

EDUARDO AGOSTA SCAREL^a

DAVID CORELL^b

MARÍA JOSÉ ESTRELA^c

JAVIER MIRÓ^d

A UN AÑO DE LA DANA DE VALENCIA, ¿PRELUDIO DE UNA NUEVA ERA CLIMÁTICA?

RESUMEN

El 29 de octubre de 2024, Valencia sufrió un evento de lluvias torrenciales sin precedentes, alcanzando un récord histórico de 771 mm en Turís. Aunque la configuración atmosférica correspondía a una DANA (o “gota fría”) tradicional, su extrema virulencia fue impulsada por el cambio climático. La causa principal fue la temperatura anormalmente cálida del mar Mediterráneo, resultado de una tendencia de calentamiento sostenido en otoño de +1,44 °C en las últimas cuatro décadas. Este calor sobrealimentó la atmósfera, creando un récord histórico de humedad para el mes de octubre. Las masas de aire absorbieron esta extraordinaria cantidad de vapor de agua antes de descargar sobre tierra firme. Por lo tanto, este fenómeno no fue simplemente una DANA más, sino un evento inédito para la climatología del lugar. El calentamiento global está intensificando estos eventos, generando tormentas de una magnitud nunca antes vista y alertando sobre los nuevos riesgos a los que nos enfrentamos.

PALABRAS CLAVE: DANA, precipitaciones extremas, mar Mediterráneo, cambio climático.

a Departamento de Ecología Integral de la Conferencia Episcopal Española. C/ Añastro, 1. 28033 Madrid. ecologiaintegral@conferenciaepiscopal.es

b Facultat de Geografia i Història, Universitat de València. Av. Blasco Ibáñez, 28. 46010 Valencia. david.corell@uv.es

c Facultat de Geografia i Història, Universitat de València. Av. Blasco Ibáñez, 28. 46010 Valencia. majoesna@uv.es

d Universidad de Alicante. 03080 Alicante. jj.miro@ua.es

Fecha de recepción: 17-09-2025. Fecha de aceptación: 29-10-2025.

ONE YEAR AFTER THE VALENCIA DANA: PRELUDE TO A NEW CLIMATIC ERA?

ABSTRACT

On October 29, 2024, Valencia experienced unprecedented torrential rainfall, reaching a historic record of 771 mm in Turís. Although the atmospheric configuration corresponded to a traditional DANA (or “gota fría”), its extreme virulence was driven by climate change. The leading cause was the abnormally warm temperature of the Mediterranean Sea, resulting from a sustained warming trend in autumn of +1.44 °C over the last four decades. This heat supercharged the atmosphere, creating record-breaking humidity for October. Air masses absorbed this extraordinary amount of water vapor before discharging over land. Therefore, this phenomenon was not simply another DANA, but the manifestation of a new climatic reality. Global warming is intensifying these events, generating storms of a magnitude never seen before and alerting us to the new risks we face.

KEYWORDS: DANA, extreme precipitation, Mediterranean Sea, climate change.

INTRODUCCIÓN

El 29 de octubre de 2024, la provincia de Valencia fue azotada por un evento meteorológico extremo que dejó una cicatriz imborrable en el territorio y en la memoria de sus habitantes. Las lluvias torrenciales fueron de una intensidad y extensión raramente vistas. La localidad de Turís, en Valencia, registró un récord histórico de 771 mm en apenas 24 horas según datos de la Agencia Española de Meteorología (AEMET). El fenómeno meteorológico no solo causó inundaciones devastadoras, sino que también planteó una pregunta urgente: ¿estamos presenciando una simple “gota fría” más, como tantas en la historia, o el nacimiento de una nueva categoría de tormentas, sobrealimentadas por el cambio climático? Este artículo busca responder a esta pregunta, no desde la impresión, sino a través de un análisis detallado que revela la singularidad del fenómeno, complementado por las claves dinámicas y termodinámicas que explican su severidad en el contexto climático actual.

Entendiendo el fenómeno meteorológico: la “gota fría” o DANA

Baja segregada, «gota fría» o depresión aislada en niveles altos (DANA) de la atmósfera son maneras de llamar a un fenómeno meteorológico natural y bien conocido en las latitudes subtropicales del hemisferio norte y del sur. Su estructura principal se extiende entre los cinco mil y diez metros de altitud, y a veces puede llegar hasta la superficie (Lackmann, 2011).

Los vientos en altura soplan predominantemente del oeste, formando intensas corrientes de aire llamadas corrientes en chorro. Estas bandas de intenso viento se ubican habitualmente en latitudes subpolares, entre 60°N y 50°N, pero son muy sinuosas, con profundas curvas que oscilan de norte a sur, por lo que muchas veces alcanzan latitudes subtropicales, en torno a los 30°N. Estos vientos en la tropósfera superior de las latitudes medias se explican bien con la teoría cuasigeostrófica, por lo que sus

intensidades son proporcionales al gradiente del campo geopotencial y su dirección es paralela a las isolíneas de mismo. En este sentido, los vientos de altura siguen el patrón sinusoidal de la perturbación cuasigeostrofica del geopotencial, cuyas cuñas y vaguadas se propagan de oeste a este, siguiendo el sentido de la rotación terrestre (Holton y Hakim, 2012).

Su función en la dinámica meteorológica global es crucial: transportan energía (calor y momento) entre las latitudes polares y las menores. Cuando curvan hacia el norte (sur), transportan aire cálido del sur (norte) y entregan (absorben) momento terrestre a la atmósfera. Desde Europa, a veces en esta última situación, los fuertes vientos llegan hasta el norte de África, y la curvatura de la perturbación del geopotencial se hace tan pronunciada que encierra en una rotonda los vientos fríos, circulando en sentido ciclónico, en contra de las agujas del reloj. La rotonda se separa del flujo principal y se forma una “gota” o bolsa de aire frío rotando allá arriba, de gran tamaño, sobre la península ibérica o sobre alguna zona del mar Mediterráneo o del norte de África (Martín-León, 2003; Insúa-Costa et al., 2021).

Pensemos que el aire frío en altura es denso, pesado, y que tenderá a bajar, pero en niveles más bajos el aire está caliente, y en las zonas cercanas al mar, además, muy húmedo. Esto genera en la vertical una intensa inestabilidad, mucha energía potencial convectiva disponible para ser liberada. Esta situación meteorológica organiza fuertes tormentas, que no son otra cosa que una manera natural de la atmósfera de equilibrar fuerzas, mezclando verticalmente las parcelas de aire cálido y húmedo en niveles bajos, con aire frío y seco de niveles altos. En consecuencia, una DANA siempre tiene asociadas intensas tormentas con precipitaciones torrenciales.

El Mediterráneo: el cóctel perfecto

La costa mediterránea ibérica es un escenario particularmente propenso a estos eventos, especialmente en otoño (Sánchez Almodóvar et al., 2022; Insúa-Costa et al., 2021). A la DANA en altura se le suma un factor crucial: un mar Mediterráneo que, tras el verano, está mucho más cálido que el aire. Este mar actúa como un combustible, inyectando ingentes cantidades de humedad y calor a las capas bajas de la atmósfera. Si, además, el viento en superficie sopla del este (viento de Levante), empuja todo este aire húmedo hacia la costa, donde choca con las montañas y se ve forzado a ascender debido al relieve que allí encuentra. La combinación de la DANA en altura, un mar cálido y los vientos de Levante es el cóctel perfecto para generar lluvias intensas, como ha demostrado la historia climática de la región (Millán et al., 1995; Estrela et al., 2000; Martín-Vide et al., 2009). Es justamente en estas últimas condiciones que se han registrado a lo largo de la historia los valores diarios de precipitación más altos de toda España en Levante, y es por esta razón por la que sus habitantes tienen experiencia de la severidad de la “gota fría” (Martín et al., 2014; Insúa-Costa et al., 2021).

El factor determinante: el cambio climático antropogénico

Tener en cuenta el contexto climático actual es crucial. El calentamiento global, provocado por la quema de combustibles fósiles, está alterando las reglas del juego. Este calentamiento planetario está causado inequívocamente por actividades humanas y está alterando el régimen climático, al intensificar

el ciclo hidrológico y aumentar la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos (IPCC, 2023). Por un lado, las investigaciones apuntan a que el mayor calentamiento anómalo del Ártico podría estar haciendo que las “autopistas” del chorro polar sean más sinuosas (Francis, 2015) y, por tanto, más propensas a romperse, aumentando la frecuencia de las DANA, algo que ya se evidencia en la región oriental del mar Mediterráneo, aunque no es así para nuestra región de interés (Muñoz et al., 2020). Es decir, los autores muestran que en la región occidental del Mediterráneo no hay cambios significativos en la frecuencia de DANA en las últimas décadas.

Asimismo, y de forma aún más directa, el excedente de calor del sistema climático actual se acumula en los océanos (Pörtner, 2021). El Mediterráneo se está calentando a un ritmo superior a la media global, alcanzando temperaturas anómalas sin precedentes en los últimos años (Lionello y Scarascia 2018; Pastor y Khodayar, 2020). Un mar más caliente no solo inyecta más vapor de agua a la atmósfera, sino que una atmósfera más cálida, por la ecuación de Clausius-Clapeyron, es capaz de contener mucha más humedad: aproximadamente un 7 % más por cada grado de calentamiento (Alan y Soden, 2008; Kininmonth 2010). El resultado es inevitable: cuando se forma una tormenta, el potencial de precipitación es mucho mayor.

El episodio del 29 de octubre, que dejó récords históricos de intensidad, ocurrió sobre un mar anómalamente cálido, en el que la variabilidad natural ha jugado un papel menor y es atribuible al cambio climático según Faranda et al. (2024). Los autores encontraron que las DANA en las dos últimas décadas presentan ahora un incremento de humedad de hasta el 15 % en comparación con el pasado, lo cual se traduce en hasta 7 mm adicionales de lluvia por día en la costa mediterránea española. El evento del 29 de octubre se alzaría, por tanto, ya no solo como un riesgo conocido (las DANA de otoño), sino como uno que podría estar cambiando de escala. A continuación, demostraremos con datos la naturaleza excepcional de este evento y argumentaremos que, lejos de ser un hecho aislado, es una señal de la urgente necesidad de adaptar nuestras sociedades a una nueva y más severa realidad climática.

DATOS Y METODOLOGÍA

Se utilizaron series de precipitación diaria procedentes de las redes de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y de la Associació Valenciana de Meteorologia Josep Peinado (AVAMET). El conjunto combinado de datos integra 8.145 estaciones que cubren la España peninsular y las islas Baleares (figura 1). Para el análisis del episodio asociado a la DANA de 2024 que afectó a la provincia de Valencia, se trabajó con el dominio completo y, en determinadas partes del estudio, con un subconjunto de nueve estaciones seleccionadas por el orden de mayor precipitación registrada en el entorno del área donde se registró el máximo pluviométrico del episodio. Dicho subconjunto incluye estaciones con precipitaciones superiores a 300 mm en la jornada del 29 de octubre de 2024, con el objetivo de garantizar la representación tanto de los extremos más intensos como de situaciones de menor acumulado dentro de la propia zona afectada. La base de datos se inicia en 1955, debido al incremento en el número de estaciones operativas a partir de esa fecha, tal y como se ha documentado en trabajos previos de ámbito regional en el este peninsular (Estrela et al., 2024; Miró et al., 2023). Esta decisión garantiza una base

instrumental suficientemente densa para la aplicación de los métodos estadísticos posteriores. Para el relleno de datos faltantes y obtener las series completas del periodo 1955-2024, se ha aplicado la metodología descrita en Miró et al. (2017), que utiliza el método NLPCA-EOF-QM (“nonlinear principal component analysis–empirical orthogonal functions–quantile mapping”). Este procedimiento realiza el relleno de datos utilizando la información meteorológica de estaciones vecinas. Una vez obtenidos los datos rellenados para el periodo 1955-2024, se llevó a cabo el proceso de homogenización de las series de precipitación. Para ello se empleó el método ACMANT (ACMANTv3.0-ACMANTP3day; Domonkos, 2014; 2015). Esta metodología ha sido utilizada en trabajos previos, donde se describe con detalle (Estrela et al., 2024; Miró et al., 2023).

Figura 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio (puntos azules) y ubicación de la localidad de Turís, en Valencia (punto rojo), con el máximo histórico de precipitación de 771 mm, acumulados durante el 29 de octubre de 2024 bajo condiciones meteorológicas de DANA



Para el cálculo de la altura geopotencial (AG [mgp]), del campo de viento (V [m/s]) y de temperatura del aire (T [K]) en 300 y 925 hPa, se utilizaron datos del reanálisis ERA5 (C3S/ECMWF), descargados del *Climate Data Store* en el conjunto *ERA5 hourly data on pressure levels* (Copernicus, 2023). A partir del reanálisis, se emplearon datos del conjunto *ERA5 hourly data on single levels* referentes a energía potencial convectiva disponible (CAPE, [J kg⁻¹]), flujo de humedad verticalmente integrado (FHVI, [kg·m⁻²·s⁻¹]), divergencia de humedad verticalmente integrada (DHVI, [kg m⁻²]), agua de lluvia total en la columna de aire (ALTC, [kg m⁻²]) y vapor de agua total en la columna (VATC [kg m⁻²]). Las

variables de humedad y energía tanto diarias como mensuales se anomalizaron con la climatología de 1981-2010. Sobre las variables de humedad y de precipitación diaria se han estimado los histogramas de frecuencias y las curvas teóricas de mejor ajuste a la distribución de frecuencias para estimar los percentiles de extremo para el episodio del 29 de octubre de 2024 (Wilks, 2019).

La temperatura de la superficie del mar (TSM) se obtuvo del producto NOAA/NCEI Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST), un análisis diario que integra observaciones satelitales e *in situ* mediante técnicas de interpolación y correcciones de sesgo (Huang et al., 2021). A partir de estos campos se calcularon anomalías y percentiles respecto a la climatología 1982–2011, pues el dato de TSM comienza en septiembre de 1981. Las series temporales de anomalías tanto diarias como mensuales de las variables se desestacionalizaron y se estimaron las tendencias lineales y sus significancias (Wilks, 2019).

Las trayectorias de masas de aire se calcularon con el *software* traj3d, el cual se obtuvo de la página web del Parcel Trajectory Software de la Universidad de Melbourne (<http://www.cycstats.org/trajectories/trajhome.htm>). Este código implementa un algoritmo lagrangiano tridimensional en coordenadas esféricas que integra, paso a paso, el desplazamiento de parcelas de aire a partir de campos meteorológicos cuadrículados, mediante interpolación espaciotemporal de los vientos y cálculo de trayectorias hacia delante o hacia atrás de forma cinemáticamente consistente con los datos de entrada (Noone y Simmonds, 1999; Barras y Simmonds, 2009). Para el análisis se emplearon los datos del NCEP/DOE Reanalysis II y las imágenes proporcionadas por el Laboratorio de Ciencias Físicas de la NOAA, Boulder, Colorado, desde su sitio web <https://psl.noaa.gov/>.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El 29 de octubre se caracterizó por una tropósfera con circulación típica de una DANA, caracterizada por su núcleo de aire frío, sobre la península ibérica, con un centro de altura geopotencial cerrado hacia el sur, inferior a 9.000 m_gp en 300 hPa y vientos superiores a los 70 m/s en su flanco sudeste (figura 2a). En niveles bajos de la tropósfera, la circulación ciclónica sobre el Levante español presentó una fuerte componente mediterránea del viento perpendicular a la costa, entorno a 40°N (figura 2b). Estas características cuasi estacionarias de baja segregada prevalecieron sobre la península ibérica desde el 27 hasta el 31 de octubre.

Los registros de la red pluviométrica combinada muestran lluvias generalizadas en gran parte del territorio español continental e islas Baleares (figura 3a). El promedio territorial pluviométrico fue 19,7 mm, siendo un valor extremo –percentil 99– para la época del año (figura 3b). La inspección de los registros muestra que los mayores valores pluviométricos se ubican en la Comunitat Valenciana, al norte de 39°N y al este de –2°O, con valores superando los 600 mm en 24 horas en tres localidades.

Figura 2. Altura geopotencial (AG, contornos en mvp) y viento (V, vectores, en m/s) y temperatura (T, sombreado, en K) en los niveles de 300 hPa (a) y 925 hPa (b) correspondientes a las 12 UTC del 29 de octubre de 2024, según datos del reanálisis ERA5. Escala de colores en K

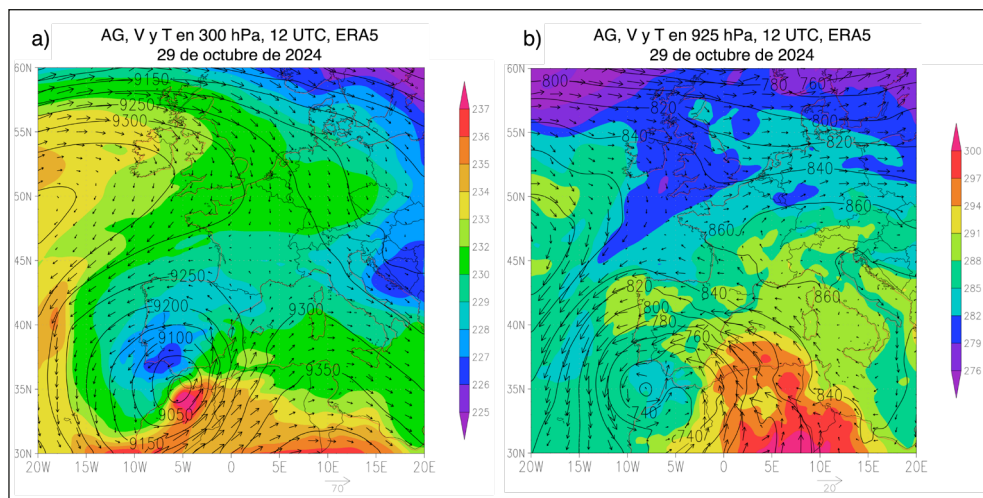
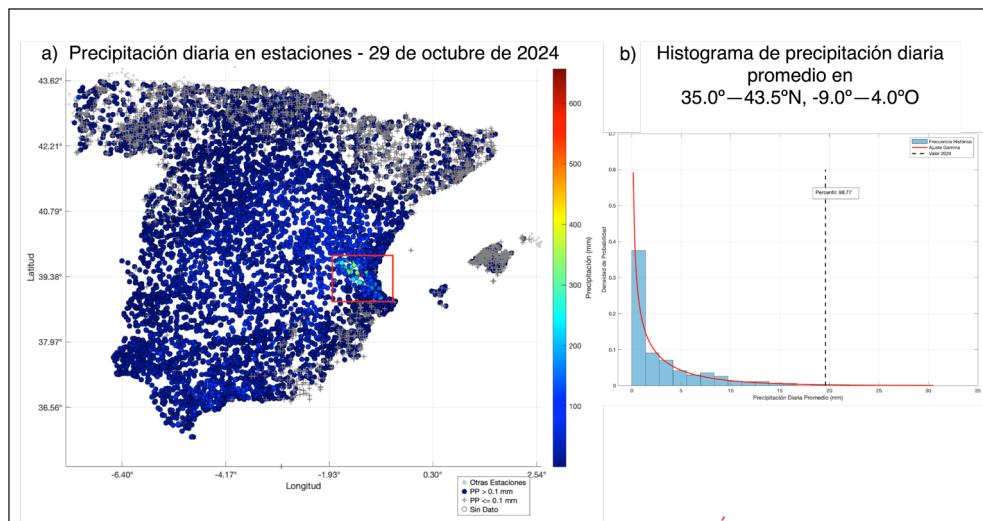


Figura 3. a) Estaciones con precipitación diaria en la jornada del 29 de octubre (puntos en escala de colores), estaciones sin precipitación (cruz), rectángulo rojo: área de mayores precipitaciones; b) histograma de precipitación diaria promedio para la ventana de 15 días antes y después del 29 de octubre, estimada para el periodo 1981-2010 (barras verticales) en el dominio, función de distribución teórica de frecuencia gamma de mejor ajuste (curva roja) y valor del percentil para la precipitación del 29 de octubre de 2024



Para estimar la magnitud de la precipitación local, se ranquearon los valores y se escogieron las nueve primeras estaciones con los máximos registros, que se muestran en la figura 4a. La precipitación promedio diaria máxima local del evento para este conjunto de estaciones fue de 459,6 mm, representando un evento extremo inédito para la función de distribución de probabilidades ajustada, al ser un valor del percentil 100 (figura 4b). La historicidad del récord se aprecia con claridad en la evolución interanual de la precipitación máxima promedio de las nueve estaciones en el bimestre octubre-noviembre, desde el comienzo del registro hasta 2024 (figura 5). La precipitación media máxima promedio de 2024 descuella en la serie de los máximos diarios promedio del bimestre otoñal, siendo tres veces mayor al siguiente máximo diario promedio ocurrido en 2000, con 123,2 mm. Ciertamente, las lluvias extraordinarias caídas en la jornada del 29 de octubre de 2024 contribuyeron a este valor y representan un hecho inédito para la región.

Figura 4. a) Dentro del óvalo, la ubicación de las 9 primeras estaciones con máxima precipitación el 29 de octubre de 2024; b) histograma de frecuencia de precipitación diaria promedio de las 9 estaciones principales, para la ventana de 15 días antes y después del 29 de octubre, estimada para el período 1981-2010 (barras verticales) y función de distribución teórica de frecuencia gamma de mejor ajuste. La precipitación diaria máxima promedio de las 9 estaciones del 29 de octubre con 459,6 mm cae en el percentil 100 de la distribución

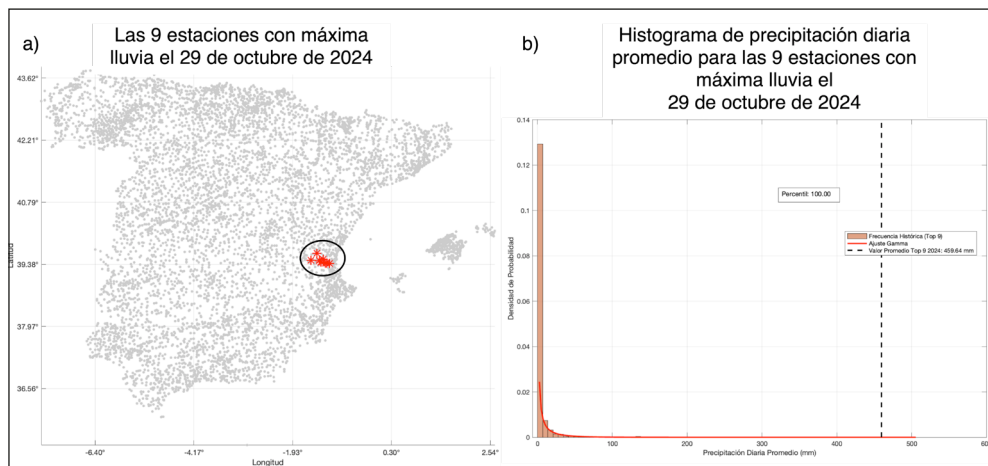
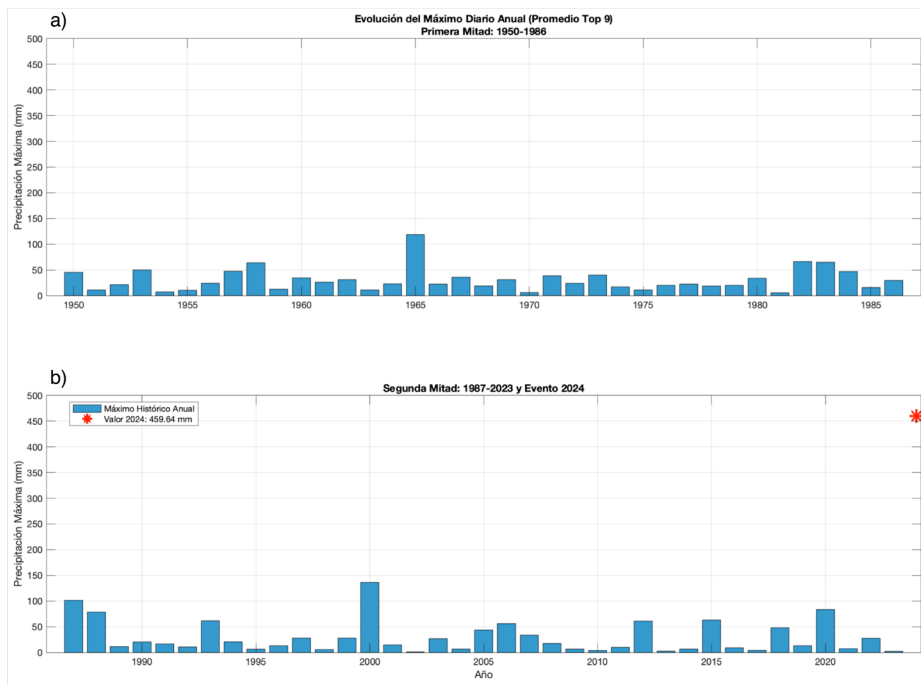


Figura 5. Máxima precipitación diaria promedio que se alcanzó en la ventana de octubre-noviembre para el grupo de las 9 estaciones principales. Esto nos permite comparar directamente el pico de cada año con el pico de 2024. a) Evolución de los máximos anuales de 1950 a 1986; b) evolución de 1987 a 2023, con el valor de 2024 marcado con una estrella roja para una comparación inmediata



La figura 6a muestra la anomalía de la TSM del 29 de octubre sobre la parte occidental del Mediterráneo, que en promedio areal, entre 5°O-15°E y entre 35°-45°N, es de +1,22 °C (respecto a la línea base 1982-2011). Podríamos decir que es una anomalía positiva bastante típica (percentiles centrales, figura 6b). Sin embargo, esta anomalía diaria de TSM ocurre en un contexto de calentamiento sistemático del mar Mediterráneo occidental. La figura 7 muestra la serie temporal de anomalía desestacionalizada tanto para su valor diario (figura 7a) como para su valor mensual (figura 7b), y se puede apreciar bien cómo, desde 1 de octubre de 1982, que es cuando empieza la base de datos utilizada, hay una tendencia sostenida de calentamiento. El cambio de las TSM del Mediterráneo occidental por tendencia es de +1,44 °C en las últimas cuatro décadas, siendo significativo el 99 % de confianza.

Figura 6. a) Anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) con datos la base NOAA oisst v.2 para el 29 de octubre de 2024. b) Percentil de la anomalía de TSM obtenido a partir de la función de distribución teórica Gamma de mejor ajuste de TSM para el 29 de octubre en el período 1982-2011

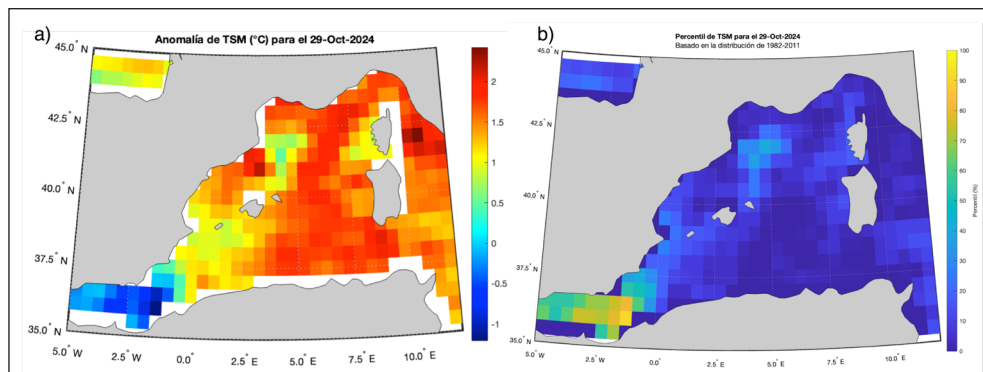
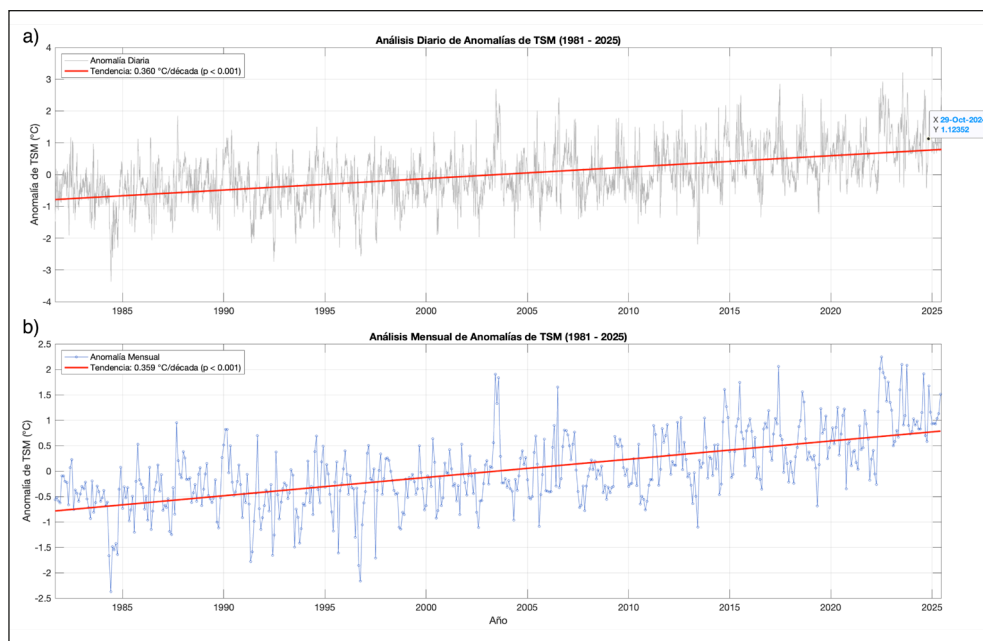


Figura 7. a) Anomalía diaria de TSM promedio en el dominio $-5^{\circ}\text{O}-15^{\circ}\text{O}$ y $35^{\circ}-45^{\circ}\text{N}$ (Mediterráneo occidental) desde el 1 de octubre de 1982 hasta el 30 de junio de 2025, y recta de tendencia lineal, su pendiente y probabilidad (p) de significancia; b) ídem a), pero para el valor medio mensual

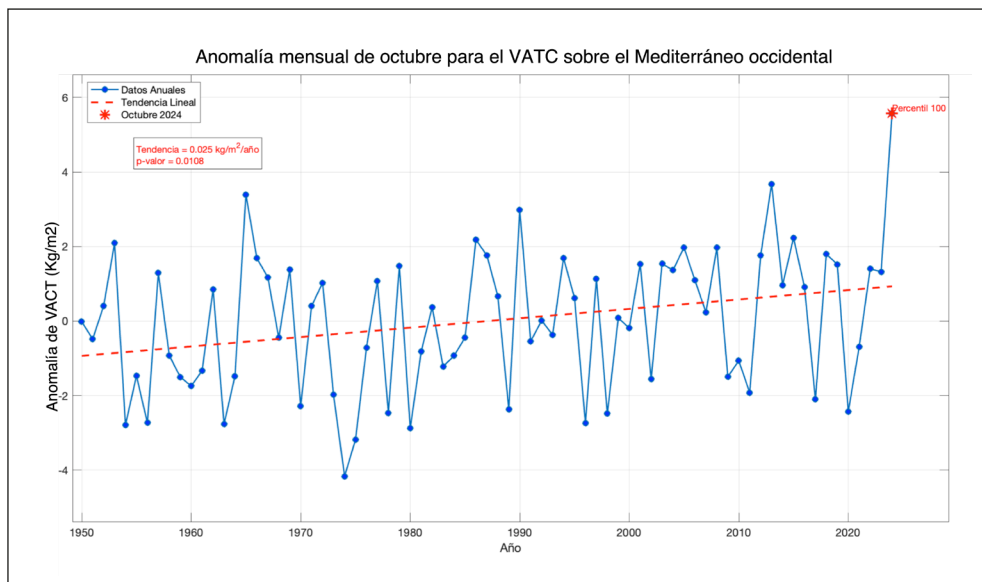


Un ingrediente clave para las precipitaciones torrenciales es la disponibilidad de humedad en la atmósfera. La figura 8 muestra la anomalía del contenido de humedad en la columna de aire por encima

del Mediterráneo occidental. De ella es también evidente el aumento sistemático del contenido de humedad disponible en la atmósfera para otoño, con un cambio de $+1,878 \text{ kg/m}^2$ en los últimos 75 años. Además, octubre de 2024 descuella con una anomalía de $+5,73 \text{ kg/m}^2$, convirtiéndose en un récord histórico de vapor de agua total en la columna de aire para el reanálisis ERA5, siendo un 362 % superior a la media de las anomalías absolutas.

El calor y la humedad son dos variables clave para proveer de energía potencial convectiva disponible (CAPE) a las parcelas de aire. Energía esencial termodinámica para disparar tormentas de gran desarrollo convectivo. En este sentido, también esta variable, durante el otoño sobre el mar Mediterráneo occidental, viene incrementándose sistemáticamente en las últimas décadas, a razón de $8,75 \text{ J/kg}$ por década, como ilustra la figura 9.

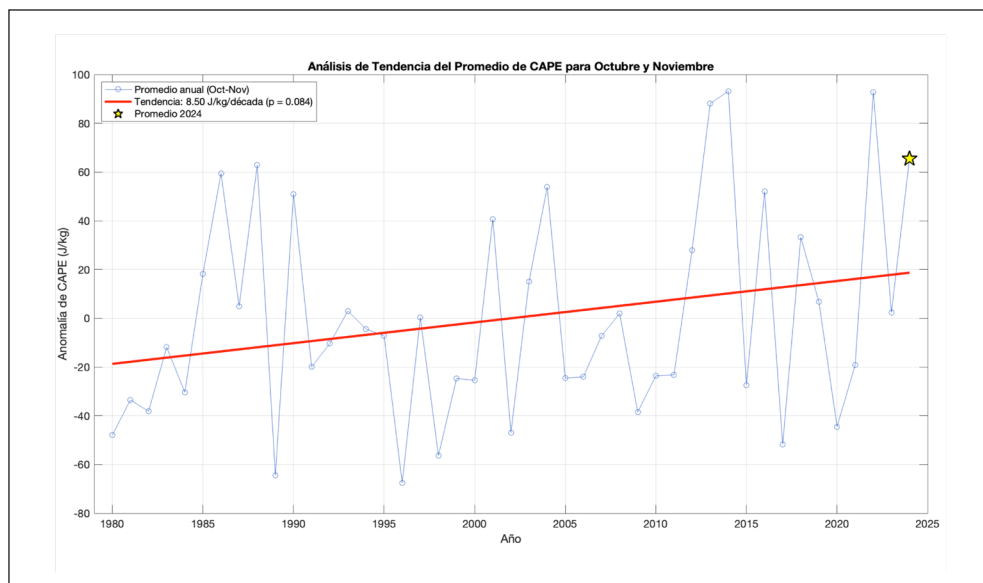
Figura 8. Anomalía de vapor de agua en la columna de aire por encima del mar Mediterráneo occidental, entre 5°O - 15°E y 35° - 45°N , con respecto al período base 1981-2010. El valor anómalo de octubre de 2024 cae en el percentil 100 de la función de distribución teórica de mejor ajuste. La tendencia lineal es significativa al 99 % de confianza



Cabe destacar que la mayor parte de la humedad que alimenta las lluvias torrenciales en el Mediterráneo occidental no se origina localmente, sino que proviene de regiones lejanas según Insua-Costa et al. (2022). A través de la simulación de 160 eventos de precipitación extrema, estos autores concluyeron que es necesario adoptar una perspectiva global, en lugar de una puramente regional, para entender y atribuir estos fenómenos al cambio climático. Así, en promedio, solo el 35 % de la precipitación proviene de la evaporación del mar Mediterráneo; el océano Atlántico Norte es la segunda fuente más

importante, contribuyendo con un 25 %, y la evaporación de áreas terrestres cercanas (reciclaje local) aporta un 10 % (Insua-Costa et al. 2022).

Figura 9. Evolución temporal de la anomalía de energía potencial convectiva disponible (CAPE) para el desarrollo de tormentas convectivas severas, estimada sobre el mar Mediterráneo occidental (5°O-15°E, 35°-45°N), promedio octubre-noviembre, respecto a la línea base 1981-2010. Tendencia lineal significativa al 99 % de confianza



Ayudados por el cálculo lagrangiano de trayectoria de parcela de aire, es posible estimar la trayectoria recorrida por las parcelas de aire que llegaron a niveles bajos de la tropósfera de la zona de la provincia de Valencia donde ocurrieron las fuertes lluvias el 29 de octubre de 2024. Así, por ejemplo, la parcela de aire que a las 18 h UTC de ese día arribó al punto de coordenadas 40°N y 1°O, durante las 36 horas previas hizo un recorrido sobre el mar Mediterráneo occidental (figura 10a), siempre permaneciendo muy cerca de la superficie del mar, al igual que otras parcelas aledañas (figura 10b), tiempo suficiente como para cargarse de humedad adicional en niveles bajos. Asimismo, las parcelas de aire en tropósfera media (700-500 hPa) sobre el Mediterráneo occidental muestran haber tenido trayectorias sobre el Atlántico Norte subtropical, al menos hasta diez días antes del episodio del 29 de octubre, sobre un océano anómalamente caliente (figura no mostrada). Por esta razón, las parcelas de aire que fueron advectadas hacia el Levante español por la circulación troposférica de niveles bajos inducida por la DANA, en dirección perpendicular a la costa, trajeron consigo enormes cantidades de humedad que, al converger orográfica y dinámicamente en la región afectada, dieron lugar a máximos históricos, récord tanto en el contenido de agua de lluvia total en la columna (figura 11a) como en la convergencia del

flujo de humedad verticalmente integrado (figura 11c). Para ambas variables húmedas, los máximos valores registrados sobre el área afectada por las grandes lluvias resultan ser de percentil 100 y 0, es decir, inéditos para la climatología del lugar (figuras 11b y 11d).

Por tanto, la severidad del fenómeno ocurrido en la jornada del 29 de octubre de 2024 se dio esencialmente por la presencia de una atmósfera y TSM climatológicamente más cálidas que dieron lugar a contenidos de humedad y energía disponibles muy altos, en condiciones inéditas para la primera variable. En este sentido, la sistematicidad hacia el incremento de estas variables en las últimas décadas indica que un evento como el registrado es probable que se haga más habitual en condiciones dinámicas de DANA sobre la península ibérica.

Figura 10. a) Trayectoria de 36 horas previas para la parcela de aire que arribó a las 18 h UTC del 29 de octubre de 2024 al punto geográfico 40°N y 1°O (aproximadamente cerca de las máximas lluvias) en niveles bajos (925 hPa), obtenidos con datos de reanálisis II de NCEP/DOE; b) idem, pero para parcelas en el entorno de 1°x1° del punto geográfico

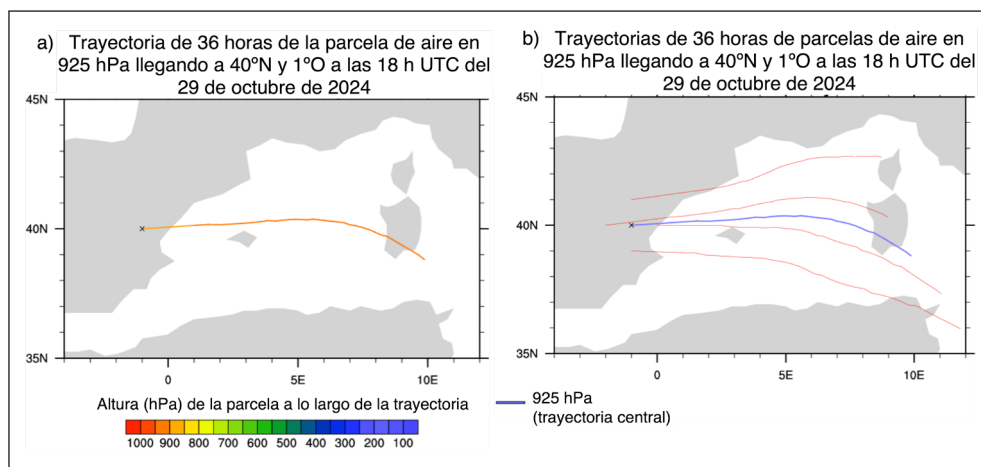
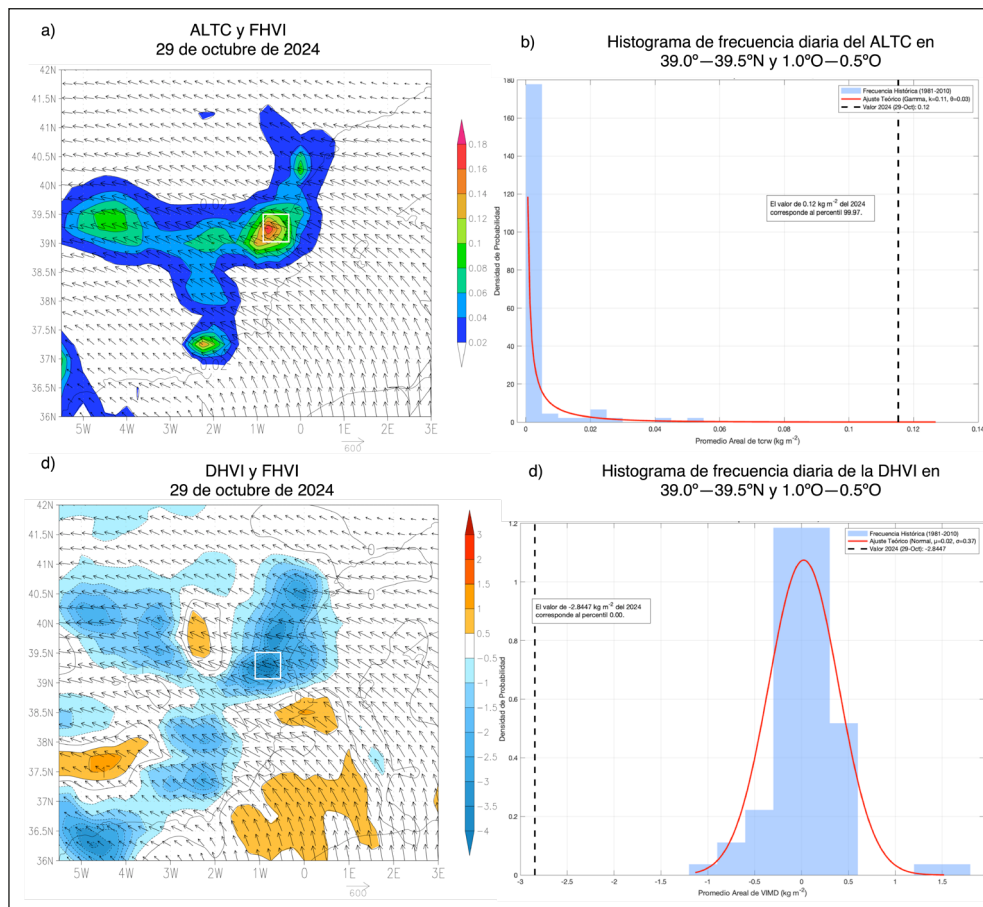


Figura 11. a) Agua de lluvia total en la columna (ALTC), [kg m^{-2}] y flujo de humedad verticalmente integrado (FHVI, vector, [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]) promedio diario para el 29 de octubre de 2024, del reanálisis ERA5; el rectángulo indica los máximos valores de ALTC; b) histograma de frecuencia del ALTC para la ventana de 1 día antes y después del 29 de octubre, estimada para el período 1981-2010 (barras verticales) y función de distribución teórica de frecuencia gamma de mejor ajuste en el área de máximos valores de ALTC y el valor percentil correspondiente al 29 de octubre de 2024; c) ídem a) pero para la divergencia de humedad verticalmente integrada (DHVI, [kg m^{-2}]); d) ídem b), pero para el DHVI



CONCLUSIONES

Las lluvias catastróficas de Valencia del 29 de octubre de 2024 obligan a redefinir el concepto de “gota fría”. Si bien el mecanismo atmosférico –la DANA– es familiar, su impacto devastador fue, en parte, el resultado de condiciones termodinámicas exacerbadas por el calentamiento global. El estudio muestra evidencias de que la temperatura anómala del Mediterráneo y la carga histórica de humedad atmosférica fueron los ingredientes clave que transformaron un evento meteorológico severo en un extremo climá-

tico sin precedentes. Este evento marca un punto de inflexión, advirtiendo de que el verdadero riesgo ya no es la DANA en sí, sino el combustible termodinámico que nuestro nuevo clima mediterráneo le proporciona. Si bien nuestro estudio no es de atribución al cambio climático, confirma que este evento es igual o superior al máximo absoluto registrado en la serie de datos termodinámicos climatológicos. Esto es consistente con la teoría del cambio climático antropogénico y ocurre en un contexto de calentamiento sistemático del mar Mediterráneo. El resultado es, por definición, un evento sin precedentes en el registro. Trabajos recientes de atribución mediante simulaciones muestran la mayor probabilidad de ocurrencia de este evento debido al calentamiento global antropogénico (Faranda et al. 2024). En consecuencia, propiciar políticas de adaptación al cambio climático es crucial para la sostenibilidad de nuestra región en cuanto al impacto de los extremos hidrometeorológicos. Trabajos futuros contemplarán la caracterización climatológica de la variabilidad de baja frecuencia de los eventos extremos de precipitación en la región para comprender mejor el estado actual de la transición climática observada.

BIBLIOGRAFÍA

- Allan, R. P. & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321, 1481-1484.
- Barras, V. & Simmonds, I. (2009). Observation and modeling of stable water isotopes as diagnostics of rainfall dynamics over southeastern Australia. *Journal of Geophysical Research*, 114, D23308. DOI:10.1029/2009JD012132.
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2023). ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.bd0915c6.
- Domonkos, P. (2014). The ACMANT2 software package. En: *Eighth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases and Third Conference on Spatial Interpolation Techniques in Climatology and Meteorology* (pp. 46-72). WMO WCDMP-84, Geneva, World Meteorological Organization (WMO).
- Domonkos, P. (2015). Homogenization of precipitation time series with ACMANT. *Theoretical Applied Climatology*, 122, 303-314. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1298-5>
- Estrela, M. J., Peñarrocha, D., Pastor, F. & Millán, M. (2000). Multi-annual drought episodes in the Mediterranean coast (Valencia Region) from 1950-1996. A spatio-temporal analysis. *International Journal of Climatology*, 20, 1.599-1.618.
- Estrela, M. J., Corell, D., Miró, J. J. & Niclós, R. (2024). Analysis of Precipitation and Drought in the Main Southeastern Iberian River Headwaters (1952-2021). *Atmosphere*, 15(2), 166. <https://doi.org/10.3390/atmos15020166>
- Faranda, D., Álvarez-Castro, M. C., Ginesta, M., Coppola, E. & Pons, F. M. E. (2024). Heavy precipitations in October 2024 South-Eastern Spain DANA mostly strengthened by human-driven climate change. *ClimaMeter*. Institut Pierre Simon Laplace, CNRS. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14052042>

- Francis, J. A. & Vavrus, S. J. (2015). Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environmental Research Letters*, 10(1), 014005.
- Holton, J. R. & Hakim, G. J. (2012). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academic Press.
- Huang, B., Liu, C., Banzon, V. F., Freeman, E., Graham, G., Hankins, B., Smith, T. M. & Zhang, H.-M. (2021). Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *Journal of Climate*, 34(8), 2.923-2.939. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0166.1>
- Insua-Costa, D., Lemus-Cánovas, M., Miguez-Macho, G. & Llasat, M. C. (2021). Climatology and ranking of hazardous precipitation events in the western Mediterranean area. *Atmospheric Research*, 255, 105.521. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105521>
- Insua-Costa, D., Senande-Rivera, M., Llasat, M.C. & Miguez-Macho, G. (2022). A global perspective on western Mediterranean precipitation extremes. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, 9. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00234-w>
- IPCC (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)] (pp. 1-34). IPCC, Geneva, Switzerland. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Kinmonth, W. (2010). Clausius-Clapeyron and the regulation of global warming. *Fisica E*, 26, 61-70.
- Lackmann, G. (2011). *Midlatitude Synoptic Meteorology: Dynamics, Analysis, and Forecasting*. American Meteorological Society, Boston, MA.
- Lionello, P. & Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5), 1481-1493.
- Martín León, F. (2003). *Las gotas frías/DANAs: ideas y conceptos básicos* (Nota técnica S.T.A.P., 38). Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 84-8320-247-6. <https://hdl.handle.net/20.500.11765/5117>
- Millán, M., Estrela, M. J. & Caselles, V. (1995). Torrential precipitations on the Spanish east coast: The role of the Mediterranean sea surface temperature. *Atmospheric Research*, 36, 1-16.
- Miró, J. J., Caselles, V. & Estrela, M. J. (2017). Multiple imputation of rainfall missing data in the Iberian Mediterranean context. *Atmospheric Research*, 197, 313-330. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.016>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106695>
- Muñoz, C., Schultz, D. & Vaughan, G. (2019). A Midlatitude Climatology and Interannual Variability of 200- and 500-hPa Cut-Off Lows. *Journal Of Climate*, 33(6), 2.201-2.222. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0497.1>
- Noone, D. & I. Simmonds (1999). A three-dimensional spherical trajectory algorithm. *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, 28. WMO/TD-No. 942. H. Ritchie, Ed., World Meteorological Organization, 3.26-3.27.

- Pastor, F., Valiente, J. A. & Khodayar, S. (2020). A Warming Mediterranean: 38 Years of Increasing Sea Surface Temperature. *Remote Sensing*, 12(17), 2.687. <https://doi.org/10.3390/rs12172687>
- Pörtner, H. O. (2021). El papel de los océanos en el contexto de un clima cambiante. *Boletín de la OMM*, 70(1), 20-23.
- Sánchez-Almodóvar, E., Martín-Vide, J., Olcina-Cantos, J. & Lemus-Canovas, M. (2022). Are Atmospheric Situations Now More Favourable for Heavy Rainfall in the Spanish Mediterranean? Analysis of Episodes in the Alicante Province (1981–2020). *Atmosphere*, 13(9), 1.410. <https://doi.org/10.3390/atmos13091410>.
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (4a ed.). Elsevier Science Publishing.

Cómo citar este artículo:

Agosta Scarel, E., Corell, D., Estrela, M.^a J. & Miró, J. (2025). A un año de la DANA de Valencia, ¿preludio de una nueva era climática? *Cuadernos de Geografía*, 114-115, 221-237.
<https://doi.org/10.7203/CGUV.114-15.31889>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

