambas zonas se observa que el calentamiento del mar se ha intensificado especialmente en los últimos 10 años, registrándose las mayores anomalías en el año 2023 en el Atlántico ($+1.18\text{ °C}$) y en 2022 y 2023 en el Mediterráneo ($+1.21\text{ °C}$) respecto a la media anual de la serie.

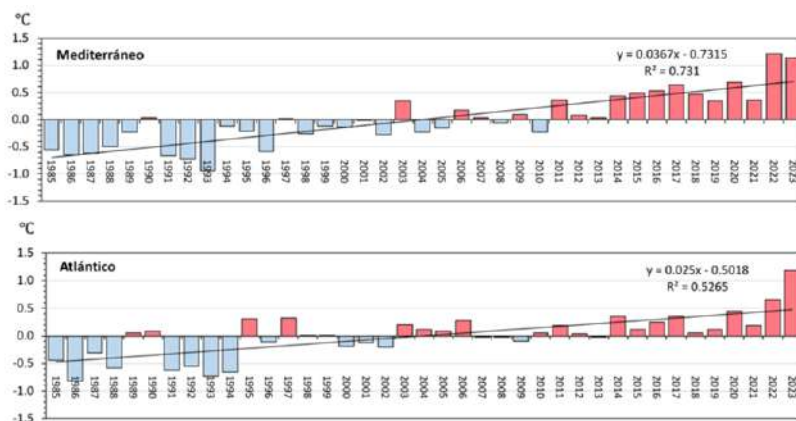


Fig. 3: Anomalías térmicas anuales de la SST para la serie 1985-2023 obtenidas a partir de imágenes de satélite para las zonas del Mediterráneo y del Atlántico

Las tasas de calentamiento calculadas por meses confirman los patrones de mayor intensidad en los meses cálidos (primavera, verano y otoño) ya apuntados en la bibliografía para las cuencas mediterráneas (López García y Camarasa, 2011; López García, 2015, 2021). En la Figura 4 se comparan los datos globales de calentamiento registrados para el Mediterráneo y el Atlántico en cada uno de los meses (4a), y se muestran también los valores registrados en cada una de las subzonas en cada mes (4b). En el Mediterráneo peninsular, en las cuatro últimas décadas, la temperatura se ha incrementado 1.43°C, debido al aumento de las temperaturas en los meses cálidos, fundamentalmente junio y julio, cuando se registran las mayores tasas (+0.061 y +0.062°C/año). Estas tasas suponen un incremento global de 2.37 y 2.43°C, respectivamente. En las zonas del Atlántico también se observa un aumento de las temperaturas significativo, si bien la cifra global es de 0.98°C. Destaca que en el Atlántico el calentamiento es más intenso en los meses otoñales, con tasas máximas en octubre (+0.038°C/año) que supone un aumento global de la SST de 1.48°C, y tasas destacables también en primavera (+0.033°C/año en mayo) y verano (+0.035°C/año en junio), lo que implica un aumento global de 1.28°C y 1.38°C respectivamente.

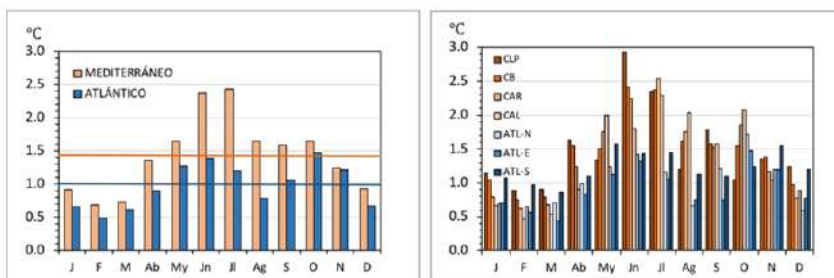


Fig. 4: Calentamiento global (°C) en el Atlántico y Mediterráneo peninsular (a) y en las distintas subzonas (b) para el periodo 1985-2023. Las líneas horizontales en la gráfica de la derecha indican el valor promedio medio global en cada zona

El análisis regional (Figura 4b) muestra que en el Mediterráneo el máximo calentamiento se registra en la cuenca más septentrional (liguro-provenzal) donde se ha registrado un incremento térmico de casi 3°C en el mes de junio, con una tasa de +0.07°C/año. En la fachada atlántica el máximo calentamiento se registra en octubre en el mar Cantábrico (1.7°C) y en el Atlántico sur en los meses de mayo, junio y julio, con cifras que oscilan entre 1.4 -1.6°C.

Si bien el calentamiento en el Atlántico es de menor intensidad, la representación de las anomalías térmicas mensuales en toda la serie temporal (Figura 5) permite identificar patrones semejantes. Se observa un periodo donde predominan anomalías negativas desde 1985 hasta 2000, y una intensificación de las anomalías positivas especialmente en los últimos años. En el Mediterráneo, se identifican las olas de calor como el verano extraordinario de 2003, 2006, 2015, 2017 y el año 2022 con anomalías record desde el mes de mayo hasta noviembre. En el Atlántico, el patrón es similar si bien destaca el año 2023 (junio y octubre) con anomalías positivas superiores a las registradas en el Mediterráneo.

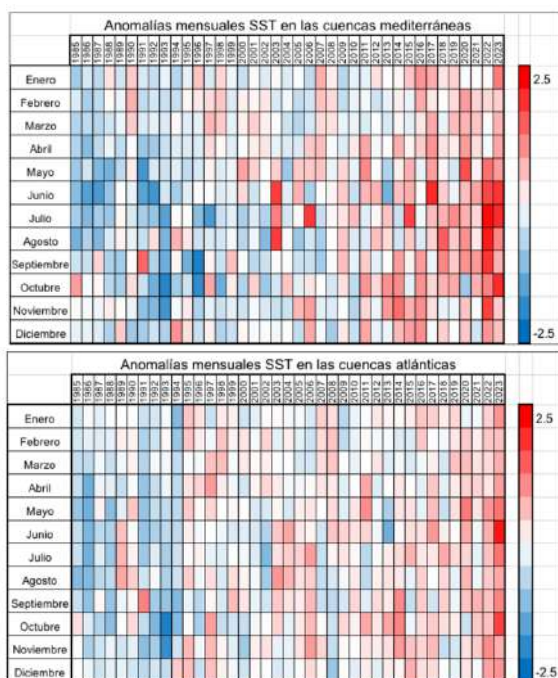


Fig. 5: Anomalías térmicas mensuales (°C) en el periodo 1985-2023 para las cuencas atlánticas y mediterráneas

3.2. Cambios en la curva de evolución anual

El ciclo anual de la temperatura presenta diferencias entre las cuencas atlánticas y mediterráneas (Figura 6a). Si bien en los meses de invierno (diciembre, enero, febrero) la temperatura media es similar (13-14°C), en verano se alcanzan valores más elevados

en el Mediterráneo ($25.01 \pm 0.84^\circ\text{C}$ en agosto) que en el Atlántico ($20.18 \pm 0.56^\circ\text{C}$), con una amplitud térmica anual superior, 11.16°C frente a 6.50°C .

El calentamiento del mar experimentado en las últimas cuatro décadas se manifiesta también en las variaciones del ciclo anual. La Figura 6b y 6c representa, respectivamente, los cambios registrados en la curva estacional tomando como referencia dos periodos en la serie anual: 1985-2000 y 2001-2023. En ambas zonas se observa el adelanto de la estación estival, su mayor intensidad y la prolongación del verano. En el caso de las cuencas atlánticas, destaca el aumento de las temperaturas en otoño y primavera, con máximos en torno a 1.5°C registrados para todo el periodo en el mes de octubre.

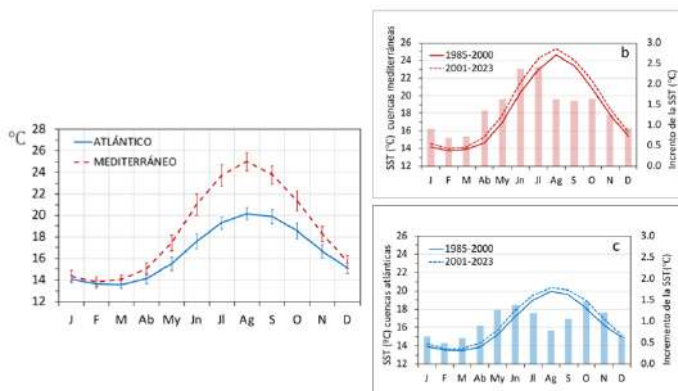


Fig. 6: Ciclo anual en la temperatura en las cuencas atlánticas y mediterránea (a) y variaciones de la curva estacional (b y c)

4. CONCLUSIONES

El análisis comparado del calentamiento del mar en la fachada atlántica y mediterránea de la península ibérica muestra patrones generales similares, con un aumento de la temperatura significativo, especialmente en las dos últimas décadas, en las que predominan las anomalías positivas. Las imágenes de satélite para la serie 1985-2023 cifran un aumento de la temperatura global de 1.4°C en las cuencas mediterráneas peninsulares y de 1°C en las zonas atlánticas. La tasa es mayor en el Mediterráneo ($+0.037^\circ\text{C/año}$) que en el Atlántico ($+0.025^\circ\text{C/año}$) y en ambas zonas se detectan variaciones regionales. En el Mediterráneo, el calentamiento es mayor en la cuenca liguero-provenzal, y en el Atlántico, los mayores aumentos corresponden a la zona de la bahía de Cádiz, aunque también se observa un incremento acusado de la temperatura en otoño en el mar Cantábrico.

Este análisis revela que el calentamiento en las cuencas atlánticas, aunque menos intenso que en el Mediterráneo, se está produciendo también de forma acelerada.

En cuanto a las variaciones estacionales, en el Mediterráneo el aumento de las temperaturas se produce fundamentalmente en los meses de junio y julio (con un incremento promedio de casi 2.5°C) y se prolonga hacia el otoño mientras que, en el Atlántico, además del incremento estival, destaca el aumento de temperatura registrado en octubre y noviembre (con un incremento promedio de casi 1.5°C). El

análisis de anomalías mensuales detecta también una intensificación reciente de los meses cálidos, con records en 2022 en el Mediterráneo y 2023 en el Atlántico. Los resultados son coherentes con las estimaciones recientes indicadas por otros autores y alertan sobre un calentamiento acelerado en el mar cuyas consecuencias para los ecosistemas marinos requieren la máxima atención.

REFERENCIAS

- Belkin, I. (2009): Rapid warming of Large Marine Ecosystems. *Progress in Oceanography* 81, 2017-213. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.04.011>
- Biguino, B., Antunes, C., Lamas, L., Jenkins, L.J., Dias, J.M., Haigh, I.D. y Brito, A.C. (2023): 40 years of changes in sea surface temperature along the Western Iberian Coast. *Science of the Total Environment* 888, 164193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164193>
- De Castro, M., Gómez-Gesteira, M., Alvarez, I., Gesteira, J.L.G (2009) Present warming within the context of cooling-warming cycles observed since 1854 in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research* 29, 1053-1059. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.11.016>
- López García, M.J. y Camarasa, A.M. (2011): Recent trends of SST in the Western Mediterranean basins from AVHRR Pathfinder data (1985-2007). *Global Planetary Change*, 78, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.001>
- López García, M.J. (2012) Calentamiento reciente en el contorno del mar balear. Hacia un adelantamiento y prolongación de la estación estival. En: Rodríguez Puebla, C. et al. (Eds.) *Cambio climático. Extremos e impactos*, Pub. de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie A, nº 8, AEC, Salamanca, pp. 459-467
- López García, M.J. (2015): Recent warming in the Balearic Sea and Spanish Mediterranean coast. Towards an earlier and longer summer. *Atmosfera*, 28 (3), 149-160. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.01>
- López García, M.J. (2020) SST Comparison of AVHRR and MODIS Time Series in the Western Mediterranean Sea, *Remote Sensing* 12: 2221, <https://doi.org/10.3390/rs12142241>
- López García, M.J. (2021) How much warmer is the Mediterranean becoming? Thirty-five years of satellite observation. *Metode Science Studies Journal* 11: 193-199. <https://doi.org/10.7203/metode.11.16693>
- Marullo, S., Buongiorno, B., Guarracino, M., Santoleri, R. (2007): Observing the Mediterranean Sea from space: 21 years of Pathfinder-AVHRR Sea surface temperatures (1985 to 2005): re-analysis and validation. *Ocean Science* 3, 299-310. hal-00298409
- Minnett, P.; Evans, R.; Kearns, E.; Brown, O. Sea-surface temperature measured by the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (2003). En: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Piscataway, NJ, USA; Vol. 2, pp. 1177-1179.*
- Mohaned, B., Mohamed, A., El-Din, K.A., Nagy, H. Shaltout, M. (2019): Inter-annual Variability and Trends of Sea Level and Sea Surface Temperature in the Mediterranean Sea over the Last 25 years. *Pure Applied Geophysics* 176 (8), 3787-3810.

- Nykjaer, L. (2009): Mediterranean Sea surface warming 1985-2006. *Climate Research* 39, 11-17. 10.3354/cr00794
- Pastor, F., Valiente, J.A. y Palau, J.L. (2018): Sea Surface Temperature in the Mediterranean: Trends and Spatial Patterns (1982-2016). *Pure and Applied Geophysics* 175, 4017-4029. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1739-z>
- Pisano, A., Marullo, S., Artale, V., Falcini, F., Yang, C., Leonelli, F.E., Santoleri, R. y Buongiorno Nardelli, B. (2020): New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. *Remote Sensing* 12, 132. <https://doi.org/10.3390/rs12010132>.
- Salat, J. y Pascual, J. (2006): Principales tendencias climatológicas en el Mediterráneo noroccidental, a partir de más de 30 años de observaciones oceanográficas y meteorológicas en la costa catalana. En: Cuadrat, J.M. et al. (Eds.), *Asociación Española de Climatología serie A, n°5*, Zaragoza, pp. 283-290.
- Salat, J., Pascual, J., Flexas, M., Chin, T.M., Vazquez-Cuervo, J. (2019) Forty-five years of oceanographic and meteorological observations at a coastal station in the NW Mediterranean: a ground truth for satellite observations. *Ocean Dynamics* 69, 1067-1084. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01285-z>
- Santoreli, R., Böhm, E. y Schiamo, M.E. (1994): The sea surface temperature of the Western Mediterranean Sea: historical satellite thermal data. En: La Violette, P.E. (Ed.) *Seasonal and interannual variability of the Western Mediterranean Sea*. *Coastal and Estuarine Studies*, 46, 155-176.
- Shaltout, M. y Omstedt, A. (2014): Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologica* 56 (3), 411-443.
- Skliris, N., Sofianos, S., Gkanasos, A., Mantziafou, A., Vervatis, V., Axaopoulos, P. y Lascaratos, A. (2012): Decadal scale variability of sea Surface temperatura in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics* 62, 13-30.
- Trenberth, K E, Jones, P D, Ambenje, P, Bojariu, R, Easterling, D, Klein Tank, A, Parker, D, Rahimzadeh, F, Renwick, J A, Rusticucci, M, Soden, B, and Zhai, P. *Observations. Surface and Atmospheric Climate Change. Chapter 3*. United Kingdom: N. p., 2007. Web.
- Vargas-Yáñez, M., Salat, J., Fernández, M.L., López-Jurado, J.L., Pascual, J., Ramirez, T., Cortés, D., y Franco, I. (2005): Trends and time variability in the northern continental shelf of the western Mediterranean. *J. Geophysical Research* 110, C10019.
- Vargas-Yáñez, M., García, M.J., Salat, J., García, M.C., Pascual, J. y Moya, F. (2009): Warming trends and decadal variability in the Western Mediterranean shelf. *Global Planetary Change*, 63, 177-184.
- Vargas-Yáñez, M., Zunino, P., Benali, A. Delpy, M. Pastre, F. Moya, F., García-Martínez, M.C., Tel, E. (2010): How much is the western Mediterranean really warming and salting?. *J. Geophysical Research*, 115, C04001.
- Vázquez, J. Perry, K. y Kilpatrick, K. (1998): NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder sea surface temperature data set user's reference manual, version 4.0. JPL Publication D-14070.
- Von Schuckmann, K., Le Traon, P.Y., Smith, N., Pascual, A., Brasseur, P., Fennel, K. y Djavidnia, S. (Eds) (2018): Copernicus marine service ocean state report, *J. Operational Oceanography*, 11: sup1, S1-S142.

EXCEPCIONALIDAD DE LA DANA DE SEPTIEMBRE DE 2023 EN EL CENTRO PENINSULAR

David LÓPEZ-REY LUMBRERAS¹, Enrique SÁNCHEZ SÁNCHEZ¹, David RESUELA SÁNCHEZ², Darío CANO ESPADAS³, José Antonio LÓPEZ DÍAZ⁴, Alejandro LOMAS GONZÁLEZ² y Ricardo TORRIJO MURCIANO⁶

¹Facultad de Bioquímica y Ciencias Ambientales, Universidad de Castilla – La Mancha, Avda. Carlos III, s/n. Toledo.

²AME, Asociación Meteorológica Española.

³AEMET, Oficina Meteorológica del Aeropuerto de Barajas, Madrid.

⁴AEMET, SS.CC., c/Leonardo Prieto Castro, 28071 Madrid.

⁶AEMET, SS.CC., c/Leonardo Prieto Castro, 28071 Madrid.

david.lopezrey@yahoo.es, e.sanchez@uclm.es, davidresuela@hotmail.com,
dcano@amet.es, jlopezd@amet.es, meteolomas@gmail.com,
rtorrijom@amet.es

RESUMEN

El mes de septiembre de 2023 comenzó con un destacado episodio de precipitaciones en la península, que incidió duramente en la desembocadura del Ebro, zona de Cádiz e interior peninsular, con un carácter excepcional. Nos centraremos en las zonas más afectadas de la Meseta Sur como fueron las provincias de Madrid y de Toledo. Debido a las riadas y a las avenidas del río Alberche y sus afluentes más próximos, perecieron 6 personas y los daños superaron los 300 millones de euros en Castilla-La Mancha y los 58 en la Comunidad de Madrid.

Esta situación de alta intensidad es característica de las costas mediterráneas en otoño, pero no son tan habituales en el interior peninsular, aunque son de reciente recuerdo la DANA de septiembre de 2021 y la riada de Cebolla de septiembre de 2018. Por este motivo, AEMET activó el aviso rojo por precipitaciones en la Comunidad de Madrid y en Castilla-La Mancha.

Analizaremos la situación mediante el estudio macro y mesoescalar. Para evidenciar la excepcionalidad del evento, prestaremos atención a los periodos de retorno para algunas estaciones. Terminaremos con un resumen de los daños más importantes.

Palabras clave: DANA, inundación, Comunidad de Madrid, Castilla-La Mancha, tiempo severo

ABSTRACT

September 2023 began with a notable episode of rainfall on the peninsula, especially in the area of the mouth of the Ebro, the Cádiz area and the center of the peninsula, which in some areas was exceptional. We will focus on the most affected areas of the Southern Plateau in the provinces of Madrid and Toledo. Due to the floods and floods of the Alberche River and its closest tributaries, 6 people died and the damage

exceeded 300 million euros in Castilla-La Mancha and 58 in the Community of Madrid.

This high intensity situation is characteristic of Mediterranean areas in autumn, but they are not so common in the interior of the peninsula, although the DANA of September 2021 and the Cebolla flood of September 2018 are recent memories. For this reason, AEMET activated the red warning due to rainfall in the Community of Madrid and in Castilla-La Mancha.

We will analyze the situation through macro and mesoscale study. To demonstrate the exceptional nature of the event, we will pay attention to the return periods for some stations. We will end with a summary of the most important damages.

Keywords: DANA, flood, Community of Madrid, Castilla-La Mancha, severe weather.

1. INTRODUCCIÓN

Según los últimos informes del IPCC, es muy probable que a mediados de siglo la temperatura media del planeta supere en 1,5°C a los valores preindustriales (periodo 1850-1900). Diversos estudios barajan la posibilidad de que este ascenso provocará un aumento de las precipitaciones torrenciales, debido a un incremento de la evaporación y, por tanto, una mayor disipación del calor latente de condensación que facilitaría las precipitaciones convectivas (Zhang Y., 2019; Ye, B., 1998).

En Europa Central los episodios de lluvias torrenciales son más frecuentes (Blösch, G., 2020), aunque en algunas zonas de la Península Ibérica las tendencias son no-significativas (Senent-Aparicio, J., 2023 y Morales, J., 2022). Más concretamente, en la Meseta Sur aparece una subida de los días con precipitaciones por encima del percentil-95 (Oria Iriarte, P., 2019).

Los episodios de inundaciones en Castilla-La Mancha están vinculados a diversas situaciones meteorológicas: las zonas más occidentales de la Meseta Sur están más influenciadas por las lluvias del Atlántico desde mediados del otoño hasta inicios de la primavera; la zona centro, por episodios tormentosos desde finales de la primavera hasta el inicio del otoño; y un sector del sureste, correspondientes a las vegas del río Júcar y del Segura, influenciadas por las lluvias del Mediterráneo (López-Rey, D. 2018). En ocasiones las precipitaciones en 24 horas pueden superar los 100 mm provocando riadas y, eventualmente, víctimas mortales (López-Rey, D. 2024, 2013, 2007; Roa, 2024; AEMET, 2007).

El Mediterráneo juega un importante papel como fuente de humedad en los eventos de precipitaciones torrenciales, no sólo en las áreas de costa, sino también en la Meseta Sur. Su contribución es igual o superior al 40% en algunos casos (Álvarez-Socorro, G.; Fernández-Álvarez, J.C. y Nieto, R., 2023). El conjunto del Mediterráneo occidental se ha calentado una media de 0,0041 + 0,006 °C/año para el periodo 1982-2018 (Pisano A. et al., 2020).

En las siguientes líneas se realizará una descripción del entorno geográfico y un análisis sinóptico de la situación, ocasionada por la DANA que a principios de septiembre de 2023 afectó a diversas zonas peninsulares, mediante el uso de imágenes de satélite y de radar y de datos en superficie y altura; así como de los daños ocurridos

y de la excepcionalidad de los registros de precipitación mediante el análisis de los periodos de retorno.

2. METODOLOGÍA

Desde el punto de vista geográfico, no hay una clara delimitación del territorio que ocupa la Meseta Sur. Mientras que los límites orientales, septentrionales y meridionales están bien definidos por los sistemas Central, Ibérico y Bético y Sierra Morena, los de la parte occidental están difusos. Geográficamente se puede extender hasta el centro y sur de Portugal incluso. Para este trabajo, la región de estudio será la conformada por las provincias de la Comunidad de Madrid y de Castilla-La Mancha que forman buena parte de este sector geográfico (Fig.1). Su entorno es determinante en la canalización de los flujos de viento superficiales.



Fig. 1. Localización del área de estudio y principales unidades geográficas que participaron meteorológicamente en el episodio. Elaboración propia.

En la situación que nos ocupa, comenzaremos con el análisis de la situación en superficie, donde el papel de la orografía es importante sinóptica y mesoscalarmente y en altura. Para ello emplearemos imágenes de satélite y de radar, el reanálisis de los modelos numéricos y los datos de observación de la red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Para valorar estadísticamente lo inusual de las cantidades de precipitación acumulada en tres días, se han confeccionado los plots de Gumbel para dos observatorios representativos: el de Madrid-Retiro y el de Mocejón de la Sagra (Toledo). Este tipo de gráfico permite valorar el grado de ajuste a la distribución extremal de Gumbel, que es la que se usa habitualmente para la estimación de periodos de retorno de valores extremos de precipitación diaria máxima anual y de racha de viento máxima anual en AEMET.

El ajuste es tanto mejor cuanto más se aproximen a una recta (Coles, S., 2001). Además, este gráfico permite aproximar el periodo de retorno, puesto que con la abscisa o variable reducida elegida, proporcional a $-\ln(\ln(1 - \frac{j}{N+1}))$, donde j es la

posición del valor en la serie ordenada en sentido creciente, y N el número de datos de la serie, los valores en el eje X son, con gran aproximación, los logaritmos decimales de los periodos de retorno; esto es el 3 corresponde a un periodo de retorno de 1000 años, 4 a 10000 años, etc.

3. RESULTADOS

Comenzaremos el estudio de la DANA de septiembre de 2023 con el análisis de la situación sinóptica mediante la interpretación de las imágenes de vapor de agua y de masas de aire. Las flechas amarillas representan el flujo relativo y los máximos de viento; las líneas punteadas blancas representan las áreas de deformación. Con la línea punteada roja se señala el eje de la dorsal cálida en torno a 850 hPa. y con la B naranja se localiza el centro de baja presión en superficie. Cabe destacar que el punto de divergencia del viento en los niveles atmosféricos altos, se sitúa sobre la vertical de Madrid (Fig. 2).

Las letras Tm señalan la presencia de una masa de aire tropical marítima advectándose hacia el interior peninsular. Las aspas señalan los centros de vorticidad relativa en 300 hPa. y la encerrada en un círculo representa el centro de vorticidad por curvatura y la libre, el centro de vorticidad por cizalladura.

El núcleo de la DANA se ubica en las proximidades del cabo de San Vicente, en el extremo suroccidental de la Península. La topografía a 300 hPa muestra una circulación perfectamente cerrada en ese entorno, con su parte meridional apoyada por el jet-stream subtropical, mientras que el jet-stream polar se ubica muy al Norte. La temperatura a 500hPa caía por debajo de los -15°C , con isotermas perfectamente circulares cubriendo todo el territorio peninsular. En la topografía de 700hPa, la presencia de la baja en el suroeste peninsular canaliza fuertemente vientos del sureste que penetran al interior por la provincia de Murcia. También se puede comprobar el remonte por el valle del Guadalquivir de vientos a ese nivel.

La masa de aire seca y fría (color rojizo) se sitúa sobre el centro de vorticidad ciclónica que se advecta hacia el interior desde el golfo de Cádiz delimita una silueta nubosa en forma de hoja baroclina. Hacia el este, la masa mediterránea caliente y húmeda se aprecia de color verdoso. En el punto de inflexión de la hoja baroclina, donde el flujo de aire diverge y el de giro ciclónico se torna anticiclónico, se aprecia una estructura convectiva muy brillante con forma picuda, signo inequívoco de severidad.

Las masas de aire que entran en juego son: una masa mediterránea (tropical marítima) advectada desde el este en los niveles bajos y una masa seca en los niveles medios advectada desde el sur. Destaca la importante inestabilidad potencial de la masa mediterránea. La distribución vertical del viento en los niveles bajos delata el carácter cálido de la advección del aire (Fig. 3).

El campo de líneas de corriente en superficie mostraba: 1) un flujo claro de vientos de procedencia mediterránea que se cuelan por el pasillo de Hellín-Almansa (parte oriental de la provincia de Albacete) y por el pasillo de Utiel-Requena (Valencia) y que penetra hasta el interior de la provincia de Madrid; 2) otro procedente del valle del Ebro que llega a la Meseta Sur por el pasillo de Molina-Sigüenza (este de Guadalajara) y se desliza por los valles del Alto Tajo y la vega del Henares hasta el centro peninsular y 3) otro mucho más difuminado por las precipitaciones, de origen

atlántico que ya se estaban generando por el sur y que remonta el valle del Guadalquivir por el pasillo de Los Pedroches, bifurcándose en dos ramas: una húmeda hacia Sierra Morena y otra seca y de sentido ciclónico por la parte más oriental de Extremadura.

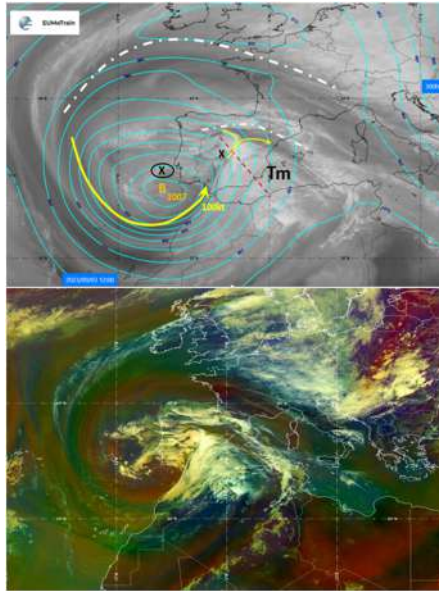


Fig.2. Diagnóstico a partir de la imagen de METEOSAT del canal de vapor de agua ($6.2 \mu\text{m}$) y el análisis del geopotencial en 300 hPa ECMWF 12+00 (arriba). Imagen RGB de masas de aire del 3-sep de 2023 a las 12UTC (abajo). Fuente: EUMETRAIN (https://resources.eumetrain.org/ePort_MapViewer/index.html)

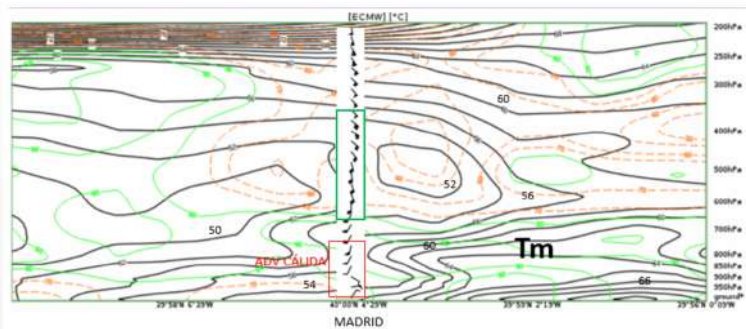


Fig. 3. Corte vertical a través del paralelo 40 de los campos de: temperatura potencial equivalente (negro); humedad relativa (verde y marrón). Sobre el punto de Madrid se representa el viento observado por el radiosondeo de Madrid.

A excepción de la corriente extremeña, todas las demás convergen en la línea imaginaria Madrid–Murcia. Una prueba de su existencia son las fuertes rachas de viento en ese eje a las 16:00UTC por estaciones en superficie: 76km/h en Chinchilla (Albacete), 63 en San Clemente (Cuenca) y 61 en Tomelloso (Ciudad Real), mientras que decrecen notablemente según nos alejamos de esa área, sobre todo al suroeste. Otra fue la formación de una persistente zona de convergencia, con gran aporte de humedad en niveles bajos en la zona del valle del Alberche, lo que dio lugar a la formación de una línea de tormentas muy activas (Fig. 4).

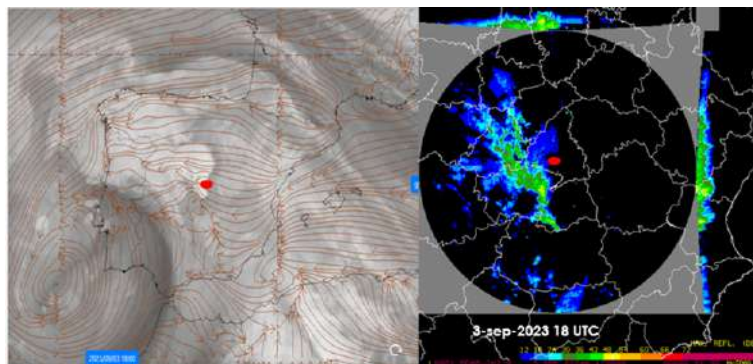


Fig. 4. Izquierda: imagen del canal vapor de agua (6.2 μm) del Meteosat superpuesta con las líneas de corriente en superficie del modelo ECMWF H+6. Derecha PPI del radar de Madrid de la AEMET con los cortes verticales de reflectividad en los laterales. Los puntos rojos localizan la estación de Cuatro Vientos, que se ha colocado como referencia orientativa. Todo ello corresponde al día 3 de septiembre a las 18:00. Imagen de la izquierda cortesía de EUMETSAT y ECMWF. Fuentes: EUMETRAIN (https://resources.eumetrain.org/ePort_MapViewer/index.html) y AEMET.

En esta situación también es llamativa por la gran cantidad de humedad en niveles bajos y los bajos niveles de condensación observados en los sondeos de las zonas más afectadas. Esto, unido a las convergencias de aire húmedo marítimo, a las anomalías térmicas aguas costeras (hasta 3°C en el Mediterráneo occidental según Copernicus Marine Service), aportaron un mayor contenido de vapor de agua en la atmósfera (Fig. 5).

Los valores acumulados de precipitación (7 h a 7 h) en los tres días afectados por la DANA (2, 3 y 4 de septiembre de 2023) superaron los 100 mm en varias de las estaciones de la provincia de Madrid (Tabla 1) y de Toledo (Tabla 2), según se recoge en el Banco de Datos Climatológico Nacional de AEMET. En áreas de montaña se llegaron a superar los 150 mm, mientras que en el resto el máximo ronda los 110 mm. Más espectaculares son los valores de la provincia de Toledo, como el caso de Mocejón de la Sagra donde se recogieron casi 257 mm, mientras que en Polán y en Ocaña se superaron los 140 mm.

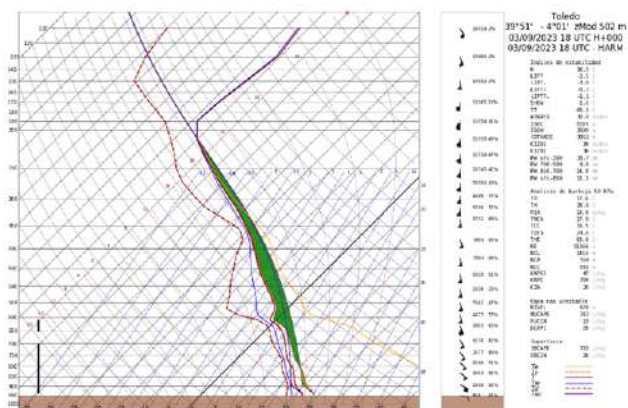


Fig. 5. Análisis del modelo HARMONIE-AROME del sondeo en Toledo el 3/09/2023 a las 18 hoRas. Cortesía de AEMET.

IND	ALT(m)	PREC(mm)	NOMBRE
3107A	1170	154.8	LOZOYA DEL VALLE (OFC. AGEN. FOR.)
3274	1028	149.1	SAN LORENZO ESCORIAL (MONAST.)
3104Y	1159	124.6	RASCAFRÍA, EL PAULAR
2462	1893	122.0	NAVACERRADA, PUERTO
3190	1100	117.5	HOYO MANZANARES (MATALASGRAJAS)
3195T	694	113.4	MADRID (SORIA)
3191E	1004	111.2	COLMENAR VIEJO/FAMET
3194Y	665	109.8	POZUELO DE ALARCÓN
3194U	664	105.8	MADRID, C. UNIVERSITARIA
3185C	1094	100.5	BECERRIL DE LA SIERRA

Tabla 1: Precipitación acumulada (entre 7 y 7 horas), los días 2, 3 y 4 de septiembre de 2023, valores en la provincia de Madrid que superaron los 100 mm.

Fuente: AEMET.

IND	ALT(m)	PREC(mm)	NOMBRE
3256	478	256.9	MOCEJON DE LA SAGRA
3256C	500	236.0	MOCEJON (HIGARES)
3291D	650	148.7	POLAN
3099Y	733	143.0	OCAÑA
3349I	580	131.0	LA TORRE ESTEBAN HAMBRAN
3246E	708	119.8	DOSBARRIOS
3355D	461	119.7	ESCALONA
3260B	513	119.0	TOLEDO
3258D	625	106.1	NAMBROCA (LAS NIEVES)

Tabla 2: Precipitación acumulada (entre 7 y 7 horas), los días 2, 3 y 4 de septiembre de 2023, valores en la provincia de Toledo que superaron los 100 mm.

Fuente: AEMET.

El observatorio de Toledo (serie 1982–2023) cuenta con una estación automática que permite hacerse una idea de la distribución temporal de la cantidad y de la intensidad de la precipitación (Fig. 6). La precipitación diaria fue de 90,2 mm superando el récord

anterior de precipitación máxima en 24 horas en el mes de septiembre (53,0 mm el 28 de septiembre de 2012) y el absoluto de su serie (89,6 mm el 11 de octubre de 2008). Estos valores tan extraordinarios hicieron que el total mensual de 135,4 mm fuese record en su categoría en su serie (anterior, 95,8 en septiembre de 2012). Las intensidades también fueron muy elevadas: 22,8 mm/h en 10 minutos y de 48,6 en 60; la intensidad máxima alcanzó los 136,8 mm/h.

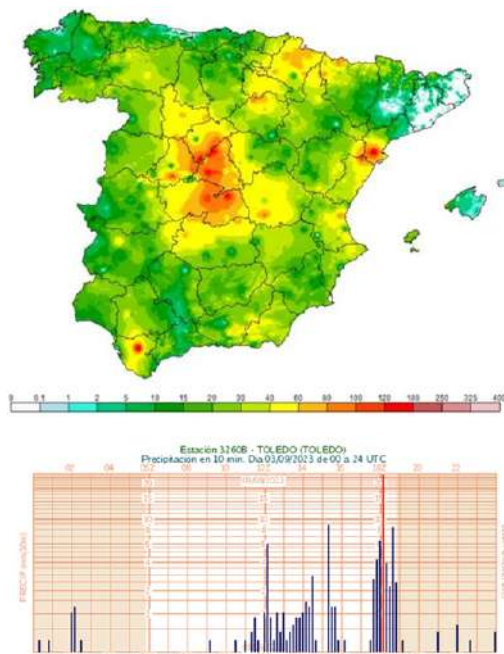


Fig. 6. Arriba, precipitación acumulada entre el 2 y el 4 de septiembre de 2023 (días civiles). Abajo, Hietograma diezminutal de la estación de Toledo correspondiente al 3 de septiembre de 2023. Fuente: AEMET.

Los acumulados del radar de AEMET proporcionan una idea más precisa de la distribución espacial de la precipitación, mejorando las limitadas observaciones en superficie. Sin embargo, la exactitud de dicha estimación puede ser muy diferente a la real (Fig.7). Las zonas más afectadas por las catastróficas inundaciones fueron las comarcas de Sierra Suroeste (en Madrid), La Sagra (Toledo) y zona sur de la ciudad de Toledo.

Hubo 6 víctimas mortales, unas por imprudencias y otras sorprendidas por las crecidas, como fueron los casos de Aldea del Fresno, Villamanta, Valmojado, Camarena, Casarrubios del Monte y Bargas. Los daños se tasaron en 300 millones de euros (200 en la provincia Toledo, 35 en la de Cuenca, 29 en la de Albacete, 27 en la de Ciudad Real y 2 en la de Guadalajara). Según datos del Gobierno de Castilla-La Mancha, se registraron más de 3.000 incidentes, la mayoría en la provincia de Toledo (2.168). Las localidades de Casarrubios del Monte (126 incidencias), Escalona (148),

Magán (124), Mocejón (143), Toledo (188), Yuncler (101) y Villaluenga de la Sagra (86) son las que más incidencias registraron.

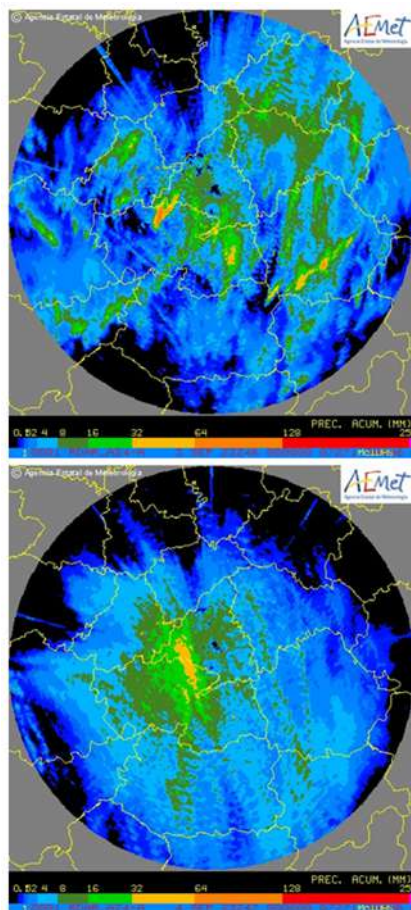


Fig. 7. Arriba, precipitación acumulada, elaborada a partir de los datos del radar de AEMET en Madrid, se puede ver cualitativamente como se distribuyó la precipitación el día 3 de septiembre

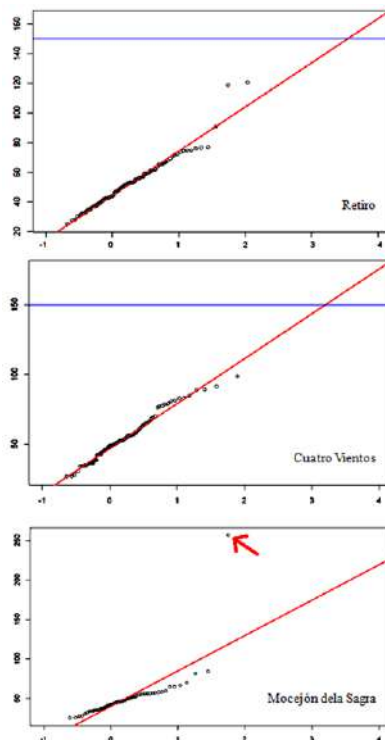


Fig 8. Plot de Gumbel de los observatorios de Retiro, Cuatro Vientos y Mocejón de la Sagra con valores máximos anuales acumulados en tres días sucesivos (eje de ordenadas) y tiempo en escala logarítmica (eje de abscisas)

Otro punto de vista interesante para evaluar la singularidad de este evento de precipitación extrema es el estudio de la distribución de Gumbel (Fig. 8). El observatorio de El Retiro cuenta con una serie de 110 años y el número de lagunas

diarias es menor del 5%. Sin embargo, no disponemos de datos para septiembre de 2023, pero es razonable pensar que esos datos son similares a los de Cuatro Vientos. Al compararlos, notamos que el ajuste de Gumbel no es bueno para los valores más altos. En concreto hay dos próximos a 120 mm que desentonan de la tendencia de los otros. Aun así, se puede apreciar que un valor de 150 mm en tres días, como se recogió en Toledo en varios lugares más, tendría en El Retiro un periodo de retorno muy alto, superior a 1.000 años independientemente de los detalles del ajuste.

Algo similar cabe decir para el observatorio de Cuatro Vientos, próximo a la capital hacia el sur, que presenta mejor ajuste a la Gumbel con serie de 58 años completos. También aquí un valor del orden de 150 mm es muy anómalo.

Por último, está el caso de Mocejón de la Sagra, que tiene una serie de 56 años, también con menos del 5% de lagunas diarias. Aquí es muy evidente el carácter verdaderamente extraordinario de los más de 250 mm de precipitación recogidos entre el 2 y el 4 de septiembre de 2023. Sin este dato, el resto tienen una tendencia en el plot que apunta a periodos de retorno para los 250 mm enormemente elevados.

En resumen, del análisis estadísticos de los datos cabe concluir que acumulaciones en tres días del orden de 150 mm o más en las provincias de Madrid (salvo en la montaña) y Toledo son muy poco probables (periodos de retorno superiores a los 1.000 años), y que los valores de alrededor de 250 mm de Mocejón de la Sagra y Mocejón constituyen un evento extremo verdaderamente singular desde el punto de vista estadístico.

Lo anterior permite especular fundadamente que a lo largo de los últimos 60 años (o 120 como muestra la serie larga de El Retiro) ha podido haber un cambio de régimen pluviométrico que ha posibilitado la ocurrencia reciente de acumulaciones de precipitación que de otra forma serían enormemente improbables.

4. DISCUSIÓN

Queda reflejado en este documento la excepcionalidad de la DANA que afectó a la Meseta Sur en septiembre de 2023, de dimensiones aún mayores a la de septiembre de 2021 tanto en su aspecto social, económico y geográfico.

Este evento de fuertes precipitaciones estuvo condicionado por la formación de una persistente zona de convergencia (Cano, D. 2019), con gran aporte de humedad en la zona del valle del Alberche, lo que dio lugar a la formación de una línea de tormentas muy activas. Esta convergencia podría estar detrás de los severos episodios de precipitaciones en nuestra área de estudio y está en concordancia con un aumento de la torrencialidad a través del índice Gini para el periodo 1951-2020 (López-Rey, D. et al., 2024).

Esta convergencia de masas de aire húmedo en la línea imaginaria Madrid–Murcia, escenario de otros episodios de la misma índole (López-Rey, D. et al. 2024; Roa, A., 2024; Cano, D. et al. 2019, 2008; AEMET, 2021, 2007), y que podrían estar fortalecidos ya debido al cambio climático antropogénico (Insua-Costa, D. et al., 2024).

En resumen, del análisis estadístico de los datos cabe concluir que acumulaciones en tres días del orden de 150 mm o más en las provincias de Madrid (salvo en la montaña) y Toledo son muy poco probables (periodos de retorno superiores a los 1000 años), y

que los valores de alrededor de 250 mm de Mocejón de la Sagra y constituyen un evento extremo verdaderamente singular desde el punto de vista estadístico.

5. REFERENCIAS

AEMET (2021) Informe sobre el episodio meteorológico de fuertes nevadas y precipitaciones ocasionadas por borrasca Filomena y posterior ola de frío.

AEMET (2007) Nota informativa sobre las intensas tormentas en la zona de Alcázar de San Juan (Ciudad Real) durante el 23 de mayo de 2007. <https://www.aemet.es/es/noticias/2007/20070528>

Álvarez, I., et al. (2024) Projection of Compound Wind and Precipitation Extreme Events in the Iberian Peninsula Based on CMIP6. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00429-6>

Alvarez-Socorro, G.; Fernández-Alvarez, J.C. y Nieto, R. (2023) Moisture Source Analysis of Two Case Studies of Major Extreme Precipitation Events in Summer in the Iberian Peninsula. <https://doi.org/10.3390/atmos14081213>

Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A. et al. (2020) Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature* 583, 560–566. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2478-3>

Cano, D.; López-Rey D. y Torrijo, R. (2019) La riada de Cebolla del 8 de septiembre de 2018. Selección del blog de Aemet 2019. 2020, p. 84-91. <https://dx.doi.org/10.31978/666-20-025-9.2019>

Cano, D., Palacios, I. y Ayensa, E. (2008) Estudio de la situación meteorológica el 23 de mayo de 2007 que originó una supercélula en La Mancha Central. XXX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española.

Coles, S. (2001) An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Ed. Springer Series in Statistics.

Insua-Costa, D., Lemus-Cánovas, M., González-Alemán, J.J. et al. Extraordinary (2024) 2021 snowstorm in Spain reveals critical threshold response to anthropogenic climate change. *Commun Earth Environ* 5, 339. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01503-7>

IPCC (2023). “Summary for Policymakers.” Frontmatter. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.

Johnson, G.C., Lyman, J.M. (2020) Warming trends increasingly dominate global ocean. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0822-0>.

López-Rey, D., Monjo, R., y Sánchez, E. (2024) Caracterización de la precipitación en la Meseta Sur de la Península Ibérica mediante el índice de Gini y tendencias de los días de lluvia (1951-2020). XXXVI Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española.

López-Rey Lumbreras, D. (2013). La riada. Polán, 30 de agosto de 1926, Ledoria. Toledo.

López-Rey Lumbreras, D. (2018) Extremos meteorológicos: analizar el pasado para entender el presente. II Informe de Cambio Climático en Castilla-La Mancha. Toledo. 53-65.

- López-Rey Lumbreras, D., Yagüe Anguís, C. & Zurita García, E. (2007) Inundaciones y riadas históricas en la provincia de Toledo Análisis meteorológico e impacto social. *Divulgameteo*. <https://www.divulgameteo.es/Inundaciones-y-riadas-historicas-en-la-provincia-de-Toledo-Analisis-meteorologico-e-impacto-social/>
- Morales, J. et al. (2022) Hazard Characterization of the Annual Maximum Daily Precipitation in the Southwestern Iberian Peninsula (1851–2021). *Water* 2022, 14, 1504. <https://doi.org/10.3390/w14091504>
- Oria Iriarte, P. (2022) Frecuencia e intensidad de la precipitación asociada a grandes borrascas en la Península Ibérica, Retos del Cambio Climático: impactos, mitigación y adaptación. 151-160.
- Pisano A, Marullo S, Artale V, et al. (2020) New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. <https://doi.org/10.3390/rs12010132>.
- Roa Alonso, A., Bello Millán, F.J. (2024). La dana de septiembre de 2023 en España. Predecibilidad, desarrollo de un SCM y efectos. XXXVI Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española y el XXII Encuentro Hispano – Luso de Meteorología
- Senent-Aparicio, J. et al. (2023) Recent precipitation trends in Peninsular Spain and implications for water infrastructure design, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 45, 101308, ISSN 2214-5818, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101308>.
- Ye, B. et al. (1998) CAPE Variations in the Current Climate and in a Climate Change. *J. Climate*, 11, 1997–2015, <https://doi.org/10.1175/1520-0442011<1997:CVITHCC>2.0.CO;2>.
- Zhang Y., & Fueglistaler, S. (2019). Mechanism for increasing tropical rainfall unevenness with global warming. *Geophysical Research Letters*, 46, 14836–14843. <https://doi.org/10.1029/2019GL086058>

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS URBANAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES EN EL BARRANCO DE SANTOS (SANTA CRUZ DE TENERIFE)

Nerea MARTÍN RAYA¹, Abel LÓPEZ DÍEZ¹, Jaime DÍAZ PACHECO¹, Pedro DORTA ANTEQUERA¹ y Jordan CORREA GONZÁLEZ¹

¹*Cátedra Universitaria "Reducción del Riesgo de Desastres y Ciudades Resilientes". Universidad de La Laguna*

nmartinr@ull.edu.es, alopezd@ull.edu.es, jdiazpac@ull.edu.es,
pdorta@ull.edu.es, jcorreag@ull.edu.es

RESUMEN

Las inundaciones son la amenaza de origen natural que mayores pérdidas causan anualmente en el mundo. La expansión de las ciudades y el crecimiento de la población urbana han hecho que estos espacios sean los más amenazados, principalmente, debido a la mala planificación, la ocupación de la red de drenaje y el sellado del suelo. Dentro de esta línea, este estudio se centra en analizar los problemas de inundación en la cuenca baja del Barranco de Santos en la ciudad de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias), una sección especialmente susceptible a sufrir inundaciones repentinas debido a los patrones de precipitación extrema típicos del régimen mediterráneo. Además, el aumento de lluvias torrenciales a consecuencia del cambio climático y la creciente irregularidad en las precipitaciones pueden estar agravando considerablemente el problema. En este trabajo, se ha desarrollado un mapa de peligro de inundación combinando el uso de modelos hidráulicos tradicionales, cuyo caudal máximo arroja 480 m³/s (T=500 años), con un inventario de puntos de daño registrados en eventos históricos. Los resultados demuestran que, para comprender e identificar las zonas propensas a sufrir inundaciones en este tipo de áreas altamente urbanizadas y de pendiente topográfica acusada, deben explorarse causas que tienen mayor relación con el drenaje urbano que con el desbordamiento de los cauces.

Palabras clave: susceptibilidad de inundación, modelización hidráulica, precipitaciones extremas, caudal máximo.

ABSTRACT

Floods are the natural hazard that causes the greatest losses worldwide each year. The expansion of cities and the growth of urban populations have made urban areas the most threatened, primarily due to poor planning, occupation of drainage networks, and soil sealing. In this context, this study focuses on analyzing flood-related problems in the lower basin of the Barranco de Santos in the city of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands), a section particularly susceptible to flash floods due to the extreme precipitation patterns typical of Mediterranean regimes. Moreover, the increase in torrential rains as a consequence of climate change and the growing irregularity in rainfall may be significantly worsening the issue. In this work, a flood hazard map was developed by combining traditional hydraulic models, which estimate

a maximum flow of 480 m³/s (T=500 years), with an inventory of damage points recorded during historical events. The results show that, in order to understand and identify flood-prone areas in highly urbanized regions with steep topographic slopes, causes related to urban drainage systems should be explored, rather than just focusing on river overflow.

Key words: flood susceptibility, hydraulic modeling, extreme precipitation, peak flow discharge

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones repentinas (*flash floods*), a escala mundial, son consideradas las amenazas naturales más frecuentes y devastadoras con numerosas víctimas y graves pérdidas económicas (Bui *et al.*, 2019; Pham *et al.*, 2020). Además, este tipo de inundaciones son propias de ambientes áridos o semiáridos de espacios costeros, con sistemas montañosos próximos, donde discurren cuencas de reducidas dimensiones y los cauces se encuentran secos la mayor parte del año, como, por ejemplo, el caso de la costa mediterránea (Alipour *et al.*, 2020)

Las inundaciones, así como otros fenómenos hidrometeorológicos, que con un alto nivel de confianza seguirán aumentando en intensidad y magnitud en el actual contexto de cambio climático (IPCC, 2021), unido al aumento de la exposición en áreas de alta susceptibilidad y peligrosidad han generado una creciente preocupación e interés en analizar las causas que pueden estar incrementando el riesgo frente a este tipo de amenazas (Maranzoni *et al.*, 2023). El aumento de la población urbana y la expansión de las ciudades hacen que, cada día, miles de personas sean cada vez más vulnerables a este peligro, sobre todo, debido al aumento de la impermeabilidad del suelo y la disminución de la infiltración. En este sentido, si bien para el análisis del riesgo de inundación, es muy importante la estimación del peligro, en términos de intensidad y magnitud espaciotemporal de los *drivers* (lluvias intensas, tormentas, deshielo, etc), también deben ser analizadas las causas que están generando las inundaciones en la ciudad. En numerosas ocasiones dichas causas están relacionadas con el desarrollo del tejido urbano y la existencia de un drenaje mal dimensionado, o por lo menos, que no fue planificado ponderando los extremos pluviométricos.

En ese contexto, este trabajo analiza las causas que intervienen en el riesgo de inundación en la cuenca más importante de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias), el barranco de Santos. Una cuenca urbana donde, recurrentemente, se producen importantes pérdidas económicas, e incluso humanas, debido a episodios de inundaciones relámpago (Marzol, 2002). El presente trabajo analiza la susceptibilidad de inundación combinando el uso de un modelo tradicional de análisis hidráulico del comportamiento de los caudales en las cuencas, con otros métodos basados en el histórico de impactos locales.

2. ÁREA DE ESTUDIO

En términos generales, el régimen pluviométrico del archipiélago canario se asemeja a los patrones del mundo mediterráneo, caracterizándose por una estacionalidad

marcada con los máximos de precipitación concentrados en los meses más fríos, seguidos de una marcada sequía estival. En general las precipitaciones son escasas, irregulares y con alta intensidad horaria. Los coeficientes de variación son los más altos de toda España, y el índice de concentración diario supera el 0.63 (Máyer y Marzol, 2017). En el caso de Santa Cruz de Tenerife, la media anual de lluvia en la ciudad apenas alcanza los 230 mm. El coeficiente de variación se sitúa en torno al 40%, de manera que se alternan años muy secos con otros muy lluviosos, siendo habitual la ocurrencia ocasional de episodios de torrencialidad de la lluvia. Estos últimos son los que desencadenan eventos de inundación que han causado importantes daños humanos y materiales.

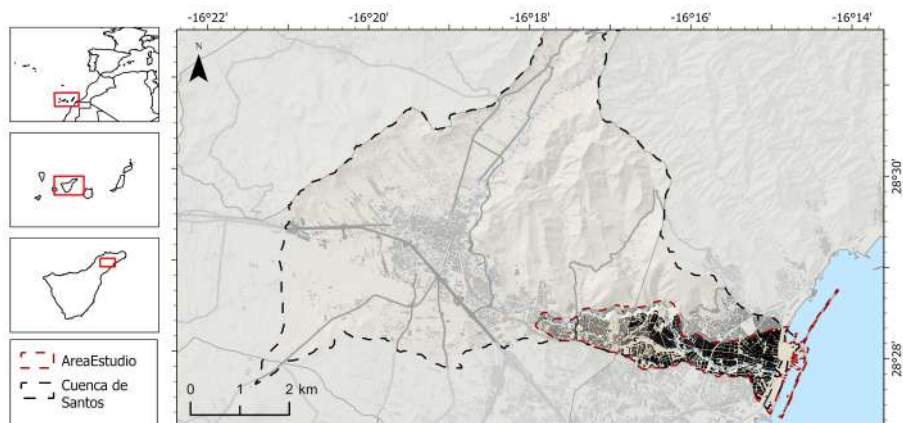


Fig. 1. Localización del área de estudio

Situada en el municipio de Santa Cruz de Tenerife (Islas Canarias), la cuenca del barranco de Santos abarca 42 km² y discurre por una rampa de pendiente moderada conformada por la acumulación de materiales volcánicos (Fig. 1). En ella se encuentran dos de las ocho Áreas con Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) establecidas por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO, 2024) para la demarcación hidrográfica de Tenerife. En las últimas décadas, la ciudad de Santa Cruz de Tenerife ha sufrido varios episodios de inundación especialmente graves y ha sido afectada de manera directa por el evento de precipitación más importante, registrado el 31 de marzo de 2002. En estos eventos, los impactos de inundación en torno a la cuenca baja del Barranco de Santos donde se sitúa el centro histórico de la ciudad fueron importantes. Las lluvias de este día constituyen el episodio de mayor intensidad horaria (160 mm/h) y volumen de precipitación (232,6 mm) de la serie. Durante el evento se produjeron importantes daños, 8 víctimas y las pérdidas estimadas en 218 Mill € (López *et al.*, 2018).

2. MÉTODOS

En esta investigación se delimitan las áreas de mayor susceptibilidad de inundación empleando una metodología cuantitativa que combina el uso de métodos deductivos

para la modelización hidráulica, el cálculo de periodos de retorno y estimación del caudal, con otros métodos de carácter inductivo basado en la observación de eventos de inundación (registro histórico de incidentes).

2.1. Modelización hidráulica basada en extremos de precipitación y caudal

La modelización hidráulica, como método para el análisis del riesgo de inundación, es ampliamente utilizada a nivel global (Teng et al., 2017). Habitualmente se presenta como una metodología secuencial. En primer lugar, se calculan los periodos de retorno y sus respectivas curvas IDF con los datos diezminutales registrados entre 1996 y 2022 en la estación de la AEMET de Santa Cruz de Tenerife (C449C), utilizando la fórmula de Gumbel III ($T = 500$). Por otro lado, para el cálculo de caudales se utiliza el método del hidrograma unitario propuesto por el Soil Conservation System (SCS) (Shatnawi and Ibrahim, 2022). En este caso, como tormenta de diseño, se ha considerado un evento de 2 horas de duración en un periodo de retorno de 500 años (T_{500}) a través de la metodología de los bloques alternos (Pratama et al., 2021). Además, se obtiene el coeficiente de Manning y el número de curva, a partir del umbral de escorrentía (MITECO, 2011) y el tiempo de retraso que se calcula con la siguiente fórmula: (Shatnawi and Ibrahim, 2022).

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{1900S^{0.5}}$$

Donde L es la longitud del cauce principal y S, la pendiente media de la cuenca.

La transformación lluvia-escorrentía y el correspondiente cálculo del caudal máximo (Q_{500}) se realiza utilizando HEC-HMS. Finalmente, se realiza la modelización de zonas inundables con el software HEC-RAS, que ha sido utilizado a escala mundial en numerosos casos de estudio (Knelb et al., 2005; Khattak et al., 2016; Ogras and Onel, 2020, entre otros)

2.2. Identificación de incidentes registrados en episodios históricos

Entre los métodos inductivos para analizar el peligro de inundación en entornos urbanos se encuentra la identificación de áreas de impacto constatado (Cherqui et al., 2015). Para cubrir este objetivo, y cumplimentar las zonas susceptibles obtenidas por la modelización hidráulica, se ha empleado un inventario de puntos de incidentes de daño producidos por impactos de eventos de inundación en el estudio de riesgos del Plan General de Ordenación de la ciudad de Santa Cruz de Tenerife (Ayuntamiento Santa Cruz de Tenerife, 2005). Para esta investigación se realiza un proceso de digitalización de los puntos a un SIG trasladando la clasificación de los impactos según se encuentra recogida en el PGO: (1) falta o insuficiente capacidad de drenaje, (2) incorporación de acarreo, (3) obstrucción de la red de drenaje y (4) peligro de desbordamiento. Con estas categorías se ha realizado un análisis básico estadístico-descriptivo.

2.3. Generación de la cartografía de susceptibilidad

En primer lugar, se realiza un análisis kernel de los incidentes identificados para establecer una zonificación de esta variable (Zhang et al., 2023). Posteriormente, a este resultado se le practica un producto con la capa que contiene los valores de las zonas inundables. El resultado se homogeneiza utilizando el método de rupturas naturales (Rahadiano *et al.*, 2015) tal y como se suele hacer para establecer diferentes niveles de amenaza en los análisis orientados a evaluar el riesgo (Iglesias et al., 2021).

1. RESULTADOS

Analizando los periodos de retorno calculados, la máxima precipitación esperada en 500 años es de 43,21 mm en 10 minutos y 258,33 mm en 12 horas. Al aplicar estos datos para obtener el hietograma de tormenta se observa cómo, con un total de 212,8 mm, el máximo de precipitación se alcanza durante la primera hora (62,02 mm). Por su parte, el caudal máximo de avenida se estima en 483,9 m³/s, y se produce a las dos horas de comenzar la tormenta, debido al tiempo de concentración de la cuenca (*Fig. 2*). Datos similares se registran en cuencas mediterráneas con cauces efímeros (Rinat et al., 2018; Benito et al., 2020).

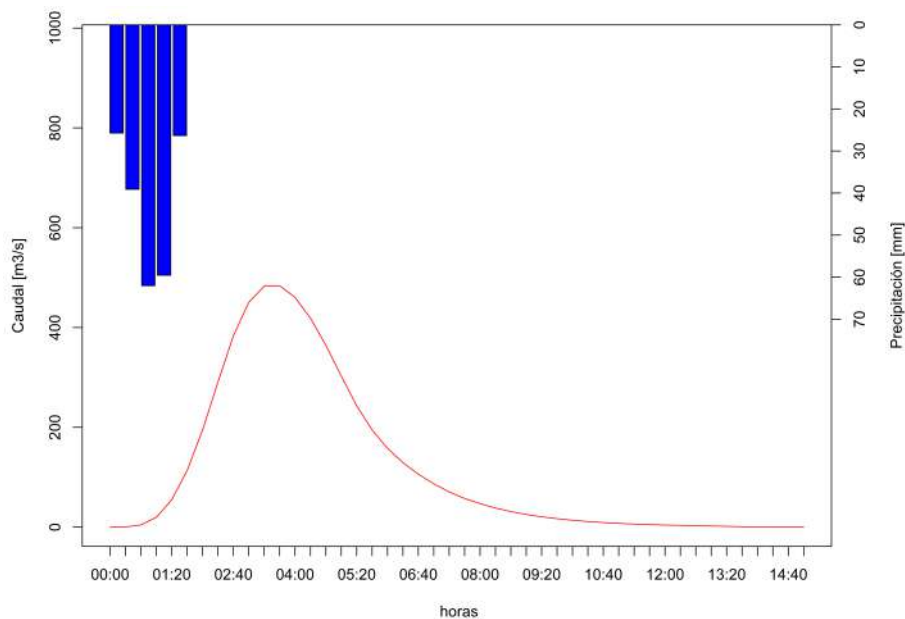


Fig. 2. Hietograma e hidrograma del Barranco de Santos ($T=500$)

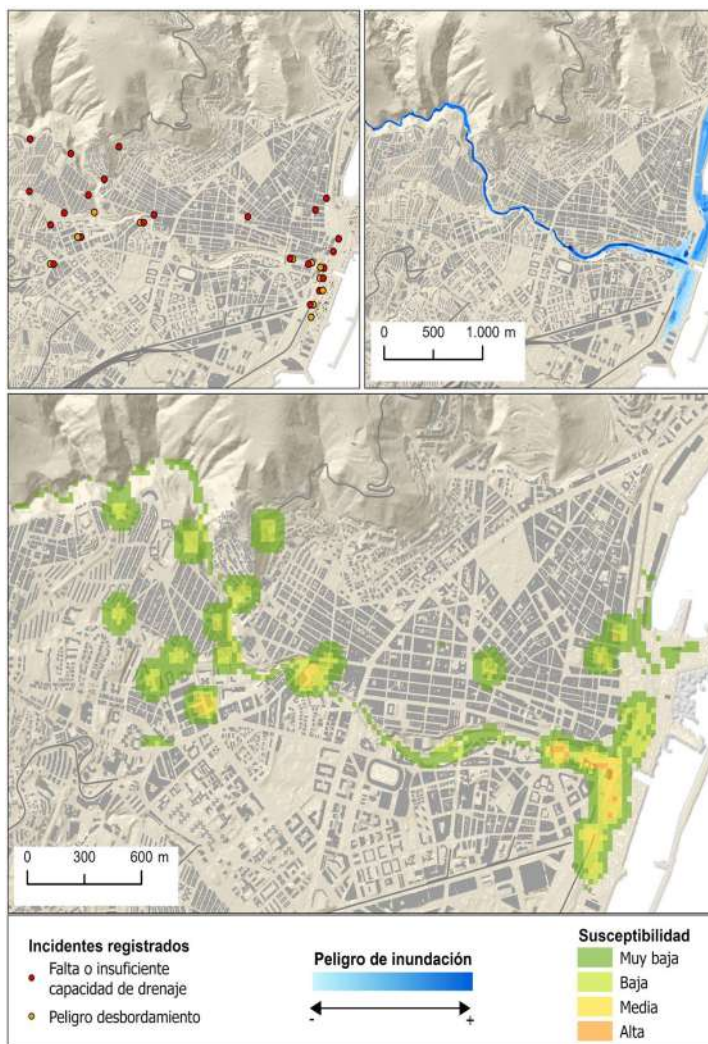


Fig. 3. Susceptibilidad de inundación en el Barranco de Santos

La modelización de las láminas de inundación cubre un total de 15,15 ha, correspondiendo con el 2,9% del área total de la cuenca. La mayor peligrosidad se encuentra en la desembocadura, donde la lámina de agua se expande más allá del lecho del cauce.

La ciudad registra un total de 34 incidentes en la superficie urbana analizada en el entorno de la cuenca del Barranco de Santos. La mayoría de estos se corresponden con falta o insuficiente capacidad de drenaje (67,7%), mientras que un 32,5% con peligro de desbordamiento. Cabe destacar que, de todos estos puntos, solo el 47% (16 puntos) se localizan en zonas inundables. El resto se encuentran diseminados a lo largo

de la cuenca demostrando un claro problema con el drenaje urbano y el sellado del suelo.

En este sentido, la integración de las dos metodologías muestra como las zonas con mayor susceptibilidad se sitúan en la desembocadura y en algunos sectores aislados y separados ligeramente del cauce principal. Incorporando ambos análisis, el territorio analizado susceptible de sufrir algún evento de inundación se encuentra en torno al 11%, donde un 1,2% corresponde con peligro moderado-alto y un 10,1% posee una peligrosidad baja. En el 88,6% del área analizada restante, el peligro por inundación es prácticamente inexistente (Fig. 3)

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En zonas urbanas con climas semiáridos, donde el crecimiento ha sido muy rápido, y sin planificación territorial, es habitual que los cauces de los barrancos, normalmente secos, sean ocupados (Pino and Hormazábal, 2016). Por ello, inventariar y analizar puntos problemáticos relacionados con las inundaciones relámpago es una cuestión que ha sido abordada en numerosas ocasiones (Marlow et al., 2011; López-Díez et al., 2019). La falta o insuficiente capacidad de drenaje debido a la construcción insuficiente de obras de desagüe para el caudal máximo de avenida es una de las cualidades señaladas para este tipo de ciudades (Hassan et al., 2022) y así se pone de manifiesto en el caso del barranco de Santos.

Del mismo modo, los caudales máximos obtenidos son equiparables a los registrados en ambientes mediterráneos (Estrany et al., 2010), donde las precipitaciones de alta intensidad horaria generan importantes inundaciones. Si se comparan los resultados con el mayor evento de precipitación acontecido en Tenerife (31 de marzo de 2002) vemos que poseen una alta similitud. En apenas dos horas y media cayeron 232 mm y dentro de los primeros 120 minutos de la tormenta ya se habían registrado 188,4 mm mientras que la tormenta simulada en este trabajo recoge 212 mm.

Por otro lado, actualmente, existen multitud de trabajos orientados al mapeo y análisis de zonas inundables mediante la modelización espacial de su expansión, calado e, incluso en algunos casos, velocidad en función de los diferentes periodos de retorno (Anni et al., 2020). Sin embargo, para comprender e identificar las zonas propensas a ser afectadas por *flash floods*, especialmente en áreas altamente urbanizadas, se hace necesario combinar metodologías deductivas capaces de modelizar el comportamiento de los cauces, con otros métodos de observación empírica, que permiten identificar áreas de peligro vinculadas al drenaje urbano y a la precipitación *in situ*. Por ello, la realización de un mapa de susceptibilidad de inundación de detalle que integre ambas variables analizadas en este trabajo puede mejorar el análisis de peligrosidad de la ciudad.

Por último, es importante señalar que en el actual contexto de cambio climático pueden acontecer episodios de lluvia extrema que podrían modificar el nivel de peligrosidad y riesgo de las inundaciones. Por ello, es necesario que en futuros estudios se puedan integrar las proyecciones climáticas de precipitación que permitan definir mejor los caudales máximos de avenida de cara al diseño de infraestructuras de drenaje eficientes y a tomar las acciones de reducción del riesgo de desastres de inundación pertinentes. Además, este trabajo deja abierta la posibilidad de desarrollar

nuevas investigaciones que incorporen datos relacionados con la vulnerabilidad y exposición, para obtener una visión integral y pormenorizada del riesgo de la zona analizada.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades bajo el proyecto “Herramientas para la prevención y gestión de los impactos sociales de inundaciones en áreas litorales”, con referencia PID2021-122500OB-I00. Los autores Nerea Martín Raya y Jordan Correa González se encuentran disfrutando de un contrato predoctoral FPU financiado por el Ministerio de Universidades.

REFERENCIAS

- Alipour, A., Ahmadalipour, A., & Moradkhani, H. (2020). Assessing flash flood hazard and damages in the southeast United States. *Journal of Flood Risk Management*, 13(2), e12605. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12605>
- Anni, A. H., Cohen, S., & Praskievicz, S. (2020). Sensitivity of urban flood simulations to stormwater infrastructure and soil infiltration. *Journal of Hydrology*, 588, 125028. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125028>
- Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife (2005) PGO. Plan General de Ordenación de Santa Cruz de Tenerife. Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife. Available at: <https://www.urbanismosantacruz.es/sites/default/files/Planeamiento/AB-PGOU92/BOC29-06>
- Benito G, Sanchez-Moya Y, Medialdea A, Barriendos M, Calle M, Rico M, *et al.* (2020) Extreme floods in small mediterranean catchments: long-term response to climate variability and change. *Water*; 12(4):1008. <https://doi.org/10.3390/w12041008>
- Bui, D. T., Tsangaratos, P., Ngo, P. T. T., Pham, T. D., & Pham, B. T. (2019). Flash flood susceptibility modeling using an optimized fuzzy rule-based feature selection technique and tree-based ensemble methods. *Science of the total environment*, 668, 1038-1054. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.422>
- Cherqui, F., Belmeziti, A., Granger, D., Sourdril, A., & Le Gauffre, P. (2015). Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures. *Science of the Total Environment*, 514, 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.027>
- Estrany, J., Garcia, C., & Alberich, R. (2010). Streamflow dynamics in a Mediterranean temporary river. *Hydrological sciences journal*, 55(5), 717-736. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.493740>
- Hassan BT, Yassine M, Amin D. (2022) Comparison of urbanization, climate change, and drainage design impacts on urban flashfloods in an arid region: case study, New Cairo, Egypt. *Water*; 14(15):2430. <https://doi.org/10.3390/w14152430>.
- Iglesias, V., Braswell, A. E., Rossi, M. W., Joseph, M. B., McShane, C., Cattau, M., ... & Travis, W. R. (2021). Risky development: Increasing exposure to natural hazards

- in the United States. *Earth's future*, 9(7), e2020EF001795. <https://doi.org/10.1029/2020EF001795>
- IPCC (2021). *Cambio Climático 2021: Un resumen para todo el mundo*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Spanish.pdf
- Khattak, M. S., Anwar, F., Saeed, T. U., Sharif, M., Sheraz, K., & Ahmed, A. (2016). Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: a case study of Kabul River. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1375-1390.
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- López Díez, A., Dorta, P., Díaz Pacheco, J., & Caraballo Acosta, O. (2018). Consecuencias de los eventos meteorológicos de rango extraordinario en Canarias: temporales de viento, inundaciones y fenómenos costeros (1996-2016). XI Congreso de la Asociación Española de Climatología <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9953>
- López Díez, A., Máyer Suárez, P., Díaz Pacheco, J., & Dorta Antequera, P. (2019). Rainfall and flooding in coastal tourist areas of the Canary Islands (Spain). *Atmosphere*, 10(12), 809. <https://doi.org/10.3390/atmos10120809>
- Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C. (2023). Quantitative flood hazard assessment methods: A review. *Journal of Flood Risk Management*, 16(1), e12855. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12855>
- Marlow D, Pearson L, MacDonald DH, Whitten S, Burn S. (2011) A framework for considering externalities in urban water asset management. *Water Sci. Technol.*;64(11):2199–206
- Marzol Jaén, M. V. (2002). Lluvias e inundaciones en la ciudad de Santa Cruz de Tenerife. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 3.
- Máyer, P., Marzol, M. W., & Parreño Castellano, J. M. (2017). Precipitation trends and a daily precipitation concentration index for the mid-eastern Atlantic (Canary Islands, Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*. <https://doi.org/10.18172/cig.3095>
- Ministerio de transición ecológica (2024). Áreas con riesgo potencial significativo de inundación. Cartografía digital. Disponible at: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/arsps.html>
- Ministerio para la Transición Ecológica, MITECO (2011). *Guía Metodológica Para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*, 1st ed.; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino: Madrid, Spain, pp. 19–52.
- Ogras, S., & Onen, F. (2020). Flood analysis with HEC-RAS: a case study of Tigris River. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2020/6131982>
- Pham, B. T., Avand, M., Janizadeh, S., Phong, T. V., Al-Ansari, N., Ho, L. S., Das, S., Le, H. V., Amini, A., Bozchaloei, S. K., Jafari, F., & Prakash, I. (2020). GIS Based Hybrid Computational Approaches for Flash Flood Susceptibility Assessment. *Water*, 12(3), 683. <https://doi.org/10.3390/w12030683>

- Pino A, Hormazábal N. (2016) Informal settlements: Reinterpreting rural imaginary in urban areas: The case of Valparaiso's ravines. *Habitat Int*; 53:534–45. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.12.014>.
- Pratama, M. I., Rohmat, F. I. W., Farid, M., Adityawan, M. B., Kuntoro, A. A., & Moe, I. R. (2021, April). Flood hydrograph simulation to estimate peak discharge in Ciliwung river basin. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 708, No. 1, p. 012028). IOP Publishing. 10.1088/1755-1315/708/1/012028
- Rahadiano, H., Fariza, A., & Hasim, J. A. N. (2015). Risk-level assessment system on Bengawan Solo River basin flood prone areas using analytic hierarchy process and natural breaks: Study case: East Java. In *2015 international conference on data and software engineering (ICoDSE)* (pp. 195-200). IEEE. 10.1109/ICODSE.2015.7436997
- Rinat Y, Marra F, Zoccatelli D, Morin E. (2018) Controls of flash flood peak discharge in Mediterranean basins and the special role of runoff-contributing areas. *J Hydrol*; 565:846–60. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.055>
- Shatnawi, A., & Ibrahim, M. (2022). Derivation of flood hydrographs using SCS synthetic unit hydrograph technique for Housha catchment area. *Water Supply*, 22(5), 4888-4901.
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., & Kim, S. J. E. M. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modelling & software*, 90, 201-216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- Zhang H, Jia H, Liu W, Wang J, Xu D, Li S, *et al.* (2023) Spatiotemporal information mining for emergency response of urban flood based on social media and remote sensing data. *Remote Sens (Basel)*; 15(17):4301. <https://doi.org/10.3390/rs15174301>

CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE TREWARTHA EN LA ESPAÑA PENINSULAR Y BALEARES ENTRE 1953 Y 2022

David ORGAMBIDES GARCÍA¹, David CORELL CUSTARDOY¹, María José ESTRELA NAVARRO², Juan Javier MIRÓ PÉREZ²

¹*Departamento de física. Universidad de Valencia.*

²*Departamento de geografía. Universidad de Valencia.*

orgarda@uv.es, david.corell@uv.es, maria.jose.estrela@uv.es, javier.miro-perez@uv.es

RESUMEN

Analizamos la climatología de la España peninsular y Baleares mediante la clasificación climática de Köppen-Trewartha (KTC) empleando datos entre los años 1953 y 2022. El lapso de tiempo se divide a saltos de década en cinco periodos de treinta años. La clasificación KTC busca ajustarse con precisión a entornos áridos, a la vez que distingue fielmente entre entornos húmedos y mediterráneos en zonas subtropicales, si bien peca de falta de esa distinción en ambientes templados. A partir de datos mensuales y anuales para un total de 3.668 estaciones, se calcula la climatología KTC y se representan las estaciones y su clima en una serie de mapas temporales, que se comparan para evaluar la evolución temporal de la climatología en el área de estudio. Descubrimos que se ha producido una expansión del dominio climático subtropical a expensas del templado, mayormente en la Submeseta Sur y en partes de la costa norte. La aridez ha incrementado, de forma más notable en la Depresión del Ebro, donde la zona árida se ha duplicado y constriñe al ámbito templado, que solo aumenta en zonas de alta montaña. Los cambios en los climas reflejan la tendencia climática observada y coinciden en gran parte con otros estudios similares sobre clasificación climática en España.

Palabras clave: Köppen-Trewartha, clasificación climática, estaciones meteorológicas, España, cambio climático.

ABSTRACT

We analyze the climatology of peninsular Spain and the Balearic Islands through the use of the Köppen-Trewartha climatic classification (KTC) employing data between the years 1953 and 2022. The timespan of the study is divided by decades in order to produce five 30 year-long periods. The KTC classification aims to fit arid environments more precisely, while establishing a clear distinction between humid and mediterranean environments in subtropical zones, albeit it lacks such a distinction for temperate environments. Using monthly and annual data for a total of 3,668 weather stations we calculate KTC climatology for each of them and visually represent the stations and their climate for each of the periods in order to evaluate the temporal evolution of the region's climate. We discovered the mediterranean domain has grown at the expense of the temperate one, mostly in the Southern Subplateau and

partes of the north coast. Aridity has increased, most notably in the Ebro Depression, where the arid zone has more than doubled, and restrains temperate environments, that have only expanded in high elevation areas. Changes in climate type reflect observed climatic changes in the study region, and fit well with other climate classification works in Spain.

Key words: Köppen-Trewartha, climate classification, weather stations, Spain, climate change.

1. INTRODUCCIÓN

La península ibérica, debido a su ubicación en el globo, se encuentra bajo la influencia de distintas masas de aire, que dan lugar a una importante variación regional de la climatología. Para poder clasificar a nivel espacial la climatología, suele recurrirse a clasificaciones climáticas, que emplean varios puntos de corte mediante variables climatológicas para diferenciar entre los distintos regímenes que pueden darse en un territorio. El primer gran ejemplo de clasificación climática fue propuesto por Köppen 1884, y revisada posteriormente, tanto por él, como por otros, para ajustar sus parámetros a la realidad de los biomas del globo. El uso de las clasificaciones permite no solo zonificar el clima, si no validar los resultados de modelos climáticos al comparar las predicciones con lo que se esperaría para un territorio (Peel et al, 2007; Beck et al, 2023).

Las clasificaciones también pueden emplearse como un indicador del efecto del cambio climático en una zona, ya que reflejan cambios en los regímenes de precipitaciones y en las temperaturas a lo largo del año, y al estar basadas mayormente en climas asociados a comunidades vegetales, permiten predecir el impacto que podría tener el cambio climático sobre la flora (Gavilán et al, 1998).

En el presente trabajo empleamos la clasificación climática de Köppen-Trewartha (KTC) descrita por Belda et al (2014) en una red de estaciones en la España peninsular y las Baleares, para obtener la climatología de las estaciones en 5 periodos móviles de 30 años que abarcan desde 1953 a 2023. El objetivo es detectar cambios en la climatología en el tiempo y estudiar el régimen climático de España mediante la clasificación empleada, comparándola con la tradicional Köppen-Geiger.

2. MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo consiste en la España peninsular y las islas Baleares. El territorio presenta una gran diversidad geográfica como resultado de su historia geológica, alternando tres tipos principales de relieve: valles/depresiones fluviales, mesetas, y sistemas montañosos. Los valles o depresiones son zonas bajas y llanas formadas por la erosión de cursos fluviales, y suelen proyectarse desde la costa al interior; las mesetas se ubican en el centro de la península, consistiendo en zonas llanas y elevadas, separadas por el Sistema Central. En la periferia de la península encontramos grandes elevaciones montañosas, como la Cordillera Cantábrica y el Pirineo por el norte, o el Sistema Bético al sur, además de Sierra

Morena y el Sistema Ibérico en el interior. La figura 1 muestra la zona de estudio, destacando las principales unidades del relieve mencionadas en el trabajo.



Fig. 1: Área de estudio, mostrando la topografía del territorio y resaltando los principales elementos del relieve.

Estas diferencias de relieve son clave para entender la climatología. Las cadenas montañosas, debido a su altura, dan lugar a climas más fríos, e impiden el paso de las precipitaciones, por lo que los frentes atlánticos no consiguen penetrar en zonas como la Depresión del Ebro o al este del Sistema Bético. En la costa norte predominan climas húmedos, con una precipitación más cuantiosa y distribuida a lo largo del año, mientras que las precipitaciones en el resto del territorio siguen un carácter mediterráneo. El régimen térmico es subtropical en la mayoría de zonas bajas, pero transiciona a un régimen templado en las mesetas y sistemas montañosos.

2.2. Clasificación climática de Köppen-Trewartha

Este trabajo emplea la clasificación climática propuesta por el estadounidense Glenn Thomas Trewartha, publicada originalmente en 1966, y modificada posteriormente. Esta clasificación es una derivada de la clasificación propuesta originalmente por Köppen. Trewartha modifica el criterio de aridez empleando una fórmula diferente que únicamente incluye la temperatura media anual y el porcentaje de precipitación en verano (de abril a septiembre); además de subdividir los climas templados de Köppen-Geiger (C) en climas subtropicales (C) y templados (D). La variante concreta de la clasificación de Köppen-Trewartha (KTC) utilizada en este estudio es la mostrada por Belda et al. (2014), que establece criterios extra para un clima mediterráneo, como aquellos subtropicales con menos de 890 mm de precipitación anual. Para el criterio de aridez se emplea la fórmula propuesta por de Castro et al. (2007), que presenta un mayor ajuste a las comunidades vegetales del globo. Las abreviaturas de los climas empleadas en este estudio corresponden a: BW (desértico),

BS (estepario), Cf (subtropical húmedo), Cs (mediterráneo), Do (oceánico), Dc (continental) y Eo (subpolar).

2.3. Fuentes de información

La base de datos empleada en este trabajo consiste en datos de precipitaciones y temperaturas (máximas y mínimas) para un conjunto de estaciones entre 1953 y 2022. Las estaciones pertenecen a las redes de AEMET, a nivel nacional, y AVAMET, a nivel de la Comunidad Valenciana. De entre todas las estaciones disponibles, únicamente se han tomado aquellas con al menos 7 años de datos en ambas variables. Las estaciones se han tratado utilizando la metodología descrita por Miró et al. (2015) para rellenar huecos, eliminar valores anómalos, y homogeneizar las series. En total, se dispone de valores diarios para 3.668 estaciones, de las cuales 3.616 pertenecen a AEMET y 52 a AVAMET.

2.4. Tratamiento de datos

La base de datos se trata con lenguaje de programación MATLAB R2024a para obtener la temperatura media de las estaciones, y obtener los valores mensuales y anuales requeridos para el cálculo de la clasificación climática. En ese mismo lenguaje se creó un código que calcula la clasificación climática de cada estación, que fue ejecutado para calcular los climas en cada uno de los cinco periodos empleados (del 1 al 5: 1953-1982, 1963-1992, 1973-2002, 1983-2012 y 1993-2022). Los climas obtenidos fueron representados mediante el software ArcGIS 10.8 para generar los mapas, y las gráficas fueron generadas con MATLAB.

3. RESULTADOS

El cálculo de los climas a nivel de estación para los distintos periodos es visible en la figura 2. Independientemente del periodo se pueden apreciar algunas generalidades sobre la ubicación de los climas. Empezando por los áridos, únicamente el cabo de Gata presenta un clima desértico durante todos los periodos, con algunas estaciones en Almería, Murcia y Alicante presentando este clima de forma intermitente. Los climas esteparios predominan en el cuadrante sureste, a sotavento del Sistema Ibérico, y en el sector central de la Depresión del Ebro, donde el Sistema Ibérico y el Pirineo bloquean las precipitaciones. Algunas estaciones en la Submeseta Sur, la depresión de Valencia y valles intramontanos en el Sistema Ibérico también presentan este clima. El clima mediterráneo es predominante en el litoral este, entre la frontera francesa y la prolongación del Bético en Alicante, Baleares incluidas; además de en el cuadrante sudoccidental, siendo mayoritario en Extremadura y el Valle del Guadalquivir, y prolongándose hacia la Submeseta Sur. En décadas recientes, el clima mediterráneo se ha expandido hacia la Submeseta Sur, y aparece en algunas estaciones en Galicia y la costa cantábrica. El clima subtropical húmedo aparece únicamente en algunas zonas bajas del litoral norte, donde el requerimiento de meses por encima de 10 grados se cumple por escaso margen, así como en las estribaciones occidentales de Sierra Morena.

Con respecto a los climas templados, predomina el clima oceánico sobre el continental. El oceánico se distribuye en las zonas medias y altas de la costa norte, en

las elevaciones montañosas de toda la península, y se expande a la Submeseta Norte y partes de la Submeseta Sur. Cabe destacar que la diferenciación entre climas mediterráneos y húmedos, bajo la clasificación KTC, únicamente aplica en climas subtropicales y no en templados, por lo que a pesar de que muchas zonas de ambas submesetas cumplen con los criterios hídricos para ser considerados mediterráneos, no cumplen con los térmicos, por lo que se clasifican como oceánicos. En las partes altas de las montañas aparecen climas continentales, y en las zonas más elevadas del Pirineo y el Sistema Bético hay climas subpolares.

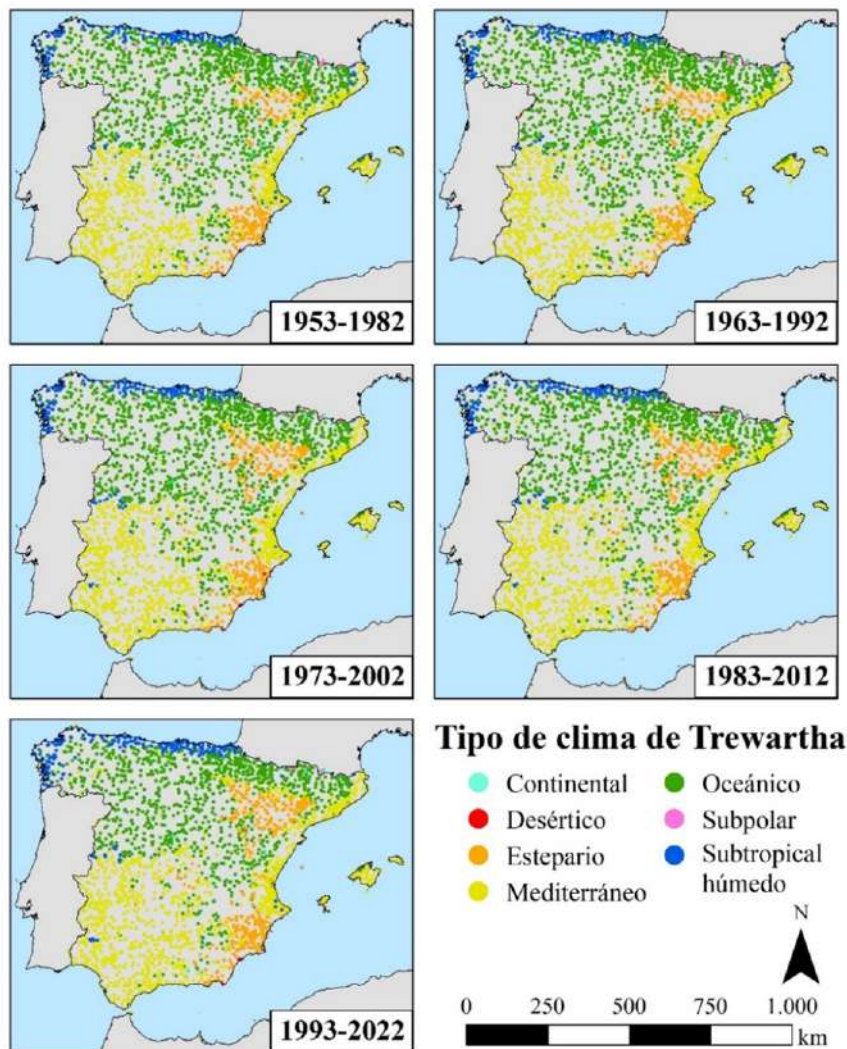


Fig. 2: Evolución de la clasificación climática de Trewartha a nivel de estación para los periodos 1953-1982, 1963-1992, 1973-2002, 1983-2012 y 1993-2022.

Al comparar los periodos 1 y 5 para ver los cambios de clima, obtenemos que 3126 estaciones (un 85,2%) no han experimentado cambio de clima. De entre las 542 estaciones que han cambiado de clima, el cambio mayoritario ha sido de Do a Cs, con 244 estaciones, seguido del cambio de Do a BS con 104, y de Cs a BS con 54. Estos cambios nos indican un incremento de la temperatura, al pasar de climas templados a subtropicales, pero también de la aridez a nivel general, tanto por cambios en el patrón de precipitaciones como por una reducción de esta. 4 estaciones han experimentado un incremento de precipitación suficiente para dejar de ser esteparias (3 pasan a Cs y 1 a Do), y 3 se han enfriado lo bastante para pasar de subtropical a templado (todas oceánico). El mayor incremento se observa en el clima BS, que incrementa su número de estaciones en un 44%, mientras que los climas Dc y Eo descienden en un 45% y 54% respectivamente, y desaparecen de las estaciones en ciertas zonas montañosas. Con respecto a la evolución temporal de los distintos climas, la figura 3 muestra que estaciones han experimentado un cambio de clima entre el periodo 1 y el 5. En la zona norte se observa una tendencia al incremento de temperaturas, pasando una cierta cantidad de estaciones de un régimen templado a uno subtropical, pero también se observa que en algunos puntos comienza a extenderse un clima mediterráneo, ya que al pasar al ámbito subtropical se puede realizar una distinción. Las zonas de montaña, a rasgos generales, muestran los cambios más universales, en especial en el Pirineo, donde gran parte de las estaciones que poseían un clima subpolar en el periodo 1 han transicionado a un clima oceánico.

En el litoral mediterráneo al norte de Alicante se aprecia un incremento de la aridez, en el que estaciones con clima oceánico pasan a ser mediterráneo, y el clima estepario comienza a extenderse por la depresión de Valencia y hasta en algunas zonas de Cataluña. En la Depresión del Ebro es donde los cambios son más aparentes. El número de estaciones que registraban clima estepario en el periodo 1 se ha duplicado para el periodo 5, con una expansión de la aridez desde la zona central hacia los bordes. La expansión de la aridez afecta también a los climas oceánicos circundantes, por lo que muchos de ellos han pasado a ser mediterráneos, al igual que en el interior de Cataluña, lo que apunta tanto a un descenso de precipitación como a un aumento de temperatura en toda la zona este. Este cambio constriñe el ámbito territorial de los climas templados hacia altitudes cada vez más elevadas. Otra zona con cambios importantes es la Submeseta Sur, donde el incremento de temperatura entre el periodo 1 y el 5 ha provocado que muchas estaciones fronterizas entre clima Do y Cs superaran el límite de 8 meses por encima de 10°C para ser consideradas subtropicales. Esto provoca que los climas mediterráneos avancen hacia el este, aunque algunas estaciones pasan a tener clima BS cerca de Toledo y en Albacete. La Submeseta Norte y el Valle del Guadalquivir destacan por apenas tener cambios en la climatología de sus estaciones.

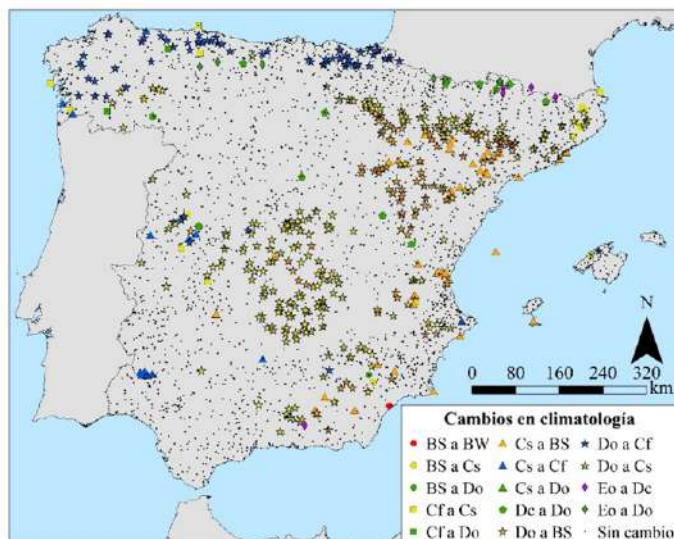


Fig. 3: Ubicación de las estaciones que han experimentado un cambio de clima entre el Periodo 1 (1953-1982) y el Periodo 5 (1993-2022). El color de denota el tipo de clima final (P5), mientras que la forma denota el tipo de clima inicial (P1).

Si analizamos la distribución de los climas en los diferentes periodos se observa el paulatino crecimiento de climas mediterráneos en detrimento de los oceánicos. En el periodo 1 los climas oceánicos representaban el 46,5% de las estaciones, que ha descendido hasta un 35,7% para el periodo 5; mientras que el mediterráneo pasa de un 35% a un 40,3% del total de estaciones. Se observa que la mayoría de cambios se producen entre los periodos 1 y 3, mientras que el cambio en los periodos 4 y 5 es menor, especialmente en climas subtropicales húmedos y esteparios, que permanecen estáticos, entorno a un 9,5% y un 13,6% de las estaciones, respectivamente. Estas tendencias parecen apuntar a un incremento de la temperatura entre los periodos 1 y 3, que empujaría estaciones oceánicas hacia el régimen subtropical, acompañado de un incremento de la aridez, que provocaría la expansión del clima mediterráneo.

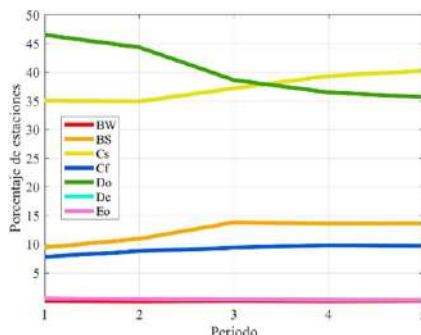


Fig. 4: Porcentaje de estaciones pertenecientes a cada tipo de clima en cada uno de los periodos descritos.

4. DISCUSIÓN

La clasificación de la Submeseta Norte y amplias zonas de la Submeseta Sur bajo un régimen oceánico resulta problemática, ya que las condiciones de la zona son más similares a las de un entorno mediterráneo que a las de un clima oceánico al uso. Esto se debe a que la clasificación de Trewartha no posee un tipo de clima “mediterráneo templado”, y únicamente tiene en cuenta climas mediterráneos cuando su régimen es subtropical. En estudios como el de Chazarra Bernabé et al (2023), que emplea la clasificación de Köppen-Geiger (que no separa templado de subtropical y aplica “mediterraneidad” a ambos), se observa que la Submeseta Norte y Galicia corresponde, precisamente, a un clima mediterráneo templado, que Trewartha asigna a oceánico. Por ende, una inclusión del criterio de “mediterraneidad” de los climas C podría extenderse a los D para generar un tipo de clima Ds que se ajustara a la realidad del terreno.

El incremento de la aridez en la depresión del Ebro se relaciona a un descenso general de la precipitación, pues el 75% de las estaciones ubicadas dentro de la cuenca del río experimentaron un descenso de precipitación entre 1951 y el 2000 (De Luis et al, 2007), también visible en el Sistema Ibérico a fechas más recientes (Miró et al, 2023). En Valencia, la aridificación se asocia a un debilitamiento de las precipitaciones de frentes atlánticos y a un ligero incremento de las precipitaciones por ciclogénesis mediterránea (Estrela et al, 2024). Los cambios de clima concentrados en las primeras partes del estudio coinciden con un intervalo de incremento de las temperaturas medias entre 1970 y 1990 en España (Sandonis et al, 2021), y el incremento de temperatura ha condicionado los cambios de clima mayoritarios, de oceánico a subtropical húmedo.

Al comparar nuestros resultados con los obtenidos por Belda et al (2014), con la misma clasificación, se observan diferencias significativas. Si bien clasifican buena parte de ambas mesetas como oceánico, su modelo resulta en una amplia extensión de climas subtropicales húmedos en zonas de Extremadura y el Valle del Guadalquivir, que son mediterráneos en nuestro caso. Esto también ocurre en la costa oriental de la península, donde el modelo de Belda predice climas subtropicales húmedos y no detecta aridez en la Depresión del Ebro. Cabe destacar que los periodos de datos utilizados en los estudios no son idénticos, lo que puede haber influido en los resultados obtenidos.

Si se compara con resultados obtenidos para la clasificación Köppen-Geiger, se observan similitudes con los resultados obtenidos por Chazarra Bernabé et al (2023), en especial con respecto a la localización de las zonas con cambios. Cabe destacar que las clasificaciones no son directamente homologables, en especial con respecto a las zonas esteparias y desérticas, que son significativamente mayores en el caso de Köppen-Geiger. Otros estudios que emplean esta clasificación, como el de Beck et al (2023) muestran zonas esteparias significativamente mayores, que cubren el corazón de la Submeseta Norte, la práctica totalidad de la Submeseta Sur, la Depresión del Ebro, y la Comunidad Valenciana.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha llevado a cabo dentro del contexto de los proyectos de investigación PID2020-118797RB-I00 (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) del Ministerio de Ciencia e Innovación, y PROMETEO/2021/016 de la Generalitat Valenciana.

REFERENCIAS

- Beck, H.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N.J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., Van Dijk, A.I.J.M. & Miralles, D.G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, 10:724. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02549-6>
- Belda, M., Holtanová, E., Halenka, T. & Kalvová, J. (2014). Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. *Climate Research*, 59, 1-13, doi: <http://dx.doi.org/10.3354/cr01204>
- de Castro, M., Gallardo, C., Jylha, K. & Tuomenvirta, H. (2007). The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of regional climate models. *Climatic Change*, 81, 329-341, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9224-1>
- Chazarra Bernabé, A., Lorenzo Mariño, B., Romero Fresneda, R. & Moreno García, J.V. (2023). Evolución de los climas de Köppen-Geiger en España (1951-2020). XII Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (AEC): Retos del Cambio Climático: impactos, mitigación y adaptación.
- De Luis, M., Longares, M.A., Stepanek, P. & González-Hidalgo, J. C. (2007). Tendencias estacionales de la precipitación en la cuenca del Ebro 1951-2000. *Geographicalia*, 52(52), 53-78. doi: http://dx.doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2007521107
- Estrela, M.J., Miró, J., Pastor, F. & Millán, M. (2004). Precipitaciones por frentes atlánticos en la Comunidad Valenciana: Cambios y tendencias en las últimas décadas. XXVIII Jornadas Científicas de la AME.
- Gavilán, R.G., Fernández González, F. & Blasi, C. (1998). Climatic classification and ordination of the Spanish Sistema Central: relationships with potential vegetation. *Plant Ecology*, 139, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1009794219141>
- Miró, J.J., Estrela, M.J. & Olcina Cantos, J. (2015). Statistical downscaling and attribution of air temperature change patterns in the Valencia region (1948–2011). *Atmospheric Research*, 156, 189-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.003>
- Miró, J.J., Estrela, M.J., Corell, D., Gómez, I. & Luna, M.Y. (2023). Precipitation and drought trends (1952-2021) in a key hydrological recharge area of the eastern Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*, 286:106695. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106695>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A. (2007). Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644. doi: <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Sandonis, L., González-Hidalgo, J.C., Peña-Angulo, D. & Beguería, S. (2021). Mean temperature evolution on the Spanish mainland 1916–2015. *Climate Research*, 82, 177-189. doi: <https://doi.org/10.3354/cr01627>

TENDENCIAS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN ARGENTINA, 1993-2022

María Mercedes POGGI¹, César AZORÍN-MOLINA², María Laura BETTOLLI³,
María de los Milagros SKANSI¹, Tim R. MCVICAR⁴ y Shalenys BEDOYA-
VALESTT²

¹*Dirección Central del Monitoreo del Clima, Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, Servicio Meteorológico Nacional (DCMC-DNCIPS-SMN), Argentina.*

²*Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CIDE-CSIC-UV-GVA), Climate, Atmosphere and Ocean Laboratory (Climatoc-Lab), Moncada, Valencia, España.*

³*Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultades de Ciencias Exactas y Naturas, Universidad de Buenos Aires (DCAO-FCEyN-UBA), Argentina.*

⁴*CSIRO Environment, GPO Box 1700, Canberra, ACT 2601, Australia.*

mpoggi@smn.gob.ar, cesar.azorin@csic.es

RESUMEN

Este estudio analiza series homogeneizadas de velocidad del viento cercano a la superficie (*SWS*, 10-m) en 86 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de Argentina para el período 1993-2022. Se centra en las cuatro estaciones del año y en dos grandes regiones: el centro-norte argentino y la Patagonia. Los análisis de tendencia y variabilidad confirman la ocurrencia de los fenómenos de *stilling* y *reversal* en estas latitudes, si bien la señal varía en función de la región y la época del año, ocurriendo el cese del *stilling* primeramente en verano. El estudio también revela que ciertos tipos de circulación sinóptica y forzantes globales y regionales, como la Baja del Noroeste Argentino, están asociados con los cambios observados en *SWS*. Estos hallazgos amplían nuestro conocimiento sobre las tendencias de *SWS* en el hemisferio sur, donde existen pocos estudios en comparación con el hemisferio norte, y proporcionan una base sólida para investigaciones futuras sobre el potencial de energía eólica de Argentina.

Palabras clave: viento, tendencias, fenómenos *stilling-reversal*, Argentina.

ABSTRACT

This study analyzes homogenized near-surface wind speed (*SWS*, 10-m) series at 86 meteorological stations distributed across Argentina for 1993-2022. It focuses on the four seasons of the year and on two large regions: central-northern Argentina and Patagonia. The analyses of the trends and variability confirm the occurrence of *stilling* and *reversal* phenomena at these latitudes, although the signal varies depending on the region and time of year, with the cessation of *stilling* occurring earlier in summer. The study also reveals that certain types of synoptic circulations and global and regional forcings, such as the Argentine Northwest Low, are associated with the

observed changes in *SWS*. These results expand our knowledge of *SWS* trends in the Southern Hemisphere, where few studies exist compared to the Northern Hemisphere, and provide a solid basis for future research on the wind energy potential of Argentina.

Key words: Wind, trends, *stilling-reversal* phenomena, Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se han observado cambios en la velocidad del viento cercano a superficie (*SWS*, 10-m). Se han identificado tendencias decrecientes, un fenómeno denominado *stilling* por Roderick et al. (2007), tanto en las regiones tropicales como en las latitudes medias de ambos hemisferios, en el período que comienza aproximadamente en los años 1960-1970 y termina en los años 2000-2010 (McVicar et al., 2012). Según una revisión de 148 estudios sobre las tendencias de la *SWS* en todo el mundo, McVicar et al. (2012) encontraron que la tasa promedio de *stilling* fue de -0,014 m/s por año, lo que representa un cambio de -0,7 m/s en 50 años. Esta tendencia decreciente ha sido confirmada por investigaciones realizadas en Europa y Asia (Azorín-Molina et al., 2014; You et al., 2014). Desde 2011, sin embargo, varios estudios indicaron que la tasa del *stilling* ha disminuido (Guo et al., 2011), informando una recuperación de la *SWS*, fenómeno referido como *reversal*. Gran parte de estos estudios son de naturaleza regional, ubicándose exclusivamente en el hemisferio norte (Utrabo-Carazo et al., 2022), y aquellos globales utilizan principalmente observaciones de dicho hemisferio (Zeng et al., 2019).

Para complementar estos análisis, es importante determinar si los fenómenos de *stilling* y *reversal* se observan en el hemisferio sur y, en especial, en América Central y Sudamérica, donde aún faltan estudios exhaustivos sobre las tendencias de la *SWS* (McVicar et al., 2012). En Australia se han reportado tendencias de la *SWS* entre 1975 y 2006, sin evidencia del *reversal* (McVicar et al., 2008), lo cual puede deberse a que el período de estudio concluye antes de 2010, año identificado por Zeng et al. (2019) como el inicio del *reversal* global. Por su parte, en Brasil, se ha documentado un decrecimiento de la *SWS* en el noreste (da Silva et al., 2010).

Los estudios sobre las tendencias y climatología de la *SWS* en Argentina son escasos, a pesar de los avances recientes logrados por Merino y Gassman (2021), quienes analizaron los cambios de la *SWS* en 18 estaciones entre 1990 y 2020, encontrando una disminución significativa en la mayoría de ellas, con reducciones de hasta 0,49 m/s por década. En general, los estudios en Argentina se centran en una única estación o región, siendo la Patagonia la región predilecta por sus vientos intensos y persistentes.

Frente a este contexto, el objetivo general del trabajo es analizar por primera vez las tendencias de la *SWS* en 86 estaciones meteorológicas de Argentina en el período 1993-2022, para evaluar si se observan los fenómenos de *stilling* y *reversal* en estas latitudes. Los objetivos principales son:

i) obtener series mensuales de la *SWS* de alta calidad y homogeneizadas, con una compilación detallada del instrumental de la red de estaciones convencionales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina;

- ii) evaluar las tendencias y variabilidad decadal de las series anuales y estacionales de las anomalías de la *SWS*, junto con su distribución espacial, en el período 1993-2022 y en los subperíodos 1993-2012 y 2013-2022, considerando las estaciones australes estándar (verano: diciembre, enero y febrero; otoño: marzo, abril y mayo; invierno: junio, julio y agosto; y primavera: septiembre, octubre y noviembre);
- iii) investigar la posible relación entre las tendencias observadas y ciertos forzantes de escala global y regional que tienen influencia en el clima de Argentina, así como con la frecuencia de tipos de circulación sinóptica o *weather types*.

2. DATOS

2.1. Datos observados homogeneizados

Se trabajó con las series mensuales de la *SWS* de 86 estaciones meteorológicas del SMN en el período 1993-2022, distribuidas a lo largo del país y equipadas con distintos tipos de instrumental de viento: el anemómetro ultrasónico, el anemómetro electromecánico y la anemoveleta pendular, instrumento mecánico que es empleado en el 37% de las estaciones (Fig. 1). Las series mensuales de la *SWS* se derivaron de observaciones diarias en los horarios de las 12, 18 y 00 UTC.

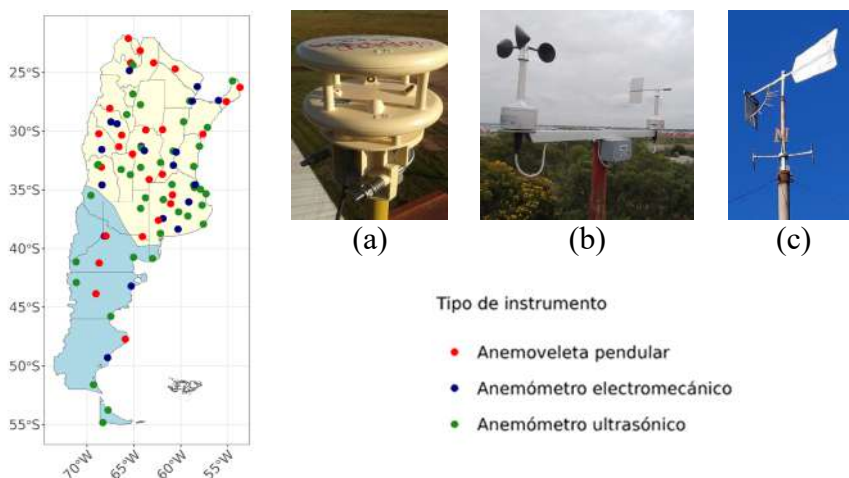


Fig. 1: Der.: Ubicación de las 86 estaciones meteorológicas convencionales del SMN y su instrumental de viento. Las estaciones en el área amarilla pertenecen a la región del centro y norte argentino, y las del área celeste, a la Patagonia. Izq.: (a) Anemómetro ultrasónico ubicado en la estación Paso de los Libres; (b) anemómetro electromecánico ubicado en la estación Formosa; y (c) anemoveleta pendular ubicada en la estación Ituzaingó.

Aunque varias estaciones cuentan con registros desde 1961, se eligió un período de estudio que comienza en 1993, ya que las series presentan menos datos faltantes y son más confiables.

Se empleó la versión 4.1.0 del paquete de R *Climatol* (Gujarro, 2024) para realizar el control de calidad, el relleno de datos faltantes y la homogeneización de las series mensuales de la *SWS*, considerando el Test de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT; Alexandersson, 1986). Se corrigieron 263 puntos de quiebre (*breakpoints*).

2.3. Índices de forzantes globales y regionales

Para estudiar la posible influencia de forzantes de gran escala en los cambios observados de la *SWS* en Argentina, se seleccionaron los índices asociados al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO); a la Oscilación Antártica (AAO); al Dipolo del Océano Índico (IOD); y a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). En cuanto a los forzantes de escala regional, se consideraron los índices asociados al Monzón Sudamericano (SAMS); al sistema de baja presión continental que se desarrolla en el noroeste argentino y el sur de Bolivia, conocido como la Baja del Noroeste Argentino (BNOA; Lichtenstein, 1980); y a la persistente anomalía cálida de la temperatura superficial del mar en el suroeste del océano Pacífico, conocida como el *Southern Blob* (Garreaud et al., 2021).

2.3. Tipos de circulación sinóptica

Se utilizó el esquema de Jenkinson y Collison (JC; Jenkinson y Collison, 1977) para asignar *weather types* a cada día del período analizado. Este esquema se basa en siete variables de circulación calculadas a partir de datos de presión a nivel del mar y clasifica los *weather types* en: flujo direccional, anticiclónicos, ciclónicos, tipos híbridos y flujo débil. A partir de este método, se obtuvieron series temporales del número de días por mes en que ocurrió cada tipo de circulación sinóptica.

3. MÉTODOS

3.1 Caracterización regional de la u

Uno de los aspectos destacados de *Climatol* es que realiza una clusterización de las series utilizando el método de agrupamiento jerárquico “ward.D2” (Johnson, 1967). A partir de este método, se identificaron ocho clústers que, a su vez, permitieron definir dos grandes regiones en función del comportamiento de la climatología anual de la *SWS*: el centro y norte argentino, y la Patagonia (Fig. 1).

3.1 Análisis de tendencias

Se trabajó con las anomalías medias mensuales de la *SWS*, analizando las series de las 86 estaciones meteorológicas, así como series promedio agregadas en las dos grandes regiones. A partir de ellas, se obtuvieron series anuales y estacionales, a las que se les aplicó un filtro de media móvil centrada con una ventana de 10 años, resultando en series filtradas que resaltan la variabilidad de baja frecuencia.

En las series observadas y filtradas, se identificaron *breakpoints* a partir del SNHT, los cuales pueden dar indicios de cambios en el comportamiento de las tendencias. Tanto para el período completo de 1993 a 2022 como para los subperíodos definidos

por los *breakpoints*, las tendencias se determinaron mediante un ajuste lineal. Se eligieron dos subperíodos representativos para el estudio: 1993-2012 y 2013-2022. La elección del año 2013 como punto de separación de los subperíodos se debe a que fue el último año en el que se identificaron *breakpoints* en las series, y porque permite realizar un análisis de al menos 10 años. La magnitud de las tendencias, en m/s por década, se estimó utilizando el método no paramétrico de Sen (Gilbert, 1987) y su significancia se evaluó mediante el test de Mann-Kendall modificado (Hamed y Rao, 1998), que tiene en cuenta la autocorrelación. Con el objetivo de determinar el inicio y la persistencia de las tendencias observadas, y siguiendo a Utrabo-Carazo et al. (2022), se aplicó un análisis de tendencias móviles con una amplitud de ventanas temporales que varían desde 10 años hasta la duración completa del período de estudio.

La significancia de la identificación de los *breakpoints* y de las tendencias se clasificó en tres categorías: significativa a $p < 0,05$, significativa a $p < 0,10$ y no significativa a $p > 0,10$.

3.3 Análisis de correlación

Para cada mes, se calculó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman entre las series de anomalías de la SWS de cada estación, las series agregadas en las dos regiones, los índices de forzantes globales y regionales, y las series de frecuencias de *weather types*. Las correlaciones se evaluaron considerando las mismas categorías de significancia descritas anteriormente.

4. RESULTADOS

4.1. Tendencias anuales y estacionales de la u

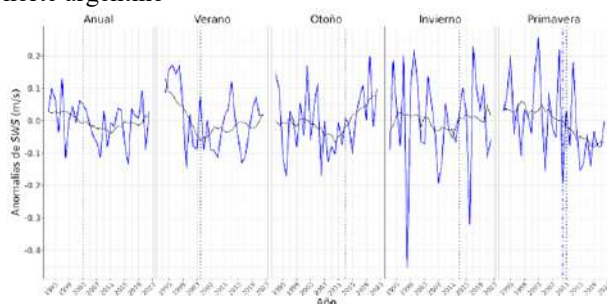
En el período 1993-2022 y para las dos regiones consideradas, la disminución de las anomalías de la SWS a escala anual y en las estaciones de verano y primavera es notable (Fig. 2), revelando la ocurrencia del *stilling*. Las series de anomalías medias de la SWS presentan tendencias negativas (Tabla 1). Aquellas significativas (a $p < 0.05$) se observan durante el verano en la Patagonia, con una disminución de -0.12 m/s por década, y durante la primavera en el norte y centro argentino, con una disminución de -0.05 m/s por década. En el otoño y el invierno, por el contrario, no se observa esta disminución; en el centro y norte argentino se registra, inclusive, un aumento de las anomalías de la SWS durante el otoño. Para estos trimestres, las tendencias detectadas son nulas o débiles, ya sea positivas o negativas, y no son significativas a $p > 0.1$.

La mayoría de las series muestra un comportamiento distinto al inicio y al final del período analizado: el inicio se caracteriza por las mayores disminuciones de las anomalías de la SWS de todo el período, las cuales luego se atenúan o, en algunos casos, se tornan en incrementos. Esto sugiere que el fenómeno del *stilling*, con intensidades variables según la estación del año, ocurre principalmente al comienzo del período, seguido por un cese del mismo o por un posible *reversal*. A escala anual y para el verano, otoño y primavera, el análisis de tendencias en los subperíodos 1993-2012 y 2013-2022 reveló que en el primer subperíodo prevalecen las tendencias negativas, mientras que en el segundo subperíodo predominan tendencias positivas o

menos negativas en comparación con el primero. Durante 1993-2012, se registran tendencias negativas significativas ($p < 0,05$) a escala anual para el centro y norte de Argentina, con una tendencia de $-0,06$ m/s por década. En verano, se observa una tendencia negativa significativa ($p < 0,05$) tanto en esa región como en la Patagonia, con valores de $-0,09$ m/s y $-0,23$ m/s por década, respectivamente. Durante 2013-2022, ninguna de las tendencias resulta significativa ($p > 0,10$), posiblemente debido al corto período de tiempo de análisis y a la alta variabilidad interanual. Las tendencias positivas se concentran, principalmente, en el otoño.

Para el invierno, en ambas regiones, el análisis de tendencias en los subperíodos indicó que el mayor declive de las anomalías de la SWS por década ocurre durante el último subperíodo de 10 años, con tendencias negativas, aunque no significativas ($p > 0,10$). Para la Patagonia, se detecta una tendencia de $-0,57$ m/s por década durante 2013-2022, mientras que durante 1993-2012, esta es de $0,04$ m/s por década.

Centro y norte argentino



Patagonia

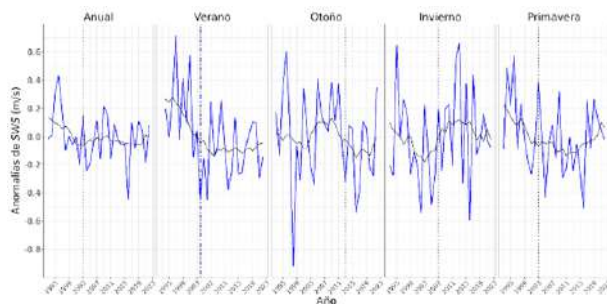


Fig. 2: Series anuales y estacionales de las anomalías de la SWS (en m/s) promediadas para el centro y norte argentino (arriba), y la Patagonia (abajo), en el período 1993-2022. La línea negra representa un filtro de media móvil centrada con una ventana de 10 años. Las líneas verticales representan los breakpoints encontrados en las series observadas y filtradas.

La identificación de *breakpoints* en las series observadas y filtradas no reveló un año específico para el cese del *stilling*, ya que este varía considerablemente entre las estaciones del año. Sin embargo, se observa que el cese ocurre antes en el verano, alrededor del año 2004.

Centro y norte argentino Patagonia			
Anual	1993-2022	-0,02	-0,03
	1993-2012	-0,06	-0,06
	2013-2022	-0,01	0,10
Verano	1994-2022	-0,03	-0,12
	1994-2012	-0,09	-0,23
	2013-2022	0,12	-0,05
Otoño	1993-2022	0,02	-0,05
	1993-2012	-0,06	0,03
	2013-2022	0,14	0,17
Invierno	1993-2022	0,00	0,04
	1993-2012	-0,07	0,04
	2013-2022	-0,09	-0,57
Primavera	1993-2022	-0,05	-0,06
	1993-2012	-0,06	-0,17
	2013-2022	-0,01	0,32

Tabla 1: Tendencias de las series anuales y estacionales de las anomalías de la SWS (en m/s por década) promediadas para el centro y norte argentino, y la Patagonia. Las tendencias estadísticamente significativas se muestran en **negrita y cursiva** para $p < 0,05$ y solo en **negrita** para $p < 0,10$.

El análisis de las tendencias móviles permitió confirmar la existencia de un cambio en el signo de las tendencias durante el verano, el otoño e, inclusive, durante el invierno en el centro y norte argentino (Fig. 3). Este cambio de tendencias negativas al inicio a positivas hacia el final, algunas de ellas significativas a $p < 0.05$, se observa en ventanas temporales de aproximadamente 10 a 15 años. Esta señal no es tan clara en la Patagonia (no se muestra).

El análisis en cada estación meteorológica a escala anual reveló que, durante el período 1993-2022, el 63% (37%) de las estaciones presenta tendencias negativas (positivas), mientras que el 14% (3%), tendencias significativamente negativas (positivas). En el subperíodo 1993-2012, el 69% (31%) de las estaciones muestra tendencias negativas (positivas), mientras que el 20% (5%), tendencias significativas negativas (positivas). Por el contrario, en el subperíodo 2013-2022, el 45% (55%) de las estaciones exhibe tendencias negativas (positivas), mientras que el 7% (7%), tendencias significativas negativas (positivas).

Centro y norte argentino

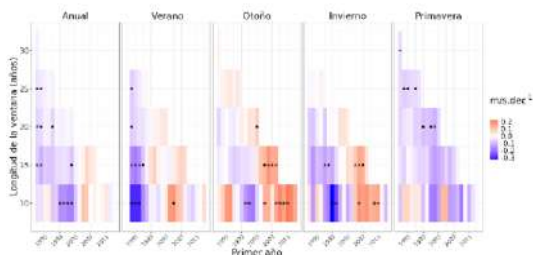


Fig. 3: Análisis de las tendencias móviles de las series anuales y estacionales de las anomalías de la SWS (en m/s por década) promediadas para el centro y norte argentino, desde 1993 a 2022. Los asteriscos y los puntos negros indican tendencias significativas a $p < 0,05$ y $p < 0,10$, respectivamente.

3.2. Influencia de forzantes globales y regionales, y de weather types

Se encontraron correlaciones significativas entre las series anuales y estacionales de las anomalías de la SWS y varios índices de forzantes globales y regionales (no se muestra). Algunas señales importantes estuvieron asociadas a los índices de la AAO y el ENSO. Entre los forzantes regionales, se destaca la BNOA, cuyo índice presenta el mayor número de correlaciones significativas (a $p < 0,10$) y positivas.

La correlación entre la frecuencia de ocurrencia de cada *weather type* del esquema JC y las series mensuales de las anomalías de la SWS agregadas regionalmente mostró que, para la Patagonia, los *weather types* que presentan las correlaciones positivas más altas y estadísticamente significativas (a $p < 0,05$) son los asociados a flujo del oeste y suroeste, y a circulaciones ciclónicas de estas direcciones (Fig. 4). Para dicha región, también predomina una correlación negativa con condiciones anticiclónicas y de flujo con componente este. Para el centro y norte argentino, los *weather types* asociados a las condiciones ciclónicas, pero de distintas direcciones, también presentan una fuertes correlaciones positivas y significativas (a $p < 0,10$).

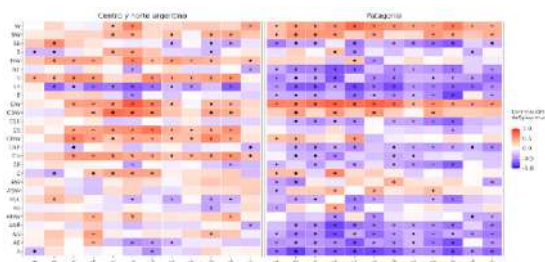


Fig. 4: Correlación de Spearman entre las series mensuales de las anomalías de la SWS y los *weather types* del esquema de JC para el centro y norte argentino (izq.), y la Patagonia (der.) en el periodo 1993-2022. Los asteriscos y los puntos negros indican correlaciones significativas a $p < 0,05$ y $p < 0,10$, respectivamente.

4. DISCUSIÓN

En este estudio se investigaron los cambios de la *SWS* en Argentina durante un período de 30 años, utilizando datos de estaciones de referencia de la red del SMN. A partir de series promedio agregadas en dos grandes regiones, se confirmó una disminución significativa de la *SWS* anualmente y durante el verano y la primavera desde 1993 hasta 2022. Esta disminución no fue constante en el tiempo, observándose un comportamiento variable a lo largo del período. El análisis de tendencias en los subperíodos 1993-2012 y 2013-2022, así como en ventanas móviles, permitió confirmar que existe un cambio en las tendencias en el inicio y hacia el final del período, con una transición de tendencias negativas a tendencias menos negativas o incluso positivas. Este cambio se advierte en todas las estaciones del año, tanto en el centro y norte de Argentina como en la Patagonia, con la excepción del invierno en esta última región. Lo hallado pone en evidencia los fenómenos de *stilling*, el cese del mismo e, inclusive, la presencia del fenómeno de *reversal*. Si bien no se encontró un año específico a partir del cual se pueda establecer el cese del *stilling*, se observó que este se presenta de manera más temprana en el verano.

Las correlaciones significativas entre las series mensuales de las anomalías *SWS* y los índices de forzantes global, como la AAO y el ENSO, así como de forzantes regionales, como la BNOA, y los *weather types*, resaltan el papel que ejerce la circulación atmosférica en la variabilidad multidecadal de la *SWS*. Otros mecanismos, como el efecto de los cambios en los usos y rugosidad del terreno, o en los errores de medida, deberían estudiarse en futuros trabajos.

A pesar de haber sido sometidas a un control de calidad y homogeneización, la confiabilidad de las series de la *SWS* aquí consideradas puede ser objeto de discusión, dado que se derivan de tres observaciones diarias y que gran parte de ellas corresponde a estimaciones realizadas con un instrumento mecánico. Sin embargo, es importante destacar que los resultados hallados en cuanto a la variabilidad y a las correlaciones con forzantes y *weather types* son coherentes con la circulación atmosférica y los mecanismos locales, lo cual avala su validez.

Este estudio amplía el conocimiento sobre las tendencias de la *SWS* en el hemisferio sur, abordando una brecha de investigación en Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó en el marco del proyecto RED-CLIMA 2 (programa LINCGLOBAL - CSIC, Ref. LINC24042), con una ayuda para desarrollar una estancia de investigación en el CIDE (CSIC-UV-GVA) durante 2024.

REFERENCIAS

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.*, 6(6), 661-675. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Azorín-Molina, C., Vicente-Serrano, S. M., McVicar, T. R., Jerez, S., Sanchez-Lorenzo, A., López-Moreno, J. I., ... & Espirito-Santo, F. (2014). Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961-2011. *J. Climate*, 27(10), 3692-3712. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00652.1>
- da Silva, V. D. P. R., e Silva, R. A., Cavalcanti, E. P., Braga, C. C., de Azevedo, P. V., Singh, V. P., & Pereira, E. R. R. (2010). Trends in solar radiation in NCEP/NCAR

- database and measurements in northeastern Brazil. *Solar Energy*, 84(10), 1852-1862. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.07.011>
- Garreaud, R. D., Clem, K., & Veloso, J. V. (2021). The South Pacific pressure trend dipole and the Southern Blob. *J. Climate*, 34(18), 7661-7676. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0886.1>
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Van Nostrand Reinhold Co. New York.
- Guijarro, J. A. (2024). *climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products)*. R package version 4.1.0, <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>.
- Guo, H., Xu, M., & Hu, Q. (2011). Changes in near-surface wind speed in China: 1969-2005. *Int. J. Climatol*, 31, 349-358. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.2091>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J. Hydrology*, 204(1-4), 182-196. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Jenkinson, A. F., & Collison, F. P. (1977). An initial climatology of Gales over the North Sea. *Synoptic climatology branch memorandum*, 62, 18.
- Johnson, S. C. (1967). Hierarchical clustering schemes. *Psychometrika*, 32(3), 241-254. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02289588>
- Lichtenstein, E. R. (1980). *La Depresión del Noroeste Argentino*. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Recuperado de: http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n1649_Lichtenstein
- McVicar, T. R., Van Niel, T. G., Li, L. T., Roderick, M. L., Rayner, D. P., Ricciardulli, L., & Donohue, R. J. (2008). Wind speed climatology and trends for Australia, 1975-2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L20403. doi: <https://doi.org/10.1029/2008GL035627>
- McVicar, T. R., Roderick, M. L., Donohue, R. J., Li, L. T., Van Niel, T. G., Thomas, A., ... & Dinpashoh, Y. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *J. Hydrology*, 416, 182-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.024>
- Merino, R. A., & Gassmann, M. I. (2022). Wind trends analysis in southern South America from weather station and reanalysis data. *Int. J. Climatol*, 42(4), 2117-2134. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.7355>
- Roderick, M. L., Rotstayn, L. D., Farquhar, G. D., & Hobbins, M. T. (2007). On the attribution of changing pan evaporation. *Geophys. Res. Lett.*, 34(17). doi: <https://doi.org/10.1029/2007GL031166>
- Utrabo-Carazo, E., Azorín-Molina, C., Serrano, E., Aguilar, E., Brunet, M., & Guijarro, J. A. (2022). Wind stilling ceased in the Iberian Peninsula since the 2000s. *Atmospheric Research*, 272, 106153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106153>
- You, Q., Fraedrich, K., Min, J., Kang, S., Zhu, X., Pepin, N., & Zhang, L. (2014). Observed surface wind speed in the Tibetan Plateau since 1980 and its physical causes. *Int. J. Climatol*, 34(6), 1873-1882. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3807>
- Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., Yang, L., Chen, A., Ju, K., ... & Wood, E. F. (2019). A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nat. Clim. Chang.*, 9(12), 979-985. doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0622-6>

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES METOCEÁNICAS EXTREMAS CAUSADAS POR HURACANES EN EL ATLÁNTICO TROPICAL

Marta RAMÍREZ-PÉREZ¹ y Melisa MENÉNDEZ GARCÍA¹

¹ IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, Santander, Spain

ramirez@unican.es, menendez@unican.es

RESUMEN

Los ciclones tropicales (CTs) se consideran uno de los peores desastres naturales, debido a los impactos devastadores que se producen como consecuencia de los fuertes vientos, las intensas lluvias, las condiciones de nivel del mar elevadas y los oleajes extremos. Mitigar la amenaza que suponen requiere de estudios específicos de evaluación de riesgo, que tengan en cuenta sus múltiples amenazas. Este estudio se centra en dos de ellas: los vientos y la contribución en la sobre elevación del nivel del mar asociados a huracanes históricos que afectaron a la región del Atlántico Oeste Tropical. Se analizan distintos métodos para reconstruir el campo de vientos asociados a dichos CTs, y se modela la correspondiente sobre elevación del nivel del mar. Los resultados se comparan con medidas instrumentales. Los resultados más similares a las medidas se han obtenido para los vientos del reanálisis ERA5 y el nivel del mar simulado a partir de dicho reanálisis. No obstante, ERA5 subestima significativamente las velocidades del viento máximas y no reproduce adecuadamente el perfil de viento radial asociado al ciclón. Respecto a los modelos paramétricos, los resultados varían entre los modelos explorados en función del evento y de la localización.

Palabras clave: huracán, ciclón tropical, viento, nivel del mar, marea meteorológica

ABSTRACT

Tropical cyclones (TCs) are one of the worst natural hazards, causing devastating impacts due to heavy rains, destructive winds, storm surge, high waves, etc. Mitigating the threat of TC requires a rigorous risk assessment, considering the multiple TC-related hazards. This study focuses on two of them: TC-associated wind and storm surge. In particular, we seek to assess different approaches for tropical cyclones wind field modelling and the derived storm surge. With this aim, both the wind field and the storm surge associated with four intense historical hurricanes on the Tropical Western Atlantic region are simulated and compared with in situ measurements. Results show that the ERA5 reanalysis outperforms compared to the three analyzed parametric wind models, although this dataset underestimates the maximum wind speed and does not reproduce properly the radial wind profile associated with the tropical cyclones. The reliability of data derived from parametric wind models vary depending on the event and location.

Key words: hurricane, tropical cyclone, wind, storm surge, extreme sea levels

1. INTRODUCCIÓN

Un ciclón tropical (CT) es un sistema de bajas presiones, que se origina sobre aguas tropicales o subtropicales (entre los 5° y los 30° de latitud norte/sur), ya que requieren de calor y humedad. Tienen un centro de circulación cerrado, en torno al cual los vientos rotan en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio norte (y en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur). Se clasifican de acuerdo a la escala de Saffir/Simpson, que estima el potencial de daños del ciclón en función de la intensidad de sus vientos. Así, se distingue entre depresión tropical, tormenta tropical o huracán (de categoría 1 a 5). En el Pacífico Occidental se les denomina tifones.

Los CTs obtienen su energía de las diferencias verticales de temperatura, son más simétricos que los extra-tropicales y tienen un núcleo cálido. Las principales partes de un ciclón son el ojo, la pared del ojo y las bandas lluviosas (con tormentas eléctricas). El ojo es un área aproximadamente circular de buen tiempo, que presenta la menor presión en superficie y la mayor temperatura en la parte superior. En la pared del ojo se localizan los vientos en superficie más fuertes y presenta un diámetro en torno a 200-500 km, aunque puede alcanzar los 1000 km (Smith, 2006).

Los CTs se consideran uno de los desastres naturales más destructivos de la naturaleza, ya que provocan importantes impactos debido a los fuertes vientos, a las intensas precipitaciones, y a las condiciones extremas de nivel del mar en costa, causadas por la componente marea meteorológica y el oleaje.

Por ejemplo, el huracán Katrina (agosto de 2005), que tocó tierra con categoría 4 en Luisiana, causó múltiples inundaciones, pérdidas masivas de vidas (~1500) y desplazamiento de miles de personas, con un coste aproximado de 125 billones de dólares. Este huracán produjo una marea meteorológica de ~8.5 m en la Bahía de St. Louis y Pass Christian (en Misisipi), y velocidades de viento sostenidas de hasta 225 km/h, cerca de la isla de Grand (Luisiana).

Por estos motivos, existe un gran interés en determinar, de forma precisa, el campo de vientos asociado a los CTs, así como sus amenazas derivadas, a fin de desarrollar herramientas fiables de predicción y de alerta temprana, que permitan cuantificar los impactos, reducir los riesgos y proponer medidas de mitigación.

Existen distintas aproximaciones (con diverso grado de complejidad) para reconstruir el campo de viento asociado a los CTs: desde sencillos modelos paramétricos (ej., Holland (1980), Emanuel (2004)), modelos cinemáticos (ej., H*Wind (Powell et al., 1998) y IOKA (Cardone et al., 2007)) o modelos atmosféricos de meso-escala (ej., MM5 y WRF). Además, las bases de datos de reanálisis atmosférico son otra fuente de información muy valiosa, ya que tienen una cobertura espaciotemporal homogénea durante varias décadas (Thorne y Vose, 2010). Sin embargo, debido a su resolución espacial ($\geq 0.2^\circ$) tienden a subestimar significativamente la intensidad del ciclón (Karl et al., 2008; Hodges et al., 2017).

Debido a la baja frecuencia de los CTs, a menudo los registros históricos no son suficientes para estimar, de forma robusta, los valores extremos asociados a periodos de retorno altos de las variables meteoocéánicas. Por ello, es necesario recurrir a métodos estocásticos para generar una serie de eventos sintéticos de CTs. Además, otro aspecto clave hoy en día es el análisis de los efectos del cambio climático sobre los CTs, lo que implica la simulación de CTs futuros obtenidos a partir de Modelos Climáticos Globales (GCM). En ambos casos, se simulan un gran número de CTs y

las amenazas asociadas, lo que requiere de metodologías computacionalmente eficientes.

En este contexto, los modelos paramétricos de viento son una herramienta muy útil para abordar este tipo de estudios, ya que reconstruyen el perfil radial de viento y presión a partir de ecuaciones que se basan en un número limitado de parámetros del ciclón tropical (posición, intensidad, tamaño). En el caso de ciclones históricos, estos parámetros generalmente se obtienen de las bases de datos de Best Track (ej., IBTrACS, ATCF, SPEArTC, etc.). Dichas bases de datos constituyen las mejores estimaciones de los ciclones e incluyen datos de medidas satelitales, de aviones, boyas, etc.

La precisión y veracidad de los campos de viento reconstruidos van a condicionar los resultados en los análisis de amenazas y riesgos asociados a CTs, por lo que constituyen un elemento clave. Esto se debe a que dichos vientos se introducen como forzamiento en modelos numéricos avanzados para simular las condiciones asociadas de las dinámicas marinas (marea meteorológica y oleaje).

El rápido avance de las capacidades computacionales y la creciente disponibilidad de datos ha hecho que, en las últimas décadas, se desarrollen nuevos modelos y aproximaciones para simular los CTs y las amenazas asociadas.

Este estudio tiene como objetivo llevar a cabo un análisis de sensibilidad de algunos de los modelos más recientes y comúnmente utilizados para reconstruir el campo de viento asociado a CTs, así como analizar sus efectos en la marea meteorológica generada. Los resultados se comparan con bases de datos disponibles y medidas instrumentales a fin de determinar la pericia de cada uno de los métodos considerados. El estudio se centra en la región del Atlántico Oeste Tropical y analiza una serie de huracanes históricos de gran intensidad.

2. MÉTODOS

Esta sección describe los huracanes históricos analizados en este estudio, así como los distintos modelos para reconstruir los forzamientos atmosféricos considerados y los datos disponibles para su validación. Además, se presenta el modelo hidrodinámico empleado para caracterizar la marea meteorológica derivada de cada uno de dichos modelos.

2.1. Ciclones tropicales históricos

El estudio se centra en cuatro huracanes de categoría 4 o superior que han afectado a la región del Atlántico Oeste Tropical (Fig. 1).

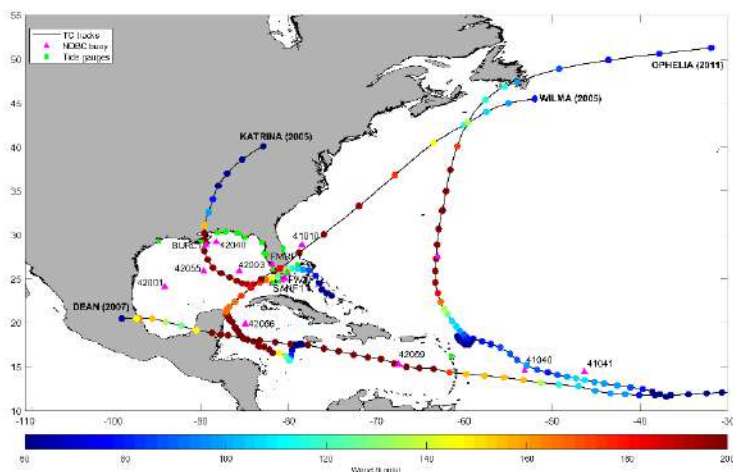


Fig. 1: Trayectoria de los 4 huracanes analizados, con los colores indicando la velocidad del viento máxima sostenida. Se muestra la localización de las boyas y mareógrafos utilizados.

La selección se ha hecho en función de la disponibilidad de información procedente de la base de datos de H*Wind, y de medidas instrumentales. Además, se han elegido CTs muy intensos (y que provocaron fuertes impactos), que presenten diferentes trayectorias (es decir, de este a oeste, de sur a norte, con un bucle, etc.).

La información sobre la posición, intensidad y tamaño de estos ciclones se obtiene de la base de datos de Best Track de IBTrACS (Knapp et al. 2018), que contiene datos, al menos, 6-h de cada uno de estos parámetros. La Tabla 1 muestra un resumen de las principales características de estos huracanes.

Huracán	Periodo del evento	Wmax (km/h)	Pmin (mbar)	Pérdidas
Katrina	23/08/2005 12:00 a 30/08/2005 12:00	278	902	\$125 billones en EEUU 1392 fallecidos
Wilma	15/10/2005 12:00 a 25/10/2005 18:00	296	882	\$21 billones en EEUU 33 fallecimientos directos
Dean	14/08/2007 18:00 a 23/08/2007 23:00	278	905	\$700 millones 32 fallecimientos directos
Ophelia	20/09/2011 0:00 a 03/10/2011 12:00	222	940	Sin daños registrados

Tabla 1: Características de los huracanes históricos analizados. Fuente: IBTrACS y Tropical Cyclone Reports.

2.2. Medidas instrumentales

Se han utilizado los datos instrumentales disponibles procedentes de boyas y mareógrafos con el objetivo de validar los datos simulados de viento y marea meteorológica. En concreto, se han seleccionado las boyas del National Data Buoy Center (NDBC) que se localizan cerca de la trayectoria o que se han visto afectadas

por los vientos extremos asociados a los huracanes analizados. Dichas boyas contienen información sobre la velocidad del viento promediado en 8 minutos y su dirección. La altura del anemómetro varía de una boya a otra y la medida se traslada a 10 m de altura mediante la relación propuesta por Mears et al. (2001):

$$W_{10} = \frac{\ln\left(\frac{10}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} * W$$

donde Z_0 es la longitud de rugosidad de la superficie (Peixoto and Oort, 1992; $Z_0 = 1.52 \cdot 10^{-4}$) y W es la velocidad del viento en m/s a la altura del anemómetro (Z) (en metros).

Respecto a los mareógrafos, se han descargado los datos de GESLA3 (Global Extreme Sea Level Analysis), que contienen información horaria del nivel del mar.

2.3. Modelos para simular el campo de vientos

Este estudio analiza tres aproximaciones para estimar el campo espacial de vientos en superficie asociado a CTs: modelos paramétricos, datos procedentes de reanálisis globales y de modelos cinemáticos.

2.3.1. Modelos paramétricos de viento: entre los diferentes modelos paramétricos disponibles, el modelo de Holland (1980) es uno de los más utilizados y, por ello, a partir de éste se han propuesto diversas modificaciones y mejoras. Por esta razón, este estudio evalúa el modelo de Holland con las modificaciones propuestas por Fleming et al. (2008). Este modelo es conocido como el Modelo Dinámico de Holland. Sin embargo, varios estudios indican errores sistemáticos de este modelo, por lo que también se ha evaluado otro modelo que deriva del mismo. En particular, se analiza el perfil de viento continuo, definido por tramos, propuesto por Willoughby et al. (2006), el cual dio muy buenos resultados en estudios previos (por ejemplo, Ramsay et al., 2009). Por último, otro modelo cuyo uso está muy extendido, ya que se basa en los procesos físicos, es el propuesto por Emanuel (2004) y sus modificaciones. Este estudio se centra en el modelo de Chavas et al. (2015), que es uno de los modelos más recientemente desarrollados basado en el propuesto por Emanuel (2004) y por Emanuel y Rottuno (2011).

2.3.2. Bases de datos de reanálisis globales: ERA-5 es la última base de datos de reanálisis global generada por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, Dee et al., 2011). Como cualquier base de datos de reanálisis, ERA-5 combina datos de observaciones con modelos acoplados de los subsistemas climáticos mediante el proceso de asimilación de datos. Cubre el periodo desde 1940 hasta el presente, con resolución horaria y a una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Las principales ventajas que presenta esta base de datos con respecto a su predecesor ERA-Interim son, entre otros aspectos, mayor resolución temporal y espacial y mejor representación de la troposfera y de los CTs. Los datos de ERA-5 están disponibles para descarga en: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>.

2.3.3. Modelos cinemáticos: la base de datos de H*Wind (*Real-time Hurricane Wind Analysis System*) contiene información sobre el campo espacial de viento en superficie

(velocidad promediada en 1 minuto y dirección), con una resolución ~6 horaria y sobre una malla regular de $8 \times 8^\circ$, centrada en el ojo del ciclón (Powell et al., 1998). Esta base de datos se genera a partir de la asimilación de medidas in situ, satelitales y de aviones. De acuerdo con Dietrich et al. (2018), H*Wind proporciona las mejores estimaciones del campo de viento asociado a CTs, ya que es la que mejor representa la estructura y asimetría del mismo. Por ello, este estudio utiliza esta información como referencia para validar los resultados de los modelos descritos en los apartados 2.3.1 y 2.3.2. Estos datos se descargan de: <https://www.rms.com/event-response/hwind/legacy-archive/storms>.

2.4. Modelo hidrodinámico para simulación de la marea meteorológica

El modelo ADCIRC es un modelo hidrodinámico bidimensional de última generación desarrollado por la Universidad de Carolina (Luettich et al., 1992). Resuelve las ecuaciones del movimiento (ecuaciones de continuidad y de conservación del momento) para un fluido en movimiento en una Tierra en rotación, utilizando las aproximaciones hidrostática y de Boussinesq, discretizadas en espacio utilizando el método de elementos finitos y en tiempo, el de diferencias finitas. Una de las principales ventajas de este modelo es que utiliza una malla de cálculo no estructurada, lo que permite aumentar la resolución en zonas de interés. Se utiliza en multitud de aplicaciones entre las que destaca que es el modelo usado por la USACE y por la FEMA (EEUU) para el análisis y predicción de la marea meteorológica e inundación asociadas a huracanes. Este modelo se ha forzado con los campos de viento y presión derivados de los distintos métodos descritos en el apartado 2.3.1 y 2.3.2.

3. RESULTADOS

Este apartado describe, por un lado, los resultados obtenidos de la reconstrucción del campo de viento y, por el otro, la marea meteorológica generada para los huracanes analizados. Los campos de viento modelados se comparan con las series temporales de la velocidad del viento medida por boyas y con los campos espaciales de la base de datos de H*Wind. Por su parte, la marea meteorológica modelada se compara con las medidas de los mareógrafos.

3.1. Viento

3.1.1 Series temporales en boyas

En general, todos los modelos paramétricos analizados simulan satisfactoriamente el pico de viento asociado al huracán. Los mejores resultados se obtienen con el reanálisis de ERA5, ya que captura no sólo el pico, sino todo el evento extremo y el comportamiento del viento fuera de dicho evento (Fig. 2). Estos resultados se observan de forma más clara en la Fig. 3, donde se muestra el diagrama de dispersión de los valores medidos frente a los simulados, junto con las métricas de error.

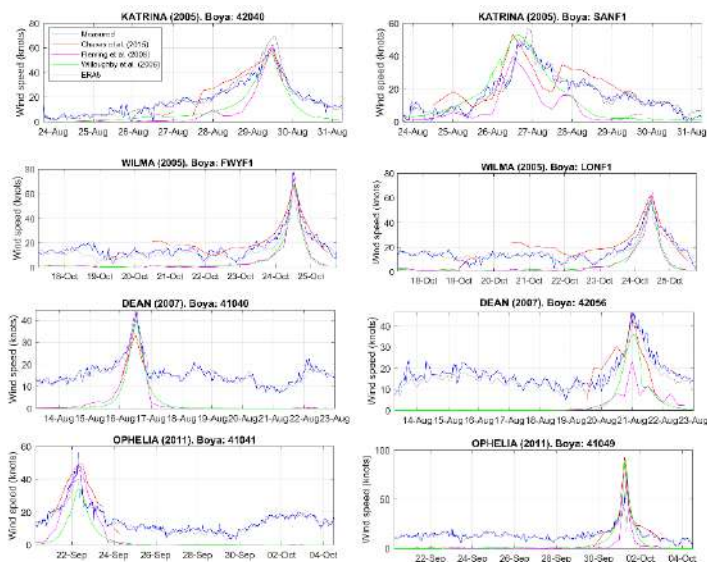


Fig. 2: Series temporales de velocidad del viento simuladas con los distintos modelos en las localizaciones de las boyas.

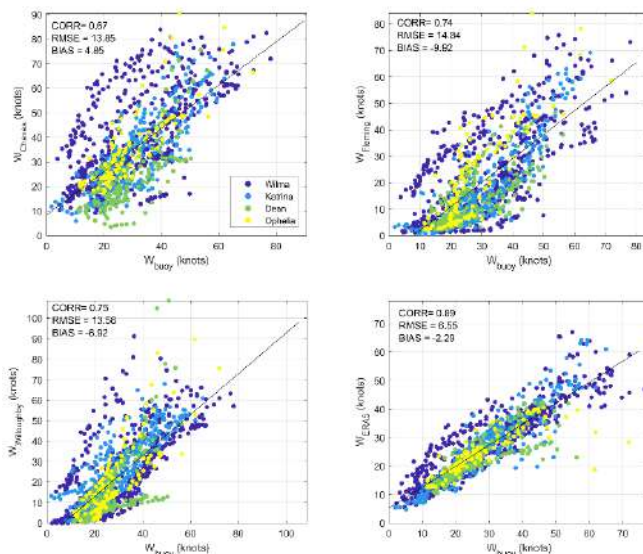


Fig. 3: Diagramas de dispersión de la velocidad del viento medida frente a la simulada durante el evento ciclónico, de acuerdo con los modelos utilizados. Los colores corresponden con cada uno de los huracanes analizados.

3.1.2 Campos espaciales

La comparación tanto de los campos espaciales (Fig. 4) como de los perfiles de viento radial (Fig. 5) utilizando los datos de H*Wind como referencia, ponen de manifiesto

que el reanálisis de ERA5 tiende a subestimar las velocidades del viento máximas y no es capaz de capturar adecuadamente el perfil radial de viento asociado al ciclón. Los modelos paramétricos, por su parte, representan satisfactoriamente el perfil radial de viento hasta una distancia de ~ 2 veces el radio de máximos vientos ($2 \cdot R_{max}$).

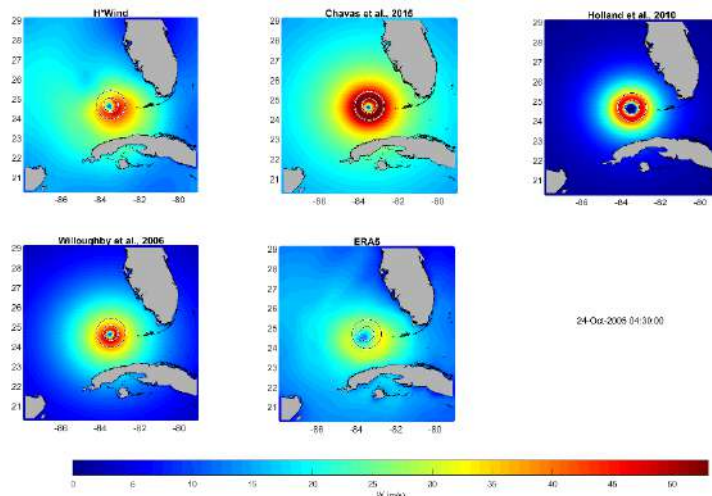


Fig. 4: Campos espaciales de la velocidad del viento asociada con el huracán Wilma el 24 de octubre de 2005 a las 04:30h, de acuerdo a la base de datos de H*Wind y a los 4 modelos analizados. Los círculos grises representan R_{max} (el radio de máximos vientos) y $2 \cdot R_{max}$.

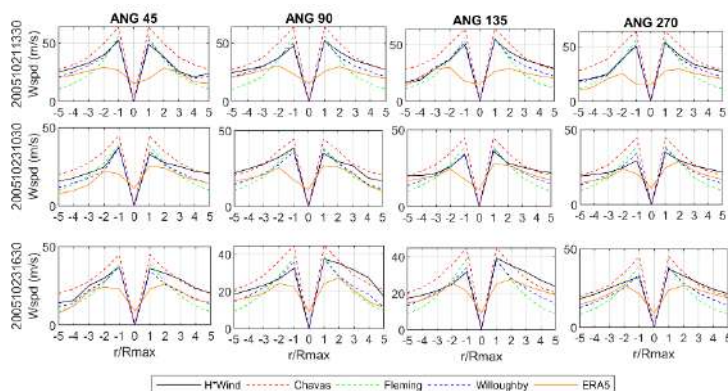


Fig. 5: Perfiles radiales de la velocidad del viento a 4 ángulos diferentes respecto a la dirección de avance del ciclón, reconstruidos en 3 instantes distintos durante el huracán Wilma (2005), con los modelos utilizados y con la base de datos de H*Wind.

3.2. Marea meteorológica

La simulación de la marea meteorológica asociada a los huracanes analizados se ha llevado a cabo utilizando, como forzamiento atmosférico, el campo de viento

generado de acuerdo a los cuatro modelos descritos. Los mejores resultados se han obtenido para el reanálisis de ERA5, a pesar de que tiende a subestimar ligeramente la marea meteorológica (Fig. 6).

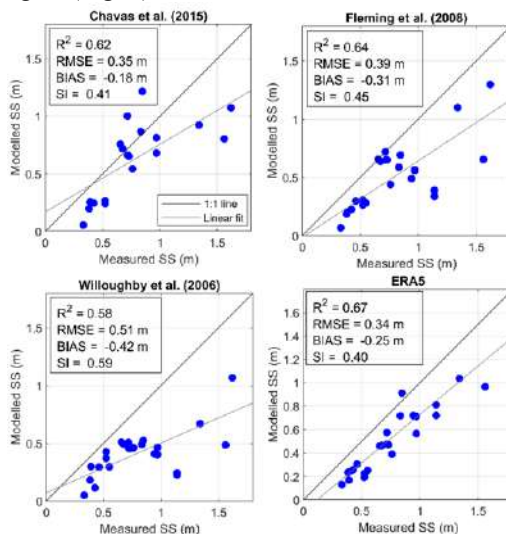


Fig. 6: Diagramas de dispersión de la marea meteorológica máxima (o storm surge (SS) en inglés) medida por los mareógrafos y modelada para los 4 huracanes analizados.

4. CONCLUSIONES

Reconstruir de forma precisa el campo de vientos asociado a CTs es un aspecto clave en los estudios de impactos y riesgos derivados de estos eventos. Por este motivo, este estudio se centra en comparar tres modelos paramétricos que reconstruyen el viento y los datos atmosféricos procedentes del reanálisis ERA5. Además, se simula la marea meteorológica resultante de las condiciones atmosféricas obtenidas para cada modelo. Se han analizado cuatro huracanes históricos especialmente dañinos que afectaron a la región del Atlántico Oeste Tropical. Los resultados indican que ERA5 tiende a subestimar las velocidades del viento máximas y no es capaz de reproducir adecuadamente el perfil radial de viento asociado a los huracanes, comparado con los modelos paramétricos. Sin embargo, al comparar con medidas in situ, los mejores resultados tanto de velocidad del viento como de marea meteorológica asociada se han obtenido con esta base de datos para los eventos analizados. Respecto a los modelos paramétricos, ninguno destaca frente a los demás, ya que los resultados obtenidos a partir de ellos varían significativamente en función del evento y de la localización.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen la financiación proporcionada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades para la elaboración de este estudio a través del proyecto “CycloMar” (PID2023-151200B-I00).

REFERENCIAS

- Cardone, V. J., et al. (2007). OTC 18652: Hindcast of winds, waves and currents in northern Gulf of Mexico in Hurricanes Katrina (2005) and Rita (2005). Offshore Technology Conf., Houston.
- Chavas, D.R.; Lin, N.; Emanuel, K. A (2015). A model for the complete radial structure of the tropical cyclone wind field. Part I: Comparison with observed structure. *J. Atmos. Sci.*, 3647–3662.
- Dee, D.P., et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553-597.
- Dietrich, J.C., Muhammad, A., et al. (2018). Sensitivity of storm surge predictions to atmospheric forcing during hurricane ISAAC. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 144, 04017035.
- Emanuel, K. (2004). Tropical cyclone energetics and structure. In *Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*; Fedorovich, E., Rotunno, R., Stevens, B., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 165–192.
- Emanuel, K., and Rotunno, R. (2011). Self-stratification of tropical cyclone outflow. Part I: Implications for storm structure, *J. Atmos. Sci.*, 68, 2236–2249.
- Fleming, J. G, Fulcher, C. W., Luettich, R. A., et al. (2008). A Real Time Storm Surge Forecasting System using ADCIRC. Proceedings of the International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, pp. 893-912.
- Hodges, K. and Cobb, A. (2017). How well are tropical cyclones represented in Reanalysis Datasets? *Journal of Climate*, Vol. 30, 5243-5264.
- Holland, G.J. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, 108, 1212–1218.
- Knapp, K.R., et al. (2018). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4. NOAA National Centers for Environmental Information.
- Luettich, R.A., Jr., Westerink, J.J., and Scheffner, N.W. (1992). ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 137p.
- Mears, C. A., et al. (2001). Comparison of Special Sensor Microwave Imager and buoy-measured wind speeds from 1987 to 1997, *J. Geophys. Res.*, 106(C6), 11719–11729.
- Peixoto, J.P., Oort, A.H.(1992) *Physics of climate*. American Institute of Physics, NY.
- Powell, M.D., Houston, S.H., et al. (1998). The HRD real-time hurricane wind analysis system. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 77, 53–64.
- Ramsay, H. A., Leslie, L. M. and Kepert, J. D. (2009). A high-resolution simulation of asymmetries in severe Southern Hemisphere TC Larry (2006). *Mon. Weather Rev.*, 137(12), 4171-4187.
- Willoughby, H.E., Darling, R.W.R, and Rahn, M.E. (2006). Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part II: A new family of sectionally continuous profiles. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 1102–1120.

INCENDIOS CAUSADOS POR RAYOS EN EL ARCHIPIÉLAGO BALEAR: ANÁLISIS METEOROLÓGICO Y BIOFÍSICO

Margalida RIBAS-MUNTANER*¹, Miquel TOMÀS-BURGUERA¹, Alexandre MORAGUES¹, Francisco CUELLO¹, Jaume COMPANYY¹, Maurici RUIZ^{1,2}, Josep FORTESA¹, Joan ESTRANY¹ y Julián GARCÍA-COMENDADOR¹

¹ *Observatori de Riscos Naturals i Emergències de les Illes Balears – RiscBal; Universitat de les Illes Balears, Mediterranean Ecogeomorphological and Hydrological Connectivity Research Team – MEDhyCON. Departament de Geografia y Instituto de Investigaciones Agroambientales y de Economía del Agua, Centre Bit Raiguer, Carrer dels Sellaers 25, 07300 Inca (Illes Balears).*

² *Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció, Universitat de les Illes Balears. Edifici d'Instituts Universitari de Recerca, Campus de la UIB, Cra. Valldemossa, km 7,5, 07122 Palma (Illes Balears).*

margarita.ribas@uib.cat, riscbal@uib.cat

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis de los regímenes meteorológicos y las características biofísicas vinculadas a la ocurrencia de incendios forestales causados por la caída de rayos en el archipiélago balear. Concretamente, se examinó la estacionalidad, el comportamiento horario, la distribución espacial y las características de estos incendios y de los rayos responsables de su generación durante el periodo 1994-2019. Finalmente, se analizaron y clasificaron las condiciones sinópticas (500 hPa, 850 hPa y slp) responsables de la formación de las tormentas eléctricas susceptibles de generar incendios, a partir de un método de clasificación objetiva incluido en paquete synoptReg. Los resultados definieron el verano como el periodo más propenso a este tipo de incendios, coincidiendo con el periodo con un mayor número de descargas eléctricas, observándose un repunte durante las horas centrales del día. Además, se definieron 7 tipos de tiempo asociados a la formación de las tormentas eléctricas, siendo el tipo de tiempo 7 el más eficiente generando incendios. La distribución espacial y los usos del suelo afectados permitieron determinar las variables biofísicas favorables para su ignición, concentrándose en zonas montañosas ocupadas por masas forestales y a sus alrededores. La definición de situaciones sinópticas con una mayor probabilidad de ocasionar incendios y la determinación de zonas potencialmente vulnerables puede ser de gran interés en materia de prevención y gestión de incendios forestales en el archipiélago balear.

Palabras clave: Incendios forestales, rayos, tormentas eléctricas, islas baleares

ABSTRACT

This study analyzes the meteorological regimes and biophysical characteristics associated with wildfires ignited by lightning strikes in the Balearic Islands. Specifically, the seasonality, hourly patterns, spatial distribution, and characteristics

of these fires and the lightning responsible for igniting them were analyzed during the 1994-2019 period. Finally, the synoptic conditions (500 hPa, 850 hPa, and msl) responsible for the formation of thunderstorms likely to cause fires were analyzed and classified by using synoptReg package. Results identified summer as the season most susceptible to these wildfires, aligning with the peak lightning occurrence, with a peak during midday hours. Thunderstorms are associated with seven weather types, among which type 7 stands out for its high efficiency in generating fires. The spatial distribution and affected land uses helped determine the favorable biophysical variables for ignition. The area's most susceptible to these fires are those near mountainous regions occupied by forested land.

Key words: forest fires, lightning bolts, lightning storms, Balearic Islands

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios son una perturbación natural en los sistemas forestales mediterráneos (Plana et al., 2016). Se calcula que aproximadamente el 85% de la superficie anual quemada en Europa es de bosque mediterráneos (Pineda & Rigo, 2017). La génesis y propagación de los incendios está condicionada por factores como la meteorología, la topografía, la cantidad y distribución del combustible forestal (Plana et al., 2016). Sin embargo, durante las últimas décadas, estos factores han sido alterados por procesos como el cambio de usos del suelo y el cambio climático. Hay que destacar, el incremento de las temperaturas, periodos de sequía (Pineda & Rigo, 2017) y los procesos de forestación natural (García-Comendador et al., 2017), que aumentan la cantidad, densidad y continuidad de la vegetación y, por lo tanto, del combustible disponible, incrementándose la extensión y severidad de los incendios (Estrany & Gago, 2019). Además, la expansión de las zonas residenciales hacia zonas forestales incrementa el área de interfaz urbano-forestal, aumentando significativamente las áreas de riesgo y la vulnerabilidad social. Todos estos procesos provocan alteraciones en el régimen natural de incendios, acrecentando el riesgo para las poblaciones y los ecosistemas. En este contexto, los incendios ocasionados por causas naturales normalmente responden al impacto de un rayo durante una tormenta eléctrica. Estos son considerados la principal causa de ignición en los bosques de todo el mundo, aunque son únicamente responsables del 5% de los incendios forestales de la cuenca mediterránea (Pineda & Rigo, 2017) y del 3,9% de los incendios del Estado Español (Nieto et al., 2012). El clima, el tipo de vegetación, la topografía y las características de los rayos son variables fundamentales en la distribución espaciotemporal de estos (García-Ortega et al., 2011).

Este trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis y clasificación de los regímenes meteorológicos más propensos a generar las tormentas eléctricas que provocan incendios por impacto de rayos en las Baleares durante el periodo 1994-2019. Los objetivos específicos son: i) caracterizar los incendios ocasionados por la caída de rayos en función de la estacionalidad, distribución y localización (1994-2019) y ii) estudiar la relación entre la caída de rayos y la generación de incendios en función de los regímenes meteorológicos.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El archipiélago balear se sitúa en el Mediterráneo occidental, al este de la Península Ibérica (Fig. 1). Se compone por cuatro islas principales (Mallorca, Menorca, Ibiza y Formentera) con una superficie de 4.992 km². El clima es mediterráneo, condicionado por las anomalías térmicas del Mediterráneo occidental y los factores topográficos. La estación seca destaca por temperaturas estivales elevadas y un marcado déficit hídrico. Los principales usos del suelo son forestales, destacando pinares y encinares, la maquia de acebuche y la vegetación de alta montaña constituida por matorral. Destaca la presencia de especies pirófitas y pirófilas con adaptaciones a la presencia de fuego (Estrany & Gago, 2019). El abandono de la agricultura durante la segunda mitad del siglo XX ha favorecido una transición forestal, generando procesos de forestación natural en campos de cultivo abandonados y zonas marginales, incrementándose la biomasa y la continuidad forestal del paisaje.

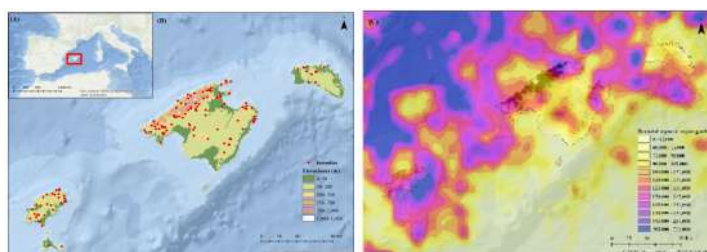


Fig. 1. (A) Localización de las Islas Baleares en la cuenca mediterránea occidental. (B) Distribución geográfica de los 241 incendios ocasionador por la caída de rayos del periodo 1994-2019, en los diferentes municipios de las Islas Baleares. (C) Distribución espacial de la densidad de rayos entre mayo y octubre para el periodo de estudio. Fuente: IBANAT y AEMET.

3. MÉTODOS

3.1. Base de datos

Se generó una base de datos de incendios y descargas eléctricas registradas durante los días de tormenta para el periodo 1994-2019 en el archipiélago balear en base a datos ofrecidos por el Instituto Balear de la Naturaleza (IBANAT). Se dispone de información de 241 incendios relativa a su localización, fecha, hora de detección, control y extinción, superficie forestal afectada (arbolada y no arbolada), además de datos meteorológicos (precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento y humedad). Por otra parte, se posee información de su ubicación, fecha y hora de registro, distancia respecto al detector de rayos e intensidad de la descarga de 6.750.500 rayos registrados durante 4.444 días de tormenta en Baleares y mar circundante. Los datos de las descargas eléctricas han sido proporcionados por la red de detección de rayos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

3.2. Análisis y clasificación de los regímenes meteorológicos

La clasificación de los regímenes meteorológicos se llevó a cabo mediante las funciones del paquete de R `synoptReg` (Lemus-Canovas et al., 2019), realizando

clasificaciones sinópticas de forma objetiva a partir de técnicas multivariantes. En este caso, se elaboró a partir del Análisis de Componentes Principales (PCA) utilizando datos diarios de altura geopotencial a 500 hPa (gpm), temperatura a 850 hPa (°C) y presión al nivel del mar (hPa), con una varianza del 90%. Estas variables provienen del reanálisis global de quinta generación (ERA5) del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF). Para esta clasificación solo se tuvo en cuenta los días de tormenta con más de 20 descargas eléctricas, restringiéndolo al período de mayo a octubre, que coincide con el período de mayor ocurrencia de incendios. De esta forma, se elaboró una clasificación en 7 tipos de tiempo en base a 1.688 días de tormenta.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización incendios ocasionados por la caída de rayos

Durante el periodo 1994-2019, se registraron 3.036 incendios forestales, siendo la caída de rayos (en adelante, LIW) la tercera causa de origen, con 241 casos (7,9 % del total). Esta tipología de incendios mostró una notable estacionalidad, concentrándose entre mayo y octubre (suponiendo un 95,8% del total), con un máximo en agosto y septiembre (Fig. 2A). Su comportamiento coincide con la temporada de mayor riesgo de incendios entre el 1 de mayo y el 15 de octubre. Además, se identificó un patrón horario, concentrándose durante las horas centrales del día (Fig. 2B), con dos picos de máxima actividad, a las 13 h (14 %) y a las 16 h (12 %).



Fig. 2. (A) Comportamiento estacional de los LIW para el periodo 1994-2019 (n=241). (B) Comportamiento horario de los LIW para el periodo 1994-2019 (n=241). Fuente: IBANAT y AEMET.

En cuanto a su ubicación, la mayoría se localizan en Mallorca (n = 181), seguida de Ibiza (n = 43), Menorca (n = 14) y Formentera (n = 3). Generalmente, se concentran en las zonas de mayor relieve o a sus alrededores, destacando las zonas de sierras y piedemonte en todas las islas (Fig. 1)

En Baleares, los LIW son incendios puntuales y pequeños, llegando difícilmente a afectar a una hectárea. Son responsables de la quema de 427.67 ha entre 1994 y 2019, afectando mayoritariamente espacios ocupados por bosques (46% de los incendios), vegetación arbustiva o herbácea (31,7% de los incendios).

4.2. Caracterización de las descargas eléctricas y relación con la generación de incendios

De los 4.444 días de tormenta únicamente 1.827 días presentaron descargas eléctricas en la zona terrestre (239.944 descargas). Estas descargas tienen un patrón estacional con un máximo entre agosto y diciembre, con un pico máximo en septiembre (38,5%; 92.316 descargas) (Fig. 2A). Además, se observa un comportamiento horario con un repunte durante las horas centrales del día (36,3%; 87.163 descargas) de los rayos entre las 11-15 h (Fig. 2B), con un pico secundario entorno a medianoche.

Respecto a la ubicación de impacto, en el caso de Mallorca la distribución espacial está condicionada por el gradiente altitudinal. En cambio, en Ibiza y Formentera, predominan ante las costas este, y en Menorca se observan dos máximos, uno ante la costa sur y otro ante las costas del oeste. También destaca la latencia de estos incendios, detectándose en días posteriores a las descargas eléctricas. Únicamente en el 49,8 % de los casos se han registrado rayos durante el día de detección del incendio, mientras que en un 41,1% de los casos, los rayos se detectaron en días previos. En el 9,1 % restante de incendios no se registraron descargas eléctricas asociadas.

Aunque existe una coincidencia temporal, tanto en escala mensual como en escala horaria en cuanto a número de incendios y el número de rayos, cuando se analiza la serie temporal 1994-2019 no existe correlación en el número anual de ambos eventos.

4.3. Clasificación de los regímenes meteorológicos asociados a la generación de tormentas eléctrica e incendios por rayo.

El análisis de los regímenes meteorológicos responsables de la formación de tormentas eléctricas permite elaborar una clasificación en siete grupos:

- 1) **Tipo 1** (n = 454): Vaguada centrada en la zona oeste de la Península Ibérica, detectable a 500 hPa, debido al descenso de un embolsamiento de aire frío procedente del Atlántico norte, dejando así a las Islas Baleares en la parte delantera y cálida de dicha vaguada. A 850 hPa se puede observar los restos de una entrada de aire cálido procedente del norte de África.
- 2) **Tipo 2** (n = 304): Anticiclón en superficie con centro en el norte de Europa acompañado de una dorsal anticiclónica a 500 hPa, con una leve vaguada en la zona noreste, favoreciendo la llegada de un flujo de levante al archipiélago balear.
- 3) **Tipo 3** (n = 270): Inestabilidad derivada del paso de una vaguada poco marcada sobre las Islas Baleares cuyo eje vertical de encuentra centrado sobre la Península Ibérica detectable a 500 hPa, dejando nuevamente al archipiélago balear en la parte delantera, con circulación poco marcada en superficie.
- 4) **Tipo 4** (n = 223): Baja presión en altura ubicada sobre la Península Ibérica asociada a una profunda vaguada. A 850 hPa se detecta una bajada de temperaturas que viene acompañada en superficie de un centro de bajas presiones en el Mediterráneo.
- 5) **Tipo 5** (n = 197): Vaguada centrada sobre las Islas Baleares (500 hPa) favoreciendo una bajada de las temperaturas debido a la entrada de flujo procedente del norte de Europa, que se detecta tanto a 850 hPa como en superficie.

- 6) **Tipo 6** (n = 121): Anticiclón en superficie ubicado al oeste de la Península Ibérica, favoreciendo la entrada de viento de norte. En altura (500 hPa) se caracteriza por la presencia de una elevada difluencia en las cercanías del archipiélago balear.
- 7) **Tipo 7** (n = 119): Pequeña entrada de aire frío procedente del interior del continente europeo en forma de vaguada que se extiende hasta el oeste de la Península Ibérica, con reflejo a 500 hPa y 850 hPa (500 hPa). En superficie se detecta un área de bajas presiones poco marcada en el Mediterráneo Occidental.

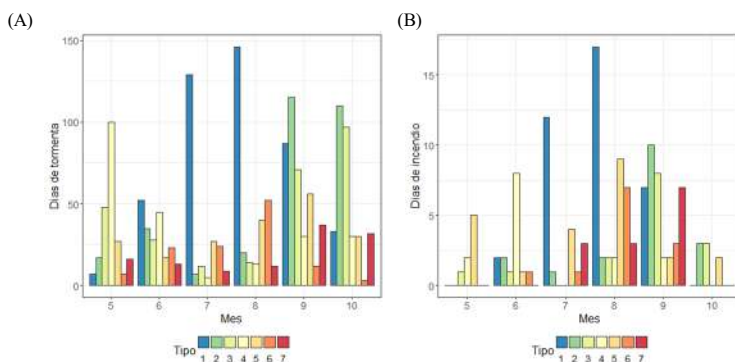


Fig. 3. (A) Distribución mensual del número de días de tormenta asociado a los 7 tipos. (B) Distribución mensual del número de días de incendios causados por tormenta en función de cada uno de los 7 tipos de tiempo.

La distribución mensual de las tormentas en función de los tipos muestra tres patrones distintos (Fig. 3A): (i) en mayo predomina la formación de tormentas bajo el tipo 4, (ii) entre septiembre y octubre la mayoría responden al tipo 2, y (iii) los meses de verano presentan una elevada concentración de casos vinculados al tipo 1. En cuanto a la distribución mensual de los incendios ocasionados durante estas tormentas (Fig. 3B), el dominio del tipo 1 se mantiene en julio y agosto, siendo responsable de la mayoría de los incendios. En septiembre y octubre los incendios se asocian mayoritariamente al tipo 2 y tipo 3. Finalmente, en mayo y junio dominan los tipos 5 y 6, respectivamente.

El análisis combinado de la presencia de tormentas eléctricas y la formación de incendios permite calcular la eficiencia de cada tipo, entendida como la frecuencia con la que cada uno de los tipos ocasiona incendios forestales por rayo (Fig. 5). En este sentido, destaca el tipo 7 durante el verano, y más concretamente en julio, cuando se generan incendios forestales por rayos en más de un 30 % de los días con el tipo 7. En cambio, a pesar de que el tipo 1 es el que genera un mayor número de incendios, su elevada recurrencia da lugar a una baja efectividad, siendo esta de cerca del 10 % en julio y agosto.

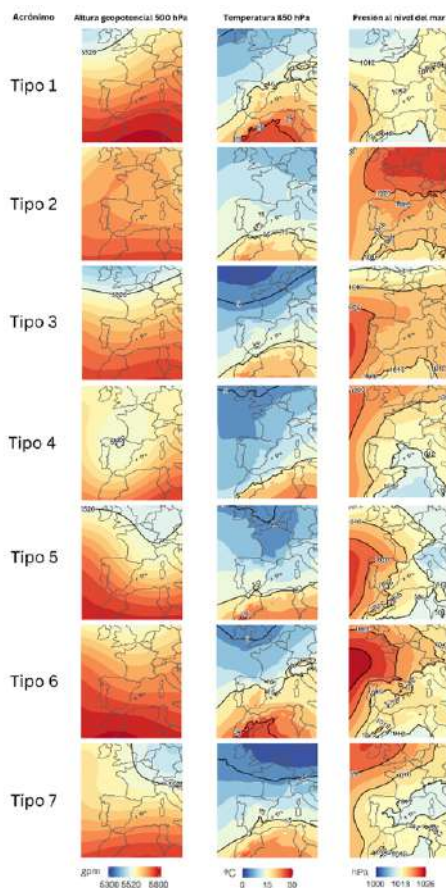


Fig. 4. Regímenes meteorológicos asociados a la formación de tormentas eléctricas en las Baleares para el periodo 1994-2019.

5. DISCUSIÓN

5.1. Características definitorias de los LIW y de las descargas eléctricas responsables de su formación.

Las tormentas y las descargas eléctricas son fenómenos estacionales concentradas entre agosto y diciembre. Una estacionalidad expuesta en diversos estudios (Ruiz et al., 2010), ligada a la formación de tormentas derivadas de la combinación entre la llegada de las primeras irrupciones de aire frío y las elevadas temperaturas de la superficie marítima (Tomàs-Burguera & Gelabert, 2014) entre agosto y octubre. La necesidad de descargas eléctricas para la generación de LIW hace evidente la coincidencia entre el comportamiento estacional de ambos fenómenos; en el caso de los LIW con un máximo entre agosto y septiembre, periodo más propenso para la generación de incendios por rayo en el territorio español (Pineda & Rigo, 2017).

Concretamente, la estacionalidad de los LIW viene definida por: i) la generación de tormentas eléctricas vinculadas a situaciones de inestabilidad ocasionadas por el ciclo anual de temperatura del aire superficial (Rivas Soriano et al., 2005); ii) los veranos secos, calurosos y con déficit hídrico del mediterráneo (Pineda & Rigo, 2017); y, iii) un máximo en el registro de descargas eléctricas sobre el archipiélago entre agosto y setiembre (Ruiz et al., 2010), confirmando así la relación existente incendios y rayos. En ambos fenómenos su máximo coincide durante los meses de agosto y septiembre. Más allá, también experimentan un mismo comportamiento horario vinculado, en el caso de los LIW, al ciclo de insolación diurno, repuntando durante las horas centrales de la tarde, momento en el que coinciden las temperaturas máximas y el mínimo de humedad relativa en verano (Pineda et al., 2022). En el caso de las descargas eléctricas se vincula al periodo durante el cual se registran las temperaturas máximas, momento en el que la energía disponible para el crecimiento de tormentas es más elevada (Tomàs-Burguera & Gelabert, 2014). En Baleares, el momento en el que se registran las temperaturas máximas se encuentra desplazado alrededor de las 12h debido al fenómeno del *embat* (brisa marina), el mismo fenómeno que favorece la presencia de puntos de convergencia que disparan el crecimiento de tormentas (Tomàs-Burguera & Gelabert, 2014; Ribas-Muntaner et al., 2023). Ambos eventos poseen un máximo alrededor de las 12h.

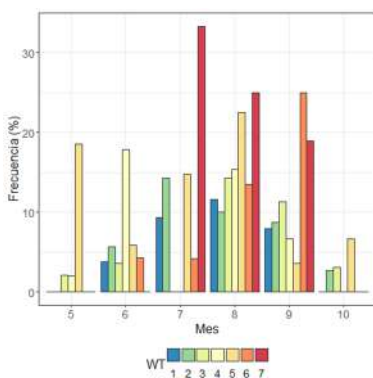


Fig. 5. Distribución mensual de la frecuencia (%) de generación de incendios por cada tipo.

Finalmente, estos incendios destacan por ser generalmente puntuales, pequeños, centrados en las zonas de relieve y alrededores ocupadas por pinares y especies arbustivas y/o herbáceas, coincidiendo con otros estudios (Pineda et al., 2022). Más allá de la relación existente entre la probabilidad de ignición con el número de rayos (Pacheco et al., 2009) y la coincidencia observada en la ubicación de ambos fenómenos, la ocurrencia de los incendios depende de la probabilidad de ignición requiriendo la coincidencia de ciertos factores (Pineda et al., 2022). Concretamente, la mayor afección en zonas boscosas se vincula a la mayor presencia de combustible y a la alta inflamabilidad de las especies de coníferas y aquellas que forman su sotobosque, además de la presencia de un menor albedo aumentando así la energía disponible para flujos de calor latente (Pacheco et al., 2009).

5.2. Regímenes meteorológicos favorables a la formación de LIW

La clasificación objetiva aplicada ha permitido definir 7 tipos de tiempo responsables de la formación de tormentas eléctricas durante los meses más cálidos del año. En la mayoría de los regímenes meteorológicos la situación a 500 hPa se caracteriza por la presencia de una vaguada acompañada de una lengua de aire frío en altura, que se desplaza de oeste a este pasando por encima del archipiélago balear. Dicha vaguada desplaza la isoterma de 15°C a 850 hPa hacia el sureste. En cambio, en superficie, domina una circulación poco marcada en un entorno de altas presiones, siendo esta la situación en superficie más frecuente durante el verano en el Mediterráneo Occidental (Grimalt et al., 2013). La ausencia de una circulación ciclónica marcada en superficie se debe a que el análisis se ha centrado en la época cálida del año, mientras que los ciclones mediterráneos intensos ocurren principalmente en la época fría. El tipo que más incendios genera es, a su vez, el que aparece con mayor frecuencia, es decir, el tipo 1. Además, su mayor frecuencia coincide con los meses en los que se dan más incendios. Sin embargo, su eficiencia para generar incendios es baja, ya que durante los meses de verano únicamente se registran incendios en un 10 % de los días con tipo 1. En el lado opuesto nos encontramos al tipo 7, que siendo el que menor frecuencia tiene, presenta una elevada eficiencia en los meses de verano. Así, en un 30 % de los días con tipo 7, las tormentas generadas dan lugar a un incendio. Este tipo de análisis puede aportar información valiosa en cuanto a la gestión y prevención de incendios, ya que la previsión de un determinado tipo se podría asociar con una probabilidad mayor de ocurrencia de incendio.

6. CONCLUSIÓN

Los LIW en el archipiélago balear son eventos de gran importancia debido a su coincidencia con el periodo de mayor riesgo de incendio en el territorio balear, a pesar de ser escasos y de pequeño tamaño. En primer lugar, la definición de 7 regímenes meteorológicos asociados a la formación de tormentas eléctricas durante el periodo de mayor ocurrencia de LIW, permite conocer bajo qué condiciones existe una mayor probabilidad de caída de rayos y por lo tanto de generación de estos incendios. Concretamente, se ha podido definir el tipo 7 como aquel con una mayor peligrosidad en la generación de incendios para el periodo de estudio, ocasionando incendios forestales en un 30% de los días en que se registra esta situación. Aun así, no se asegura la generación de incendios bajo unas determinadas condiciones sinópticas, debido a la intervención de otras variables biofísicas condicionantes para la ignición. Finalmente, la caracterización de las descargas eléctricas y de las variables que intervienen en la generación de LIW, junto con los regímenes meteorológicos propensos a su ocurrencia, permite incrementar el conocimiento actual sobre este fenómeno en el territorio balear y se presenta como una herramienta de útil para los servicios de prevención, control y extinción de incendios. Permite incrementar la alerta ante una mayor probabilidad de ocurrencia, teniendo en cuenta el escenario sinóptico y focalizar la atención en aquellas zonas más susceptibles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Balear de la Naturaleza (IBANAT) la cesión de la base de datos de incendios generados por rayos.

REFERENCIAS

- Estrany, J., & Gago, J. (2019). Incendis forestals i riscos de desertificació en un context de canvi global. In J. Estrany & J. Gago (Eds.), *Gestió ambiental post-incendi forestal. Monitoratge i control de processos ecogeomorfològics amb tecnologies de precisió* (pp. 1–21).
- García-Comendador, J., Fortesa, J., Calsamiglia, A., Calvo-Cases, A., & Estrany, J. (2017). Post-fire hydrological response and suspended sediment transport of a terraced Mediterranean catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2254–2265. <https://doi.org/10.1002/esp.4181>
- García-Ortega, E., Trobajo, M. T., López, L., & Sánchez, J. L. (2011). Synoptic patterns associated with wildfires caused by lightning in Castile and Leon, Spain. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3), 851–863. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-851-2011>
- Grimalt, M., Tomàs, M., Alomar, G., Martin-Vide, J., & Moreno-García, M. C. (2013). Determination of the Jenkinson and Collison's weather types for the western Mediterranean basin over the 1948-2009 period. temporal analysis. *Atmosfera*, 26(1), 75–94. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71063-4](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71063-4)
- Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins, J. A., Martin-Vide, J., & Royé, D. (2019). Environmental Modelling & Software synoptReg: An R package for computing a synoptic climate classification and a spatial regionalization of environmental data. *Environmental Modelling and Software*, 118(January), 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.006>
- Pacheco, C., Aguado, I., & Nieto, H. (2009). Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 9, 232–249.
- Pineda, N., Peña, J. C., Soler, X., Aran, M., & Pérez-Zanón, N. (2022). Synoptic weather patterns conducive to lightning-ignited wildfires in Catalonia. *Advances in Science and Research*, 19, 39–49. <https://doi.org/10.5194/asr-19-39-2022>
- Plana, E., Font, M., Serra, M., Borràs, M., & Vilalta, O. (2016). *El fuego y los incendios forestales en el Mediterráneo, la historia de una relación entre bosques y sociedad: cinco mitos y realidades para saber más*.
- Ribas-Muntaner, M., García-Comendador, J., Fortesa, J., Company, J., Ruíz, M., & Estrany, J. (2023). Análisis de los incendios forestales causados por impactos de rayo en mallorca. *XXVIII Congreso de La Asociación Española de Geografía*, 164, 155–164. <https://doi.org/10.21138/CG/2023.lc>
- Ruiz, M., Burguera, M. T., Riera, C. M. A. S., Salv, L., Gelabert, M. G., & Balears, I. (2010). *Climatología de descargas eléctricas en mallorca y su relación con las precipitaciones intensas (1944-2010)*.
- Tomàs-Burguera, M., & Gelabert, M. G. (2014). Actividad tormentosa, marítima, litoral y microcontinental en ámbitos insulares. Un análisis geográfico aplicado a Mallorca. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 66, 125–142. <https://doi.org/10.21138/bage.1783>.

IMPACTOS DE LA SEQUÍA: RASTREANDO SUS EFECTOS MEDIOAMBIENTALES A TRAVÉS DE GOOGLE EARTH ENGINE

Paula SERRANO ACEBEDO, Natalia LIMONES RODRÍGUEZ y Mónica AGUILAR ALBA

Facultad de Geografía e Historia. Universidad de Sevilla
paulaserranoace@gmail.com, natalialr@us.es, malba@us.es

RESUMEN

La sequía constituye un riesgo hidroclimático de gran complejidad y actualidad en Andalucía por sus repercusiones y acentuación en el contexto de cambio climático, siendo sus impactos muy diversos. De ellos, este estudio aborda los impactos medioambientales, con el fin de demostrar el potencial de la teledetección para la cuantificación de impactos en variables medibles a través de imágenes satélites. Esto ha sido llevado a cabo tomando como marco de estudio el municipio de El Pedroso (Sevilla), realizando una distinción interna en coberturas de vegetación natural y seminatural.

Para determinar los impactos se han tomado diversas variables ambientales (agua superficial, agua subterránea, humedad del suelo, índices de vegetación, productividad primaria de la vegetación, polvo en el aire, etc.) disponibles en Google Earth Engine, para verificar su vinculación con los fenómenos de sequía. Así, su desarrollo temporal ha sido analizado estadísticamente para el periodo 2004-2022 en relación con las condiciones de sequía del municipio.

Con todo ello, se prueba la potencialidad de las fuentes satelitales para el estudio del grado de impacto medioambiental de las sequías, poniendo de manifiesto la elevada vinculación entre los impactos de naturaleza hidrológica y vegetal con la sequía, especialmente en momentos de mayor productividad vegetal. Esta vinculación es mayor con SPEI 3, lo que muestra la mayor influencia de los eventos de sequía de carácter estacional sobre la vegetación natural y seminatural del área de estudio.

Palabras clave: sequía, impactos-medioambientales, hidrometeorología, teledetección, Andalucía.

ABSTRACT

This study focuses on analyzing the environmental impacts of drought in the municipality of El Pedroso, located in the province of Seville, using remote sensing tools based on satellite imagery and data obtained from the Google Earth Engine platform. Drought constitutes a significant hydroclimatic risk, particularly in the context of climate change, as its repercussions on the natural environment are becoming increasingly pronounced, especially in ecosystems with natural and semi-natural vegetation.

To assess these impacts, various environmental variables have been employed, such as surface water, groundwater, soil moisture, vegetation indices, primary vegetation productivity, and atmospheric dust concentration, among others. The goal is to verify their relationship with drought phenomena. These variables have been subjected to temporal and statistical analysis over the period from 2004 to 2022, in relation to the specific drought conditions in the municipality.

These results underscore the utility of remote sensing in assessing drought impacts and enhance understanding of the complex relationship between drought and environmental variables. In this regard, a strong correlation is observed between drought-related effects, both hydrological and natural vegetation covers and drought events. This connection is higher during periods of higher vegetation productivity. The correlation is strongest with the SPEI-3 index, which highlights the greater influence of seasonal drought events on natural and semi-natural vegetation in the study area.

Key words: drought, environmental impacts, hydrometeorology, remote sensing.

1. INTRODUCCIÓN

La sequía constituye un riesgo hidroclimático de gran actualidad en Andalucía por sus repercusiones y su acentuación en el contexto del cambio climático. Los últimos informes emitidos por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, basados en la modelización CMIP6 –Coupled Model Intercomparison Project 6– (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023), prevén un aumento de la variabilidad pluviométrica y de las temperaturas, así como fenómenos extremos más frecuentes en el sur de Europa, lo que supondrá un incremento de secuencias secas prolongadas en el ámbito mediterráneo (Martínez-Dalmau et al., 2023).

Así, el aumento de las sequías las configura como riesgos naturales cuya comprensión y gestión en esencial, debiendo hacerse especial énfasis en el desarrollo de estrategias de adaptación que partan de un previo análisis de los efectos de sus fenómenos en el medio físico y socioeconómico (Martínez-Dalmau et al., 2023). No obstante, el estudio de los impactos de la sequía y la atribución de estos a este fenómeno no está exento de retos, pues existe falta de consenso sobre la definición de la propia sequía, sus límites y sus diversas manifestaciones (Limonés et al., 2022).

De hecho, puede que la falta de consenso en torno a las sequías y sus manifestaciones sea precisamente debida a sus impactos de diversa naturaleza. Estos son generalmente abordados desde una perspectiva socioeconómica y agrícola, haciéndose énfasis en las pérdidas económicas directas y relegando a un segundo lugar sus efectos en el medio. Por ello, nos centramos aquí en los impactos medioambientales por el desigual tratamiento bibliográfico que se ha realizado de ellos (Crausbay et al., 2017), aunque son esenciales a nivel ecológico y ecosistémico. La teledetección constituye una herramienta idónea para el análisis de los impactos medioambientales, pues la gran diversidad de productos satelitales permite rastrear los impactos de la sequía aprovechando las amplias coberturas espaciales y altas frecuencias de medición (AghaKouchak et al., 2015). Existe gran disponibilidad de productos de índole medioambiental, como índices de vegetación (Belal et al., 2014), otros que ofrecen la

temperatura y humedad del suelo, las partículas en suspensión (Abdollahi et al., 2021) y el volumen o presencia de aguas superficiales o subterráneas (Frappart & Ramillien, 2018). En base a ellos, se plantea realizar una valoración de los impactos de la sequía sobre las coberturas naturales y seminaturales a escala municipal, analizando su vinculación con las condiciones de sequía.

2. FUENTES Y METODOLOGÍA

Este estudio pretende analizar los impactos medioambientales de la sequía en Andalucía tomando como zona de estudio la escala municipal, siendo el municipio en el que pilotar esta metodología El Pedroso, situado en la provincia de Sevilla. Los análisis sobre este municipio nos servirán para mostrar el potencial del uso de la teledetección en la identificación de impactos en variables medibles a través de imágenes satélites procedentes de Google Earth Engine (GEE). El municipio ha sido seleccionado como zona en la que pilotar esta metodología por su ubicación en la Sierra Norte de Sevilla, cuya elección radica en la variedad y extensión de coberturas de carácter natural y seminatural que presenta.

GEE constituye una plataforma web en continua actualización con gran cantidad de productos satelitales y modelizados de carácter climático y fisisico-ambiental, por lo que de ella han sido extraídas las variables ambientales y los índices de sequía (SPEI) para el periodo temporal 2004-2022. Se han seleccionado los rangos temporales de SPEI de 3, 6, 12, 24 y 48 meses de agregación mensual, así como las variables ambientales de mayor coherencia en el ámbito espacial elegido, atendiendo también a la disponibilidad temporal de los registros de datos y primando la homogeneidad temporal y de desagregación de los datos. Estas son el índice NDVI, la productividad primaria bruta y neta de la vegetación, variables de agua azul (reservas de agua superficial y subterránea) y de agua verde (humedad del suelo). En aquellas variables en la que la resolución espacial lo ha permitido, se ha desagregado la información a escala de usos – obtenidos de la REDIAM, 2023--, siendo identificadas 11 coberturas naturales en El Pedroso (agua, bosques de coníferas, bosques de quercíneas, bosques mixtos, matorrales boscosos, matorrales esclerófilos, olivares, pastizales naturales, prados, sistemas agroforestales y vegetación escasa).

Además, se ha manejado información hidrológica procedente del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) y del Sistema de Información de Anuarios de Aforo (SIAA) para analizar las fluctuaciones temporales de las reservas de agua superficial y subterránea con relación a los episodios de sequía. Todas las variables, desestacionalizadas mediante el cálculo de sus anomalías, han sido puestas en relación con los índices de sequía mediante el cálculo de coeficientes de correlación de Pearson y el análisis de sus fluctuaciones temporales conjuntas. Esto ha permitido identificar el grado de vinculación de cada variable con los momentos de déficit y superávit hídrico, así como los posibles retardos en la materialización de los impactos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Impactos de la sequía en la vegetación

La intensificación y aumento de la frecuencia de las sequías ha tenido un evidente efecto adverso sobre las condiciones ecológicas de la vegetación, generando un impacto ecosistémico y económico derivado de la reducción de los beneficios agrícolas, aunque este trabajo aborda en exclusiva la vertiente medioambiental de los impactos de la sequía en relación a las condiciones de la vegetación.

El NDVI se configura como un proxy idóneo para evaluar el verdor vegetal, que puede estar ligado al estado de la biomasa y la vitalidad de la cobertura vegetal en relación con las condiciones de sequía (Huang et al., 2021). Las cifras de NDVI obtenidas de GEE para las distintas coberturas vegetales muestran una tímida tendencia al alza y un marcado patrón estacional –que ha sido eliminado desestacionalizando sus registros–. Las distintas formaciones vegetales presentan un patrón interanual similar, aunque se aprecia menor variabilidad en el estrato arbóreo y arbustivo en comparación con las coberturas herbáceas (pastizales y prados), pues estas parecen tener mayor dependencia de las condiciones de precipitación y humedad, de lo que se deriva una menor capacidad de amortiguación de las condiciones hidrometeorológicas. En ello juega un rol fundamental su aparato radicular, que es de menor magnitud que el de las coberturas forestales de mayor dimensión (Zerda & Tiedemann, 2010).

La conexión de las anomalías de NDVI con las condiciones de sequía es moderada (0.46), siendo mayor para SPEI 3 al aplicar un retraso de un mes a las condiciones de sequía, lo que muestra el mayor impacto de los eventos de sequía de carácter breve y estacional. Los valores mínimos de SPEI 3 presentan gran coincidencia con los NDVI, pero a mayor superávit hídrico el NDVI de estas coberturas vegetales presenta menor vinculación con las condiciones hidrometeorológicas, pues NDVI covaría mejor con SPEI en momentos de déficit (Figura 1). Esto pone de manifiesto la vinculación del verdor y la vigorosidad de la vegetación con la sequía bajo condiciones de déficit, al suponer el agua un elemento limitante del desarrollo vegetal.

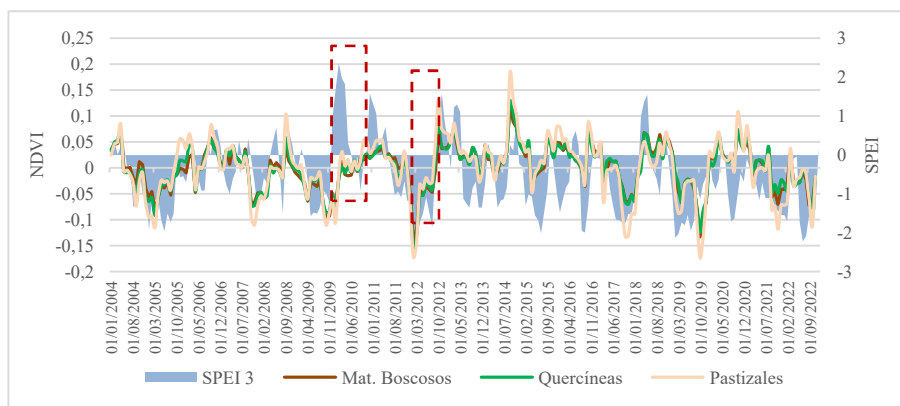


Fig. 1. Fluctuaciones conjuntas de anomalías de NDVI con SPEI 3. Fuente: Serrano Acebedo, P. (2024).

Por su parte, el análisis mensual de las condiciones de la vegetación a partir de NDVI ha evidenciado una mejor vinculación con las condiciones de sequía durante los meses de abril y mayo, momentos de mayor crecimiento vegetal. De ello puede derivarse

una mayor capacidad predictiva del impacto de la sequía sobre la vegetación en estos momentos de mayor verdor y vitalidad vegetal, coincidentes con la estación primaveral.

Estas conexiones quedan también constatadas atendiendo a los valores de productividad primaria bruta, cuyas anomalías presentan mayor vinculación con las condiciones de sequía marcadas por SPEI 3, en especial en momentos de déficit hídrico severo, así como en la estación primaveral. En ecosistemas mediterráneos la sequía se configura como el principal freno a la productividad (Rambal et al., 2014), teniendo mayor vinculación con eventos de sequía de media y baja duración (Liu et al., 2021). Los resultados obtenidos con respecto a este variable corroboran esta afirmación, pues el impacto de las sequías en la productividad vegetal es mayor en sequías estacionales marcadas por SPEI 3.

Así, las mayores correlaciones de producción primaria bruta y SPEI se ubican en abril, mayo y septiembre, fundamentalmente para las coberturas correspondientes a olivares, pastizales, matorrales boscosos y bosques de quercíneas, que alcanzan coeficientes de correlación cercanos a 0.9 en mayo. Por el contrario, en momentos de menor desarrollo vegetal –invierno y verano– estas correlaciones son ínfimas e incluso negativas, pues la producción primaria bruta es reducida por los propios ciclos fenológicos de la vegetación. Esto no implica que el elemento hidrometeorológico posea menor relevancia, sino que más allá de que se trate de un año húmedo o seco, la estación estival es característicamente seca en El Pedroso, por lo que las bajas productividades de la vegetación no casan bien. En invierno ocurre algo similar, pues las temperaturas condicionan también la productividad independientemente de la humedad/déficit general del año en cuestión.

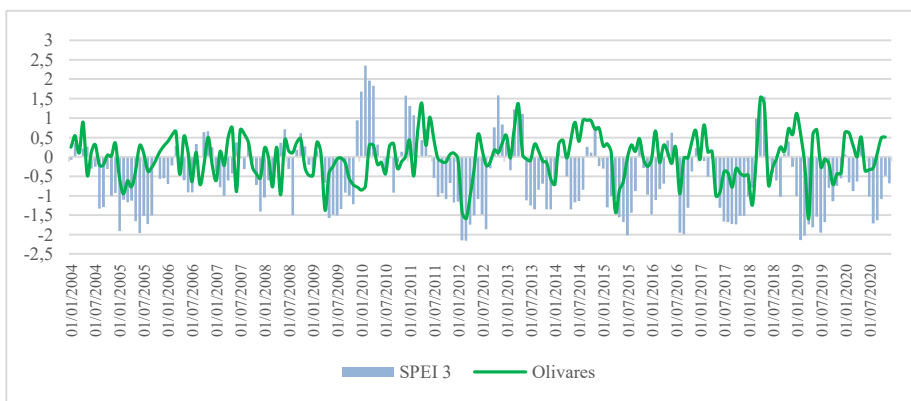


Fig. 2. Fluctuaciones conjuntas de Producción Primaria Bruta de olivares y SPEI 3. Fuente: Serrano Acebedo, P. (2024).

3.2. Impactos de la sequía en el agua superficial

El agua superficial presente en un territorio constituye un aspecto fundamental de su ecosistema y los servicios prestados por este, así como de la severidad, que puede ocasionar determinados riesgos hidrometeorológicos. El Pedroso presenta dos embalses con gran capacidad de almacenamiento, que en este trabajo tratamos como

masas de agua permanentes pero fluctuantes con un valor ecológico evidente a pesar de suponer una fuerte regulación para el sistema de funcionamiento hidrológico. Aparte de estos, el agua superficial también se manifiesta, en menor medida, dentro de las distintas coberturas vegetales naturales presentes en el término municipal. Estas balsas y humedales son de origen natural o antrópico, dependiendo del caso, y aunque con menor relevancia y permanencia que las reservas de presas y embalses, forman parte del agua superficial disponible en el municipio, y computan como parte integrante de la disponibilidad hídrica en el ecosistema.

Se ha extraído de GEE el producto procedente de GLDAS 2.2 (Global Land Data Assimilation System 2.2), cuya desestacionalización de registros muestra una pronunciada tendencia descendente en las anomalías de disponibilidad hídrica. El patrón espaciotemporal seguido por las aguas superficiales tiene gran correspondencia con las condiciones hidrometeorológicas del entorno, pues los coeficientes de correlación entre ambas variables son elevados. Las mayores cifras son obtenidas para SPEI 6, con valores de 0.70. Aun así, pese a tener altas correlaciones (0.7), ambas series presentan mayores diferencias en sus valores mínimos, existiendo cierto desfase entre el agua superficial y las condiciones de sequía marcadas por SPEI 6. En momentos en los que SPEI 6 registra un severo déficit el agua superficial desciende de forma paralela (Figura 3), pero cuando dicho déficit es moderado, superior a -1, el agua disponible en superficie experimenta un descenso más acusado que la tendencia de SPEI. Esto parece ir asociado al uso y manejo antrópico que se realiza del agua superficial, lo que podría implicar un retardo en la toma de acciones encaminadas al ahorro hídrico y la imposición de limitaciones al consumo de agua para usos no prioritarios.

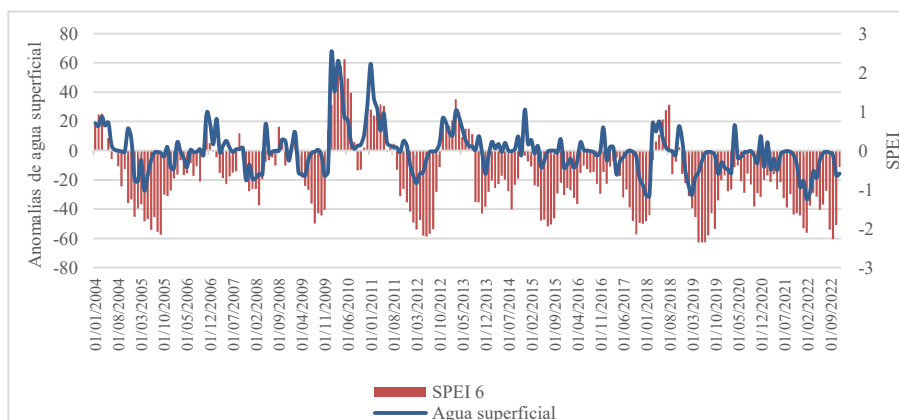


Fig. 3. Fluctuaciones conjuntas de anomalías de aguas superficiales de GLDAS junto a SPEI 6. Fuente: Serrano Acebedo, P. (2024).

Los registros de píxeles con presencia de agua provenientes del Joint Research Centre (2021) confirman la mejor relación de esta variable con los SPEI de menor agregación anual, en especial con el SPEI 6 dada la rápida materialización de los impactos. La tendencia es creciente en todas las coberturas vegetales estudiadas para El Pedroso, lo

que implica un paulatino aumento de los píxeles con presencia de agua que resulta contrario a la tendencia descendente mostrada por GLDAS 2.2. Esta discrepancia puede deberse a que más que atender a condiciones hidrometeorológicas y climáticas, podría reflejar la influencia de la acción antrópica, materializada en el aumento de balsas.

En términos generales, los píxeles de la mayoría de las coberturas vegetales de El Pedroso se localizan donde no existen cuerpos de agua, destacando en superficie principalmente la cobertura de agua y sistemas agroforestales –coberturas seminaturales—. De ellas, los pantanos –cobertura de ‘agua’– registran valores elevados pero reducida variabilidad, pues se trata de cuerpos de agua de gran dimensión y carácter permanente, aunque destacan las mayores fluctuaciones de los sistemas agroforestales. Su proximidad a los embalses informa del crecimiento y retroceso de sus límites, lo que constituye un dato de gran valor analítico e interpretativo, pues aporta información acerca de la expansión y retroceso que experimentan los embalses dentro de la dehesa a causa de la sequía (Figura 4).

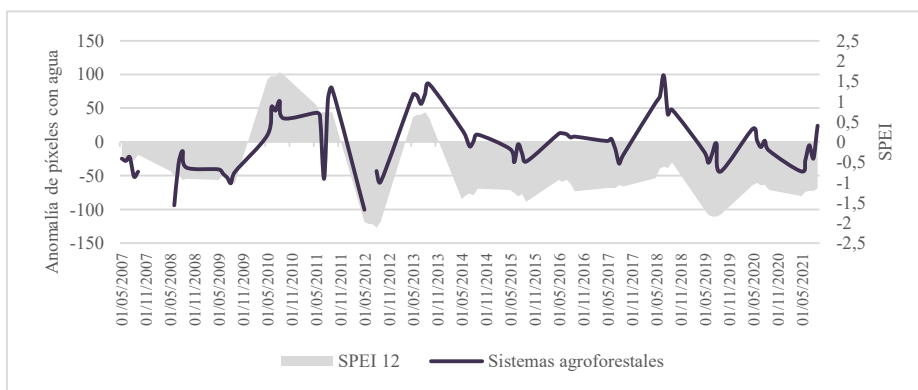


Fig. 4. Fluctuaciones de anomalías aguas superficiales (JRC) y SPEI 12. Fuente: Serrano Acebedo, P. (2024).

No obstante, las fluctuaciones en las reservas de agua de los dos embalses presentes en el municipio (Melonares y Huesna) presentan una tendencia distinta con relación a la sequía, pues el embalse de Huesna presenta mayor vinculación con las condiciones hidrometeorológicas que Melonares. Esto parece ser debido a la menor capacidad del primero, así como a su dependencia de las operaciones realizadas al embalse de El Pintado, ubicado aguas arriba del pantano de Huesna que recoge las aguas del río Rivera de Huesna. Por el contrario, las fluctuaciones temporales del Melonares casan mejor en momentos de déficits muy acusados, como en 2012 y 2018, pero sus reservas no se ven tan afectadas por periodos de sequía de menor gravedad en los que el SPEI registra cifras negativas superiores a -1. Esta mayor capacidad de amortiguación de las condiciones hidrometeorológicas parece estar ligada a su mayor capacidad de embalse y su gestión, pues sus reservas abastecen al área metropolitana de Sevilla en materia de consumo humano y riegos agrícolas, por lo que están influidas por el

intenso manejo antrópico. Esto permite identificar la mayor vulnerabilidad y susceptibilidad del embalse de Huesna ante condiciones de déficit hidrometeorológico, pues es más propenso a sufrir alteraciones e impactos en sus reservas derivadas de las condiciones de sequía

3.3. Impactos de la sequía en el agua subterránea

En El Pedroso, los volúmenes de aguas subterráneas presentan un marcado patrón estacional consistente en la coincidencia temporal de los meses de verano con las menores cifras de reservas de agua subterránea, tanto por el descenso de la precipitación como por el aumento de la evapotranspiración en las latitudes en las que se ubica la zona de estudio. Esta estacionalidad y su importancia dentro del mecanismo de propagación de la sequía en nuestras latitudes ha sido también identificado por otras investigaciones (Van Loon & Van Lanen, 2012).

Al margen de la estacionalidad intraanual, la tendencia interanual de esta variable ha mostrado ser descendente desde 2004 a 2022, con determinadas fluctuaciones ligadas a fenómenos hidroclimáticos concretos que han suscitado máximos y mínimos singulares. Estos son coincidentes con momentos de superávit y déficit hídrico, lo que pone de manifiesto la estrecha vinculación de las reservas de agua subterránea con las condiciones de sequía, que alcanzan coeficientes de correlación de Pearson mayores de 0.7 para SPEI 6 al introducir un mes de retraso en el agua subterránea. Aun así, se aprecia un retardo de las reservas subterráneas en manifestar el déficit hidrometeorológico, siendo ejemplo de ello los años 2004, 2011, 2012 y 2019, pues el agua subterránea posee cierta inercia y capacidad de suavizar el déficit hidrometeorológico.

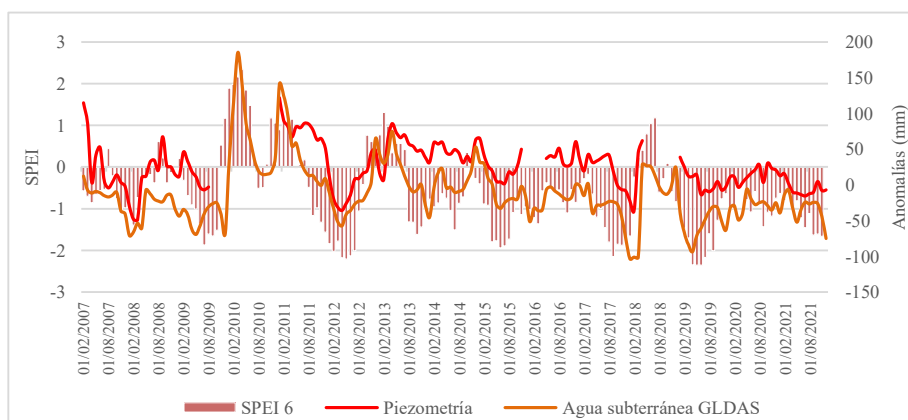


Fig. 5. Fluctuaciones conjuntas de anomalías de aguas subterráneas de GLDAS y niveles piezométricos junto a SPEI. Fuente: Serrano Acebedo, P. (2024).

A modo de complemento al registro de datos de procedencia satelital y modelos climáticos, se incluyen aquí los niveles piezométricos registrados por el piezómetro de Cazalla de la Sierra, que constituye una fuente de datos directa. Se trata de un sondeo de 100 metros de profundidad. Los niveles registrados por este piezómetro no

exceden los 8 metros de profundidad. Sus datos, medidos en términos de cotas sobre el nivel del mar, presentan un patrón interanual con gran similitud al de los niveles de aguas subterráneas extraídos de GLDAS 2.2. Ambas variables muestran una tendencia similar, aunque su conexión es menor en condiciones de sequía, donde casan peor que los máximos. Es destacable la menor variabilidad para los registros de piezometría, pues los datos de GLDAS 2.2 amortiguan las abruptas subidas y bajadas, evidenciándolas de forma más tardía.

4. CONCLUSIONES

El análisis realizado acerca de los impactos medioambientales de la sequía en Andalucía muestra el breve plazo de manifestación de estos impactos sobre las condiciones de vegetales e hidrológicas, al ser los SPEI 3 y 6 los que mayores correlaciones presentan. Esta vinculación es más elevada en términos hidrológicos, lo que ha permitido identificar la relación directa entre las condiciones de sequía y la expansión/retroceso de los embalses, así como una mayor inercia del agua subterránea con respecto al agua superficial, pues los acuíferos reflejan más tardíamente las condiciones hidrometeorológicas en superficie al presentar un efecto amortiguador de estas.

Asimismo, se ha identificado una mayor influencia de las condiciones de sequía en la vegetación en las etapas de mayor desarrollo vegetal (época primaveral), en especial para pastizales y prados, por la menor profundidad radicular de las especies herbáceas. De ello parece extraerse una mayor influencia de la sequía en la productividad vegetal cuando esta alcanza sus máximos, pues en momentos de menor desarrollo vegetal pueden existir otros factores externos que distorsionen dicha vinculación. Así, nuestro estudio demuestra una mayor capacidad de predicción de las condiciones de la vegetación en épocas de mayor desarrollo vegetal (mayo y octubre) en función de las condiciones hidrometeorológicas, lo que permitiría una mejora en el seguimiento y gestión de estos espacios de gran valor ambiental.

REFERENCIAS

- Abdollahi, S., Madadi, M., Ostad-Ali-Askari, K. (2021). Monitoring and investigating dust phenome-non on using remote sensing science, geographical information system and statistical methods. *Applied Water Science*, 11(7), 111. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01419-z>
- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlaw, B. D., Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452-480, Doi: <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Belal, A.-A., El-Ramady, H. R., Mohamed, E. S., Saleh, A. M. (2014). Drought risk assessment using remote sensing and GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), 35-53. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0707-2>
- Crausbay, S. D., Ramirez, A. R., Carter, S. L., Cross, M. S., Hall, K. R., Bathke, D. J., Betancourt, J. L., Colt, S., Cravens, A. E., Dalton, M. S., Dunham, J. B., Hay, L. E., Hayes, M. J., McEvoy, J., McNutt, C. A., Moritz, M. A., Nislow, K. H., Raheem,

- N., Sanford, T. (2017). Defining Ecological Drought for the Twenty-First Century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(12), 2543-2550. Doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0292.1>
- Frappart, F., Ramillien, G. (2018). Monitoring Groundwater Storage Changes Using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Satellite Mission: A Review. *Remote Sensing*, 10(6), 829. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs10060829>
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.). (2023). Summary for Policymakers. En *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Re-port of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 3-32). Cambridge University Press. Doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Joint Research Centre (2021). *Global Surface Water Explorer*. <https://global-surface-water.appspot.com/>
- Limones, N., Pita- López, M. F., Camarillo-Naranjo, J. M. (2022). A new index to assess meteorological drought: The Drought Exceedance Probability Index (DEPI). *Atmósfera*, 35(1), 67-88. Doi: <https://doi.org/10.20937/ATM.52870>
- Liu, Y., Zhou, R., Wen, Z., Khalifa, M., Cheng, Z., Ren, H., Zhang, Z., Wang, Z. (2021). Assessing the impacts of drought on net primary productivity of global land biomes in different climate zones. *Ecological Indicators*, 130, 108146. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108146>
- Martínez-Dalmau, J., Gutiérrez-Martín, C., Kahil, T., Berbel, J. (2023). Impact of alternative water policies for drought adaptation in the Guadalquivir Mediterranean River basin, southern Spain. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101444. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101444>
- Rambal, S., Lempereur, M., Limousin, J., Martin-StPaul, N., Ourcival, J. M., Rodríguez-Calcerrada, J. (2014). How drought severity constrains GPP and its partitioning among carbon pools in a *Quercus ilex* coppice? *Biogeosciences Discussions*, 11, 8673-8711. Doi: <https://doi.org/10.5194/bgd-11-8673-2014>
- Serrano Acebedo, P. (2024). *Huellas de la sequía: Explorando su impacto medioambiental mediante Big Data de libre acceso* [Trabajo Fin de Máster]. Universidad de Sevilla.
- Van Loon, A. F., Van Lanen, H. a. J. (2012). A process-based typology of hydrological drought. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 1915-1946. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-16-1915-2012>
- Zerda, H. R., Tiedemann, J. L. (2010). Dinámica temporal del NDVI del bosque y pastizal natural en el Chaco de la Provincia de Santiago del Estero, Argentina The temporal dynamic of NDVI, of forest and grassland in the Chaco Seco of Santiago del Estero province, Argentine. *AMBIÈNCIA*, 6(1).