

Informe sobre el estado del clima de España 2021



Informe sobre el estado del clima de España 2021

Documento elaborado en el seno de la Agencia Estatal de Meteorología, por Ana Morata Gasca, Ramiro Romero Fresneda, Andrés Chazarra Bernabé, Maite Huarte Ituláin, José Ángel Núñez Mora, César Rodríguez Ballesteros, Juan Antonio de Cara García, Rubén del Campo Hernández, Pedro Pablo Rivas Soriano, Manuel Antonio Mora García, José María Sánchez-Laulhé Ollero y Miguel Ángel García Couto.

Han colaborado también: Belinda Lorenzo Mariño, José Vicente Moreno García, María Teresa Toha Rebull, Beatriz Peraza Sánchez y Jaime Rey Vidaurrázaga.



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2022

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es/>

NIPO: 666-22-006-X
<https://doi.org/10.31978/666-22-006-X>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>

 @Aemet_Esp

 <https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. ESTADO DEL CLIMA GLOBAL Y DE EUROPA	5
1.1. Temperaturas	5
1.2. Precipitación	8
1.3. Océanos, hielo y nieve	10
1.4. Gases de efecto invernadero	13
1.5. Anomalías y fenómenos climáticos extremos	16
1.5.1. Olas de calor e incendios forestales	16
1.5.2. Olas de frío y nieve	16
1.5.3. Ciclones tropicales	17
2. ESTADO DEL CLIMA DE ESPAÑA: AÑO 2021	19
2.1. Temperatura	20
2.1.1. Evolución de las temperaturas durante 2021	21
2.1.2. Episodios de temperaturas extremas	23
2.1.3. Evolución de los récords diarios de temperatura en España	25
2.1.4. Análisis de olas de calor y olas de frío de 2021	27
2.1.5. Evolución de las temperaturas en España desde los niveles preindustriales	32
2.1.6. Evolución de la temperatura superficial del agua del mar	34
2.2. Precipitación	39
2.2.1. Evolución de la precipitación a lo largo de 2021	40
2.2.2. Episodios de precipitaciones intensas	41
2.3. Hidrometeorología. Índice de precipitación estandarizado (SPI). Agroclimatología y fenología	42
2.3.1. Precipitación por zonas características de AEMET o grandes cuencas	42
2.3.2. Índice de precipitación estandarizado (SPI) por zonas características de AEMET o grandes cuencas	42
2.3.3. Agroclimatología y fenología	44
2.4. Insolación	60
2.4.1. Anomalías significativas de insolación	60
2.5. Descargas eléctricas y tormentas durante 2021	62
2.5.1. Descargas eléctricas	62
2.5.2. Días de tormenta	65
2.6. Fenómenos meteorológicos y climáticos extremos	67
2.6.1. Principales episodios de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos	67
2.6.2. Borrascas con gran impacto y principales episodios de vientos intensos	70
3. ANALISIS ESTACIONALES PARA ESPAÑA Y EL SECTOR ATLÁNTICO NORTE - EUROPA	75
3.1. Forzamientos externos	76
3.2. Enero-febrero	80
3.3. Primavera	84
3.4. Verano	86
3.5. Otoño	92
3.6. Diciembre	96
AGRADECIMIENTOS	99
REFERENCIAS	101
ANEXOS	105
A. Descripción sinóptica estacional del año 2021	105
B. Olas de calor y frío: definición y metodología. Evolución	115
C. Notas para la observación fenológica de la golondrina común (<i>Hirundo rustica</i>)	126
D. Notas sobre fenómenos y circulaciones asociados a la variabilidad de interanual a subestacional del sistema climático	129
E. Efemérides climatológicas	140
F. Lista de siglas y acrónimos	142

INTRODUCCIÓN

El sistema climático presenta, como característica destacada, gran variabilidad en su comportamiento, tanto espacial como temporal, consecuencia no solo del carácter complejo de la dinámica atmosférica, sino también de los procesos de realimentación existentes entre la atmósfera y los demás componentes del sistema: la hidrosfera, la biosfera, la litosfera y la criosfera. Existen, además, otros factores que influyen en la variabilidad del clima de una región, como es el caso de la radiación solar o la actividad humana. La influencia de todos los factores sobre el sistema climático puede ser debida a inestabilidades, modos resonantes o a procesos estocásticos de naturaleza no lineal, intrínsecos a los propios componentes del sistema (IPCC Technical Summary, 2021).

En un clima estable, la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol está aproximadamente en equilibrio con la cantidad de energía que se pierde en el espacio en forma de luz solar reflejada y radiación térmica. El aumento de los gases de efecto invernadero o los aerosoles, interfiere en este equilibrio, haciendo que el sistema gane o pierda energía. Esta ganancia o pérdida de energía se cuantifica por el forzamiento radiativo efectivo que, si es positivo provoca calentamiento y si es negativo, provoca enfriamiento. Ese calentamiento o enfriamiento, a su vez, puede modificar el desequilibrio energético a través de muchos factores amplificadores.

A medida que los efectos del calentamiento climático se hacen más evidentes, es más exigente la demanda de información sistemática, objetiva, reproducible y con mayor grado de detalle sobre el cambio climático, tanto para explicar y proyectar los cambios como para ayudar a planificar y aplicar medidas de adaptación y mitigación.

Desde los años ochenta, cada nuevo decenio ha sido más cálido que el anterior. El lugar que cada año concreto ocupa en la clasificación global debe interpretarse desde una perspectiva a largo plazo, en especial porque las diferencias entre los años, a veces, son muy pequeñas. Es necesario destacar, que los siete años más cálidos se han dado desde 2015, y los tres primeros lugares de la clasificación corresponden a 2016, 2019 y 2020. En lo que respecta al año 2021, los episodios de La Niña ocurridos entre 2020 y 2022 han supuesto la reducción transitoria del incremento de las temperaturas medias mundiales. Así pues, en 2021 el calentamiento experimentado ha sido ligeramente menos pronunciado. Aun así, 2021 fue más cálido que otros años en los que también se dio el fenómeno La Niña. A pesar de ello, 2021 se ha convertido en uno de los siete años más cálidos de los que se tiene constancia, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

La temperatura es uno de los indicadores del cambio climático, pero hay que añadir más variables, entre otras, las concentraciones de gases de efecto invernadero, el contenido calorífico y el pH de los océanos, el nivel medio del mar a escala mundial, la masa de los glaciares y la extensión del hielo marino. Los indicadores climáticos globales están estrechamente interrelacionados y proporcionan una amplia visión de la evolución del clima a escala global, que abarca la composición de la atmósfera, los cambios energéticos y la respuesta de la tierra, el océano y el hielo a estas variaciones. En conjunto, los indicadores construyen una imagen coherente de un mundo que se calienta y que afecta a todos los componentes del sistema terrestre, tal y como indica el Prof. Petteri Taalas, secretario general de la OMM.

Algunos aspectos del sistema climático, como la biosfera terrestre, las profundidades oceánicas y la criosfera, responden mucho más lentamente que las temperaturas superficiales a los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero. En consecuencia, ya hay cambios sustanciales comprometidos asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero del pasado. Así pues, el nivel medio global del mar seguirá subiendo en el futuro, aunque las emisiones de CO₂ se redujesen a cero (IPCC Technical Summary, 2021).

Según datos de la OMM, en 2021: la temperatura media mundial superó en aproximadamente 1,11 °C ($\pm 0,13$ °C) los niveles preindustriales (1850-1900). Así, 2021 es el séptimo año consecutivo en el que la temperatura mundial ha superado en más de 1 °C estos niveles; el nivel medio global del mar alcanzó un nuevo récord en 2021, aumentando una media de 4,5 mm al año, durante el periodo 2013-2021; el agujero de ozono de la Antártida alcanzó una superficie máxima de 24,8 millones de km² impulsado por un vórtice polar fuerte y estable y condiciones térmicas más frías que la media en la estratosfera inferior; Groenlandia experimentó deshielos excepcionales a mediados de agosto; olas de calor batieron récords en el oeste de Norteamérica y el Mediterráneo y en Europa central se produjeron las inundaciones más graves de las que se tiene constancia a mediados de julio.

El clima en la región mediterránea se encuentra condicionado por su situación geográfica, ya que se sitúa en un área de transición entre la franja de altas presiones subtropicales y la intensa circulación del oeste predominante en latitudes medias. Las principales características del clima en esta región y, por tanto, su variabilidad se encuentra fuertemente vinculada con la circulación atmosférica a gran escala. Asimismo, el clima en esta región también está muy influido por sus características orográficas, con fuertes contrastes térmicos entre el mar y la tierra, y finalmente, por efectos más locales.

2

El *Informe sobre el estado del clima de España 2021*, IECLC 2021, constituye el tercero de la serie de informes anuales elaborados por la Agencia Estatal de Meteorología que pretende ser una herramienta esencial para mejorar el conocimiento de la evolución del clima de España año a año. Esta tercera edición constituye la confirmación de una tendencia consolidada en cuanto a una publicación que proporciona a la sociedad española, un diagnóstico descriptivo, objetivo y exhaustivo del clima de nuestro país y contribuye a alinear a España con la mayoría de los países de nuestro entorno, que realizan publicaciones similares en este ámbito, siguiendo la estela determinada por el Estado Global del Clima de la Organización Meteorológica Mundial.

Para conseguir los objetivos de este informe, se han empleado diferentes conjuntos de datos procedentes de las diversas bases de datos que atesora esta Agencia. Estos datos están continuamente sometidos a un exhaustivo control de calidad, con estricta observación de los criterios determinados por la OMM para el tratamiento y análisis de datos, y están referidos a los valores normales del periodo 1981-2010, que se utilizan como base de referencia para obtener una información coherente, comparable y reproducible con los cálculos globales.

El IECLC 2021 pone de manifiesto el aumento de las temperaturas registrado en España desde la segunda mitad del siglo XIX. Este aumento es especialmente notable en verano, con olas de calor de mayor intensidad y frecuencia, como la ocurrida a mediados de agosto que fue la más intensa en España desde 1975, en cuanto a temperaturas alcanzadas y en menor medida por extensión afectada, aunque las mayores anomalías de temperatura se registraron durante el invierno. Por otra parte, el año 2021 estuvo marcado a nivel mundial, por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos. En España destacaron las nevadas asociadas a la borrasca Filomena y la ola de frío de los días posteriores, de inusual intensidad y extensión en las últimas décadas.

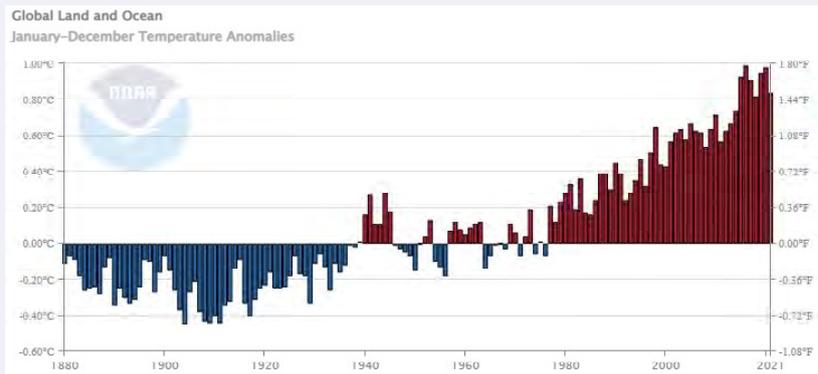
En su dimensión estructural, el informe presenta la siguiente distribución: el capítulo 1 aporta una breve visión general del contexto global del comportamiento del clima en el mundo y en Europa durante el año 2021 y constituye el pórtico introductorio al resto de capítulos; en el capítulo 2 se analizan las características espaciales y temporales más notorias del clima de España. Asimismo, se pormenoriza el comportamiento de las variables meteorológicas y climáticas más relevantes en la zona de estudio y explora las variaciones asociadas a estas; en el capítulo 3 se exponen los patrones atmosféricos que han dado lugar a distintos tipos de tiempo y fenómenos adversos ocurridos en España durante el año objeto de estudio de esta edición del IECLC; finalmente, varios anexos complementan la información proporcionada a lo largo de los capítulos que componen el informe.

1. ESTADO DEL CLIMA GLOBAL Y DE EUROPA

1.1. TEMPERATURAS

La temperatura media mundial en 2021 fue, según los datos proporcionados por la Organización Meteorológica Mundial, de aproximadamente $1,11 \pm 0,13$ °C por encima de los valores medios preindustriales de 1850-1900. Respecto a 2020 y 2019, el año 2021 ha sido ligeramente más frío debido a las condiciones de La Niña a principios y final del año. Aun así, los últimos siete años han sido los más cálidos registrados. Los diez años más cálidos desde que se tienen registros corresponden a la década 2013-2021. Desde 1977, todos los años han registrado una temperatura media superior al valor medio del siglo XX. En general, la temperatura anual mundial ha aumentado a una tasa promedio de 0.08 °C por década desde 1880 y más del doble de esa tasa (0.18 °C) desde 1981 (fuente: NOAA).

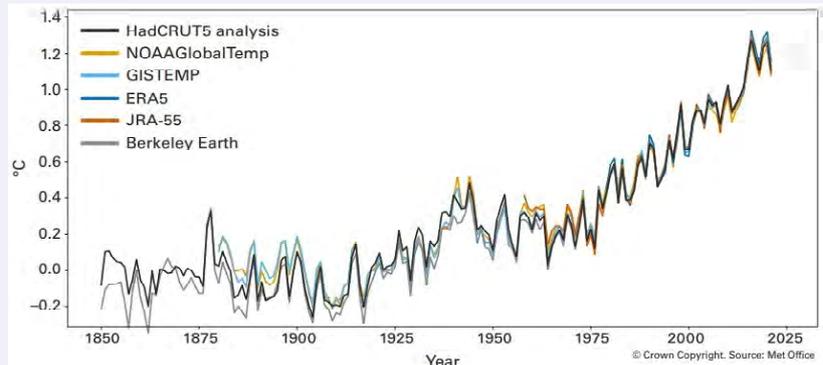
Figura 1.1 — Serie de anomalía de temperatura media anual a nivel global con respecto al promedio del siglo XX. Fuente: Global Climate Report-Annual 2021. NOAA.



5

Considerando otros modelos climáticos de referencia, los últimos siete años han sido los más cálidos registrados, situándose el año 2021 como quinto, sexto o séptimo año más cálido según el modelo considerado. De acuerdo al modelo ERA5 de Copernicus Climate Change Service (C3S), la temperatura global media anual en 2021 fue 0.3 °C superior a la del periodo de referencia 1991-2020, resultando alrededor de 1.1 °C por encima del valor medio del periodo 1850-1900, a menudo considerado como representativo del nivel preindustrial (fig. 1.2).

Figura 1.2 — Diferencia de la temperatura media anual global respecto las condiciones del periodo pre-industrial (1850-1900) para seis conjuntos de datos globales. Fuente Met Office.



En cuanto a la distribución regional de temperatura, el año 2021 se caracterizó por temperaturas mucho más cálidas que el valor medio en gran parte del mundo, en especial en el noreste de Canadá y Groenlandia, y con temperaturas anuales récord en zonas del norte de África, el sur de Asia, el sur de América del Sur, así como en algunas zonas de los océanos Atlántico y Pacífico. Sin embargo, ninguna área terrestre u oceánica tuvo una temperatura mínima récord para 2021. Las anomalías frías más notables se limitaron a la parte occidental y extremo oriental de Siberia, Alaska, Australia y partes de la Antártida. En la zona central y oriental del océano Pacífico tropical también hubo anomalía fría debido a las condiciones de La Niña.

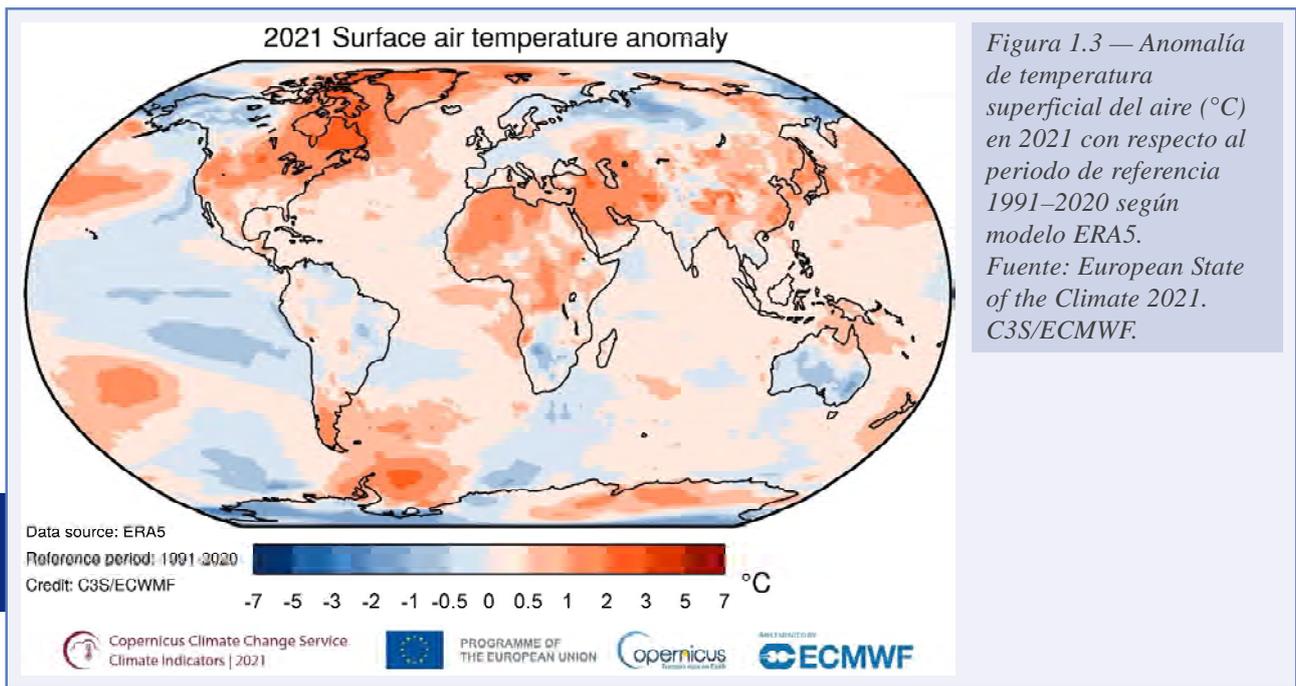


Figura 1.3 — Anomalía de temperatura superficial del aire (°C) en 2021 con respecto al periodo de referencia 1991–2020 según modelo ERA5. Fuente: European State of the Climate 2021. C3S/ECMWF.

6

Según datos de la NOAA, el año 2021, aunque mucho más frío que los años recientes, fue el noveno más cálido registrado en Europa, con 1.28 °C por encima del valor medio (periodo de referencia 1910-2000). El año 2021 también marcó el vigésimo quinto año consecutivo con anomalía de temperatura positiva respecto al valor medio. Los 10 años más cálidos de Europa han ocurrido desde 2007. La temperatura anual de Europa ha aumentado a una tasa promedio de 0.15 °C por década desde 1910. Sin embargo, se ha triplicado a 0.45 °C desde 1981.

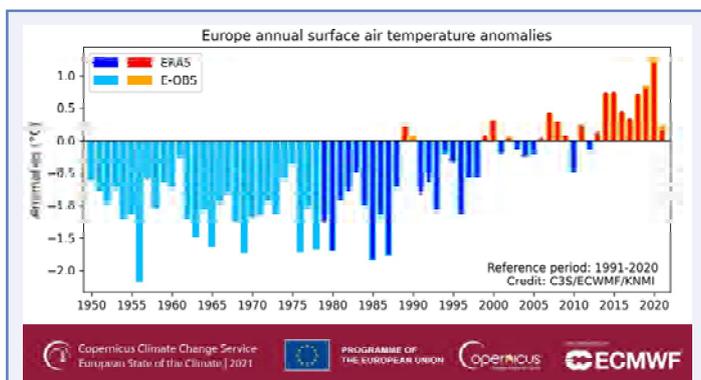
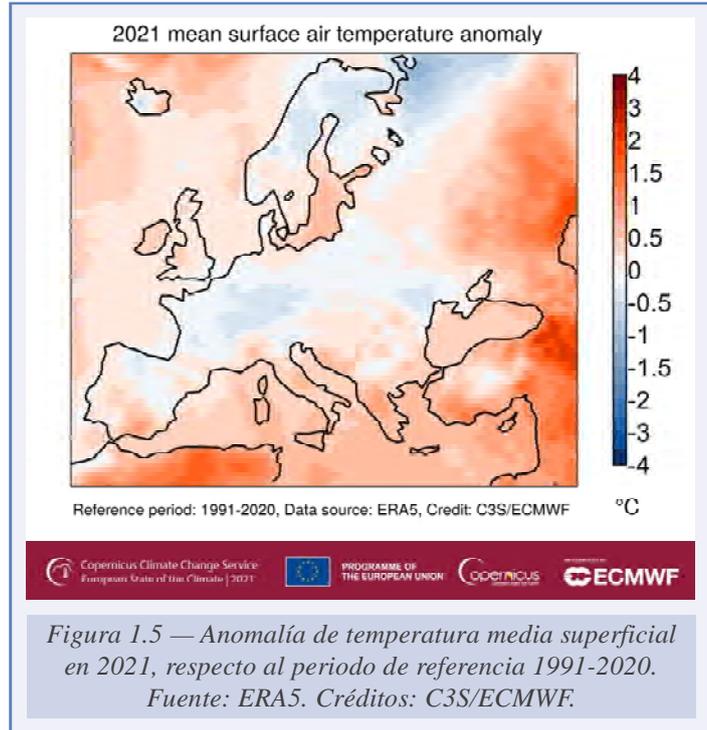


Figura 1.4 — Serie de anomalías anuales de temperatura superficial del aire en Europa entre 1950 y 2021, respecto al periodo de referencia 1991-2000. Fuente: ERA5 y E-OBS. Créditos: C3S/ECMWF/KNMI.

anomalía de temperatura positiva respecto al valor medio. Los 10 años más cálidos de Europa han ocurrido desde 2007. La temperatura anual de Europa ha aumentado a una tasa promedio de 0.15 °C por década desde 1910. Sin embargo, se ha triplicado a 0.45 °C desde 1981.

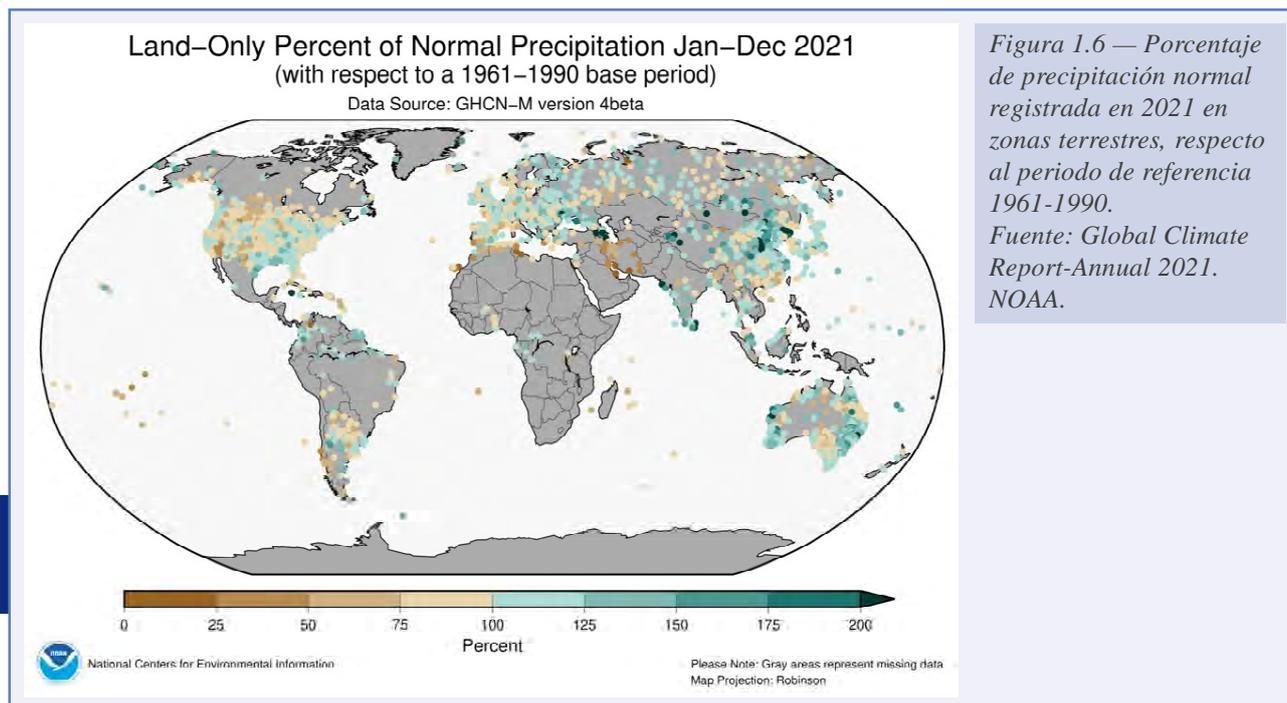
Según otros modelos, como ERA-5 y E-OBS (C3S), el año 2021 en Europa fue entre 0.15 y 0.25 °C más cálido que el valor medio del periodo de referencia 1991-2020, no encontrándose entre los 10 años más cálidos, con una diferencia notable (1 °C más frío) respecto a 2020, el año más cálido de la serie (figura 1.4).

El verano fue el más cálido registrado, con 1.0 °C por encima del valor medio (periodo de referencia 1991-2010), mientras que la primavera fue más fría que el valor medio, aunque inferior a 0.5 °C. El año resultó más cálido que el valor medio de temperatura alrededor del mar Negro, en el sureste de Europa y en el oeste de Rusia. Resultó más frío en Escandinavia y, en menor medida, en Europa central. Las temperaturas anuales de la superficie del mar en toda Europa estuvieron entre el sexto y el octavo lugar entre las más cálidas registradas. Algunas zonas de los mares Báltico y Mediterráneo fueron excepcionalmente cálidas, con temperaturas en el Báltico que aumentaron a más de cinco grados por encima del valor medio en junio y julio.



1.2. PRECIPITACIÓN

En el año 2021 se registraron precipitaciones anuales significativamente por debajo del valor medio en zonas del oeste de los Estados Unidos, la parte meridional de América del Sur, el norte de África, el Medio Oriente y en algunas islas del Pacífico. Sin embargo, fueron significativamente superiores a la media en el norte de Sudamérica, el este de Europa, la costa occidental y oriental de Australia, así como en zonas del sur de Asia. Además, como se analiza a continuación, se produjeron precipitaciones extremas y sequías en todo el mundo.



A principios de octubre, llovió abundantemente en el norte de Italia, lo que provocó inundaciones y deslizamientos de tierra. En Liguria (noroeste de Italia) se recogieron 181 mm en una hora y más de 900 mm en un periodo de 24 horas. Un *medicane* trajo lluvias torrenciales a zonas de Argelia, Túnez y el sur de Italia a finales del mes.

En la Columbia Británica (Canadá), a mediados de noviembre cayeron cantidades récord de precipitaciones, lo que provocó peligrosas inundaciones y deslizamientos de tierra.

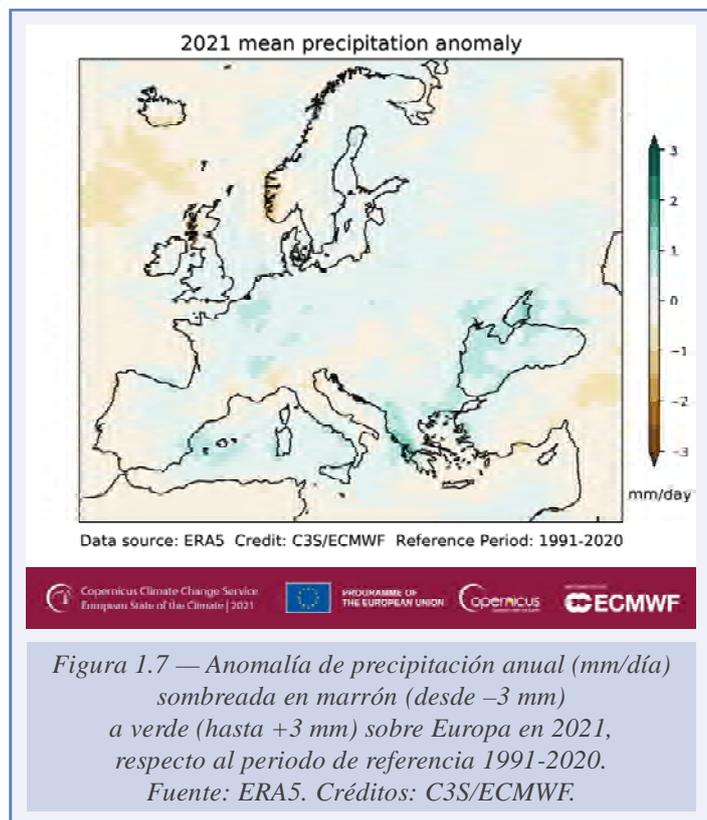
Zhengzhou, en la provincia de Henan (China), recogió 382 mm, un poco más de la mitad de su precipitación anual promedio, en solo seis horas el 20 de julio y más de 640 mm durante un periodo corto de cuatro días. El mes de octubre de 2021 resultó el segundo octubre más lluvioso registrado en Hong Kong, recibiendo más de seis veces la precipitación normal (100.9 mm), coincidiendo con el paso de los ciclones tropicales Lionrock y Kompasú.

En los Estados Unidos, la sequía afectó especialmente a gran parte del oeste, las llanuras altas, el sur y la región de los Grandes Lagos, así como al sureste. Casi el 90 % del territorio continental experimentaba a finales de año una sequía entre moderada y excepcional. Las condiciones de sequía han afectado gravemente al centro y sur de Brasil, lo que ha resultado en una de las peores sequías del país en siglos. Condiciones más secas que el promedio envolvieron gran parte de Argentina durante el mes de julio.

Varios lugares del sur de Europa tuvieron un julio más seco que el promedio. Las condiciones secas combinadas con temperaturas elevadas facilitaron el desarrollo y la propagación de peligrosos incendios forestales a finales de mes. Los destructivos incendios forestales afectaron a partes del sur y suroeste de Turquía, afectando también a zonas del noreste de España. Para el mes en su conjunto, España tuvo precipitaciones en julio por debajo del promedio, recibiendo solo el 57 % de las precipitaciones normales de julio. Mientras tanto, partes de Europa occidental tuvieron lluvias torrenciales que causaron inundaciones mortales entre el 13 y el 15 de julio, y algunos lugares recibieron al menos el doble de su precipitación mensual normal en solo tres días.

En Europa la precipitación anual registrada alcanzó valores próximos a la media, aunque enero resultó especialmente húmedo y el periodo entre febrero y abril el más seco del año. La mayor parte del este y sureste de Europa tuvo más días de precipitación en 2021 que el promedio anual, mientras que la mayor parte de Escandinavia y las áreas alrededor del mar Báltico generalmente tuvieron menos días de precipitación. El invierno fue más húmedo que lo normal en gran parte de Europa, con las mayores anomalías encontradas en el norte de España, el oeste de Italia y a lo largo de la costa este del mar Adriático. Por el contrario, se dieron condiciones más secas que lo normal en el oeste de Noruega. En verano, se produjeron condiciones más húmedas que lo normal en Bélgica, Alemania y el este de Francia, mientras que se produjeron condiciones más secas en el norte del Reino Unido, Irlanda y el oeste de Rusia. El otoño resultó húmedo en el mar Mediterráneo y en el norte de Europa; mientras que hubo condiciones secas en una zona desde Francia y Alemania hasta el mar Negro.

En cuanto a la distribución espacial, las anomalías de precipitación más destacables fueron las condiciones húmedas en el este de España, zonas de Francia y Alemania, sur de Italia, la mayoría de los Balcanes y países al norte del mar Negro. Condiciones más secas predominaron en el norte de Italia, suroeste de Noruega y noroeste del Reino Unido.



1.3. OCEANOS, HIELO Y NIEVE

Océanos

El cambio en el nivel medio del mar es un indicador esencial de variabilidad climática, ya que refleja tanto el efecto de expansión térmica, debido al calor agregado al océano, como la pérdida de masa de las capas de hielo y los glaciares. Se observan variaciones a largo plazo e interanuales en el nivel del mar tanto a escala mundial como regional. Estas variaciones están relacionadas con los cambios observados en las cuencas oceánicas individuales y pueden afectar a las áreas costeras, donde las variaciones del nivel del mar pueden superponerse a los efectos del hundimiento de la tierra.

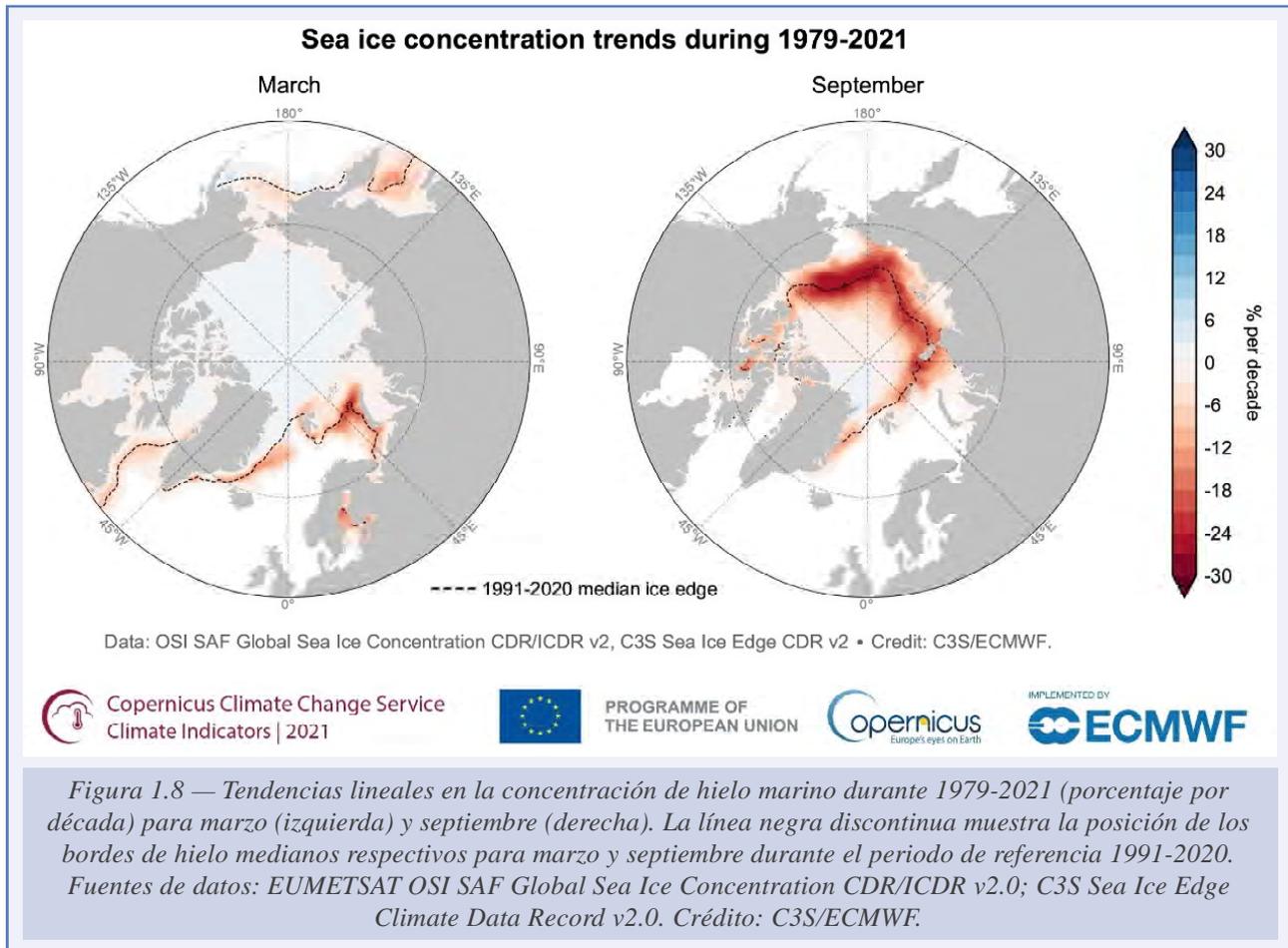
Desde 1993, a escala global el nivel medio del mar ha aumentado en 3.2 ± 0.4 mm/año. Esto equivale a un aumento total de aproximadamente 9 cm entre 1993 y 2021. Alrededor del 30 % de este aumento se puede atribuir a la expansión térmica del océano, el otro 70 % se debe en gran parte a la fusión del hielo terrestre de los glaciares y de las capas de hielo de la Antártida y Groenlandia. Además, un aumento de poco menos de 0.3 mm/año se atribuye a los cambios en el almacenamiento de agua de la tierra, como la humedad del suelo y las aguas subterráneas. Se puede detectar un aumento en la tasa de aumento del nivel medio del mar a nivel mundial a lo largo de todo el registro satelital de 1993-2021, estimado en 1.1 ± 0.8 mm/año/década. En escalas de tiempo interanuales, el registro del nivel medio del mar global muestra variaciones significativas relacionadas principalmente con el ENSO, durante las cuales se observan precipitaciones más altas que el promedio sobre los trópicos durante los eventos de El Niño y precipitaciones más bajas que el promedio durante los eventos de La Niña. Las tendencias regionales del nivel medio del mar pueden desviarse significativamente de la tendencia mundial debido a diversos procesos geofísicos y oceánicos.

Hielo y nieve

El hielo marino en las regiones polares juega un papel importante en el sistema climático. Situado entre el océano y la atmósfera, la capa de hielo está influida tanto por la temperatura del aire como del agua, así como por los vientos superficiales y las corrientes marinas. El hielo marino en las regiones polares es vigilado desde el espacio desde 1979. Los datos registrados desde entonces muestran el retroceso a largo plazo en la extensión del hielo del Ártico y cambios más complejos del hielo marino alrededor de la Antártida.

La disminución en la extensión del hielo marino no se ha producido a ritmo constante, pero fue más rápida a finales de la década de 1990 y principios de la década de 2000. Desde 2007, la tendencia parece haberse estabilizado, pero la extensión del hielo marino del Ártico de septiembre, que es cuando alcanza el mínimo anual, se ha mantenido constantemente por debajo del promedio para el periodo de referencia 1991-2020 (STROEVE y NOTZ, 2018). En marzo, el retroceso del hielo marino a largo plazo es mayor en el mar de Barents, mientras que, en septiembre, el retroceso es mucho más generalizado en todo el Ártico y es mayor en la franja que se extiende desde el mar de Kara hasta el mar de Beaufort.

En el Ártico, la extensión del hielo marino generalmente alcanza su máximo anual en marzo y su mínimo anual en septiembre. Aparte de este ciclo anual, la extensión del hielo marino del Ártico ha experimentado una marcada disminución en las últimas cuatro décadas, que se



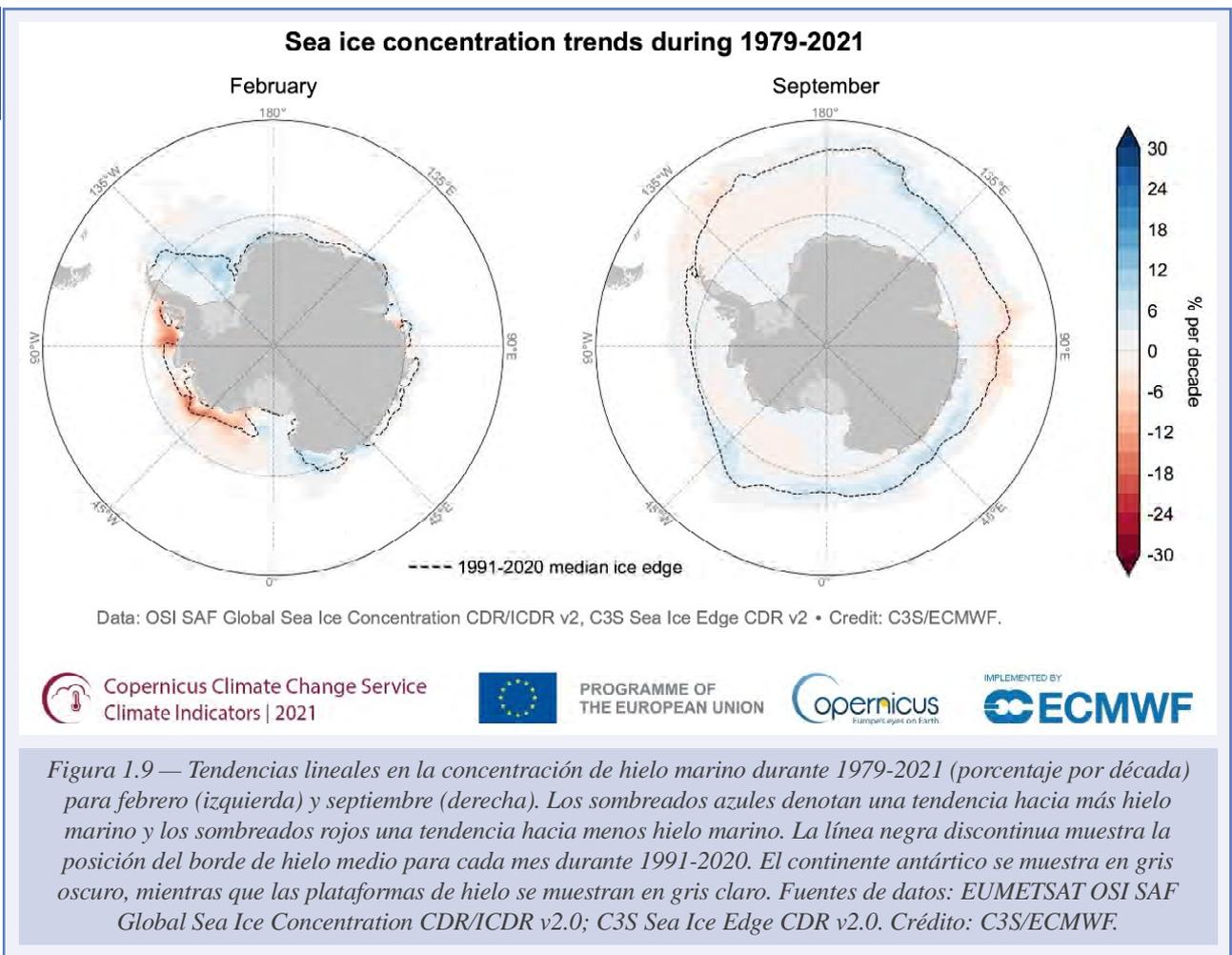
puede ver en todos los meses, pero es mayor en septiembre. Entre 1979 y 2021, disminuyó a una tasa promedio de alrededor de -2.6 % por década en marzo y -13.4 % en septiembre (figura 1.8). En la década de 1980, la extensión promedio de septiembre representaba cerca del 50 % del promedio de marzo; en la década de 2010, esto había disminuido a menos del 35 %.

El retroceso a largo plazo del hielo marino ha provenido principalmente de áreas a lo largo del borde del hielo marino, cuya posición varía a medida que cambia la cubierta de hielo marino durante el año. En marzo, las mayores tendencias negativas en la concentración de hielo marino se encuentran en el sector atlántico noreste del Ártico (área de Svalbard, mar de Barents). En septiembre, las grandes tendencias negativas son prominentes en una mayor parte del océano Ártico y sus mares marginales. En las partes centrales del océano Ártico al norte de Groenlandia y del archipiélago ártico canadiense, los cambios a largo plazo en la concentración de hielo marino siguen siendo muy pequeños. Sin embargo, esta área ha visto cambios en otras características del hielo marino, como la edad y el espesor del hielo marino.

Por otro lado, el ciclo estacional de la extensión del hielo marino antártico se desplaza en unos seis meses en comparación con el del Ártico, con el mínimo anual en febrero o principios de marzo, y el máximo anual en septiembre. El ciclo estacional del hielo marino también es más grande que en el Ártico. En la Antártida, la extensión promedio durante el mes con el mínimo anual de hielo marino es generalmente inferior al 20 % de la extensión promedio durante el mes del máximo anual de hielo marino. Esto es mucho menos que el promedio del 35 % visto en el Ártico durante 2010-2019.

No existe una tendencia clara a largo plazo en la extensión general del hielo marino en la Antártida, lo que refleja contrastes en los cambios en el hielo marino en diferentes sectores del océano austral, así como respuestas más complejas al cambio climático que en el Ártico. La evolución de la extensión del hielo marino antártico desde 1979 ha estado dominada por una gran variabilidad año a año y fluctuaciones a corto plazo. Esto fue particularmente marcado en la última década, durante la cual las extensiones de hielo marino muy por encima del promedio de 2012 a 2015 fueron seguidas por extensiones muy por debajo del promedio de 2016 a 2019, incluido un mínimo récord en 2017. La misma evolución reciente se ha visto para los máximos de septiembre, aunque con anomalías relativas menores.

La ausencia de una tendencia clara a largo plazo en la extensión del hielo marino antártico en su conjunto, enmascara cambios más significativos en algunos sectores del océano austral. Por ejemplo, los sectores oceánicos a lo largo de la parte occidental de la Antártida (los mares de Bellingshausen y Amundsen) han visto una reducción en las concentraciones de hielo marino en febrero desde 1979. Otras tendencias, ya sea en febrero (en el mar de Weddell) o septiembre (alrededor de la Antártida) son pequeñas y no reflejan cambios significativos en el hielo marino a largo plazo, generalmente debido a la gran variabilidad interanual. En la figura 1.9 se muestra el mapa de tendencias de la concentración de hielo marino alrededor de la Antártida; solo las tendencias en los sectores del mar de Bellingshausen y el mar de Amundsen en febrero son estadísticamente significativas en el nivel de confianza del 95 %. Las tendencias de febrero en el mar de Weddell, así como las tendencias de septiembre en toda la Antártida no son estadísticamente significativas.



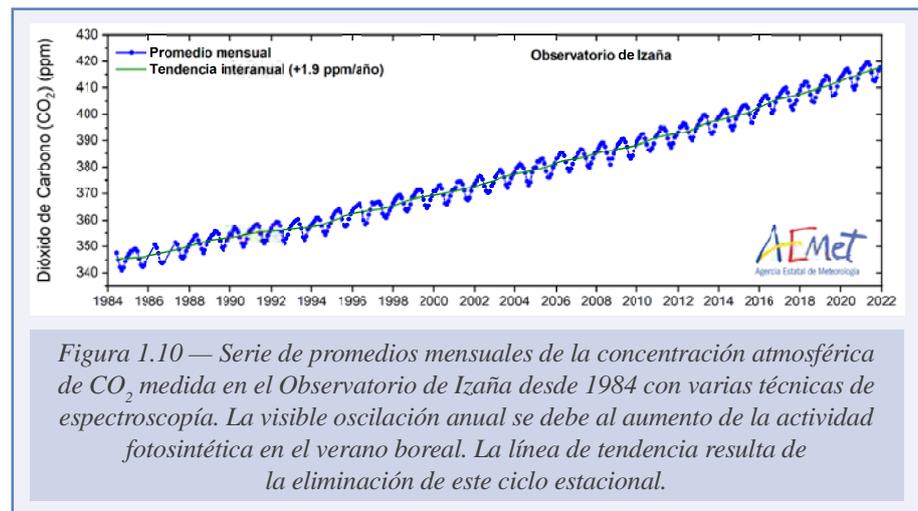
1.4. GASES DE EFECTO INVERNADERO

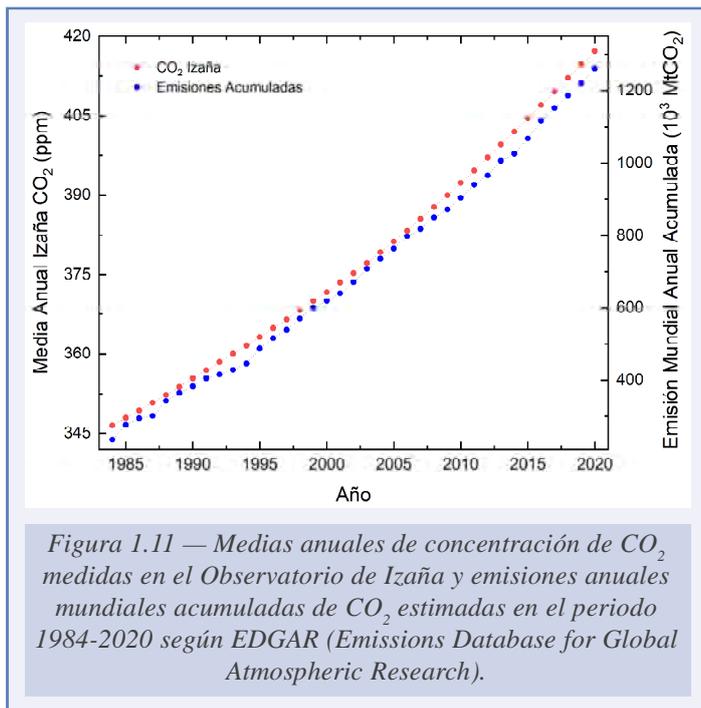
El calentamiento global es el resultado de desequilibrios en el balance energético de la Tierra, causados por procesos y agentes naturales y antropogénicos. El forzamiento radiativo cuantifica el cambio en los flujos de energía originados por variaciones en la acción de estos agentes, de los cuales los más importantes son los gases de efecto invernadero (GEI) de larga duración. De entre ellos, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los clorofluorocarbonos (CFC), son responsables de aproximadamente el 96 % del forzamiento radiativo debido a los GEI de larga duración desde el año 1750, que se toma como referencia de la era preindustrial. (BUTLER y MONTZKA, 2021).

a) Dióxido de carbono (CO_2)

El CO_2 es el GEI antropogénico más abundante en la atmósfera, y contribuye en aproximadamente un 66 % al forzamiento radiativo ocasionado por los GEI de larga duración. Es también el responsable del 82 % del aumento de ese forzamiento en el último decenio. Las emisiones generadas por actividades humanas proceden principalmente de la quema de combustibles fósiles y de la producción de cemento. Según el último boletín de GEI de la OMM (WMO, 2021) el promedio mundial de la fracción molar del CO_2 en la atmósfera durante el año 2020 fue de 413.2 ppm (partes por millón), lo que supone un aumento de 2.5 ppm respecto al promedio de 2019 y del 149 % respecto de los niveles preindustriales. El incremento anual medio durante la última década es de 2.4 ppm. Estos valores se obtienen promediando las observaciones *in situ* de la red de estaciones de superficie del programa de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de la OMM, de la que forma parte el Observatorio Atmosférico de Izaña, en Tenerife. En Izaña se registraron en 2020 y 2021 unos promedios de 414.1 ppm y 416.5 ppm, respectivamente, de los que resulta una diferencia anual de 2.5 ppm, en línea con el crecimiento mundial del año anterior. El promedio mensual máximo se registró en mayo,

con 419.7 ppm. Las medidas por satélite son otra fuente independiente de datos de concentración de CO_2 . Según el informe del Estado del Clima Europeo (ESO-TC) de 2021 publicado por el Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S), el promedio mundial anual de concentración de CO_2 obtenido de mediciones satelitales y dado como promedio en columna vertical (XCO_2) fue de 414.3 ppm en 2021, aumentando en 2.3 ppm el promedio de 2020, y el incremento anual medio desde 2010 resulta ser 2.4 ppm, en buen acuerdo con los resultados de las medidas *in situ*. El crecimiento del CO_2 atmosférico se está acelerando, como se puede observar en la serie de Izaña (figura 1.10), que muestra un crecimiento anual medio de 1.9 ppm desde 1984, mientras que actualmente está próximo a los 2.5 ppm.



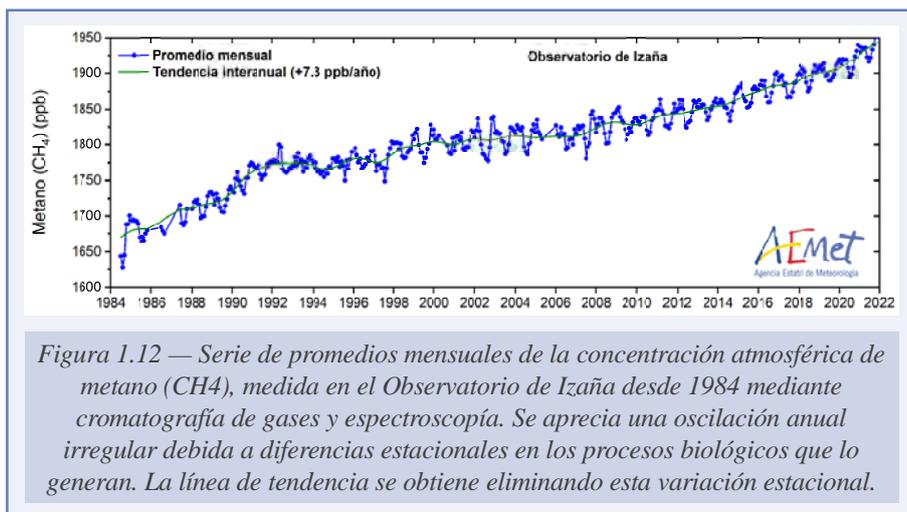


El crecimiento anual de la concentración de CO₂ que se mide en la atmósfera es aproximadamente proporcional a las emisiones anuales mundiales de CO₂ de origen fósil proporcionadas por la Base de Datos de Emisiones para la Investigación Atmosférica Global (EDGAR) (CRIPPA *et al.*, 2020), como se ve en la figura 1.11. La conversión de las unidades de emisión (Mt) en unidades de concentración (ppm) permite calcular el factor de proporcionalidad en un 45 %. Es decir, de cada 100 unidades de CO₂ emitidas a la atmósfera por el ser humano, 45 permanecen en ella y las restantes 55 se absorben por los sumideros naturales de CO₂ (el océano y la biosfera).

b) Metano (CH₄)

El metano es el segundo gas de efecto invernadero en importancia, presente en menor concentración que el CO₂, pero con mayor capacidad de absorción de calor. Contribuye en aproximadamente un 16 % al forzamiento radiativo causado por los GEI de larga duración. Alrededor del 40 % del CH₄ que se emite a la atmósfera procede de fuentes naturales (por ejemplo, humedales y termitas), mientras que cerca del 60 % restante tiene origen antropogénico (por ejemplo, ganadería de rumiantes, cultivo de arroz, explotación de combustibles fósiles, vertederos y quema de biomasa). Según la red de observaciones *in situ* del programa VAG de la

OMM, el promedio mundial de CH₄ alcanzó en 2020 un nuevo máximo de 1889 ppb (fracción molar de una parte en mil millones, del inglés *parts per billion*), lo que representa un aumento de 11 ppb con respecto al año 2019. Este aumento es superior al crecimiento anual medio del decenio anterior. Después de un periodo de estabilidad entre 1999 y 2006, la concentración de CH₄ en la atmósfera ha venido creciendo



desde 2007, hasta alcanzar en 2020 el 262 % del nivel preindustrial. La causa probable de esta tendencia reciente es el aumento de las emisiones de CH₄ procedentes de los humedales en los trópicos y de fuentes antropogénicas en las latitudes medias del hemisferio norte (WMO, 2021). El Observatorio de Izaña registró un promedio anual de 1916 ppb en 2020 y de 1935 ppb en 2021, alcanzando un promedio mensual máximo de 1959 ppb en noviembre de 2021 (figura 1.12).

c) Óxido nítrico (N_2O)

El óxido nítrico es un gas de efecto invernadero con mayor capacidad de absorción de calor que el dióxido de carbono y el metano, aunque está presente en la atmósfera en menores concentraciones. El N_2O causa aproximadamente el 7 % del forzamiento radiativo debido a los GEI de larga duración, y es el tercer gas que más contribuye a ese forzamiento. Las emisiones mundiales de N_2O inducidas por el hombre se deben principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados y constituyen aproximadamente el 40 % del total de las emisiones. Estas fuentes no naturales han aumentado en un 30 % en los últimos cuatro decenios, siendo el principal factor de crecimiento del N_2O en la atmósfera. En 2020 el promedio mundial de la fracción molar del N_2O alcanzó los 333.2 ppb, es decir, se situó 1.2 ppb por encima del valor del año 2019, lo que equivale a un 123 % del nivel de la era preindustrial (270 ppb) (WMO, 2021). En Izaña se midieron promedios anuales de 333.7 ppb en 2020 y 334.9 ppb en 2021 (aumento anual de 1.2 ppb), con un promedio mensual máximo de 335.5 ppb en diciembre (fig. 1.13).

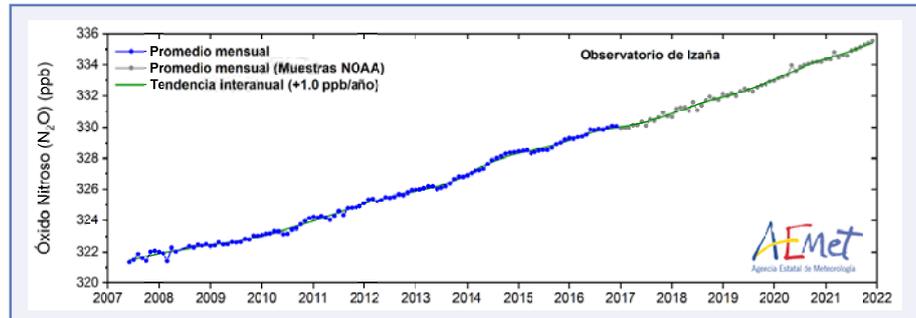


Figura 1.13 — Serie de promedios mensuales de la concentración atmosférica de óxido nítrico (N_2O) en el Observatorio de Izaña. Los valores entre 2007 y 2016 proceden de medidas realizadas in situ mediante cromatografía de gases. Los datos desde 2017 proceden de muestras tomadas en el Observatorio y analizadas por la NOAA como parte de su «Cooperative Air Sampling Network». La línea de tendencia se obtiene suprimiendo fluctuaciones de periodo anual, o menor, y muestra un claro crecimiento.

principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados y constituyen aproximadamente el 40 % del total de las emisiones. Estas fuentes no naturales han aumentado en un 30 % en los últimos cuatro decenios, siendo el principal factor de crecimiento del N_2O en la atmósfera. En 2020 el promedio mundial de la fracción molar del N_2O alcanzó los 333.2 ppb, es decir, se situó 1.2 ppb por encima del valor del año 2019, lo que equivale a un 123 % del nivel de la era preindustrial (270 ppb) (WMO, 2021). En Izaña se midieron promedios anuales de 333.7 ppb en 2020 y 334.9 ppb en 2021 (aumento anual de 1.2 ppb), con un promedio mensual máximo de 335.5 ppb en diciembre (fig. 1.13).

d) Otros gases de efecto invernadero

Los clorofluorocarbonos (CFC) y otros gases halogenados menores contribuyen aproximadamente en un 11 % al forzamiento radiativo causado por los GEI de larga duración. Entre estos gases cabe destacar el hexafluoruro de azufre (SF_6), un GEI artificial de larga duración con una enorme capacidad de absorción de calor, muy persistente en la atmósfera, y que está aumentando a un ritmo relativamente rápido, aunque todavía está presente en la atmósfera en muy bajas concentraciones. La industria química produce esta sustancia principalmente por su uso como aislante eléctrico en equipos de distribución de energía. Su fracción molar actual es más del doble que la registrada a mediados de los años noventa (WMO, 2021). Los datos registrados en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica Global de Izaña (fig. 1.14), muestran una tendencia creciente en el promedio anual de concentración de SF_6 de más de 0.3 ppt (fracción molar de una parte por billón, del inglés *parts per trillion*). El valor medio de 2021 alcanzó los 10.8 ppt, con un máximo mensual de 11.0 ppt en diciembre.

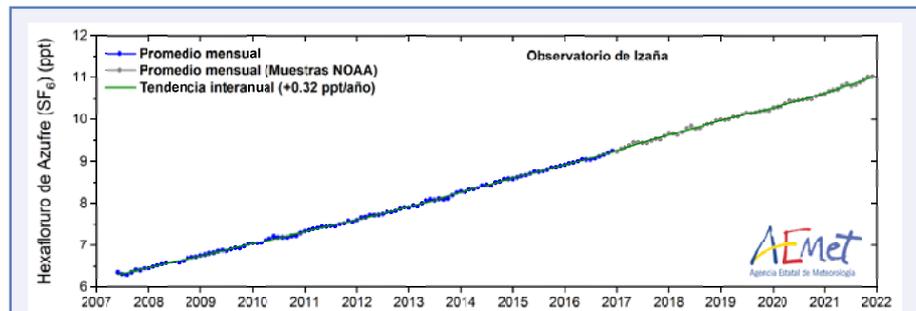


Figura 1.14 — Serie de promedios mensuales de la concentración atmosférica de hexafluoruro de azufre (SF_6) en el Observatorio de Izaña. Los valores entre 2007 y 2016 proceden de medidas realizadas in situ mediante cromatografía de gases. Los datos desde 2017 proceden de muestras tomadas en el Observatorio y analizadas por la NOAA como parte de su «Cooperative Air Sampling Network». La línea de tendencia se obtiene suprimiendo fluctuaciones de periodo anual, o menor, y muestra un fuerte crecimiento sostenido.

La industria química produce esta sustancia principalmente por su uso como aislante eléctrico en equipos de distribución de energía. Su fracción molar actual es más del doble que la registrada a mediados de los años noventa (WMO, 2021). Los datos registrados en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica Global de Izaña (fig. 1.14), muestran una tendencia creciente en el promedio anual de concentración de SF_6 de más de 0.3 ppt (fracción molar de una parte por billón, del inglés *parts per trillion*). El valor medio de 2021 alcanzó los 10.8 ppt, con un máximo mensual de 11.0 ppt en diciembre.

1.5. ANOMALÍAS Y FENÓMENOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

Los impactos más agudos del tiempo y el clima a menudo se sienten durante eventos meteorológicos extremos, como fuertes lluvias y nieve, sequías, olas de calor, olas de frío y tormentas, incluidas las tormentas tropicales y los ciclones. Estos pueden provocar o exacerbar otros eventos de alto impacto, como inundaciones, deslizamientos de tierra, incendios forestales y avalanchas. Esta sección se basa en gran medida en las aportaciones de los Miembros de la OMM.

1.5.1. Olas de calor e incendios forestales

Varias olas de calor excepcionales afectaron el oeste de América del Norte durante junio y julio. La más extrema afectó a finales de junio al noroeste de los Estados Unidos y el oeste de Canadá. Se superaron ampliamente los máximos registrados históricos, destacando los 49.6 °C en Lytton (Columbia Británica) o 46.7 °C en Portland (Oregon). También hubo múltiples olas de calor en el suroeste de los Estados Unidos. Death Valley, California, alcanzó los 54.4 °C el 9 de julio, similar al valor de 2020, el valor más alto registrado en el mundo desde al menos la década de 1930. Estas olas de calor fueron acompañadas por grandes incendios forestales.

El calor extremo afectó a la región mediterránea en general en varias ocasiones durante la segunda mitad del verano del hemisferio norte. El episodio más excepcional ocurrió en la segunda semana de agosto. El 11 de agosto, una estación agrometeorológica cerca de Siracusa en Sicilia alcanzó 48.8 °C, un récord europeo provisional, mientras que Kairouan (Túnez) alcanzó un récord de 50.3 °C. Montoro (47.4 °C) estableció un récord nacional para España el 14 de agosto, mientras que el mismo día Madrid (Aeropuerto de Barajas) registró su día más caluroso con 42.7 °C. Anteriormente, el 20 de julio, Cizre (49.1 °C) estableció un récord nacional turco y Tbilisi (Georgia) tuvo su día más caluroso registrado (40.6 °C). Se produjeron grandes incendios forestales en muchas partes de la región, y Argelia, el sur de Turquía y Grecia fueron los más afectados.

Junio fue excepcionalmente cálido en muchas partes del este de Europa. Se alcanzaron récords nacionales en Estonia y Bielorrusia, mientras que los lugares que registraron el día más caluroso de junio fueron San Petersburgo (35.9 °C) y Moscú (34.8 °C), ambos el 23 de junio, Yereván (Armenia, 41.1 °C) el 24 y Bakú (Azerbaiyán, 40.5 °C) el 26. Tampere en Finlandia registró su temperatura más alta registrada (33.2 °C) el 22 de junio. Libia también experimentó una ola de calor prolongada a finales de junio. En julio también se registraron temperaturas elevadas en el noroeste de Europa; 31.3 °C en Castledearg el 21 de julio fue un récord para Irlanda del Norte.

Por tercer año consecutivo, hubo grandes incendios forestales durante el verano en Siberia, particularmente en la República de Sakha alrededor de Yakutsk. La actividad de incendios en la región amazónica durante la temporada alta fue menor que en 2019 o 2020, pero hubo una gran actividad de incendios en otras partes de Brasil. La temporada de incendios forestales de Australia en 2020-21 también estuvo relativamente inactiva después de una temporada muy intensa en 2019-20.

1.5.2. Olas de frío y nieve

Condiciones anormalmente frías afectaron muchas partes del centro de los Estados Unidos y el norte de México a mediados de febrero. Los impactos más severos se produjeron en Texas,

que en general experimentó las temperaturas más bajas desde al menos 1989, con temperaturas en algunas áreas que se mantuvieron bajo cero continuamente durante 6 a 9 días, estableciendo récords en lugares como Austin y Waco. El 16 de febrero, la ciudad de Oklahoma alcanzó los $-25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y Dallas $-18.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, sus temperaturas más bajas desde 1899 y 1949, respectivamente.

Fue un invierno frío en muchas partes del norte de Asia. La Federación Rusa tuvo su invierno más frío desde 2009-10. Las temperaturas por debajo del promedio afectaron a gran parte de Japón a fines de diciembre y principios de enero, con repetidas fuertes nevadas, y varios lugares en la costa de Honshu en el mar de Japón tuvieron su mayor nevada registrada en 72 horas a principios de enero. Gran parte de China también estuvo fría durante este periodo, y Beijing alcanzó los $-19.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ el 7 de enero, su temperatura más baja desde 1966.

Un fuerte temporal de nieve asociado a la borrasca Filomena azotó muchas partes de España del 7 al 10 de enero, seguida de una semana de temperaturas bajo cero. Un total de 53 cm de nieve cayeron en el observatorio del Retiro (Madrid), y también se registraron grandes nevadas en muchas otras partes de España. Algunas localidades, como Toledo ($-13.4\text{ }^{\circ}\text{C}$) y Teruel ($-21.0\text{ }^{\circ}\text{C}$), registraron récords de temperatura mínima el 12 de enero. En la segunda semana de febrero, los Países Bajos experimentaron su temporal de nieve más importante desde 2010, con fuertes nevadas también en Alemania, Polonia y el Reino Unido; A raíz de la tormenta, Braemar registró $-23.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ el 12 de febrero, la temperatura más baja en el Reino Unido desde 1995. En el sureste de Europa, Atenas registró el 15 de febrero la nevada más intensa desde 2009.

Un inusual episodio de frío primaveral afectó a muchas partes de Europa a principios de abril. Las bajas temperaturas récord de abril en Francia incluyeron $-7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Saint-Etienne el día 8 y $-6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Beauvais el día 6, mientras que Belgrado (Serbia) tuvo su mayor nevada registrada en abril el día 7. En zonas elevadas, se establecieron récords nacionales para abril en Suiza ($-26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Jungfrauoch) y Eslovenia ($-20.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Nova vas na Blokah). Este episodio siguió a un final de marzo muy cálido, especialmente en Francia, donde se superó el día 31 el récord de temperatura media diaria para ese mes. El Reino Unido registró su temperatura media mensual más baja para abril desde 1922.

1.5.3. Ciclones tropicales

La temporada de huracanes en el Atlántico tuvo una actividad superior a la media, con 21 tormentas con nombre, el tercer número más alto de tormentas con nombre registrado. Cabe destacar que la tormenta tropical Claudette, que tocó tierra en Luisiana (EE. UU.), el 19 de junio, originó lluvias torrenciales, inundaciones y generó algunos tornados en la región sureste. Igualmente el huracán Ida, que tocó tierra en el estado de Luisiana el 29 de agosto fue excepcionalmente intenso. Claudette contribuyó a condiciones más húmedas que el promedio en el sureste de los EE. UU., especialmente en Alabama y Mississippi, que tuvieron su segundo y quinto junio más húmedo registrado. Antes de convertirse en tormenta tropical, la perturbación que luego se convirtió en la tormenta tropical Claudette originó fuertes lluvias en partes del este y sur de México, provocando deslizamientos de tierra y desbordamiento de ríos. Partes del este de México tuvieron el doble de precipitaciones normales de junio. También son de destacar en el mes de agosto la tormenta tropical Fred, que afectó a Puerto Rico, a la isla de La Española y a Florida (EE. UU.). Igualmente, el huracán Grace fue uno de los más intensos que ha afectado a la costa este de México, y el huracán Ida afectó a Cuba y Lousiana (EE. UU.) originando intensos vientos.

El ciclón tropical Eloise, equivalente a un huracán de categoría 1, tocó tierra en Mozambique cerca de Beira el 23 de enero, originando fuertes vientos y lluvias que provocaron graves inundaciones en la región. En Beira se recogieron 250 mm de lluvia en 24 horas, lo que se acerca al total de precipitación promedio mensual de la región para el mes de enero.

El ciclón Seroja se formó en la cuenca del océano Índico oriental a principios del mes de abril y cruzó la costa de Australia occidental el 11 de abril. Seroja trajo copiosas lluvias y fuertes vientos a la región. Varios lugares tuvieron su precipitación diaria más alta registrada. Seroja también afectó a Indonesia, provocando inundaciones y deslizamientos de tierra históricos en partes de la región.

El tifón Rai tocó tierra en el sur de Filipinas el 16 de diciembre, con fuertes vientos y lluvias torrenciales, causando estragos en toda la región. Después de cruzar Filipinas, Rai continuó moviéndose hacia el oeste hacia el mar de China Meridional, intensificándose y convirtiéndose en el primer supertifón en el mar de China Meridional en el mes de diciembre desde 1961.

El ciclón Gulab tocó tierra en el sureste de la India el 26 de septiembre, originando lluvias torrenciales. Posteriormente se intensificó en el mar de Arabia ocasionando inundaciones en Omán.

El tifón Conson, equivalente a un huracán de categoría 1, tocó tierra en el centro de Filipinas el 6 de septiembre, originando fuertes vientos y lluvias que provocaron inundaciones. Unos días después, el tifón Chanthu, equivalente a un huracán de categoría 5, tocó tierra en las islas Batanes, en el norte de Filipinas, el 11 de septiembre, ocasionando grandes destrozos. Chanthu también afectó a Taiwán, con lluvias torrenciales y mareas de tempestad de hasta 7 m.



TEMPERATURA MEDIA MUNDIAL

La temperatura media mundial en la superficie de enero a diciembre de 2021 fue la sexta más alta desde el comienzo de los registros mundiales en 1880.

EXTENSIÓN DEL HIELO MARINO EN EL ÁRTICO

En su temporada de crecimiento, la extensión máxima anual de hielo en el Ártico alcanzó su séptimo menor registro (junto con 2007). En su temporada de fusión, la extensión mínima anual alcanzó el duodécimo menor registro.

NOROESTE DE LOS ESTADOS UNIDOS Y OESTE DE CANADÁ

Durante la última semana de junio, una ola de calor extremo afectó a buena parte del noroeste de los Estados Unidos y del oeste de Canadá. Este último país alcanzó una nueva temperatura máxima a nivel nacional.

AMÉRICA DEL NORTE

América del Norte tuvo su séptimo año más cálido jamás registrado.

HURACÁN IDA

Ida se convirtió en un peligroso huracán de categoría 4 cuando tocó tierra en el estado de Luisiana (EE. UU.) el 29 de agosto, el mismo día que lo hizo el huracán Katrina 16 años antes. Ida causó cuantiosos daños en zonas de Cuba y del sur y noreste de los EE. UU.

TEMPORADA DE HURACANES EN EL PACÍFICO NORTE ORIENTAL

Actividad por encima de la media: 19 tormentas tropicales, 8 de ellas alcanzaron la categoría de huracán.

AMÉRICA DEL SUR

2021 fue el sexto año más cálido jamás registrado en América del Sur.

EXTENSIÓN DEL HIELO MARINO ANTÁRTICO

En su temporada de crecimiento, la extensión máxima anual de hielo en el Antártico alcanzó un valor próximo a su valor medio. En su temporada de fusión, la extensión mínima anual alcanzó el duodécimo menor registro.

Nota: la información que se ofrece en este mapa ha sido recopilada a partir de los Informes sobre el estado del clima de la NOAA. Puede obtener más información en el sitio web: <http://www.nceic.noaa.gov/sotc>

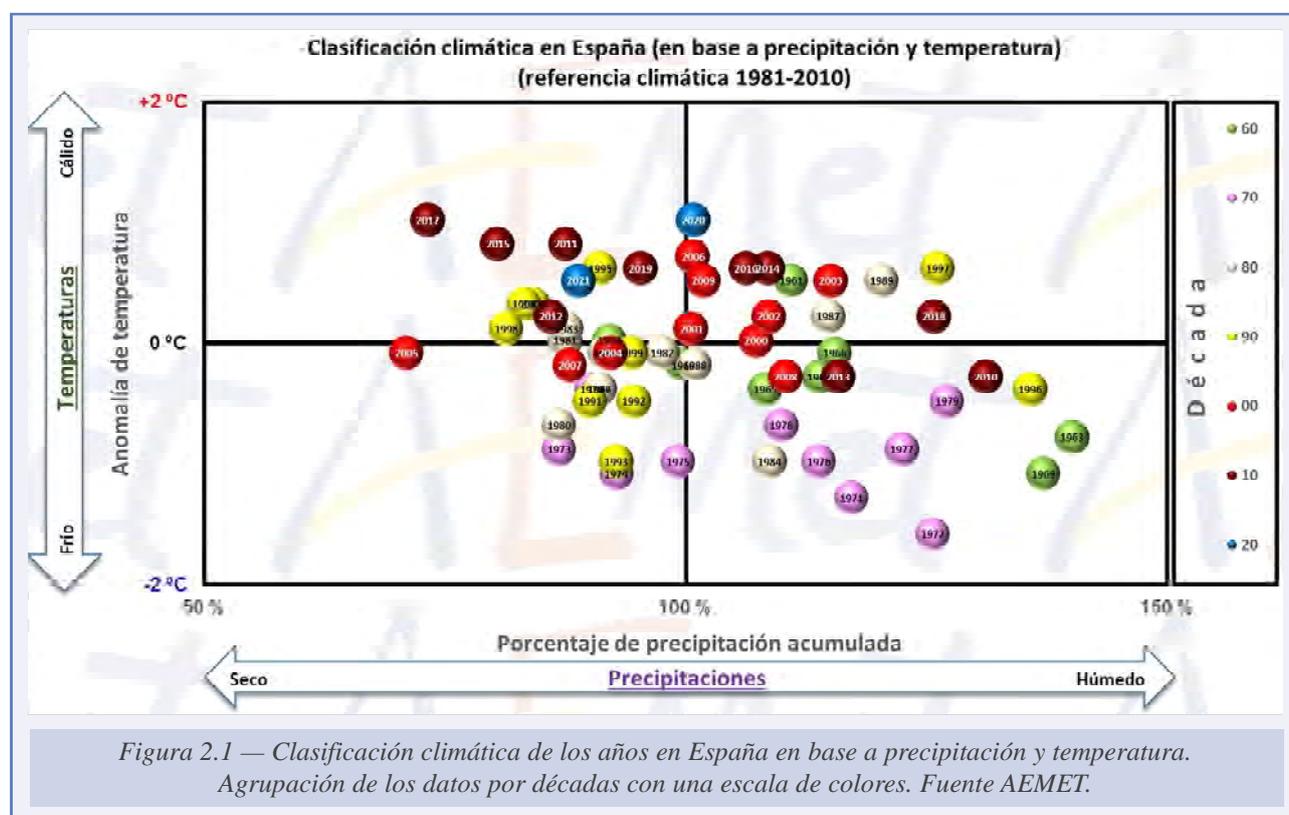


Figura 1.15 — Anomalías y eventos climáticos más significativos a nivel global en 2021.

Fuente: Global Climate Report-Annual 2021. NOAA.

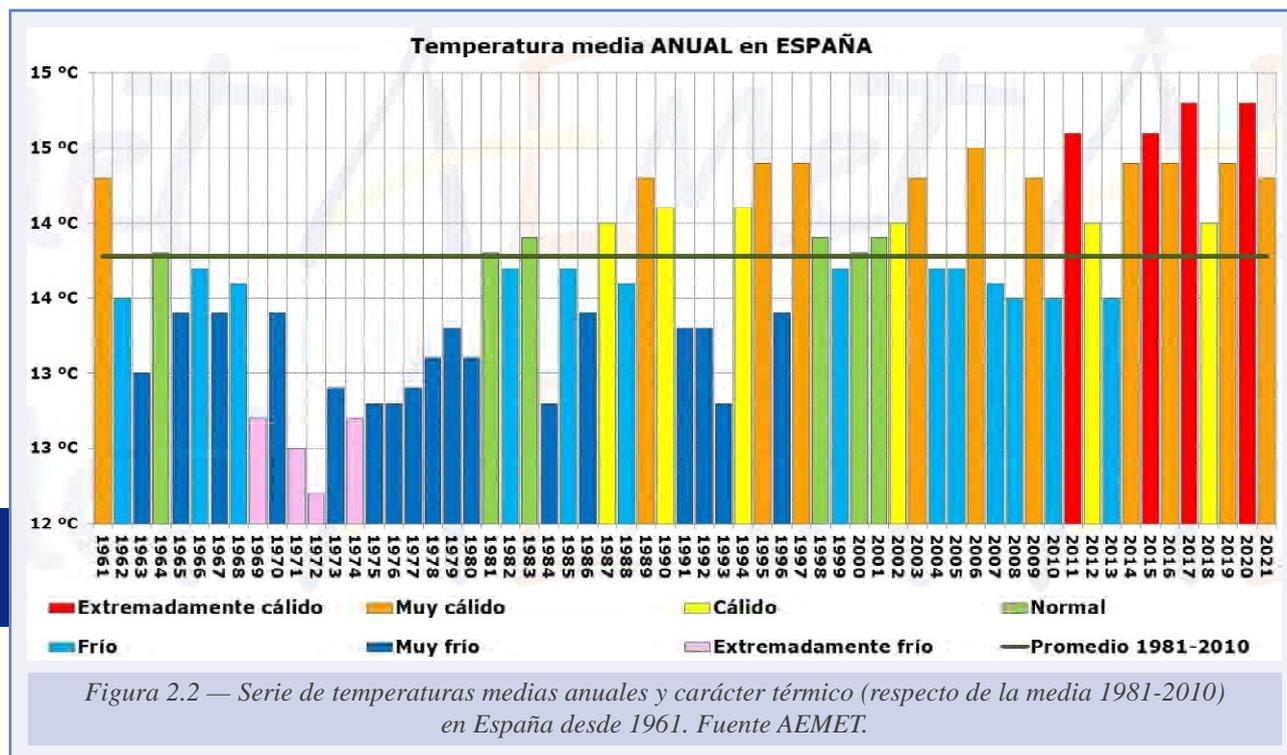
2. ESTADO DEL CLIMA DE ESPAÑA: AÑO 2021

El año 2021 presentó en España carácter extremadamente cálido en cuanto a temperaturas y normal en lo que respecta a las precipitaciones. En la figura 2.1 se muestra la clasificación de los distintos años en función de su temperatura y precipitación acumulada, ubicándose en el cuadrante superior izquierdo, donde se sitúan los años más cálidos y secos que las medias de temperatura y precipitación del periodo 1981-2020.



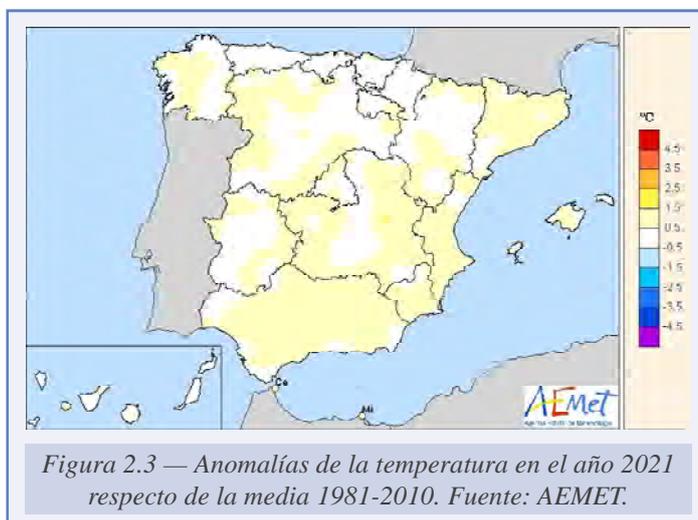
2.1. TEMPERATURA

El año 2021 fue muy cálido en España, con una temperatura media de 14.3 °C (14.2 °C en el promedio de la España peninsular, 17.3 °C en Baleares y 18.6 °C en Canarias), valor que supera en 0.5 °C al promedio anual normal (periodo de referencia 1981-2010). Se ha tratado del undécimo año más cálido desde el comienzo de la serie en 1961, y del noveno más cálido del siglo XXI. De los diez años más cálidos de la serie, ocho pertenecen al siglo XXI y siete de ellos a la década 2011-2020 (figura 2.2).



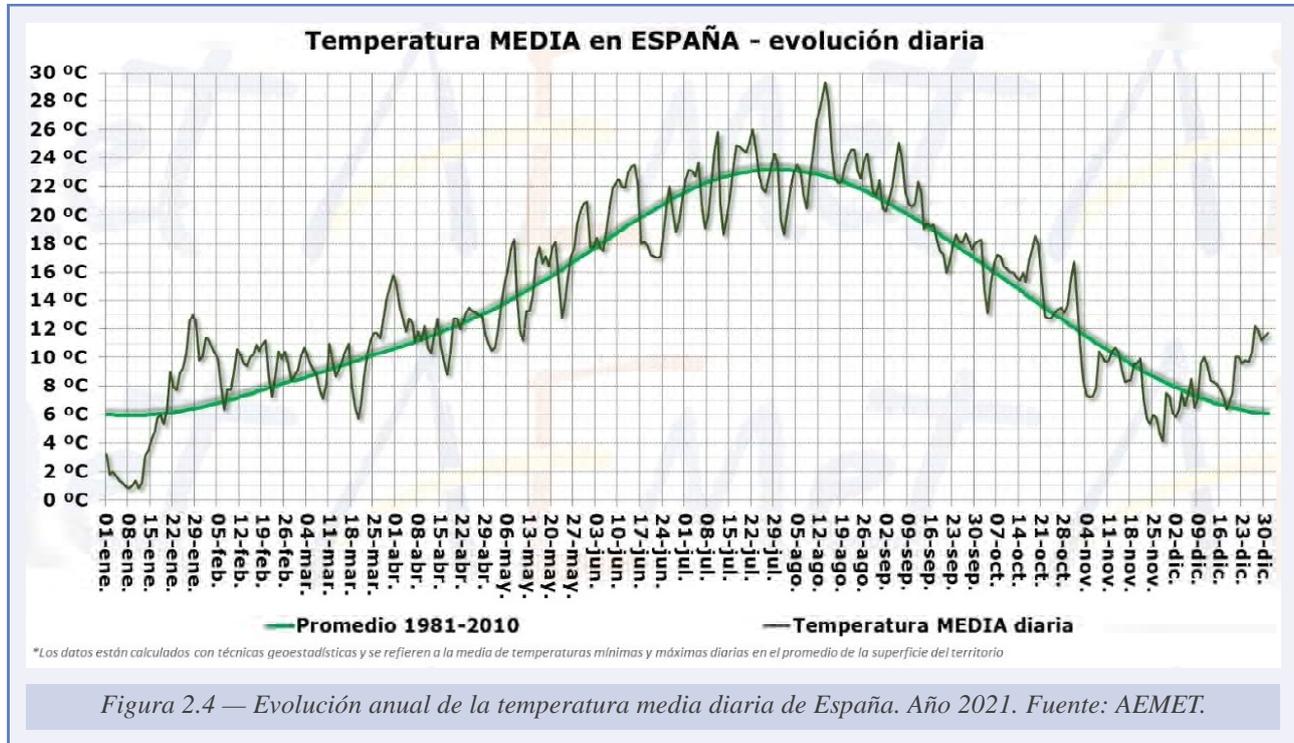
El año 2021 resultó muy cálido o extremadamente cálido en Andalucía y Región de Murcia y entre cálido y muy cálido en el resto del territorio peninsular español y en Baleares, aunque con algunas zonas aisladas en las que fue normal. En Canarias tuvo un carácter variable de unas zonas a otras, resultando en conjunto cálido. Las anomalías tomaron valores próximos a +1 °C en la mayor parte de Andalucía, Región de Murcia, Comunitat Valenciana y Cataluña, y valores comprendidos entre +1 °C y 0 °C en el resto de la España peninsular, Baleares y Canarias (figura 2.3).

Las temperaturas máximas diarias se situaron en promedio 0.5 °C por encima del valor normal, mientras que las temperaturas mínimas diarias fueron 0.6 °C superiores a las normales, resultando una oscilación térmica diaria 0.1 °C inferior a la normal.



2.1.1. Evolución de las temperaturas durante 2021

En la figura 2.4 se ha representado la evolución anual de la temperatura media diaria en España, así como el valor medio diario del periodo de referencia 1981-2010.



El año comenzó con temperaturas inusualmente bajas durante la primera quincena de enero, debidas a un episodio frío que había dado comienzo a finales de diciembre de 2020 y que se intensificó con la llegada de la borrasca Filomena, dando lugar a copiosas nevadas en el interior peninsular y a temperaturas extraordinariamente bajas en muchas regiones. A partir de mediados de enero se observó un aumento generalizado de las temperaturas que dio paso a un marcado episodio cálido, el cual se extendió durante la última decena de enero y la primera semana de febrero, registrándose temperaturas inusualmente elevadas para la época del año, y que ofrecieron un marcado contraste con las observadas en la primera quincena de enero. Durante el mes de febrero las temperaturas se mantuvieron en general por encima de los valores medios.

La primavera resultó en conjunto cálida, con una temperatura media que se situó en promedio 0.4 °C por encima del valor normal. Se alternaron sucesivos periodos cálidos y fríos, si bien fueron más frecuentes los primeros. Destacó el prolongado episodio cálido que se extendió entre el 24 de marzo y el 6 de abril, con temperaturas que fueron especialmente elevadas para la época del año en los últimos días de marzo, en los que se llegaron a superar los 30 °C en zonas de Extremadura y Andalucía y en algunos puntos del cantábrico. Los episodios fríos fueron en general de escasa magnitud, destacando únicamente el de los días 18-22 de marzo, con temperaturas muy por debajo de las habituales para la época del año, y los breves episodios fríos de los días 15-18 de abril, 1-3 de mayo y 10-14 de mayo.

El verano resultó en conjunto normal en cuanto a temperaturas. Junio presentó un marcado contraste térmico, con temperaturas que se situaron muy por encima de los valores normales

durante la primera quincena, mientras que en la segunda estuvieron muy por debajo de las habituales para la época del año. En el mes de julio las temperaturas tomaron valores ligeramente por debajo de las normales, mientras que agosto fue muy cálido, destacando la intensa ola de calor de mediados de agosto que afectó tanto a la península ibérica como a Baleares y Canarias, durante la cual se registraron las temperaturas más altas de 2021.

El otoño también tuvo un carácter normal en cuanto a temperaturas. En septiembre y octubre las temperaturas se situaron en general por encima de los valores normales, mientras que noviembre resultó en conjunto un mes muy frío, destacando los episodios fríos de los días 2-7 y 22-29 de noviembre.

En diciembre, las temperaturas volvieron a situarse muy por encima del promedio 1981-2010, resultando un mes con un carácter muy cálido. Destacó el episodio cálido de los días 20-31 de diciembre, en el que se observaron temperaturas extraordinariamente elevadas para la época del año en muchas zonas.

El 61 % de los días de 2021 tuvieron una temperatura media superior al valor normal del periodo de referencia y el 38 % tuvieron una temperatura media inferior a ese valor.

En la tabla 2.1 se muestran los valores de la temperatura media en España de cada mes, la media estacional y la anual, así como el promedio 1981-2010 de cada uno de los periodos, la anomalía térmica, el carácter y el orden que ocupan en la serie ordenada de más a menos cálido dentro de la serie de 61 años de datos que comienza en 1961. Los meses de enero, julio y noviembre tuvieron una temperatura media inferior al valor climático de referencia, destacando la anomalía de $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ observada en noviembre. El resto de los meses la temperatura media fue superior al promedio, destacando febrero, el tercero más cálido de la serie con una anomalía de $+2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, y diciembre, también el tercero más cálido de la serie con una anomalía de $+1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Mes	Temperatura media 2021	Promedio normal (1981-2010)	Anomalía	Carácter	Orden
Enero	5.3	5.9	-0.6	Frío	44
Febrero	9.6	7.1	2.5	Muy cálido	3
Marzo	10.0	9.9	0.1	Normal	22
Abril	12.1	11.5	0.6	Normal	18
Mayo	15.8	15.2	0.6	Cálido	22
Junio	19.9	19.8	0.1	Normal	23
Julio	22.8	22.9	-0.1	Frío	30
Agosto	23.6	22.7	0.9	Muy cálido	9
Septiembre	19.8	19.2	0.6	Cálido	21
Octubre	15.5	14.5	1.0	Cálido	20
Noviembre	8.4	9.6	-1.2	Muy frío	50
Diciembre	8.7	6.8	1.9	Muy cálido	3
Invierno	7.3	6.6	0.7	Cálido	14
Primavera	12.6	12.2	0.4	Cálido	20
Verano	22.1	21.8	0.3	Normal	19
Otoño	14.6	14.4	0.2	Normal	26
ANUAL	14.3	13.8	0.5	Muy cálido	11

Tabla 2.1. Temperatura media mensual, estacional, anual, promedio normal, anomalía, carácter y orden. Año 2021.

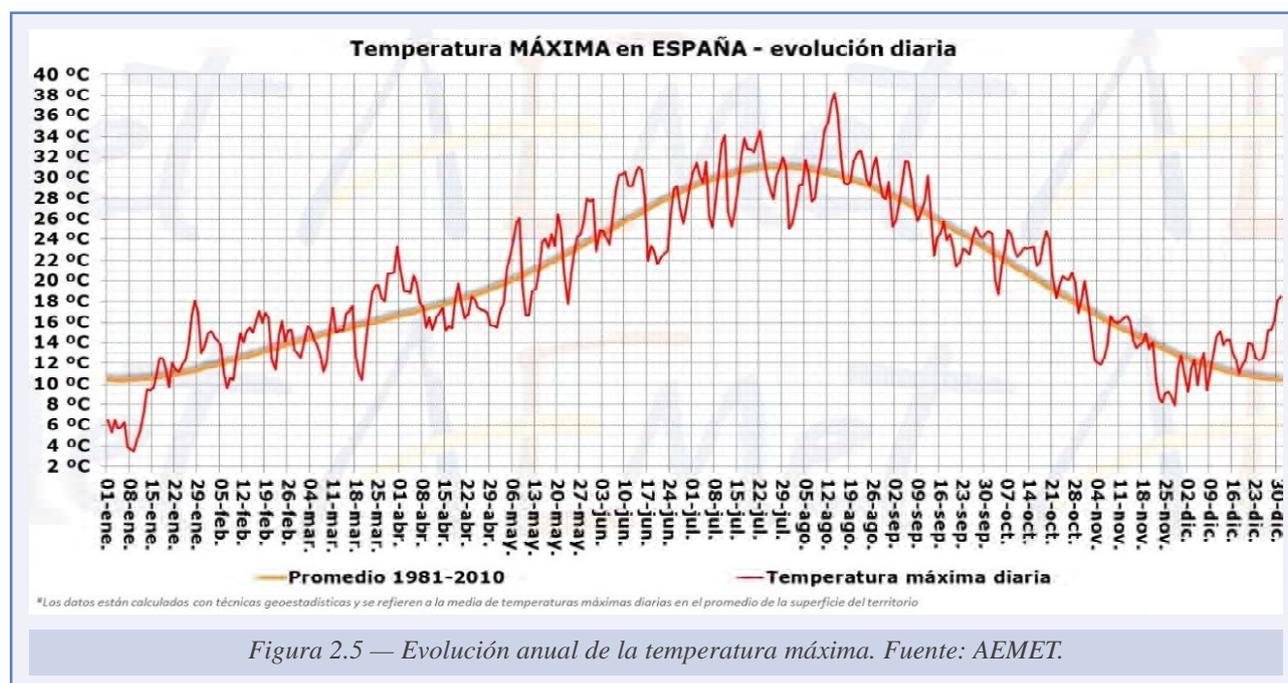
2.1.2. Episodios de temperaturas extremas

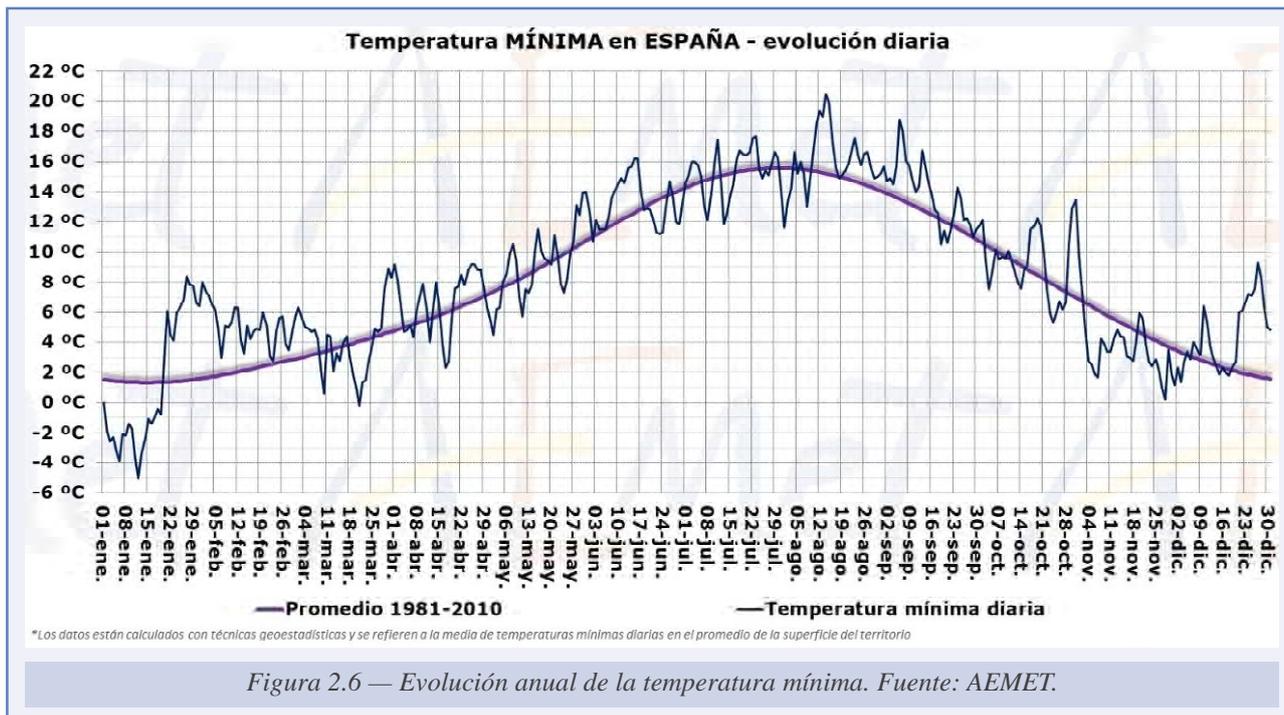
En 2021 se registraron dos olas de calor en la península ibérica y Baleares y tres en Canarias. Destacó la intensa ola de calor de mediados de agosto, provocada por la irrupción de una masa de aire muy cálido procedente del norte de África que afectó a la Península y Baleares los días 11-16 y que, posteriormente, se desplazó afectando también a Canarias durante los días 15-19. Durante este episodio tanto las temperaturas máximas como las mínimas tomaron valores extraordinariamente altos, superándose los 40 °C en gran parte del territorio peninsular y en ambos archipiélagos, llegando a superarse los 45 °C en amplias zonas de Andalucía y Murcia y en puntos de la Comunitat Valenciana, Castilla-La Mancha y Canarias.

En el mes de julio hubo otra ola de calor en la Península y en Baleares, mucho menos intensa que la anterior, entre los días 21-23. También destacó el breve pero intenso episodio cálido de los días 10-12 de julio, que no puede considerarse como ola de calor por su corta duración, durante el cual se registraron temperaturas superiores a los 40 °C en numerosos puntos del sur y del centro de la Península, llegando a alcanzarse valores cercanos a 45 °C en puntos del sureste peninsular.

En septiembre destacaron las dos olas de calor que afectaron a Canarias durante los días 5-7 y 11-13, en las cuales las temperaturas se situaron en valores muy por encima de los normales para la época del año.

En la figura 2.5 se ha representado la evolución anual de la temperatura máxima en España. Las temperaturas más altas de 2021 se observaron durante la ola de calor de mediados de agosto, destacando entre observatorios principales los 47.0 °C de Alcantarilla/base aérea el día 15, los 46.9 °C de Córdoba/aeropuerto el día 14, los 46.2 °C de Murcia el día 15 y los 46.0 °C de Granada/aeropuerto el día 14. En diecisiete estaciones principales, la mayoría de ellas situadas en el centro y sur de la Península, la temperatura máxima registrada durante esta ola de calor constituyó un nuevo récord absoluto de temperatura, y en cuatro de ellas se registró también durante esos días la temperatura mínima más alta desde el comienzo de su serie.





Por otra parte, en la figura 2.6 se ha representado la evolución anual de la temperatura mínima en España. El año 2021 empezó con un largo episodio frío que había comenzado a finales de diciembre de 2020 provocando un intenso flujo del norte, y que se prolongó e intensificó durante la primera quincena de enero con la llegada de la borrasca Filomena, la cual dio lugar a intensas nevadas en amplias zonas del interior peninsular. Tras retirarse la borrasca se estableció sobre la Península un anticiclón, lo que unido a la gran capa de nieve existente en amplias regiones dio lugar a temperaturas excepcionalmente bajas, que alcanzaron valores por debajo de -20 °C en algunas zonas.

En 2021 hubo dos olas de frío, ambas dentro del episodio frío de enero: la primera, de corta duración, se extendió entre los días 5 y 8, mientras que la segunda, de intensidad excepcional, se observó entre los días 11 y 18, después de las nevadas de la borrasca Filomena.

Las temperaturas más bajas de 2021 se observaron en la madrugada del día 12 enero en las zonas del interior peninsular afectadas por las nevadas de la borrasca Filomena, destacando entre estaciones principales los -25.2 °C de Molina de Aragón, los -21.0 °C de Teruel, los -14.1 °C de Albacete/base aérea y los -13.7 °C observados en Torrejón de Ardoz. En las estaciones principales de Madrid/Cuatro Vientos, Madrid/Getafe, Teruel y Toledo la temperatura más baja registrada en ese episodio constituyó un nuevo récord absoluto de temperatura mínima desde el comienzo de las respectivas series. En la estación de Madrid/Torrejón se registró también un récord absoluto de temperatura máxima diaria más baja desde el comienzo de la serie, al observarse una máxima de 0.0 °C el 8 de enero.

2.1.3. Evolución de los récords diarios de temperatura en España

A partir de los datos diarios calculados con técnicas geoestadísticas, se ha estimado la variación con el tiempo de los récords diarios de temperatura media en la España peninsular desde 1950, a los que se llamará «récords de temperaturas altas y bajas». No son, por tanto, efemérides de estaciones meteorológicas ni se trata tampoco de evolución de olas de calor, al estar referidos a todo el año y a datos calculados. Sin embargo, sí que muestran el incremento del número de días cálidos y, consecuentemente, la mayor frecuencia y duración de los episodios de calor. Lo contrario ocurre con los días fríos, que disminuyen notablemente, al igual que la frecuencia y duración de los episodios fríos.

De entre los métodos existentes para estimar el número teórico de récords de temperatura en un año, en este informe anual del clima de España para el año 2021 se ha aplicado el método usado por el servicio de Cambio Climático de Copernicus (Copernicus Climate Change Service (C3S), European State of the Climate 2019, 2020) que asume que, en un clima estacionario, el número anual de récords de temperaturas altas y bajas no debería variar demasiado con el paso del tiempo, ajustándose a la misma distribución estadística teórica. El método parte de la base de que, en el primer año de registros, en este caso 1950, todos los días se producen de forma simultánea récords de temperaturas altas y bajas (solo hay un registro cada día del primer año de nuestra serie, por lo que ese registro es a la vez el más alto y el más bajo). Así pues, el número de récords de ese primer año es de 365, tanto en temperaturas altas como bajas. En 1951, el segundo año de nuestra serie, el registro de cada uno de los días del año solo puede ser superior o inferior al del año anterior, por lo que aproximadamente el número de récords del segundo año será $365/2$, tanto para días cálidos como para días fríos. Asimismo, en el tercer año, aproximadamente uno de cada tres días se establecerá un récord, por lo que el número teórico es $365/3$, y así sucesivamente. En general, para una serie que comienza en 1950, el número teórico de récords en el año AAAA en un clima teórico estable sería de $365/(AAAA - 1949)$.

La figura 2.7 proporciona el número teórico para un clima estacionario y el número real observado de récords diarios de temperaturas altas y bajas desde 1950 en la España peninsular. Durante los últimos 30 años, el número real de récords de temperaturas altas diarias es mucho mayor que el valor teórico, y el número de récords diarios de temperaturas bajas es mucho menor que el valor teórico, lo cual es coherente con el calentamiento observado en España en las últimas décadas, que presupone mayor frecuencia en los récords de temperaturas altas frente a los de bajas, si bien los de estas últimas seguirán produciéndose.

Durante el año 2021 se superaron 13 récords diarios de temperaturas altas: entre el 26 y el 29 de enero, el 20 de febrero, entre el 12 y 15 de agosto, y los días 27, 28, 30 y 31 de diciembre. Los récords de temperatura altas de agosto estuvieron enmarcados dentro de la segunda ola de calor de las que se produjeron en la Península, cuya intensidad fue su aspecto más destacable, ya que tuvo una anomalía de 4.1 °C, la más elevada de la serie, tal y como se describe con más detalle en el anexo que analiza las olas de calor y de frío.

En 2021 no se superó ningún récord de temperaturas bajas, a pesar de las dos olas de frío del mes de enero, la primera bajo la influencia de la borrasca Filomena, y la segunda durante los días posteriores a las copiosas nevadas que se produjeron durante la misma. El día más frío de la segunda ola fue el 12 de enero, pero la temperatura media de ese día no fue tan baja como el mismo día del año 1985.

Según el modelo teórico, basado en un clima estable, durante el periodo de 10 años que transcurrió entre 2012-2021, se deberían haber producido 54 récords de temperaturas altas y 54 de temperaturas bajas (la probabilidad es igual en ambos casos), mientras que la realidad muestra que en los últimos 10 años se produjeron 14 récords de temperaturas bajas y 146 de temperaturas altas, resultando, por tanto, que el número de récords de temperaturas altas multiplica por 10.4 el número de récords de temperaturas bajas.

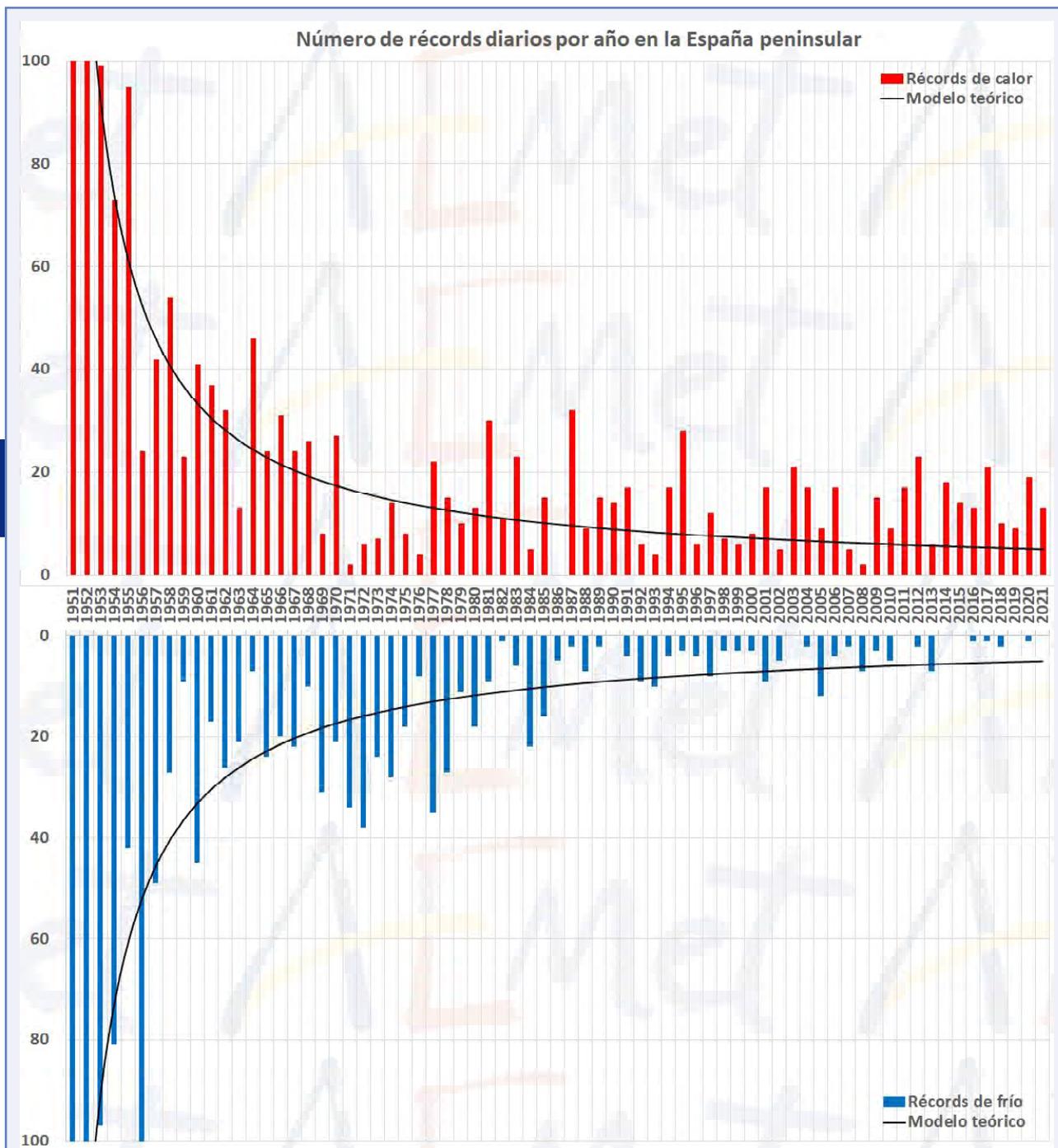


Figura 2.7 — Evolución de los récords diarios de temperatura en España peninsular. Fuente: AEMET.

2.1.4. Análisis de olas de calor y olas de frío de 2021

En el verano de 2021 hubo cinco olas de calor en España, dos de ellas en Península y Baleares y las otras tres en Canarias.

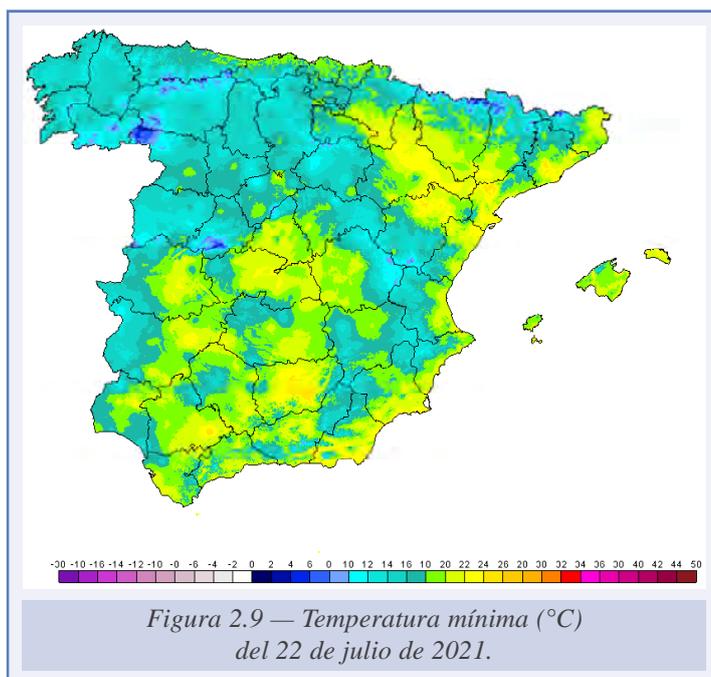
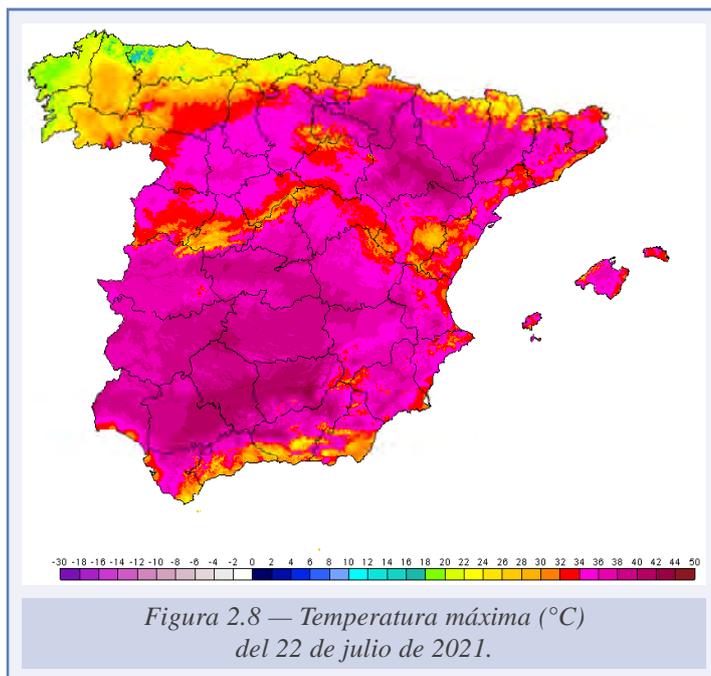
Las olas de calor en Península y Baleares

La primera ola de calor tuvo lugar entre los días 21 y 23 de julio. Su duración fue de tres días, que constituye la duración mínima necesaria para poder ser considerada ola de calor. Su mayor extensión espacial, con 16 provincias afectadas, fundamentalmente del norte peninsular, corresponde al 22 de julio. En este sentido no es una ola de calor destacable. El otro aspecto a analizar es su intensidad, para lo que hay que tener en cuenta la anomalía de la ola, 2.0 °C y la temperatura máxima de la ola, 37.0 °C, siendo también una ola de calor poco intensa. Así pues, fue una ola de calor que no destacó ni por duración, ni por extensión ni por intensidad.

El día más cálido de esta ola de calor fue el 22 de julio, fecha a la que corresponde el mapa de la figura 2.8 en el que se representan las temperaturas máximas registradas ese día. Los valores más elevados los encontramos en los valles del Guadalquivir, del Tajo y del Ebro, con máximas por encima de los 40 °C y los más suaves en Galicia y a orillas del Cantábrico donde los termómetros no superaron los 25 °C.

También las temperaturas mínimas muestran marcado contraste entre zonas, como se puede observar en el mapa de la figura 2.9, en el que los tonos amarillos corresponden a temperaturas mínimas por encima de los 20 °C, mientras que los tonos azules representan valores que en muchos casos estuvieron por debajo de los 15 °C.

Durante esta ola de calor ninguna estación de la red principal de AEMET registró efeméride de temperatura máxima ni mínima más altas para un mes de julio, aunque se superaron los 40 °C en amplias zonas del país, destacando los 41.5 °C del aeropuerto de Córdoba los días 22 y 23, los 41.1 °C del aeropuerto de Granada el día 22 y los 40.4 °C de Morón de la Frontera el día 22 y de la base aérea de Granada el 23. Entre las temperaturas

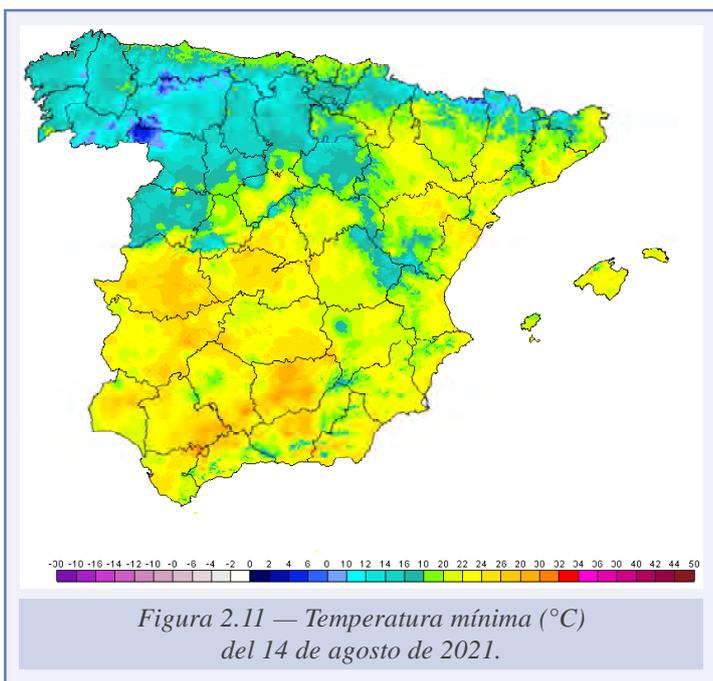
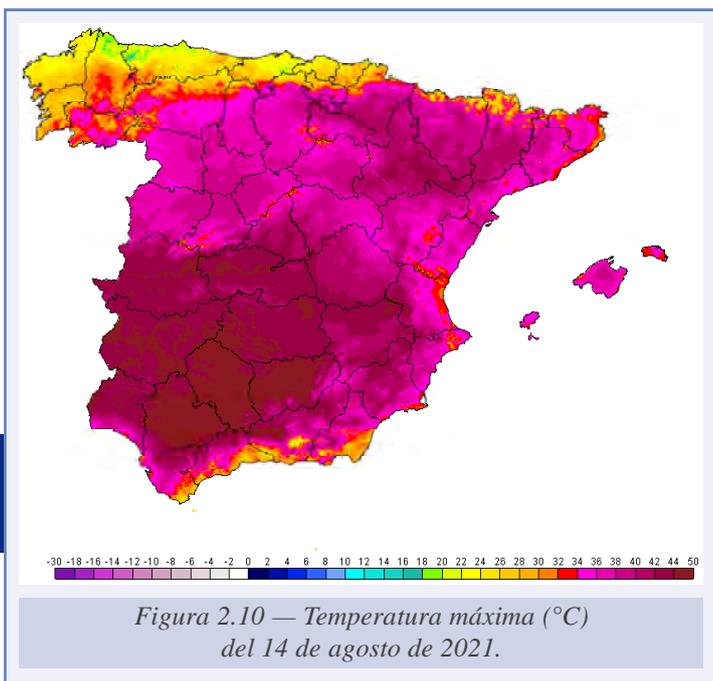


mínimas más elevadas, cabe citar los 24.4 °C registrados en el Centro Meteorológico de Barcelona el día 21 y en Jaén el 23, los 24.3 °C del puerto de Palma el día 23, los 24.2 °C del observatorio de Barcelona Fabra el día 23, o los 24.0 °C de la base naval de Rota el día 23.

La segunda ola de calor del verano en Península y Baleares tuvo una duración de seis días y transcurrió entre el 11 y el 16 de agosto. Su duración no fue el aspecto más sobresaliente, ya que ha habido 10 olas de calor que la superan y 9 que la igualan, pero sí lo fue su extensión espacial, que es de 36 provincias el día 14 de agosto, repartidas por casi toda la Península y Baleares, exceptuando Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco, superada tan solo en este sentido por las olas de calor de 2012 con 40 provincias afectadas el 10 de agosto, 2003 con 38 provincias afectadas los días 3 y 4 de agosto e igualando las de 1989 y 2018 también con

36 provincias afectadas, los días 19 y 20 de julio en la primera y el 3 de agosto en la segunda. Falta por analizar su intensidad, que es el aspecto más destacable de la misma, ya que su anomalía de la ola, 4.1 °C, es la más elevada de la serie, superando a las olas de calor del 26 de junio al 1 de julio de 2019 y del 11 al 16 de agosto de 1987, que con una anomalía de la ola de 4.0 °C ocupan el segundo lugar; el otro parámetro relacionado con la intensidad de una ola de calor es la temperatura máxima de la ola que resultó ser 40.2 °C, lo que la sitúa en tercera posición, por detrás de las de 2017 y 1975, aunque en los dos casos son olas de calor poco extensas que afectaron a 14 provincias, ubicadas fundamentalmente en el sur peninsular, lo que contribuye a elevar el valor de este parámetro. Por tanto, se trata de una de las olas de calor más importantes de la serie, tanto por su intensidad como por su extensión y en menor medida por su duración. En la figura 2.10 se representa el mapa de las temperaturas máximas del 14 de agosto, que fue el día más cálido de esta ola de calor, en el que se superaron los 40 °C en el centro y sur peninsular, en el valle del Ebro y puntos de Baleares, y los 45 °C en amplias zonas de la mitad sur.

En la figura 2.11 se muestra el mapa de las temperaturas mínimas de estos días. Se puede observar que se alcanzaron valores muy elevados, quedando por debajo de los 20 °C tan solo en la meseta Norte, Galicia, Asturias, los Pirineos y zonas de Cantabria y País Vasco, superándose los 25 °C en amplias zonas del centro y sur peninsular, a orillas del Mediterráneo y en Baleares.



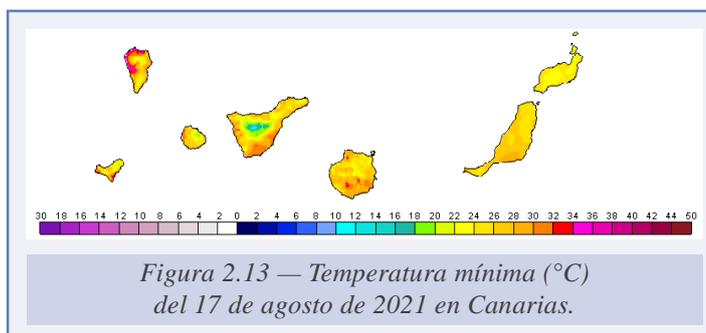
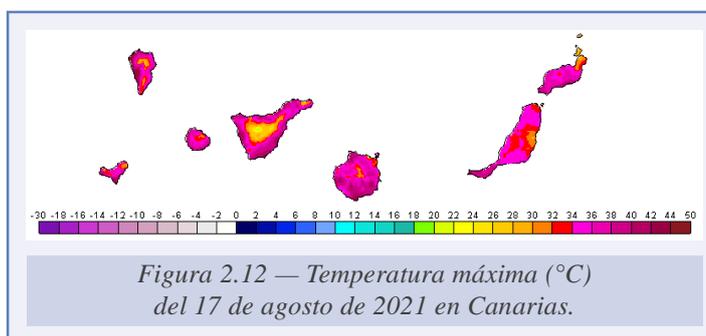
Numerosas estaciones de la red principal de AEMET superaron su efeméride de temperatura máxima absoluta para un mes de agosto, e incluso la efeméride absoluta de toda la serie, como por ejemplo Albacete Los Llanos con 43.3 °C el día 14, Ávila con 38.8 °C también el día 14, Cáceres con 43.7 °C el día 14, Córdoba aeropuerto con 46.9 °C el día 14, Cuenca con 41.5 °C el día 13, Granada aeropuerto con 46.0 °C el día 14, Granada base aérea con 43.8 °C el día 13, Madrid Barajas con 42.7 °C el día 14, Madrid Cuatro Vientos con 42.2 °C el día 14, Madrid Getafe con 42.6 °C el día 14, Madrid Retiro con 40.7 °C el día 14, Madrid Torrejón con 42.8 °C el día 14, Murcia con 46.2 °C el día 15, Murcia Alcantarilla con 47.0 °C el día 15, Pamplona aeropuerto con 41.6 °C el día 14, Segovia con 38.7 °C el día 13, Soria con 38.5 °C el día 13, Teruel con 41.3 °C el día 14 y Toledo con 44.2 °C el día 13. También cuatro estaciones de la red principal de AEMET registraron estos días su efeméride de temperatura mínima más alta de toda su serie, concretamente Albacete Los Llanos con 25.1 °C el día 15, Jaén con 30.1 °C el día 13, Madrid Getafe con 26.6 °C el día 14 y Madrid Retiro con 26.1 °C el día 14.

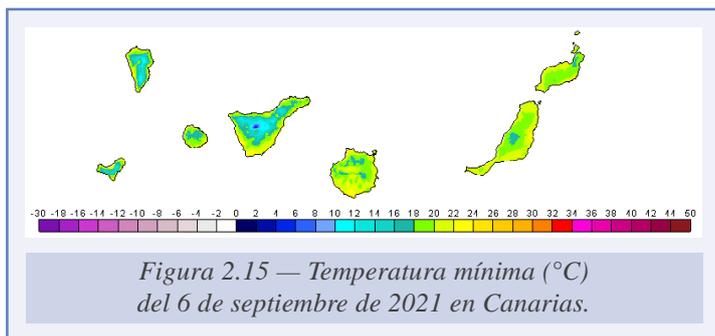
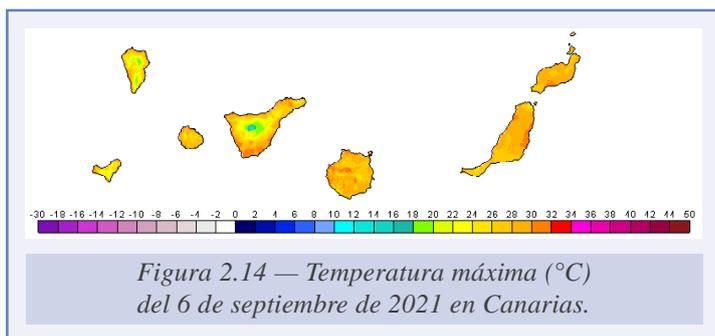
Las olas de calor en Canarias

En Canarias se registraron, en el verano de 2021, tres olas de calor con un total de 11 días, lo que convierte al verano de 2021 en el cuarto verano con más días con ola de calor, por detrás del de los años 1976, con 26 días, 2004 y 2012 con 21 e igualado con el verano de 2003. Se da la circunstancia de que los últimos cinco años no se había registrado ninguna ola de calor en Canarias. Por orden cronológico, la primera ola de calor del verano en Canarias tuvo una duración de 5 días y transcurrió entre el 15 y el 19 de agosto, afectando a las dos provincias canarias. Esta duración ha sido superada por 11 olas de calor e igualada por otras cuatro. Para evaluar su intensidad es necesario analizar su anomalía de la ola que fue de 5.8 °C, lo que la coloca en novena posición de la serie y su temperatura máxima de la ola, 35.1 °C, que ocupa la posición catorce de la serie. Se trata pues de una ola de calor destacable, que ha sido la más importante del verano en Canarias. La figura 2.12 muestra el mapa de las temperaturas máximas del 17 de agosto, que fue el día más cálido de esta ola de calor, superándose los 40 °C en la mayor parte del archipiélago.

También las mínimas, representadas en el mapa de la fig. 2.13, fueron muy elevadas, por encima incluso de los 30 °C en muchas estaciones.

Entre las temperaturas máximas de las estaciones de la red principal de AEMET en Canarias, destacan los 44.3 °C del día 16 en el aeropuerto de Tenerife Sur, los 42.4 °C del aeropuerto de Lanzarote el día 17, los 42.2 °C del aeropuerto de La Gomera el día 15, que además es la efeméride de la serie para un mes de agosto, y los 40.0 °C del aeropuerto de Tenerife Norte el día 15. Entre las mínimas cabe citar los 30.6 °C del día 17 en el aeropuerto de Tenerife Sur, los 28.1 °C del día 17 en el aeropuerto de La Gomera, los 27.4 °C del día 16 en el aeropuerto de Tenerife Norte y los 26.9 °C del día 17 en el aeropuerto de Gran Canaria y del día 16 en el aeropuerto de Lanzarote.

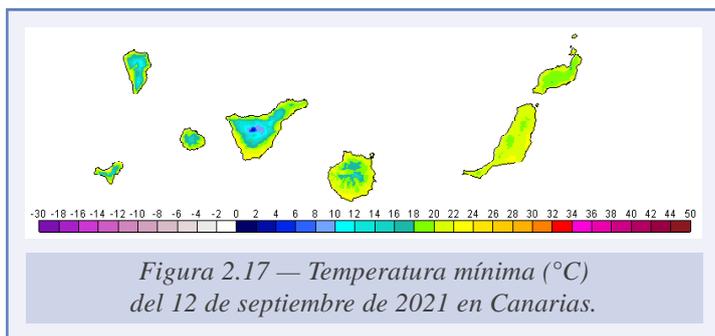
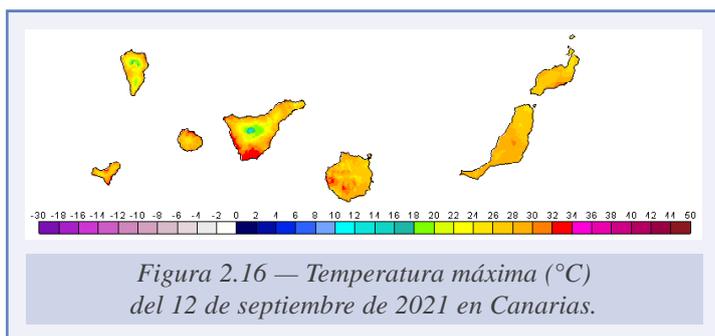




La segunda ola de calor tuvo una duración de tres días y se registró entre el 5 y el 7 de septiembre, afectando tan solo a la provincia de Santa Cruz de Tenerife. Ni la duración ni la extensión de esta ola de calor son especialmente reseñables, como tampoco lo fue su intensidad, ya que tanto su anomalía de la ola, 1.3 °C, como su temperatura máxima de la ola, 28.9 °C, están entre las más bajas de la serie. Se trata pues, de una ola de calor poco destacable. La figura 2.14 representa el mapa de las temperaturas máximas del 6 de septiembre, que fue el día más cálido de esta ola de calor aunque los termómetros no llegaron a rebasar los 35 °C en ninguna estación.

Las temperaturas mínimas, que se representan en el mapa de la figura 2.15, tampoco fueron muy elevadas, quedando por debajo de los 25 °C en todas las estaciones.

Entre las estaciones de la red principal de AEMET en Canarias, las temperaturas máximas más elevadas corresponden al aeropuerto de Lanzarote con 33.0 °C el día 7, al aeropuerto de Fuerteventura con 31.4 °C el día 6 y al aeropuerto de Tenerife Sur con 30.1 °C también el día 6, no superándose los 30 °C en el resto de estaciones de la red principal. Las temperaturas mínimas más altas se dieron en el aeropuerto de El Hierro, con 24.2 °C, en el aeropuerto de Gran Canaria con 23.7 °C, en el aeropuerto de Fuerteventura con 23.5 °C y en el observatorio de Santa Cruz de Tenerife con 23.4 °C, todas ellas registradas el 7 de septiembre.



La tercera ola de calor tuvo lugar entre el 11 y el 13 de septiembre, igualando a la anterior tanto en duración como en extensión, ya que también afectó únicamente a la provincia de Santa Cruz de Tenerife. Su intensidad fue algo mayor, con una anomalía de la ola de 2.0 °C y una temperatura máxima de la ola de 29.6 °C, aunque son valores que siguen estando entre los más bajos de la serie, por lo que estamos también ante una ola de calor poco importante.

En la figura 2.16 se representa el mapa de las temperaturas máximas del 12 de septiembre, que fue el más cálido de la serie. Tampoco en esta ocasión se superaron los 35 °C en ninguna de las estaciones empleadas en la elaboración del mapa.

Las temperaturas mínimas, reproducidas en el mapa de la figura 2.17, quedaron también por debajo de los 25 °C en todas las estaciones.

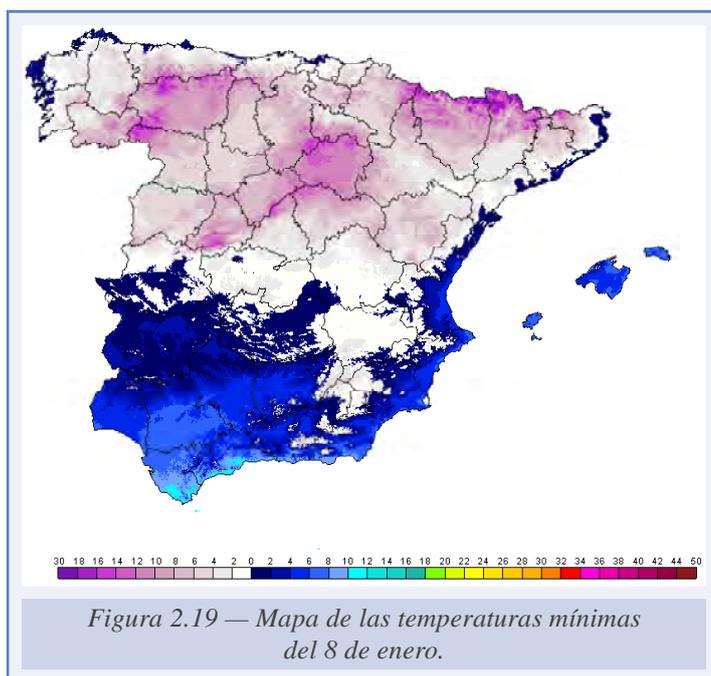
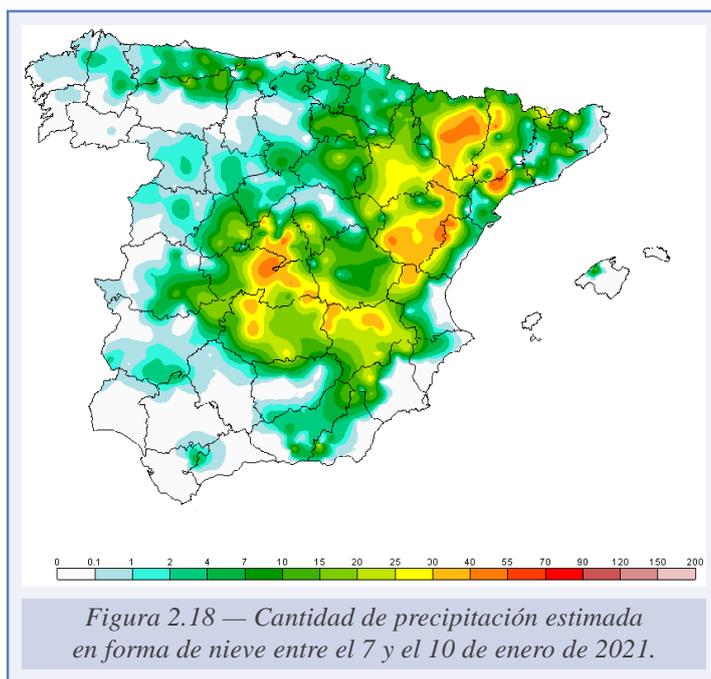
Las temperaturas máximas más elevadas registradas estos días en la red de estaciones principales de AEMET en Canarias, correspondieron al aeropuerto de Tenerife Norte con 34.9 °C el día 11, al aeropuerto de Tenerife Sur con 33.3 °C el día 12, al aeropuerto de Lanzarote con 32.0 °C el día 12 y al aeropuerto de La Gomera con 31.5 °C el día 12. Las temperaturas mínimas más altas las encontramos en el aeropuerto de La Palma y en el aeropuerto de El Hierro con 23.6 °C registradas el día 11 en ambos casos, en el observatorio de Santa Cruz de Tenerife con 23.4 °C el día 12 y en el aeropuerto de Fuerteventura con 23.1 °C también el día 12.

Análisis de las olas de frío registradas en España en 2021

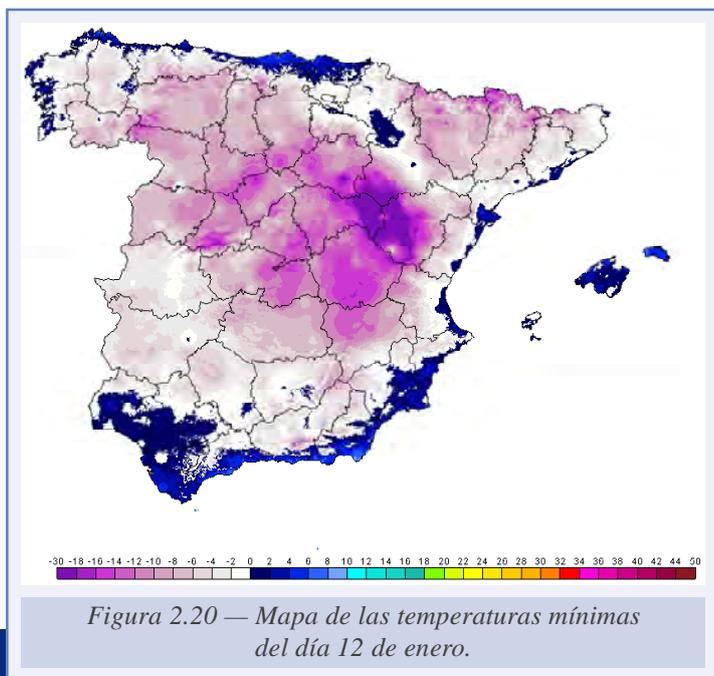
En el invierno 2020-2021 se registraron dos olas de frío. La primera transcurrió entre el 5 y el 8 de enero, coincidiendo con el paso de la borrasca Filomena. Durante estos días, la nieve cayó en abundancia, como se puede ver en el mapa de la figura 2.18, que representa la cantidad de precipitación estimada en forma de nieve entre el 7 y el 10 de enero de 2021. Filomena dejó espesores de nieve históricos en muchas zonas.

Esta ola de frío tuvo una duración de 4 días, con una anomalía de la ola de -2.3 °C, una temperatura mínima de la ola de -4.0 °C el día 8, que resultó ser el más frío de la misma y un máximo de 16 provincias afectadas los días 6 y 7, localizadas principalmente en la mitad norte peninsular. Si se comparan estos valores con los del resto de olas de frío de la serie, se observa que no está entre las más destacables en ninguno de los aspectos a tener en cuenta: duración, extensión e intensidad.

En la figura 2.19 se muestra el mapa de las temperaturas mínimas del 8 de enero, que como ya se ha dicho, fue el más frío de este episodio. Durante el mismo, ninguna de las estaciones de la red principal de AEMET registró su efeméride de temperatura mínima absoluta para un mes de enero, registrándose las temperaturas más frías en Molina de Aragón con -12.0 °C el día 6 y -10.7 °C el día 5, Soria con -11.1 °C el día 8, La Molina con -10.8 °C el día 5 y -10.2 °C el día 6, Puerto de Navacerrada con -9.8 °C el día 5, Albacete Los Llanos con -9.1 °C el día 6 y Salamanca Matacán con -9.0 °C el día 6.



Tras el paso de Filomena, los cielos despejados y el viento en calma, junto con la nieve acumulada en el suelo, propiciaron la segunda ola de frío, entre el 11 y el 18 de enero, con una anomalía de la ola de -4.1 °C, una temperatura mínima de la ola de -7.6 °C el día 12, que resultó ser el más frío de esta segunda ola de frío y un total de 30 provincias afectadas el día 13.



Al comparar esta segunda ola de frío con las del resto de la serie, por duración se sitúa en 5.º lugar, por anomalía de la ola en 6.º, por temperatura mínima de la ola en 4.º y por número de provincias afectadas en 8.º. En la figura 2.20 se representa el mapa de las temperaturas mínimas del día 12 de enero, con la práctica totalidad de la Península por debajo de los 0 °C, alcanzándose los valores más bajos en el denominado triángulo de hielo delimitado por las localidades de Teruel, Calamocha y Molina de Aragón con temperaturas mínimas en torno a -25.0 °C.

Durante esta segunda ola de frío fueron varias las estaciones de la red principal de AEMET que registraron su temperatura mínima más baja para un mes de enero, concretamente Calamocha con -21.3 °C, aunque hay que aclarar que el observatorio de Cala-

mocha registró una temperatura mínima de -24.5 °C el 4 de enero de 1971 en un emplazamiento anterior, Teruel con -21.0 °C, Madrid Torrejón con -13.7 °C, Toledo con -13.4 °C, Madrid Cuatro Vientos con -13.0 °C, Madrid Getafe con -12.0 °C y Guadalajara con -10.6 °C, aunque al igual que Calamocha también Guadalajara registró una mínima inferior en su anterior emplazamiento, concretamente -12.5 °C el 28 de enero de 2005. Todas las efemérides referidas se registraron el 12 de enero. Otras temperaturas mínimas registradas el día 12 corresponden a Torremocha de Jiloca (Teruel) con -26.5 °C, Bello (Teruel) con -25.4 °C, Molina de Aragón (Guadalajara) con -25.2 °C, Cedrillas (Teruel) con -24.0 °C, Santa Eulalia del Campo (Teruel) con -23.1 °C y Radona (Soria) con -22.0 °C.

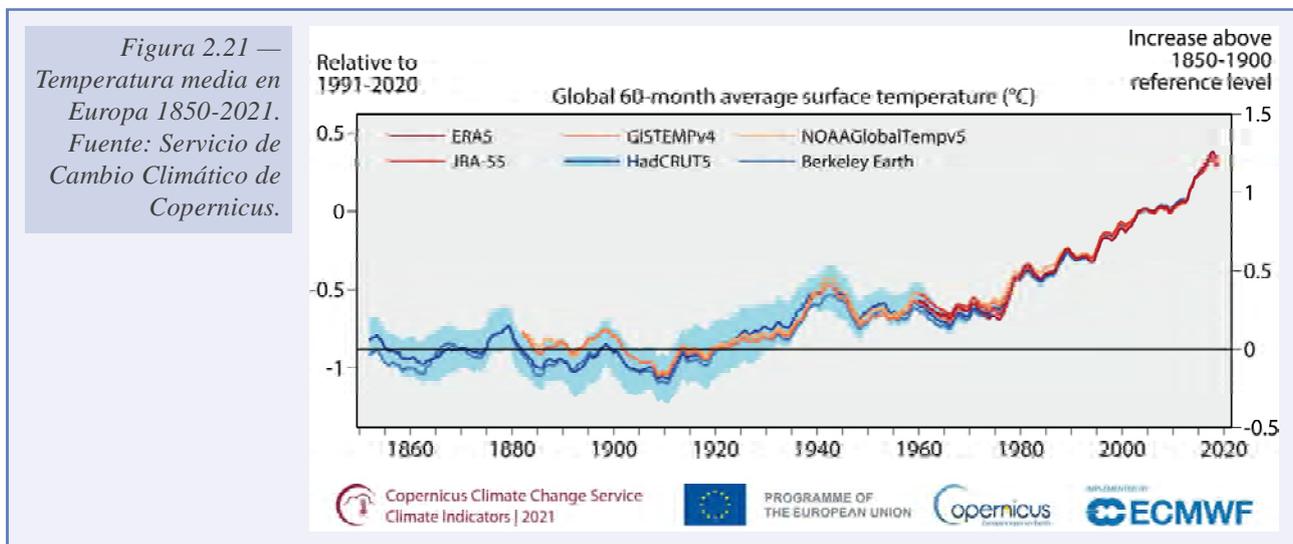
2.1.5. Evolución de las temperaturas en España desde los niveles preindustriales

Según el IPCC, el rango probable del aumento de la temperatura superficial global causado por el hombre desde la época preindustrial (promedio de 51 años 1850-1900) hasta el periodo 2010-2019, oscila entre 0.8 °C a 1.3 °C, con una mejor estimación de 1.07 °C (IPCC, 2021).

En su informe del Estado del Clima en Europa 2021, el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S) estima que el ascenso de temperatura global desde la segunda mitad del

siglo XIX está próximo a $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, aunque esta tasa de calentamiento no ha sido constante a lo largo del tiempo (COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE, 2022).

En el continente europeo la temperatura media anual de los últimos cinco años es aproximadamente $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ más alta que los valores de referencia de la segunda mitad del siglo XIX (figura 2.21). Este aumento de la temperatura para Europa es casi $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior al aumento global correspondiente. Europa se ha calentado más rápido que cualquier otro continente en las últimas décadas. La justificación de este mayor ascenso en el continente europeo respecto al conjunto del planeta se debe precisamente a la continentalidad y a su ubicación geográfica. Una de las consecuencias del cambio climático inducido por el hombre es que el calentamiento está siendo más acusado sobre tierra que sobre los océanos y, a su vez, más acusado en las latitudes árticas y cercanas al Ártico que más al sur, lo que justifica esta mayor anomalía de temperatura en el conjunto del continente europeo.



En la figura 2.22 se ha representado la temperatura media estimada sobre la superficie de España a través de medias móviles de 60 meses de datos, con el objetivo de reducir la variabilidad natural de onda corta. Los datos de temperatura de AEMET se basan en las estimaciones realizadas para todo el territorio nacional con los datos de observación del periodo 1961-2020 a los que se han añadido los datos ampliados calculados desde 1916 (CHAZARRA *et al.*, 2020). En la figura también se representan las estimaciones extraídas para la superficie de España de las últimas versiones de cuatro conjuntos de datos: ERA5, producido por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S) de la Unión Europea; GISTEMP, producido por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA); HadCRUT4, producido por el Centro Hadley del Met Office en colaboración con la Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia; y NOAA GlobalTemp, elaborado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA). Para el caso de las anomalías de temperatura en España estimadas con los datos HadCRUT4 del Centro Hadley, se han empleado también los datos de los cien miembros del conjunto (sombreado azul), representando con una línea continua azul la mediana de los datos, de esta forma queda representada también la incertidumbre de esta reconstrucción climática.

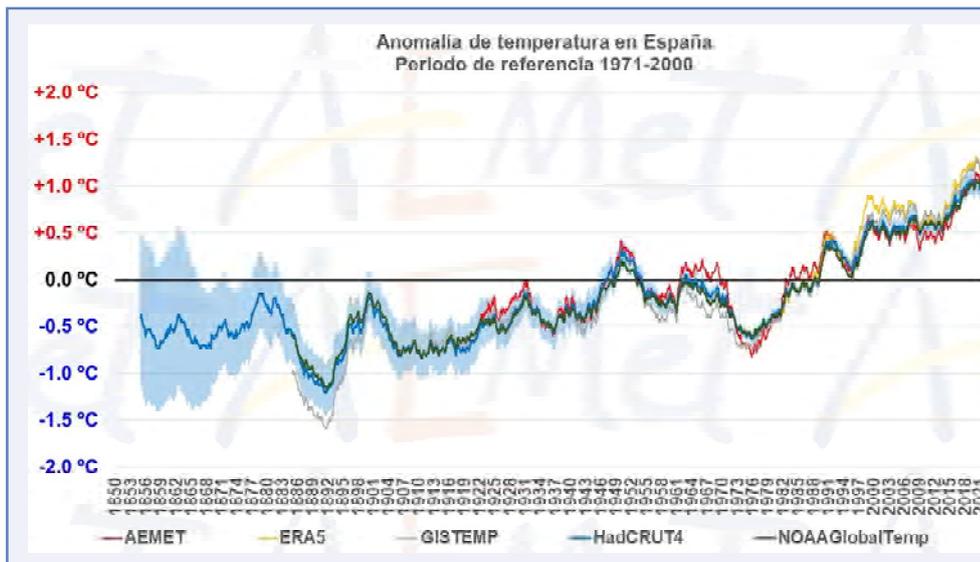


Figura 2.22 — Anomalía de temperatura media en España 1850-2020. Fuente de datos para la elaboración del gráfico: AEMET, Servicio de Cambio Climático de Copernicus (ERA5), NOAA (NOAAGlobalTemp), NASA (GISTEMP) y Met Office (HadCRUT4).

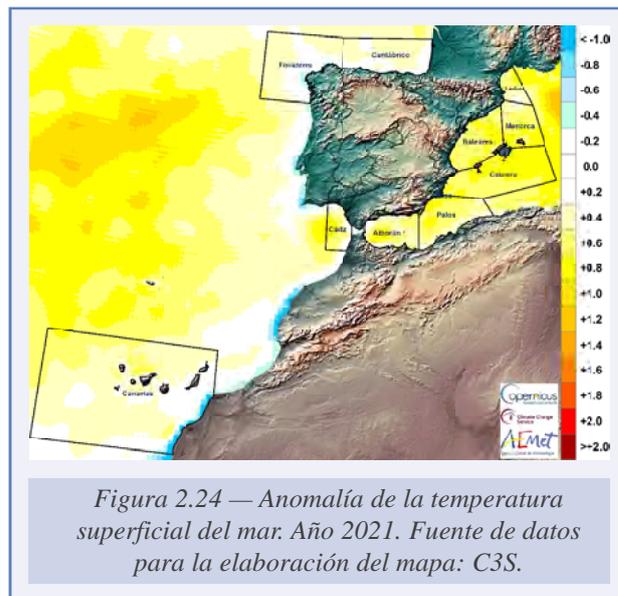
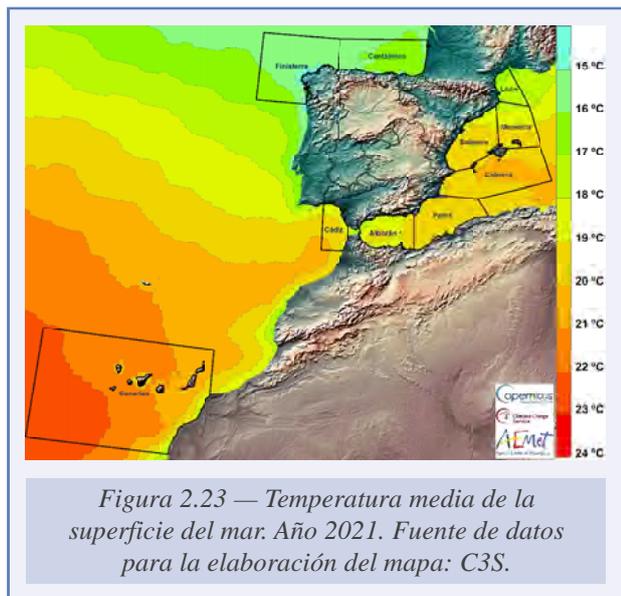
En España, la temperatura media del quinquenio 2017-2021 es aproximadamente 1.7 °C más alta que los valores de referencia de la segunda mitad del siglo XIX. Los últimos análisis indican que el calentamiento se ha acelerado en las décadas más recientes, con un incremento de la temperatura media desde 1961 a razón de 0.22 °C/decenio. Además, es muy significativo, por el impacto que esta situación tiene sobre las olas de calor, dado que la tendencia de la temperatura es mayor en verano (+0.26 °C/decenio) que en invierno (+0.19 °C/decenio).

Los cinco conjuntos de datos utilizados muestran que el promedio de temperatura media en España del promedio de cinco años más reciente (2017-2021) es algo más bajo que el alcanzado durante los 60 meses previos del año 2020, aunque esta variabilidad multidecadal no es inusual. Por ejemplo, tomando como referencia el periodo 1971-2000 para el conjunto de todos los datos, se comprueba la existencia de un mínimo relativo que se produjo a mitad de la década de los setenta del siglo XX. Posteriormente, todos los conjuntos de datos coinciden en que, posterior a ese mínimo relativo, sigue un ascenso continuo de temperatura a partir de los años ochenta y un periodo estable durante los últimos años del siglo XX y hasta aproximadamente 2013, para producirse desde entonces un ascenso continuo de la temperatura media en España hasta 2021, último año analizado.

2.1.6. Evolución de la temperatura superficial del agua del mar

Para este informe se ha analizado la evolución de la temperatura superficial del agua del mar a partir de los datos mensuales y diarios (a las 12 UTC) de los reanálisis ERA5 de C3S (HERSBACH *et al.*, 2020). Se ha calculado la anomalía anual con respecto al promedio del periodo 1981-2010 y la anomalía en las zonas costeras (desde el litoral hasta 20 millas mar adentro) de cada una de las islas y provincias con mar, así como de las zonas marítimas circundantes al territorio español, cuyos límites son los indicados en la figura 2.23, en la que se representa la temperatura media de la superficie del mar del año 2021.

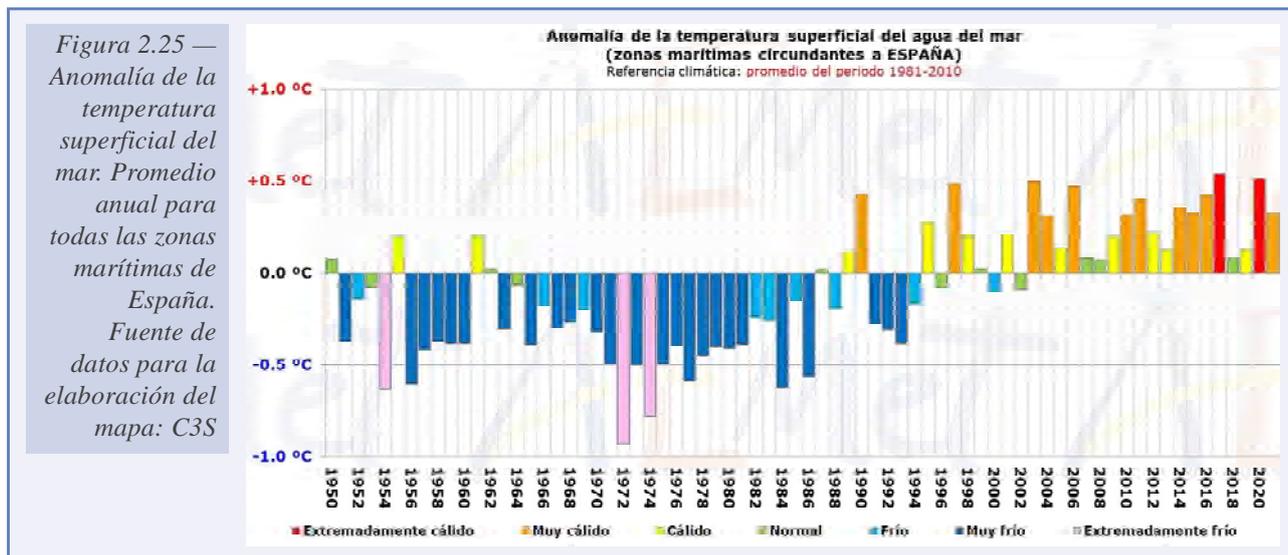
En el año 2021, los valores más altos de temperatura superficial del mar en las zonas marítimas y costeras se registraron entre el 13 y el 16 de agosto, con más de 28 °C al sur de la zona de Cabrera. Los mínimos anuales, con valores inferiores a 11 °C, se registraron en la zona oriental cantábrica entre el 8 de enero y mitad de febrero.



En la figura 2.24 se observa que prácticamente todas las zonas marítimas y costeras tuvieron durante 2021 una anomalía positiva de la temperatura superficial del agua del mar, salvo zonas litorales de la fachada atlántica gallega, donde estuvieron ligeramente por debajo del valor medio del periodo 1981-2010. En gran parte de las aguas marítimas mediterráneas y del norte de Canarias, la anomalía de la temperatura superficial del mar fue superior a +0.5 °C y en zonas de Cabrera, Menorca, Alborán y Cádiz, la anomalía fue superior a +0.7 °C.

De acuerdo con los reanálisis de temperatura superficial del mar ERA5, la temperatura media anual de la superficie del agua del mar en las zonas marítimas circundantes a España en 2021 tuvo carácter muy cálido, con una anomalía media en el promedio de todas las zonas de +0.3 °C respecto al periodo de referencia climática 1981-2010 (figura 2.25).

En la tabla 2.2 se indica la temperatura media anual de la superficie del agua del mar en 2021 en las zonas marítimas y costeras (desde el litoral hasta 20 millas mar adentro) de cada una de las islas y provincias con mar, así como el promedio normal, la anomalía y la jerarquía que ocupan en la serie ordenada, de más a menos cálido dentro de la serie de 72 años de datos.



Provincia / isla	Promedio anual 2021	Promedio normal (1981-2010)	Anomalía	Jerarquía
Zonas costeras				
A Coruña	15.1	15.3	-0.2	46
Alacant/Alicante	19.7	19.2	+0.5	8
Almería	19.3	18.7	+0.6	7
Asturias	15.7	15.7	0.0	32
Barcelona	18.6	18.0	+0.6	10
Bizkaia	16.1	16.0	+0.1	24
Cádiz	18.5	18.4	+0.1	13
Cantabria	16.2	16.1	+0.1	26
Castelló/Castellón	19.4	18.9	+0.5	9
Ceuta	18.3	18.0	+0.3	14
El Hierro	21.6	21.4	+0.2	13
Fuerteventura	20.4	20.4	0.0	23
Gipuzkoa	16.3	16.2	+0.1	24
Girona	17.5	17.2	+0.3	11
Gran Canaria	20.6	20.5	+0.1	23
Granada	18.2	17.9	+0.3	10
Huelva	18.7	18.4	+0.3	14
Ibiza y Formentera	19.9	19.3	+0.6	7
La Gomera	21.3	21.1	+0.2	17
La Palma	21.2	20.9	+0.3	11
Lanzarote	20.4	20.3	+0.1	19
Lugo	15.6	15.6	0.0	22
Málaga	18.3	18.0	+0.3	15
Mallorca	19.8	19.2	+0.6	7
Melilla	19.0	18.6	+0.4	12
Menorca	19.6	19.0	+0.6	9
Murcia	19.7	19.0	+0.7	6
Pontevedra	15.2	15.2	0.0	36
Tarragona	19.0	18.5	+0.5	7
Tenerife	20.7	20.5	+0.2	15
València/Valencia	19.5	19.0	+0.5	10
Zona	Promedio anual 2021	Promedio normal (1981-2010)	Anomalía	Jerarquía
Zonas marítimas				
Alborán	18.8	18.4	+0.4	10
Baleares	19.3	18.8	+0.5	9
Cabrera	20.0	19.3	+0.7	6
Cádiz	19.4	19.0	+0.4	11
Canarias	21.5	21.2	+0.3	12
Cantábrico	16.0	15.8	+0.2	22
Finisterre	15.7	15.5	+0.2	16
León	17.2	16.8	+0.4	14
Menorca	18.9	18.4	+0.5	11
Palos	19.5	19.1	+0.4	7

Tabla 2.2. Temperaturas medias de la superficie del mar en 2021 por costa provincial y por zonas marítimas; sus anomalías respecto sus valores medios en el periodo de referencia; y sus jerarquías en los 72 años de la serie. Fuente de datos para la elaboración de la tabla: C3S.

Para la estimación de tendencias en las series de datos climatológicos es frecuente emplear el estimador de Sen (SEN, 1968); y para el análisis de significación, el test de Mann-Kendall (KENDALL y GIBBONS, 1990), que es una prueba no paramétrica que permite identificar tendencias en series temporales de datos. Estos test se han aplicado a las series anuales de temperatura superficial del agua del mar, considerando una significación al 95 % del nivel de confianza, y se ha encontrado una tendencia estadísticamente significativa, con un 95 % de nivel de confianza, de que la temperatura superficial del mar ha aumentado en todas las zonas marítimas y costeras analizadas durante las últimas décadas, por lo que la anomalía positiva de temperatura superficial del mar durante 2021 se encuadra dentro de una tendencia general al alza.

En la tabla 2.3 se detallan los valores estadísticos básicos del promedio anual de la temperatura superficial del mar en cada zona marítima del periodo 1950-2021, indicando el valor máximo anual de la serie y el año en el que se produjo, el mínimo anual y el año, la media, y el incremento de temperatura entre 1950 y 2021 en función de la pendiente calculada.

Zona marítima	Mínimo	Año	Máximo	Año	Media	Incremento 1950-2021
Alborán	17.7 °C	1977	19.2 °C	2015	18.4 °C	+0.7 °C
Baleares	17.7 °C	1972	19.8 °C	2017	18.7 °C	+1.2 °C
Cabrera	18.3 °C	1972	20.3 °C	2017	19.3 °C	+1.1 °C
Cádiz	18.0 °C	1972	19.6 °C	2020	18.9 °C	+1.0 °C
Canarias	20.3 °C	1972	21.9 °C	1997	21.1 °C	+0.7 °C
Cantábrico	14.6 °C	1972	16.5 °C	2006	15.7 °C	+1.0 °C
Finisterre	14.6 °C	1972	16.1 °C	1997	15.4 °C	+0.6 °C
León	15.7 °C	1974	17.8 °C	2018	16.7 °C	+0.8 °C
Menorca	17.5 °C	1972	19.4 °C	2020	18.4 °C	+1.0 °C
Palos	18.4 °C	1977	19.8 °C	2017	19.0 °C	+0.9 °C

Tabla 2.3. Estadística de la serie anual de temperatura media de la superficie del agua del mar en cada zona marítima (1950-2021). Fuente de datos para la elaboración de la tabla: C3S.

En la figura 2.26 se muestra la evolución de la temperatura media anual en la zona de Baleares, la de mayor incremento de temperatura superficial del mar desde 1950, y en la figura 2.27 se muestra la evolución de la temperatura media anual en la zona de Finisterre, la de menor incremento de temperatura superficial del mar. En ambas imágenes se ha incluido la pendiente de Sen. En todas las zonas el mayor calentamiento se ha producido en verano, salvo en Canarias que ha sido en otoño. La estación en la que se ha producido el menor incremento de temperatura ha sido el invierno en las zonas mediterráneas (salvo Alborán), y la primavera en las atlánticas y Alborán.

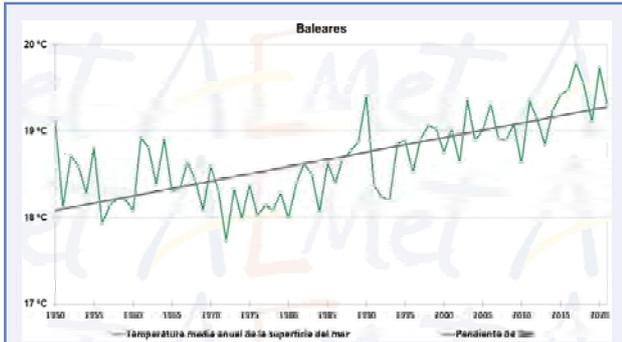


Figura 2.26 — Temperatura media anual de la superficie del mar y pendiente de Sen en la zona de Balears.
Fuente de datos para la elaboración del mapa: C3S.

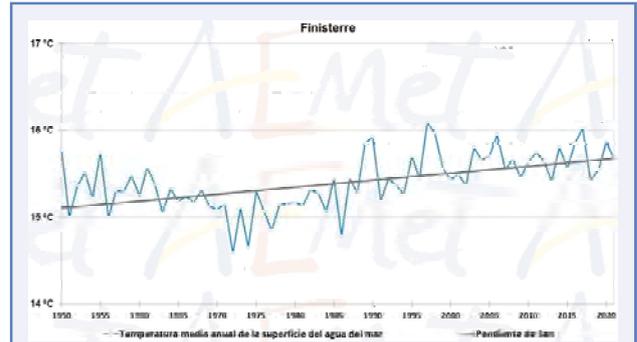
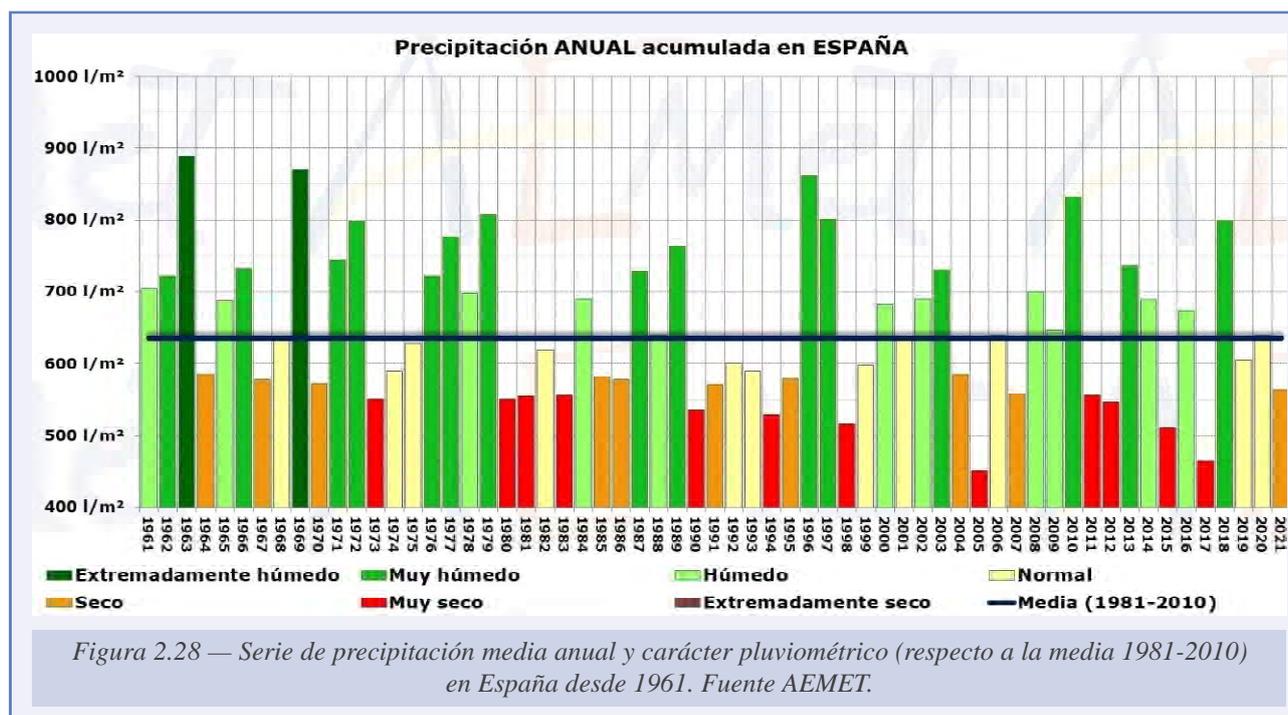


Figura 2.27 — Temperatura media anual de la superficie del mar y pendiente de Sen en la zona de Finisterre.
Fuente de datos para la elaboración del mapa: C3S.

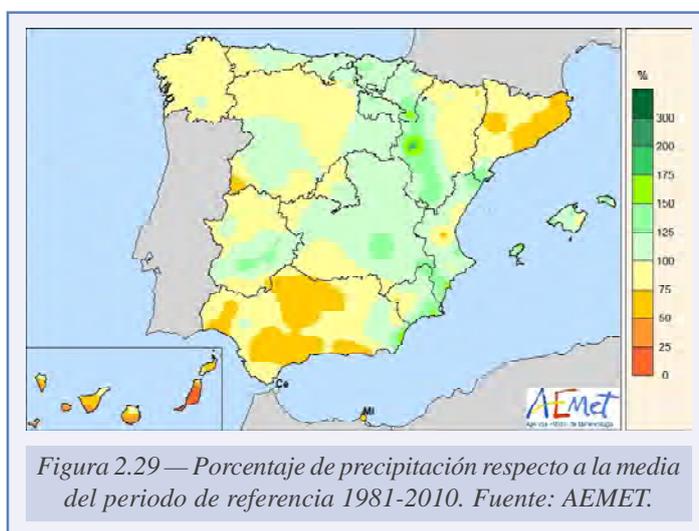
2.2. PRECIPITACIÓN

El año 2021 fue seco en cuanto a precipitaciones (figura 2.28), con un valor de precipitación media sobre España de 564.2 mm (569.2 mm en el promedio de la España peninsular, 182.3 mm en Canarias y 629.7 mm en Baleares). El acumulado total de 2021 en España representa el 89 % del valor normal anual (periodo de referencia 1981-2010). El año 2021 se ha tratado como el decimocuarto año más seco desde el comienzo de la serie en 1961, y el séptimo del siglo XXI.



El año fue entre húmedo y muy húmedo en la cornisa cantábrica, parte occidental de Navarra, La Rioja, cuadrante suroeste de Aragón, centro y este de Castilla y León, este de Castilla-La Mancha y sureste de Madrid, además de Murcia, sur de Cataluña y Baleares. Por el contrario, el año ha sido seco o muy seco en Galicia, norte de Castilla y León, norte de Aragón, Cataluña, donde ha alcanzado regiones con carácter extremadamente seco, áreas de la Comunitat Valenciana, Extremadura, casi toda Andalucía y Canarias.

La precipitación acumulada en el año 2021 fue inferior al valor normal en Galicia, parte de Castilla y León, mitad noreste de Aragón, Cataluña, áreas de la Comunitat Valenciana, Extremadura casi toda Andalucía y Canarias donde la precipitación llegó en algunas islas a ser inferior al 25 % del valor normal. En contraste, la precipitación acumulada llegó a superar el 100 % del valor normal en la cornisa cantábrica, Cantabria, País Vasco, Navarra, La Rioja, mitad suroeste de Aragón, centro y este de Castilla y León, Castilla-La Mancha, mitad sureste de Madrid, además de zonas del interior de Extremadura, Murcia, sur de Cataluña y Baleares (figura 2.29).



2.2.1. Evolución de la precipitación a lo largo de 2021

El año 2021 comenzó con un mes de enero húmedo, con una precipitación sobre la España peninsular que quedó un 19 % por encima del valor medio (periodo de referencia 1981-2010). El mes de febrero tuvo también carácter húmedo, con una precipitación media sobre la España peninsular un 35 % por encima del valor normal del mes.

La primavera fue en conjunto muy seca. La precipitación acumulada media fue de 114,5 mm, un 28 % inferior a la normal, valor que representa el 67 % del valor normal del trimestre. Se trató de la cuarta primavera más seca desde el comienzo de la serie en 1961, y la segunda del siglo XXI. El trimestre comenzó con un mes de marzo muy seco, con una precipitación peninsular equivalente al 37 % del valor normal. Abril tuvo carácter normal, con una precipitación media sobre la España peninsular equivalente al 99 % del valor normal, mientras que mayo fue muy seco con una precipitación media sobre la España peninsular equivalente al 57 % del valor normal del periodo de referencia.

El verano fue húmedo en cuanto a precipitaciones, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 75,7 mm, valor que representa el 102 % del valor normal del trimestre en el periodo de referencia 1981-2010. Se trató del vigésimo sexto verano más húmedo desde el comienzo de la serie en 1961, y del cuarto del siglo XXI. El verano comenzó con un mes de junio muy húmedo, con un valor medio de precipitación sobre la España peninsular de 49,8 mm, que representa el 147 % del valor normal; julio fue muy seco, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 10 mm, valor que representa el 58 % del valor normal; finalmente, agosto fue seco con una precipitación media sobre la España peninsular equivalente al 67 % del valor normal.

Mes	Precipitación acumulada 2021	Promedio normal (1981-2010)	Anomalía	Jerarquía
Enero	74.1	62.0	+19 %	39
Febrero	69.4	51.9	+34 %	40
Marzo	17.5	46.3	-62 %	4
Abril	62.2	63.4	-2 %	30
Mayo	33.7	59.0	-43 %	12
Junio	48.7	33.2	+47 %	48
Julio	10.0	17.1	-41 %	12
Agosto	15.6	22.3	-30 %	17
Septiembre	58.2	43.8	+33 %	48
Octubre	56.5	76.1	-26 %	25
Noviembre	57.5	78.4	-27 %	17
Diciembre	60.8	81.6	-25 %	28
Invierno	222.9	195.6	+14 %	39
Primavera	113.4	168.6	-33 %	4
Verano	74.3	72.7	+2 %	36
Otoño	172.2	198.2	-13 %	24
ANUAL	564.2	635.1	-11 %	14

Tabla 2.4. Precipitación media mensual, estacional y anual durante el año 2021, precipitación media normal, anomalía y jerarquía de sequedad. Fuente: AEMET.

El otoño fue seco, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 172 mm, valor que representa el 83 % del valor normal del trimestre en el periodo de referencia 1981-2010. Se ha tratado del vigésimo cuarto otoño más seco desde el comienzo de la serie en 1961, y el octavo del siglo XXI. El otoño comenzó con un mes de septiembre muy húmedo, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 59 mm, valor que representa el 133 % del valor normal del mes. Por el contrario, los meses de octubre y noviembre fueron secos, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 57 mm y 56 mm, valores que representan el 75 % y el 71 % del valor normal de cada mes, respectivamente.

Finalmente, el mes de diciembre fue normal en cuanto a precipitaciones, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 62 mm, valor que representa el 75 % del valor normal del mes (periodo de referencia: 1981-2010).

En la tabla 2.4 se indican los valores de precipitación acumulada en España de cada mes del año, la estacional y la anual, así como el promedio normal de cada uno de los periodos, la anomalía (% de déficit o superávit), y la jerarquía que ocupan en la serie ordenada de más a menos seco dentro de la serie de los 61 años de datos.

2.2.2. Episodios de precipitaciones intensas

A lo largo de 2021 hubo episodios de lluvias fuertes, siendo más frecuentes en enero y en los meses de primavera y otoño. Los episodios más destacados a lo largo del año fueron los siguientes:

En enero, el episodio de los días 5 a 9 de enero, en el que la borrasca Filomena dio lugar a lluvias fuertes y persistentes en Canarias, Ceuta y sur de Andalucía, y precipitaciones copiosas en forma de nieve en amplias zonas del interior peninsular los días 8 y 9. Por otra parte, entre los días 19 y 26 de enero, se produjo el paso sucesivo de las borrascas Gaetan, Hortense, Ignacio y Justine que dejaron abundantes precipitaciones en gran parte del territorio peninsular, siendo más intensas en la franja norte.

En la primavera, el episodio de los días 15 a 18 de febrero, en el que el paso de la borrasca Karim dejó abundantes precipitaciones en todo el territorio peninsular y en ambos archipiélagos, y el de los días 25 y 26 de abril, en los que la borrasca Lola produjo importantes tormentas en el suroeste peninsular y en el Mediterráneo.

En el verano el episodio más destacado fue el de los días 14 a 18 de julio, en el que la presencia de una depresión aislada en niveles altos (dana) en el oeste peninsular provocó precipitaciones en el centro de la Península, aunque la máxima actividad convectiva se dio en el este peninsular y el Mediterráneo.

En el otoño, el episodio de los días 5 a 9 de noviembre, en el que la borrasca Blas dejó precipitaciones abundantes en Baleares. En diciembre, el paso durante los días 7 a 9 de la borrasca Barra dejó precipitaciones importantes en Navarra y País Vasco.

Entre los valores de precipitación máxima diaria registrados en un observatorio principal en el año 2021 destacan los 134 mm recogidos en Ceuta el día 5 de marzo, los 125 mm de Tortosa el día 22 de noviembre, valor que constituye un nuevo máximo absoluto de precipitación diaria en esta estación desde el comienzo de la serie en 1920, y los 101 mm de Hondarribia el 9 de diciembre y los 95 mm de Daroca registrados el día 1 de septiembre.

2.3. HIDROMETEOROLOGÍA. ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (SPI). AGROCLIMATOLOGÍA Y FENOLOGÍA

Como se ha visto en los dos puntos anteriores, el año 2021 fue en conjunto seco en cuanto a precipitaciones y muy cálido en cuanto a temperaturas. El carácter seco general hizo que ninguna de las grandes cuencas estuviera por encima de su valor normal.

2.3.1. Precipitación por zonas características de AEMET o grandes cuencas

En la tabla 2.5 se muestra la precipitación anual (año natural 2021), el valor medio del periodo de referencia 1981-2010, el porcentaje sobre el valor normal y el carácter para cada una de las zonas características o grandes cuencas y para el total de la España peninsular. Se puede observar que el año resultó extremadamente seco en la cuenca del Pirineo Oriental, muy seco en las cuencas del Guadalquivir y Sur, seco en las cuencas Norte y Noroeste, Duero, Guadiana, Segura y Ebro y normal en las cuencas del Tajo y del Júcar. Las zonas características con mayor escasez de precipitaciones fueron la Sur, con un 62 % de precipitación respecto a su valor medio, y Pirineo Oriental y Guadalquivir, con un 69 % y 74 % respectivamente sobre sus valores medios para el mismo periodo de referencia.

Zonas características (grandes cuencas)	Precipitación anual 2021	Precipitación normal (1981-2010)	% de precipitación	CARÁCTER
NORTE Y NOROESTE	1266	1307	97 %	SECO
DUERO	512	582	88 %	SECO
TAJO	576	594	97 %	NORMAL
GUADIANA	434	519	84 %	SECO
GUADALQUIVIR	428	580	74 %	MUY SECO
SUR	323	519	62 %	MUY SECO
SEGURA	322	363	89 %	SECO
JÚCAR	475	498	95 %	NORMAL
EBRO	556	590	94 %	SECO
PIRINEO ORIENTAL	474	690	69 %	EXT. SECO
MEDIA ESPAÑA PENINSULAR	569	641	89 %	SECO

Tabla 2.5. Precipitación anual (año natural 2021), valor normal del periodo de referencia 1981-2010, porcentaje sobre el valor normal y carácter para cada una de las zonas características o grandes cuencas y para el total de la España peninsular. Fuente: AEMET.

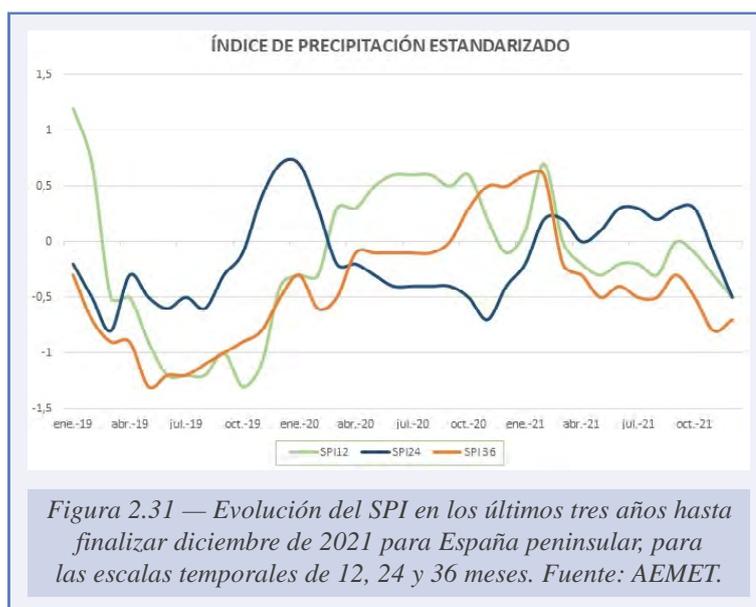
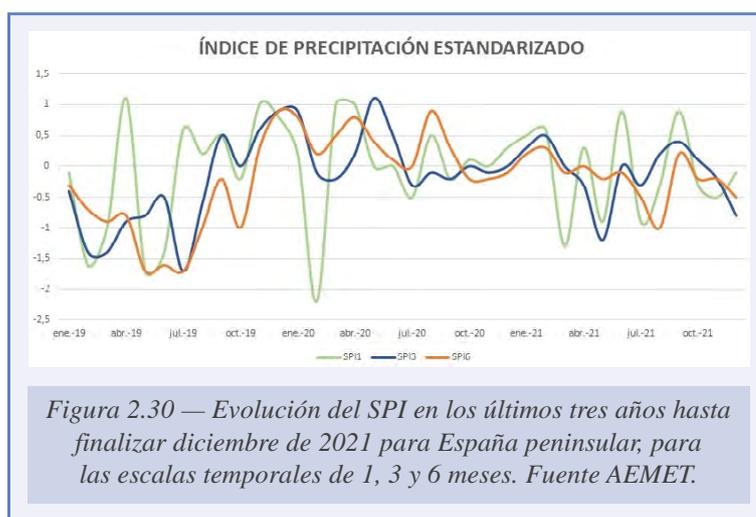
2.3.2. Índice de precipitación estandarizado (SPI) por zonas características de AEMET o grandes cuencas

Las precipitaciones en España se caracterizan por presentar una distribución irregular tanto espacial como temporal, por lo que conviene analizar los periodos en los que a lo largo del

año el déficit de precipitaciones acumuladas pueda haber provocado periodos de sequía meteorológica. Aunque el concepto de sequía es complejo, dado que existen distintas definiciones según el sector al que afecta (agrícola, hidrológica, económica, etc.), en este apartado se hace referencia a la sequía meteorológica, que estudia exclusivamente el comportamiento de la precipitación sin tener en cuenta otros factores. MCKEE *et al.* (1993) definieron el concepto de sequía para una zona determinada y para una escala temporal de acumulación dada (1, 3, 6... meses) como el periodo de tiempo que se inicia cuando el *índice de precipitación estandarizado* (SPI) alcanza el valor de -1 , para dicha zona y escala, y finaliza cuando el SPI pasa a ser positivo. El índice SPI se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo del periodo de acumulación de que se trate, respecto de la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una distribución normal.

En la figura 2.30 se muestra, para la España peninsular, la evolución de los valores del SPI para cada mes en los últimos tres años, a escalas temporales de 1, 3 y 6 meses (SPI1, SPI3 y SPI6, respectivamente). El SPI3 alcanzó el valor de -1 en el mes de mayo de 2021, hecho que se reflejó en la posterior bajada del SPI6, que en agosto pasó a valores de -1 . Esto dio inicio a un leve periodo de sequía meteorológica según esta escala temporal que se recuperó en los meses siguientes, aunque la tendencia descendente en los últimos meses del año de los índices indicaba que pronto se podría volver a otro periodo de sequía meteorológica. El SPI6 está relacionado con la actividad agrícola, por lo que durante el año 2021 la disponibilidad de agua para los cultivos fue suficiente para la España peninsular en promedio.

En la figura 2.31 se muestra la evolución, en la España peninsular, de los valores del SPI para cada mes a lo largo de los últimos tres años, a escalas temporales de 1, 2 y 3 años (SPI12, SPI24, SPI36). A estas escalas interanuales, el índice guarda relación con la disponibilidad de agua en los embalses y en los acuíferos. Durante el año 2021 ninguno de estos índices llegó a alcanzar el valor de -1 , pero debido a la escasez de precipitaciones en los últimos meses del año, octubre y noviembre secos, los índices a escala de 12, 24 y 36 meses iniciaron un periodo de descenso que condujo a periodos de sequía meteorológica a finales del invierno de 2021-2022.

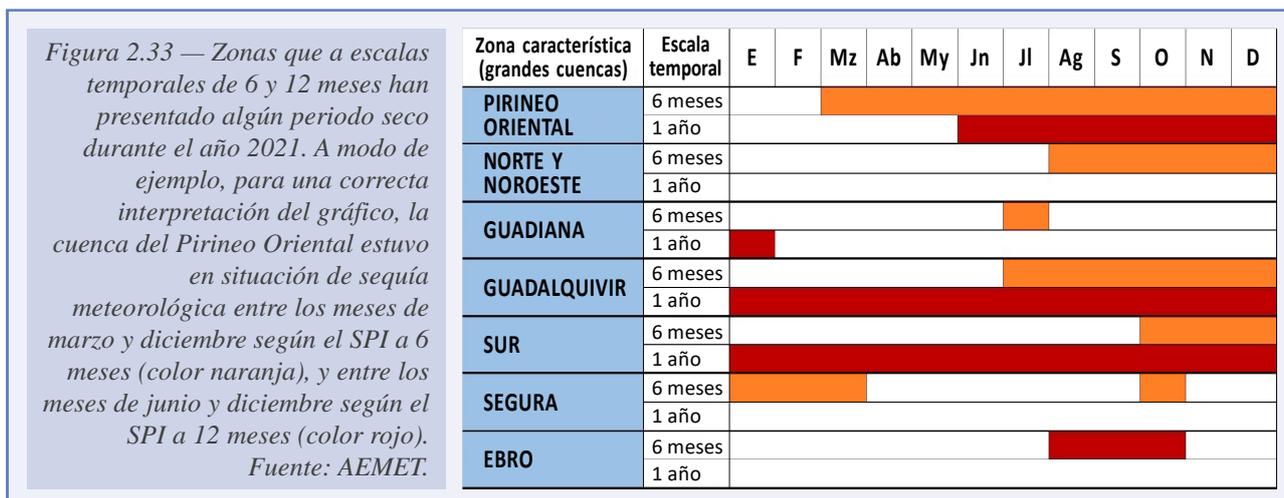




En la figura 2.32 se presenta el valor del SPI12 al finalizar diciembre de 2021 para cada una de las zonas características o grandes cuencas. Todas las grandes cuencas se encontraban en valores negativos salvo las del Tajo, Júcar y Segura, con valores ligeramente positivos de SPI12.

En la figura 2.33 se representan las zonas que han padecido algún periodo seco durante el año 2021, a escalas temporales de 6 y 12 meses. Cabe destacar las grandes cuencas del Guadalquivir y del Sur, que según sus valores de SPI12 han estado todo el año en sequía meteorológica. La zona del Pirineo Oriental empezó el año con valores positivos SPI12 pero a partir de junio alcanzó valores menores que -1 durante lo quedaba de año, llegando a acercarse a valores de -2 al final de 2021. Las zonas del Duero y del Tajo, a pesar de acabar con un valor

cercano a su valor normal, estuvieron en sequía meteorológica durante los primeros meses del año, tal y como se refleja en los valores del SPI12. Si se tiene en cuenta el déficit de precipitación durante los 6 meses anteriores, esta vez fueron las zonas del Júcar y el Segura las más afectadas, ya que acabaron el año con un SPI6 en valores negativos y por debajo de -1.



2.3.3. Agroclimatología y fenología

Características agroclimáticas y fenológicas del año 2021

El año agrícola se considera desde el 1 de septiembre hasta el 31 de agosto del año siguiente, debido a que muchas de las labores del campo comienzan en relación con los efectos de las

primeras lluvias otoñales. Pero si se estudia el clima de un año natural, desde un punto de vista ecológico y agrario, hay que tener en cuenta por una parte, la fuerte actividad biológica asociada a la primavera tras el descanso invernal y, por otra, la preparación otoñal al invierno. En la estación invernal muchas especies están en letargo, o al menos muestran poca actividad, y en verano no hay cambios en la vegetación por desarrollo sino solamente por crecimiento (incluso con temperaturas muy altas este se puede detener).

En las zonas templadas de las latitudes medias, con marcada estacionalidad, la fenología se manifiesta fundamentalmente en primavera y otoño pero no comienzan, duran y acaban las estaciones del «calendario de la naturaleza» del mismo modo en los distintos lugares, ni tampoco en el mismo lugar en diferentes años. Las manifestaciones fenológicas primaverales más significativas suceden en la España ibérico-balear entre enero y abril mientras que las características otoñales suceden, sobre todo en octubre y noviembre y en sentido más amplio entre septiembre y diciembre, según haya sido la salida del verano con un ambiente y paisaje otoñal tardío o adelantado. Es por ello, por lo que se describirán las características agroclimáticas y fenológicas de los periodos enero-abril (primavera en sentido amplio) y septiembre-diciembre (otoño en sentido amplio) por su significación ambiental en el medio natural y rural.

2.3.3.1. Periodo enero-abril de 2021

Durante el periodo enero-abril el tiempo fue muy variable alternando periodos cálidos y fríos. Las precipitaciones, para el conjunto del territorio español, fueron normales y relativamente bien repartidas en el periodo. En enero, los días 8 y 9, se produjo una nevada histórica en gran parte del centro y este peninsulares (figura 2.34) seguida de una ola de frío, que se prolongó durante los días 11 al 17, y de un episodio muy cálido para las fechas al final de mes. En abril, el frío afectó de forma importante al campo francés e italiano (y en mucha menor medida a zonas del este de la península ibérica y Baleares). Por el contrario en este mes, en el resto del territorio peninsular y en Canarias, las temperaturas fueron algo superiores a las normales.



Figura 2.34 — Izquierda, primeros copos de nieve caídos en la ribera del Manzanares del monte de El Pardo (08-01-2021); derecha, daños debidos a la nevada asociada a Filomena, en un gran pino piñonero en el monte de El Pardo de Madrid (cerca de la Quinta del Duque de Arco). Foto tomada el 02-06-2021.

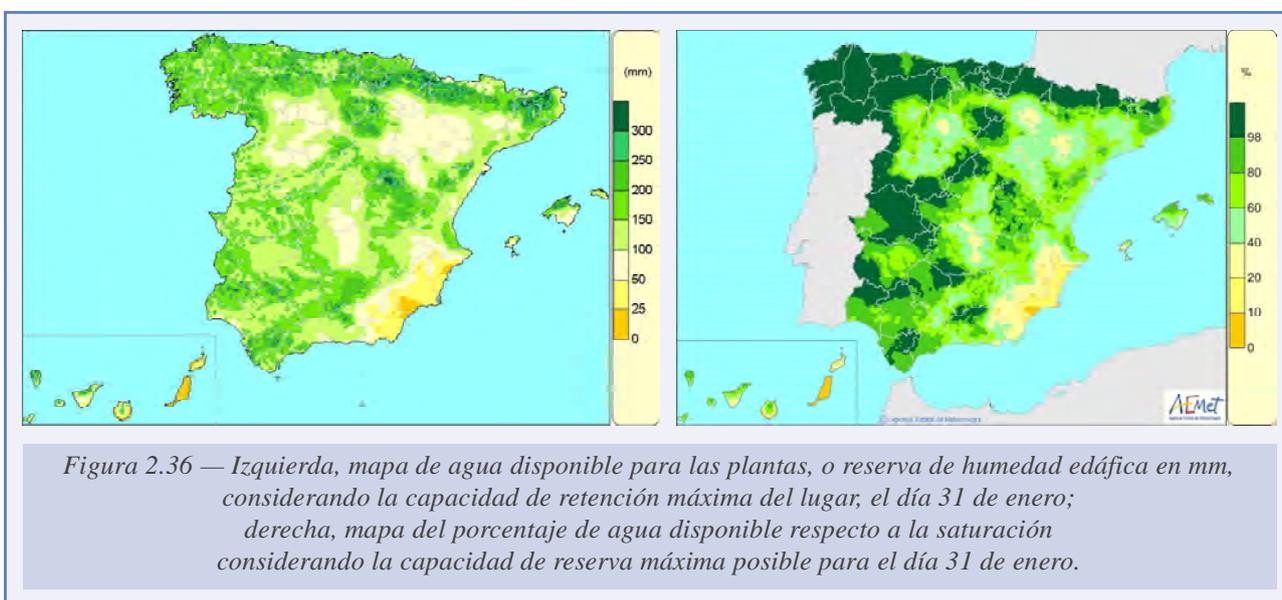
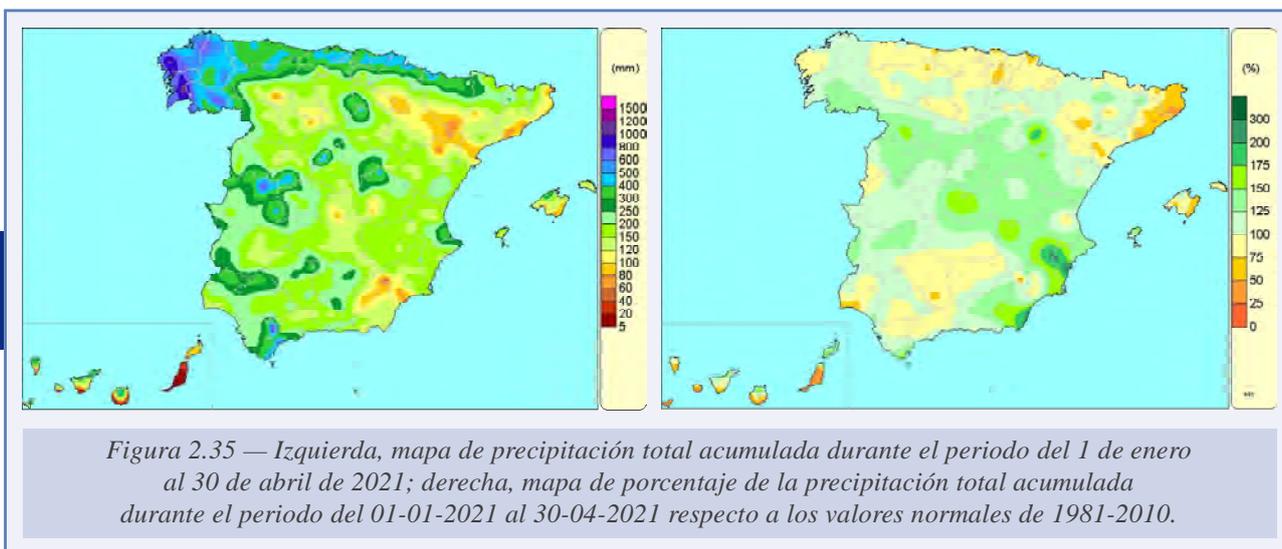
Agroclimatología

Para el periodo enero-abril, las precipitaciones totales acumuladas fueron abundantes en los montes occidentales próximos a la costa de A Coruña y Pontevedra, la comarca de la Vera,

Grazalema-Ronda y la costa gaditana mediterránea (figura 2.35 izquierda). Las precipitaciones para este trimestre estuvieron en general entre el 75-125 % respecto a las normales; es decir fueron relativamente normales, aunque fueron superiores a las normales en zonas del centro de Alicante, comarca del cabo de Gata y zona de Calatayud, e inferiores a las normales en Fuerteventura, el litoral de Barcelona-Girona y algunos puntos aislados del valle del Ebro, Mallorca, Huelva, Córdoba y zonas sur de las islas Canarias (figura 2.35 derecha).

Al finalizar el mes de enero los suelos estaban bastante húmedos en gran parte del territorio (salvo en el sureste peninsular, gran parte del valle del Ebro, de la Mancha y algunas de las llanuras de Castilla y León; además de en Lanzarote y Fuerteventura (figura 2.36 izquierda). Los suelos estaban saturados (o casi) en Galicia, cornisa cantábrica, montaña palentino-leonesa, los Pirineos, montañas de los sistemas Ibérico y Central y montañas y penillanuras del centro-oeste y del sur peninsulares (figura 2.36 derecha).

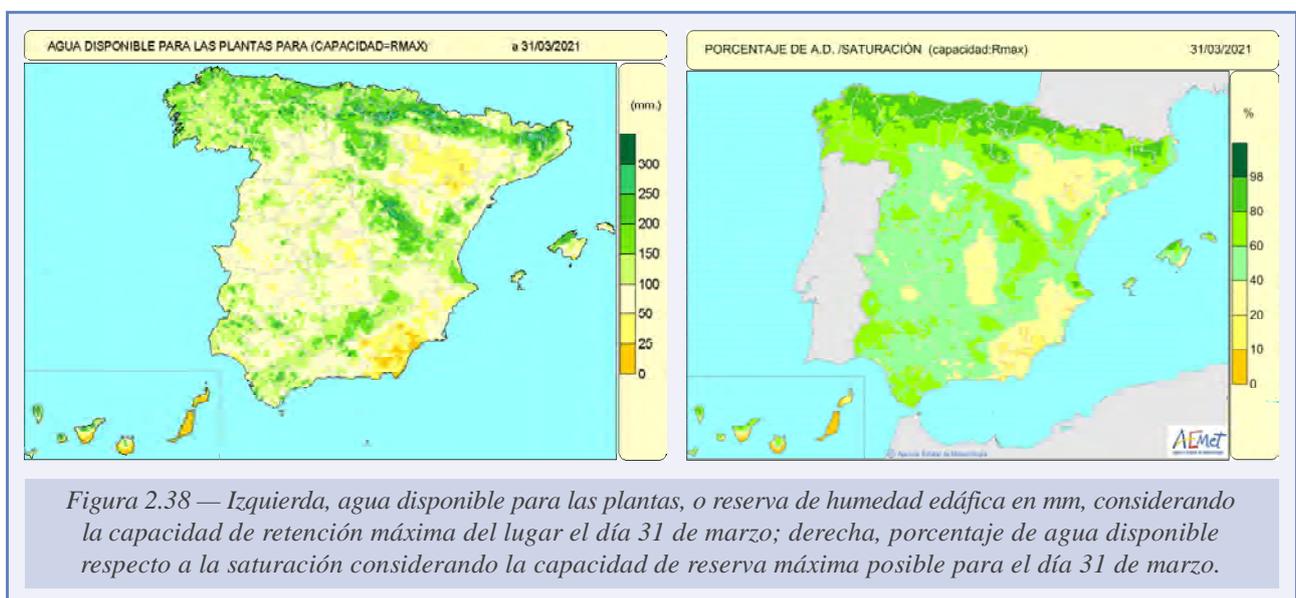
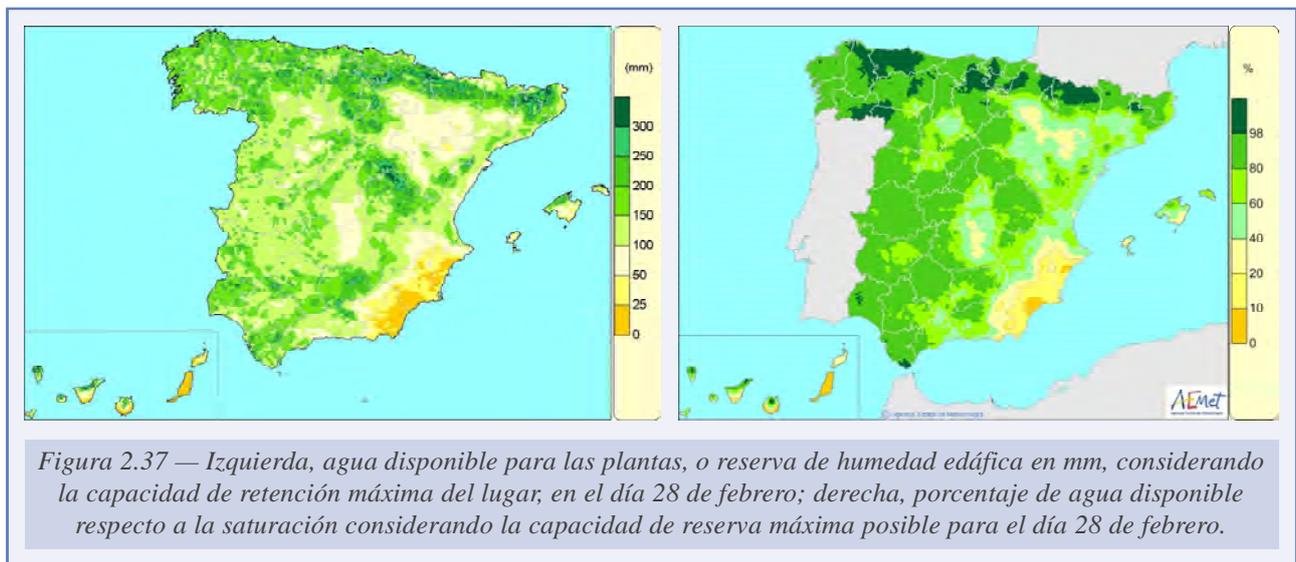
Al finalizar el mes de febrero, los suelos presentaban una humedad en general similar a la del mes anterior, aunque las precipitaciones permitieron que la humedad edáfica aumentase en la



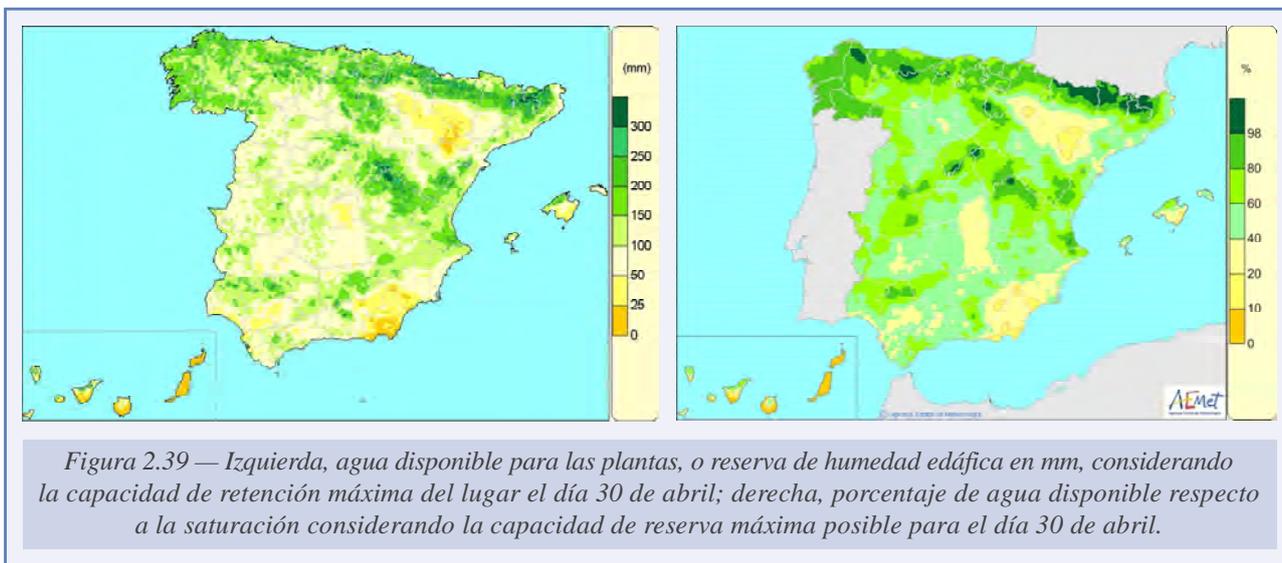
meseta Norte mientras que disminuyó en el sureste peninsular debido a la combinación de pocas lluvias, altas temperaturas y alargamiento de los días (figura 2.37 izquierda). La superficie de territorio con suelos saturados disminuyó respecto al final de enero (figura 2.37 derecha).

Al finalizar el mes de marzo, los suelos estaban más secos que en el mes anterior sobre todo en ambas mesetas, Extremadura y el valle del Ebro aunque, por el contrario, estaban más húmedos en el sureste peninsular debido a las abundantes lluvias en esa región (figura 2.38 izquierda). Durante este mes dejó de haber suelos saturados aunque el porcentaje de suelo húmedo respecto a la saturación estaba por encima del 40 % en la mayor parte del territorio; salvo en el sureste peninsular, las zonas bajas del valle del Ebro, La Mancha, los Torozos-Cerrato, La Moraña, La Serena, Lanzarote-Fuerteventura y el sur del resto de islas canarias (figura 2.38 derecha).

Al finalizar el mes de abril los suelos estaban prácticamente secos en gran parte del valle del Ebro y en el sureste peninsular; sin embargo, estaban húmedos en el norte peninsular, montañas andaluzas, sistema Ibérico, Cataluña y en la Comunitat Valenciana (figura 2.39 izquierda).

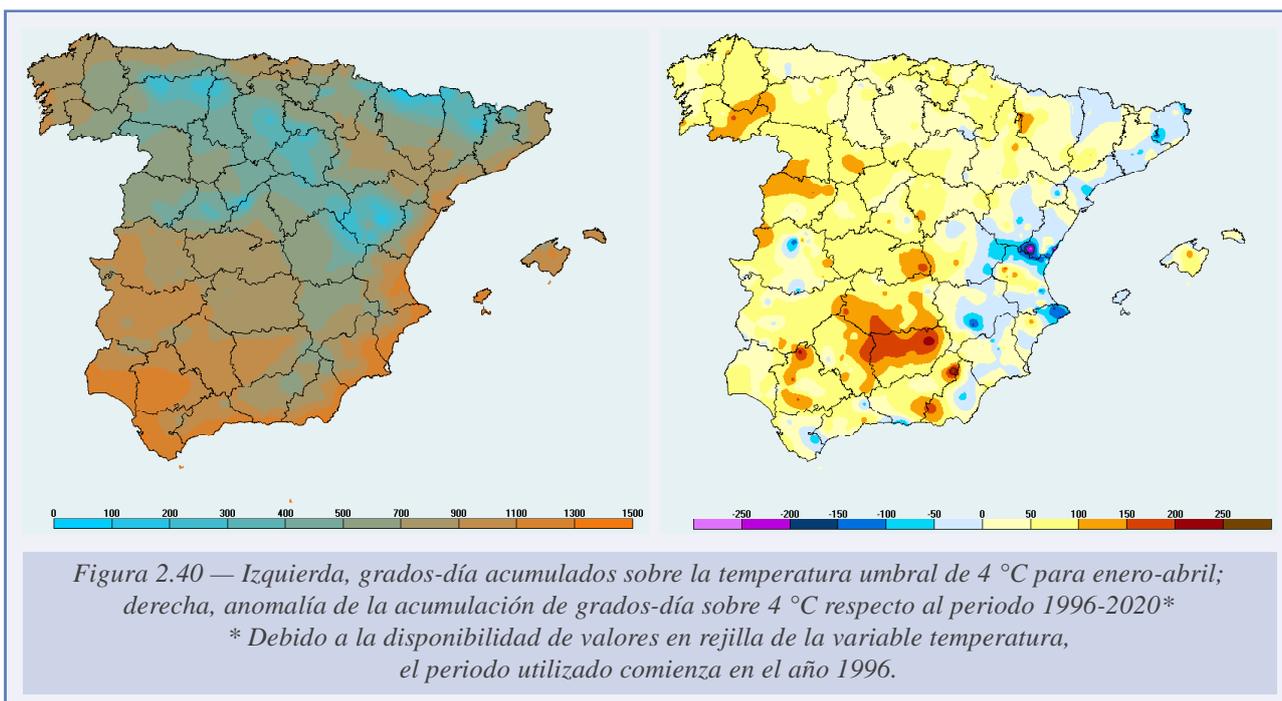


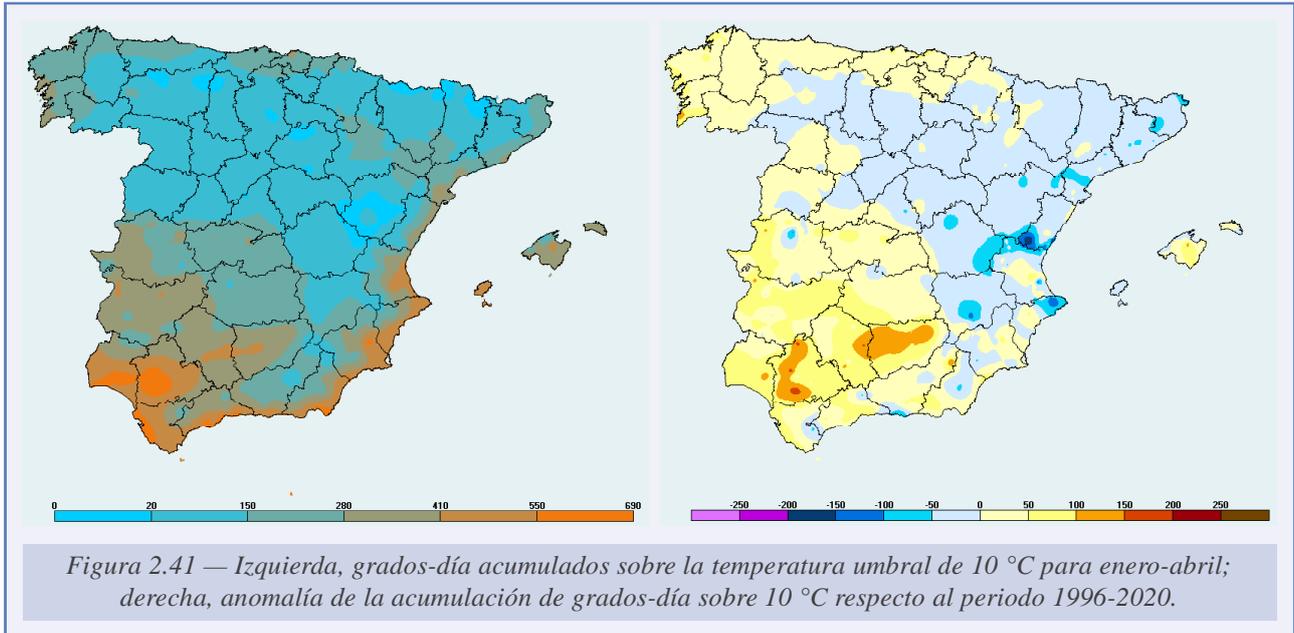
El pequeño-moderado aumento de humedad edáfica, salvo en las comarcas más áridas y de suelos más pobres, reflejaba el efecto de varias «nevadas tardías» que se produjeron en las montañas del centro y mitad norte peninsulares así como las fuertes lluvias y granizo, de los días 21 y 22, en la comarca alicantina del Vinalopó y las montañas de Albacete (figura 2.39 derecha).



48

La acumulación de calor (grados-día) siguió un patrón geográfico normal, abundante en las zonas climáticamente de temperaturas suaves a final del invierno y comienzos de primavera, como el valle del Guadalquivir y las costas de Andalucía y Levante, pero escasas en las zonas climáticamente frías como los Pirineos, la montaña palentino-leonesa, la Tierra Pinariega soriana, las serranías de Cuenca-Alto Tajo y las sierras de Teruel. Las anomalías de acumulaciones de grados-día sobre el umbral de 4 °C fueron en general, positivas en la zona centro y





oeste peninsular, especialmente en Valladolid, Ourense, Ciudad Real, Córdoba-Jaén, Sevilla y Granada (figura 2.40 izquierda). Por el contrario, las anomalías fueron negativas en las provincias de la vertiente mediterránea de Almería, Murcia, Comunitat Valenciana, Cataluña, Cuenca y Teruel (figura 2.40 derecha). Respecto al umbral de 10 °C las anomalías negativas se manifestaron en un área mucho mayor que se extiende por gran parte de la meseta Norte y por el tercio este peninsular (figura 2.41 derecha).

Fenología

En general, el año se puede considerar en cuanto a la primavera fenológica, como «tempranero» debido al efecto del mes de febrero (cálido-muy cálido) y de marzo (normal-cálido). A primeros de febrero comenzó la floración (10 % de flores abiertas) de las variedades tempranas de almendro (*Prunus dulcis*) en zonas del litoral mediterráneo desde Granada a Barcelona así como en Baleares (en general algo retrasada por el frío enero); también por esas fechas en Castilla-La Mancha y Madrid se producía el inicio de la floración en ejemplares de variedad temprana. Los piruétanos (peral silvestre: *Pyrus bourgaeana*) se encontraban en fase de yema hinchada (por ejemplo en la sierra Oeste de Madrid) y los olmos siberianos (*Ulmus pumila*) estaban en plena floración en La Alcarria. La plena floración (50 % de flores abiertas) del almendro de variedades tempranas, en los páramos y vegas del sur y este de Madrid, sucedió a mediados-finales de este mismo mes de febrero (figura 2.42) y en el sur de Navarra y Castilla y León se registró en la última semana. En estos casos, la floración fue favorecida por la humedad edáfica (debida a las nieves de enero) y la acumulación de grados-día (por las altas temperaturas de febrero, que afectaron sobre todo al



Figura 2.42 — Almendro en plena floración en Valdemoro (Madrid), 26-02-2021. Foto de Javier Cano Sánchez.

cuadrante noroccidental peninsular) observándose además de en los almendros en otras variedades o especies tempranas como en el albaricoquero (*Prunus armeniaca*).

La plena floración de los melocotoneros (*Prunus persica*) en Murcia se produjo en la última semana de febrero y en Tarragona a primeros de marzo. En la Comunidad de Madrid al comienzo del mes de marzo, empezó la brotación de yemas florales del álamo blanco (*Populus alba*) y, a mediados de mes, en el entorno periurbano de la capital, el plátano de paseo (*Platanus hispanica*) se encontraba en fase de borra en las yemas al 30 % a la vez que el arce negundo estaba en plena floración. En El Bierzo, durante la primera quincena del mes de marzo florecieron las subespecies silvestres o ejemplares asilvestrados de cerezos (*Prunus avium*), ciruelos (*Prunus domestica*) y perales (*Pyrus communis*) además de algunas variedades agrícolas como la Roma del peral. En Bizkaia, a finales de febrero se iniciaba la brotación foliar de los robles (*Quercus robur*) y a primeros de marzo la floración de cerezos, fresnos (*Fraxinus excelsior*) y avellanos (*Corylus avellana*).

En el piedemonte de la vertiente segoviana de la sierra de Guadarrama, a finales de febrero y primeros de marzo, algunas especies anuales de los herbazales mostraban floración temprana respecto al año anterior. En estas campiñas de la rampa serrana segoviana en la primera decena de marzo se empezaban a abrir las yemas de los álamos blancos (*Populus alba*) y las de los endrinos (*Prunus spinosa*) estaban al «final del hinchado»; a mediados de la tercera decena de marzo florecieron ciruelos, cerezos y endrinos; a finales de abril comenzó la floración de los majuelos (*Crataegus monogyna*).

En el valle del Jerte la plena floración de los cerezos sucedió alrededor de la segunda quincena de marzo y el final de la floración fue hacia el día 7 de abril; en la provincia de Madrid la plena floración se produjo a mediados de la tercera decena de este mismo mes. En Madrid, la plena floración del piruétano (*Pyrus bourgaeana*) se produjo a mediados de mes y a mediados de la segunda decena la floración era total.

Durante la tercera decena de abril en gran parte de ambas Castillas y Aragón los campos de colza estaban en plena floración al igual que los matorrales de jara pringosa (*Cistus ladanifer*); además, comenzaron a salir las primeras amapolas (*Papaver rhoeas*) a finales del mes en el conjunto del centro peninsular. A lo largo del mes de mayo se produjo la floración del olivo



Figura 2.43 — Izquierda, plena floración del majuelo, embalse de Navacerrada (Madrid), 14-05-2021; foto de Carlos Fernández de Cara. Derecha, hojas de *Q. pyrenaica* desplegándose, embalse de Navacerrada (Madrid), 14-05-2021; foto de Carlos Fernández de Cara.



Figura 2.44 — Izquierda, viña en Navas del Rey (sierra Oeste de Madrid, 12-05-2021); derecha, racimo con botones florales iniciando la separación.

en diferentes fechas en función de las localidades y variedades cultivadas. En los piedemontes del sistema Central, a mediados de mes, los majuelos (*Crataegus monogyna*) estaban en plena floración (figura 2.43 izquierda) y el roble melojo (*Quercus pyrenaica*) abriendo las primeras hojas (figura 2.43 derecha). En la sierra Oeste de Madrid, las viñas tenían las hojas totalmente abiertas y casi a su tamaño final y mostraban racimos con botones florales iniciando la separación (figura 2.44).

Fenología de las aves

Las primeras observaciones de golondrina común (*Hirundo rustica*) se realizaron en la tercera decena de diciembre en la provincia de Sevilla y durante enero se generalizaron estas primeras observaciones en el valle del Guadalquivir y Extremadura. A primeros de febrero se observaron en La Mancha y a mediados en el sur de Madrid e incluso en el interior de Pontevedra; a finales en las costas catalanas y en los campos del sur de Huesca. Las llegadas con asentamiento para la reproducción y cría de la especie se registraron en primer lugar a finales de enero en el litoral del golfo de Cádiz y durante febrero en el litoral mediterráneo andaluz, el valle del Guadalquivir y Extremadura. Durante marzo las golondrinas se asentaron en toda la costa mediterránea y el valle medio del Ebro, provincias occidentales castellanoleonesas, Galicia y zonas de la campiña occidental asturiana. Las últimas llegadas se produjeron en la primera decena de abril en el cantábrico oriental (oriente de Cantabria y País Vasco) así como en las zonas climáticamente más frías del interior peninsular (montañas de la Serranía de Cuenca-Alto Tajo-Montes Universales y zona de Urbión-Demanda-Cameros). Las fechas de las llegadas en general fueron relativamente normales tanto respecto a los valores medios como comparando con las llegadas de la primavera anterior (2020).

Los primeros ejemplares detectados de vencejo común (*Apus apus*) se observaron en el litoral de Cádiz e interior de Sevilla a finales de la segunda decena de febrero. En la segunda quincena de marzo, se observaron en toda Andalucía, Castilla-La Mancha y Murcia; a primeros de abril se observaron en Madrid, la Comunitat Valenciana, Cataluña y Aragón; finalmente, a mediados de este mes, en el País Vasco.

Durante la segunda quincena de febrero se produjeron las llegadas de los milanos negros (*Milvus migrans*) en la mitad sur peninsular y el bajo y medio valle del Ebro; el máximo de llegadas se produjo a primeros de marzo y durante este mes se generalizaron por toda la Península. Las águilas culebreras (*Circaetus gallicus*) se observaron por primera vez a finales de febrero y durante la primera semana de marzo se generalizaron bastante las observaciones

por gran parte del territorio peninsular produciéndose a mediados de este mes el máximo de observaciones por paso o llegadas.

En la tercera decena de marzo, se observaron los primeros abejarucos (*Merops apiaster*) en la costa atlántica andaluza y a mediados se generalizaron las primeras observaciones de paso o de llegada por toda la mitad sur peninsular y Aragón; a final de este mismo mes se observaban por todo el territorio ibérico.

Durante la primera decena de febrero, comenzaron a observarse por el centro peninsular (Madrid y Toledo por ejemplo) los pasos migratorios postnupciales hacia Europa de la grulla común (*Grus grus*), incluso se detectó algún movimiento anterior a los temporales de Filomena en la sierra Oeste madrileña. En el sur de Madrid, las últimas bandadas se observaron a primeros de marzo.

2.3.3.2. Periodo septiembre-diciembre de 2021

El otoño, con pocas lluvias, provocó escasez de agua en los ecosistemas naturales y agrarios del sur y noreste peninsulares. Térmicamente, en su conjunto, fue un otoño normal; las temperaturas fueron en general altas en septiembre y octubre, pero muy bajas en noviembre. En la primera decena de diciembre, la borrasca Barra ocasionó importantes nevadas en las montañas, desbordamientos de ríos en el País Vasco y Navarra e inundaciones y campos anegados en La Rioja, Navarra y Aragón.

Agrometeorología

Las precipitaciones fueron inferiores a los valores normales, para el conjunto del periodo y el territorio; por debajo del 50 % (y del 25 % en algunas zonas) en Canarias y las provincias mediterráneas andaluzas, Murcia y Alicante. Por el contrario, fueron superiores en la cornisa cantábrica, el sistema Ibérico, La Mancha, Baleares y, en menor medida, en algunas zonas del valle del Ebro, Badajoz y Zamora-Salamanca (figura 2.45). En términos de porcentaje respecto a los valores normales, la distribución geográfica del carácter de la precipitación es bastante similar si se analiza el periodo septiembre-diciembre que si se considera el periodo septiembre-noviembre, aunque en este segundo caso las zonas húmedas respecto a lo normal son algo más extensas y acusadas y las relativamente secas son algo menos extensas y también más acusadas.

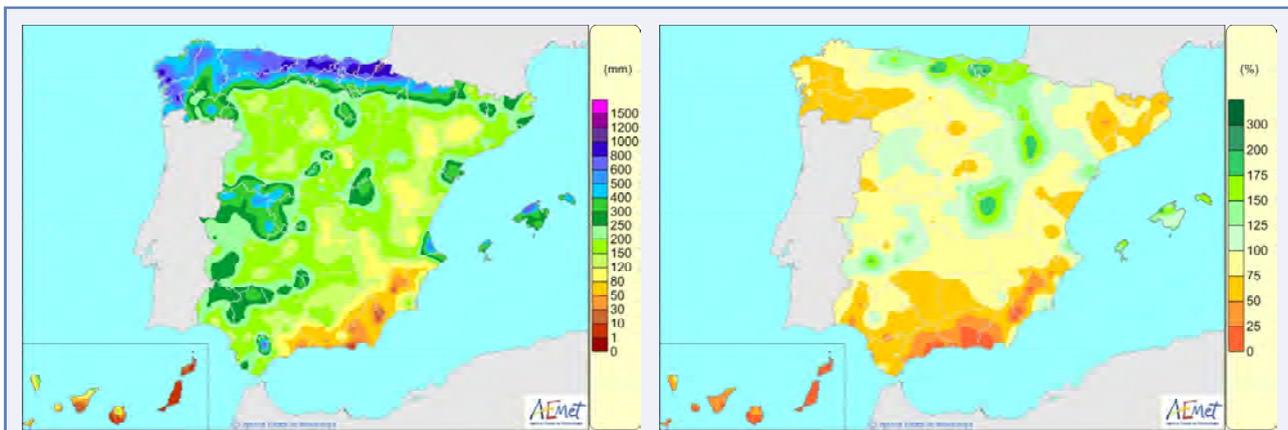


Figura 2.45 — Izquierda, precipitación acumulada en el periodo del 01/09/2021 al 31/12/2021; derecha, porcentaje de la precipitación acumulada desde el 01/09/2021 al 31/12/2021 respecto al periodo 1981-2010.

Al finalizar septiembre, los suelos estaban secos o poco húmedos en la mayor parte del territorio peninsular e insular, salvo zonas costeras y algunas montañosas de Galicia y la cornisa cantábrica, algunas comarcas de los Pirineos o Prepirineo, Tortosa-Beceite-Baix Ebre y la Safor valenciana (figura 2.46 izquierda). No se alcanzaba saturación del suelo en general en ninguna parte del territorio, aunque se encontraba próxima (por encima del 80 %) en algunas zonas costeras o montañosas del norte peninsular, Gredos y la comarca de la Safor. Por el contrario, los valores estaban muy por debajo de lo normal (a menos del 10 % respecto a la saturación) en el sureste peninsular, La Mancha, Andalucía oriental, Murcia y Canarias (figura 2.46 derecha).

A finales de octubre, los suelos seguían con poca o muy poca humedad en las mesetas centrales y el valle del Ebro pero ya no en Galicia, los entornos de las montañas de los sistemas Ibérico y Central, Extremadura y oeste de Toledo así como en algunas zonas de Baleares (figura 2.47 izquierda). En cuanto al porcentaje de humedad edáfica respecto a la capacidad máxima de retención era próxima la saturación en zonas de Galicia, País Vasco, Pirineo central y de las provincias de Salamanca, Cáceres, Ávila y Toledo; por el contrario, seguía siendo inferior al 10 % en Canarias y el sur y sureste peninsulares aunque su área se había reducido respecto a la del mes anterior (figura 2.47 derecha).

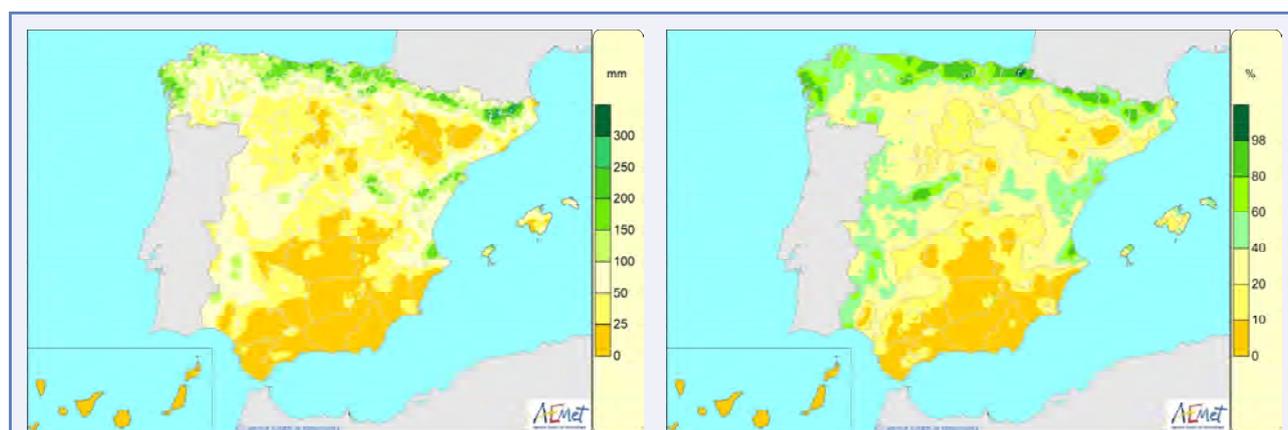


Figura 2.46 — Izquierda, agua disponible para las plantas, o reserva de humedad edáfica en mm, considerando la capacidad de retención máxima del lugar el día 30 de septiembre; derecha, porcentaje de agua disponible respecto a la saturación considerando la capacidad de reserva máxima posible para el día 30 de septiembre.

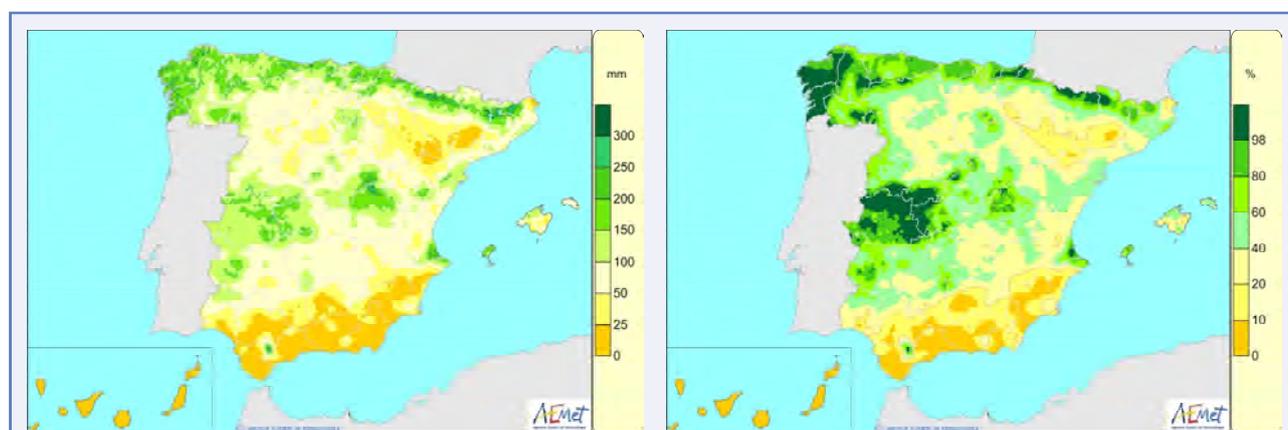


Figura 2.47 — Izquierda, agua disponible para las plantas, o reserva de humedad edáfica en mm, considerando la capacidad de retención máxima del lugar el día 31 de octubre; derecha, porcentaje de agua disponible respecto a la saturación considerando la capacidad de reserva máxima posible para el día 31 de octubre.

A finales de noviembre, los suelos aún estaban secos o muy poco húmedos en muchas comarcas del sur y sureste peninsulares, así como en Canarias; no obstante, en la mitad norte durante noviembre aumentaron de forma importante la humedad del suelo y el caudal de los arroyos, en topografías favorables, debido a la lluvia y la alternancia de pequeñas nevadas en las cumbres y los días de deshielo, así como al rocío y nieblas matutinas (figura 2.48 izquierda). Las zonas del centro-oeste peninsular que el mes anterior estaban próximas a la saturación dejaron de estarlo pero, por el contrario, se alcanzaron áreas más amplias de saturación en la mayor parte de la franja galaico-cántabro-pirenaica y Baleares. Por debajo del 10 % de la capacidad máxima de retención se encontraban Canarias y zonas del litoral entre Málaga y Alicante (figura 2.48 derecha).

Al finalizar diciembre, los suelos estaban en general húmedos en gran parte del territorio aunque secos en el suroeste peninsular y en Canarias (figura 2.49 izquierda). Respecto a la capacidad máxima de retención de agua, los suelos estaban saturados en zonas de Galicia, montañas cántabras y del Pirineo navarro-aragonés y algunas zonas de los sistemas Ibérico, Central y montes del oeste y suroeste peninsular (figura 2.49 derecha).

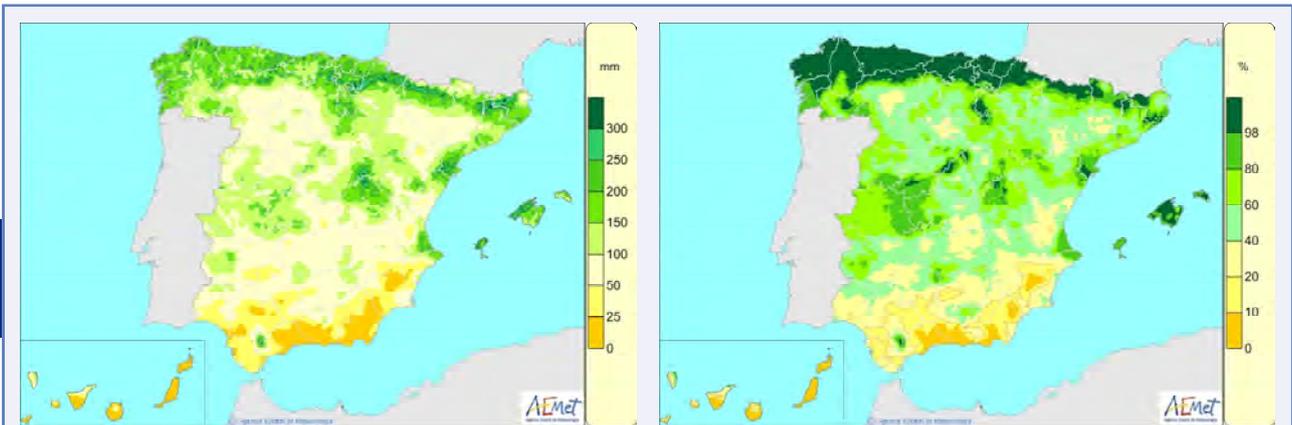


Figura 2.48 — Izquierda, agua disponible para las plantas, o reserva de humedad edáfica en mm, considerando la capacidad de retención máxima del lugar para el día 30 de noviembre; derecha, porcentaje de agua disponible respecto a la saturación considerando la capacidad de reserva máxima posible para el día 30 de noviembre.

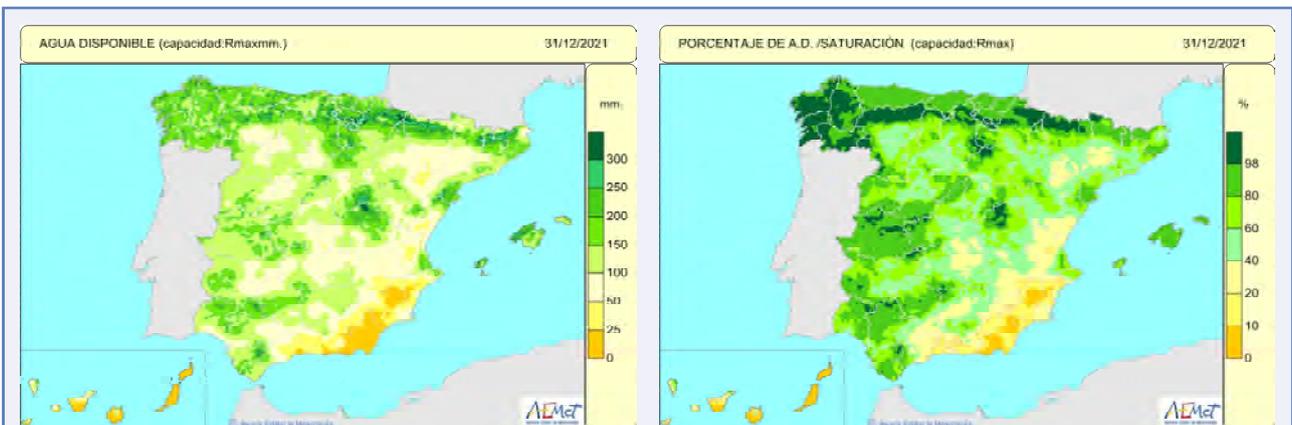
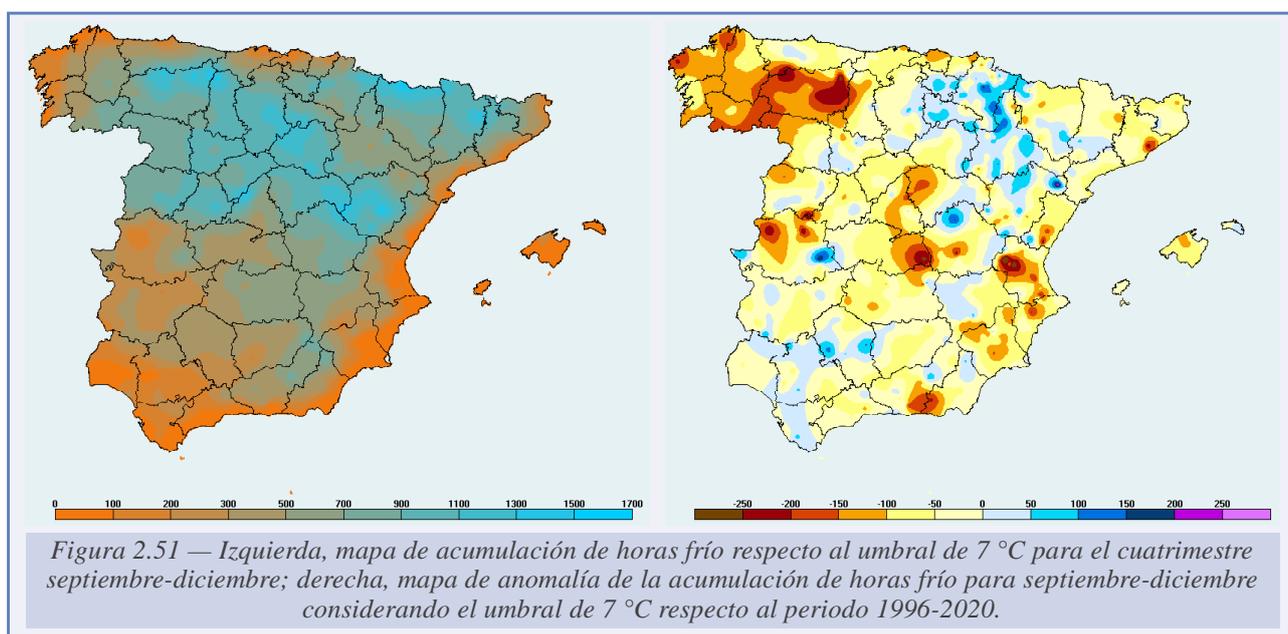
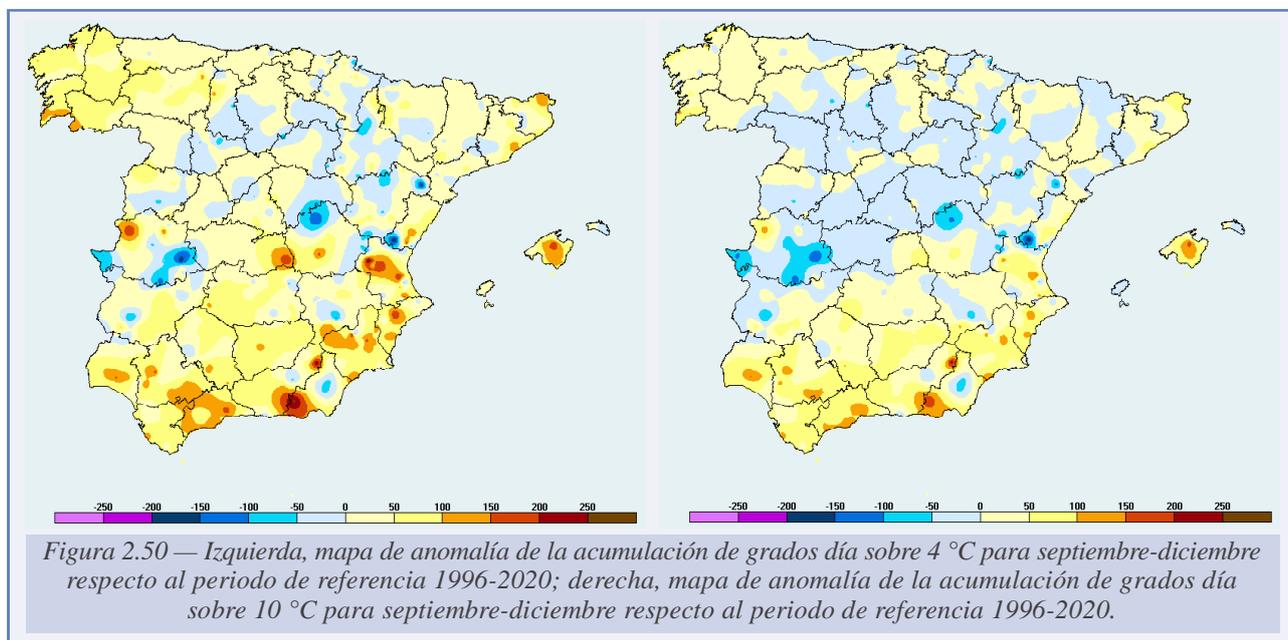


Figura 2.49 — Izquierda, agua disponible para las plantas, o reserva de humedad edáfica en mm, considerando la capacidad de retención máxima del lugar el día 31 de diciembre; derecha, porcentaje de agua disponible respecto a la saturación considerando la capacidad de reserva máxima posible para el día 31 de diciembre.

El otoño (septiembre-diciembre) en su conjunto fue de carácter térmico normal respecto al periodo de referencia 1981-2010. Septiembre fue normal o frío en el centro peninsular y cálido o muy cálido en el resto del territorio; octubre fue de carácter térmico cálido o muy cálido en la mayor parte de las provincias aunque normal o frío en amplias zonas del cuadrante nororiental peninsular; noviembre fue, en todo el territorio, frío o muy frío (con algunas zonas de extremadamente frío). Finalmente, diciembre fue cálido o muy cálido, aunque normal o frío en zonas de Navarra y Canarias. Los grados día acumulados sobre 4 y sobre 10 °C para septiembre-diciembre en general fueron normales (entre -50 y +50) salvo en zonas muy concretas como se observa en la figura 2.50, izquierda y derecha, respectivamente.

Para el cuatrimestre septiembre-diciembre, las horas frío acumuladas respecto a 7 °C fueron inferiores a 100 en casi todo el litoral y superiores a 1500 en las montañas del centro y norte peninsulares; de 700-1300 en las mesetas de Galicia, cuenca del Duero y piedemontes del valle del Ebro; en las montañas y campiñas altas andaluzas entre 500-700 (fig. 2.51 izq.) con una distribución de anomalías muy variable geográfica y cuantitativamente (fig. 2.51 der.).



La acumulación de horas frío (respecto al umbral de 7 °C) presentó anomalía positiva importante si se consideran los meses de octubre-noviembre, debido al muy frío mes de noviembre. Por el contrario, si se considera el trimestre octubre-diciembre seguía habiendo zonas de más frío acumulado de lo normal (anomalía positiva) pero en menor extensión geográfica y además hubo zonas de menor acumulación de frío de lo normal (anomalías negativas), debido al cálido mes de diciembre (figura 2.52).

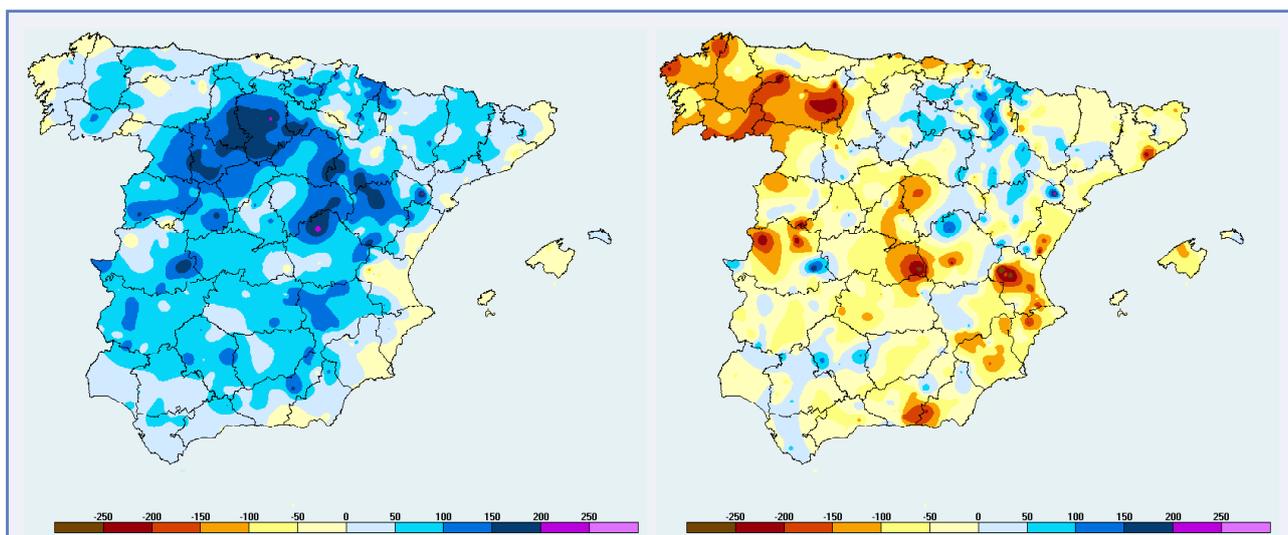


Figura 2.52 — Izquierda, mapa de anomalía de la acumulación de horas frío para un umbral de 7 °C para octubre-noviembre respecto al periodo de referencia 1996-2020; derecha, mapa de anomalía de la acumulación de horas frío para un umbral de 7 °C para octubre-diciembre respecto al periodo de referencia 1996-2020.

Precipitación y agrometeorología

Al analizar el mapa de distribución del *índice de precipitación estandarizado* (SPI) para un periodo de acumulación de precipitación de tres meses anteriores al día 30 de noviembre (es decir desde el 1 de septiembre) se observa un déficit de precipitación que representa una anomalía pluviométrica a ese plazo trimestral, que puede influir en diferentes sistemas de recursos hídricos. En zonas de Canarias, Galicia y gran parte de Andalucía, el valor es inferior a -1, lo que indica que se trata de un periodo con déficit de precipitaciones, especialmente en Málaga con un valor del SPI inferior a -2 (figura 2.53). Si se considera un periodo de seis meses anteriores al final de noviembre, además de las regiones anteriores, también se encuentra con valores negativos la mayor parte de Cataluña. En Andalucía, al comienzo de la tercera decena de diciembre el agua embalsada en las cuencas de los ríos Guadiana, Guadalquivir, Guadalete y Barbate era inferior al 30 % de su capacidad total.

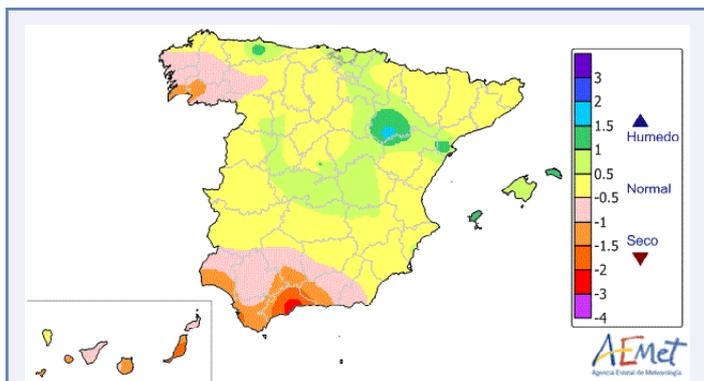


Figura 2.53 — SPI3 al finalizar noviembre.

Tras la nevada asociada a la borrasca Filomena, entre el 6 y el 11 de enero, se llenaron las reservas de agua en los embalses, pero la primavera fue muy seca (la cuarta más seca desde el comienzo de la serie en 1961). Aunque el verano fue húmedo o muy húmedo en gran parte de la Península, fue normal o seco en gran parte de Andalucía y Galicia, en parte de Castilla y León, incluso seco o muy seco en el norte de Aragón y la mayor parte de Cataluña; en el centro y este de Andalucía, además las anomalías térmicas del periodo estival fueron cercanas a +2 °C. En el otoño, en la mayor parte de Andalucía, Murcia y Galicia, se registraron unas precipitaciones totales inferiores al 75 % de las normales (respecto al periodo 1981-2010).

La escasez de agua en cuanto a las necesidades agrícolas fue importante en las cuencas del Guadalquivir, Guadiana, Guadalete y Barbate. Esta situación afectó en gran medida al olivar de secano (con pérdida de fruto tras el cuajado o con aceitunas defectuosas en la época de la maduración y recolección. En regadío, la reducción del riego se tradujo en reducción de producción. En los alrededores de las marismas del Guadalquivir, la falta de agua afectaba a los arrozales, especialmente por la falta del lavado necesario en las tierras arcillosas. En menor medida, la falta de agua afectó a las cuencas del Júcar y Segura, al Ampurdán y algunas zonas de la cuenca del Duero. Los cultivos de girasol, en muchas zonas, se vieron afectados por la escasez de agua en verano.

En octubre la falta de agua y de tempero de los suelos, unida a un tiempo relativamente seco y caluroso, afectaba a las siembras del cereal, como indica en la cultura meteorológica popular el refrán castellano, «*si octubre refleja, aguzza la reja*», que alude a la necesidad de, en el tiempo de sementera, si la temperie es de ambiente muy seco y soleado, hay que afilar la reja del arado para que penetre en un suelo duro.

Fenología de la vegetación

A primeros de octubre había algo de humedad en la capa superficial de los suelos de las sierras y somontanos, e incluso en las hondonadas de las llanuras de zonas bajas, lo que permitió la aparición de varias especies de setas en los biotopos favorables. No obstante, los suelos en general no estaban empapados y en muchos arroyos aún no corría agua. En piedemontes del norte del sistema Central la fisonomía de los diversos hábitats en el paisaje mostraba un adelantado veranillo de San Lucas (18 de octubre) debido al episodio cálido que comenzó el día 6 (con temperaturas nocturnas cálidas incluso con cielos despejados) no produciéndose este año las relativamente normales lluvias en torno al Pilar (12 de octubre); por estas fechas de la primera decena del mes comenzó el cambio de color de los castaños de indias (*Aesculus hippocastanum*) y la decoloración del plátano (*Platanus hispanica*) de paseo en la ciudad de Madrid mostrando en el piedemonte de la sierra madrileña, robles melojos (*Quercus pyrenaica*) y castaños (*Castanea sativa*) un estado foliar aún estival. A mediados de octubre en las rampas serranas del sistema Central el arce de Montpellier (*Acer monspessulanum*) mostraba su total coloración final y seguían apareciendo florecillas eventuales en los pastizales de sotos y dehesas altas frías. En la última decena de octubre a consecuencia del acortamiento del fotoperiodo, aún con temperaturas relativamente altas, en los sotos y bosques de las comarcas de la meseta Norte dominaba la coloración otoñal y comenzó la caída de las hojas de chopos (*Populus sp.*) y fresnos (*Fraxinus angustifolia*) aún muchas veces en ausencia de viento; el campo verdeaba aún sin lluvias gracias al acortamiento de los días y a los rocíos nocturnos y matutinos. Durante la segunda quincena de octubre se produjo el cambio de color de las hayas (*Fagus sylvatica*); estos se encontraban al 30 % de cambio de color a mediados de mes en La Rioja y en coloración total final en las montañas de León a final de mes (favorecido por las lluvias y primeras heladas que por estas fechas sucedieron en las montañas de la mitad norte peninsular).

A finales de la primera decena del mes de noviembre en la campiña segoviana el viento frío hizo que fresnos (*Fraxinus angustifolia*) y chopos (*Populus sp.*) perdiesen totalmente la hoja, y al final del mes los quejigos (*Quercus faginea*) estaban en plena coloración final otoñal. En el noroeste peninsular, la caída de las hojas ocurrió en fechas normales coincidiendo sobre todo con los días de viento o lluvia. En el Bierzo, se adelantó la maduración de los frutos hasta dos y tres semanas. A finales de la primera decena de octubre comenzó en Galicia la caída del fruto del castaño (*Castanea sativa*), las castañas tempranas, las híbridas (del castaño Maruxa, cruce de castaño europeo y asiático).

En la campiña de los valles de Cantabria el carácter muy cálido y húmedo de septiembre sobre campos no agostados permitió unas maduraciones en fechas normales, salvo en la vid (*Vitis vinifera*) y la higuera (*Ficus carica*) donde fueron algo adelantadas, desde primeros de mes comenzaron a caer frutos de castaños y robles (*Quercus robur*), muchos aún no maduros. Octubre fue frío y muy seco, en la tercera decena, castañas y bellotas ya estaban maduras y comenzaron a caer en las situaciones de viento sur; en general el pleno cambio de color comenzó a mediados de mes roble (*Q. robur*), ciruelo (*Prunus domestica*), manzano (*Malus domestica*), chopo (*Populus sp.*) cerezo (*Prunus avium*), peral (*Pyrus communis*), endrino (*Prunus spinosa*). Noviembre fue muy frío y extremadamente húmedo, con pluviometría extraordinaria con lluvias persistentes sobre todo entre los días 21 al 29, muchos caducifolios mantuvieron las hojas en los árboles, con total cambio de color, hasta el comienzo de la tercera decena, en la que se generalizó la caída de las mismas. A primeros de diciembre el tiempo invernal y las heladas dejaron los árboles caducifolios del norte totalmente sin hojas.



Figura 2.54 — Plena coloración final de arces en el jardín botánico de Iturrarán en el Parque Natural de Pagoeta (Gipuzkoa) el 13 de noviembre. Foto: Pilar López Vallejo.

En la campiña vasca el máximo de coloración otoñal, para el conjunto de las especies caducifolias, se alcanzó a mediados de noviembre (figura 2.54), con poca caída de hojas (aunque en lugares expuestos la caída de las hojas era casi total, como en Igeldo). Al retrasarse la caída de las hojas, se pudo desarrollar toda la variación de cambio de color en las distintas especies coincidiendo por esas fechas el amarillo de las hayas con el rojo de los arces (*Acer sp.*).

A finales de diciembre en la cornisa cantábrica se produjo una notable subida de temperaturas con ausencia de heladas y escarchas, que hizo florecer precozmente a los avellanos y los alisos y a numerosas especies herbáceas de los prados. También en el centro peninsular, de mediados a finales de diciembre

las temperaturas fueron muy altas y en la Casa de Campo de la ciudad de Madrid presentaban yema hinchada con apertura de catáfilos los ciruelos y los fresnos estaban a comienzo de su floración.

Fenología de las aves

A primeros de octubre, en el piedemonte segoviano de la sierra de Guadarrama, se observaban mariposas de varias generaciones: por ejemplo *Vanessa atalanta* (uniéndose a las sedentarias

las migratorias norteñas); ya durante la tercera decena del mes, en las mismas campiñas de la rampa serrana, los petirrojos (*Erithacus rubecula*) sedentarios cantaban para señalar sus territorios respecto a los invernantes que comenzaban a llegar y estos a su vez también para «tratar de hacerse un hueco». Durante la segunda decena de octubre fue abundante el paso migratorio hacia el sur de la mariposa *Vanessa atalanta*.

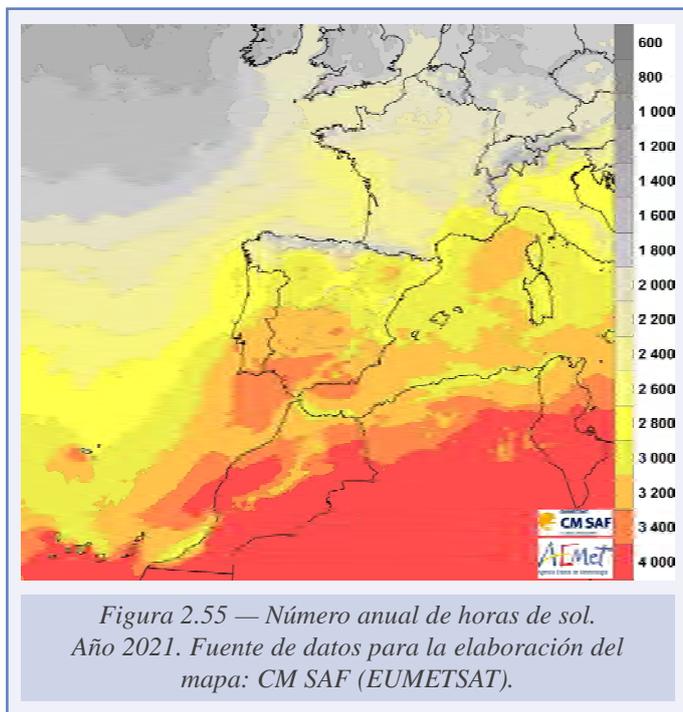
A primeros de noviembre, en toda la península ibérica, coincidiendo con la bajada de las temperaturas, comenzaron los movimientos de fauna desde las laderas de las montañas a los valles y piedemontes, por ejemplo, de rabilargos (*Cyanopica cyanus*).

Las primeras grandes bandadas de grullas (*Grus grus*) que pasaron por los collados vasconavarros se observaron a comienzos de la segunda decena de noviembre; por otra parte, a primeros de diciembre se observaron los primeros pasos de grandes grupos de torcaces (*Columba palumbus*) y algunas fugas de tempero, por ejemplo de abubillas sedentarias (*Upupa epops*).

En el entorno de Madrid capital y los páramos y vegas del sur de la provincia las últimas bandadas de abejarucos europeos (*Merops apiaster*) se observaron en la primera semana de septiembre (en fecha algo temprana), los últimos vencejos comunes (*Apus apus*) se observaron en fecha tardía (de más de 10 días) a mediados de la tercera de septiembre, los últimos aviones comunes (*Delichon urbicum*) y golondrinas comunes (*Hirundo rustica*) se observaron a primeros de octubre (fechas normales). En cuanto a las aves invernantes; los primeros petirrojos (*Erithacus rubecula*) se observaron a finales de septiembre (fechas normales), las primeras bandadas de grullas comunes (*Grus grus*) a comienzo de la segunda decena de octubre (fecha de más de diez días temprana respecto a lo normal) y los primeros zorzales comunes (*Turdus philomelos*) al final de la segunda semana de octubre (en fecha normal).

En la cornisa cantábrica, avión común (*Delichon urbicum*), golondrina común (*Hirundo rustica*) y alimoche (*Neophron percnopterus*), dejaron los valles de forma prematura hacia finales de la primera decena de septiembre. Las becadas (*Scolopax rusticola*) comenzaron a observarse a finales del mes de octubre. Durante noviembre se observaron los pasos hacia el sur de ánsares (*Anser anser*), avefrías (*Vanellus vanellus*), grullas (especialmente entre los días 18 y 20) y en la segunda mitad del mes llegaron los zorzales (*Turdus* sp.).

2.4. INSOLACIÓN

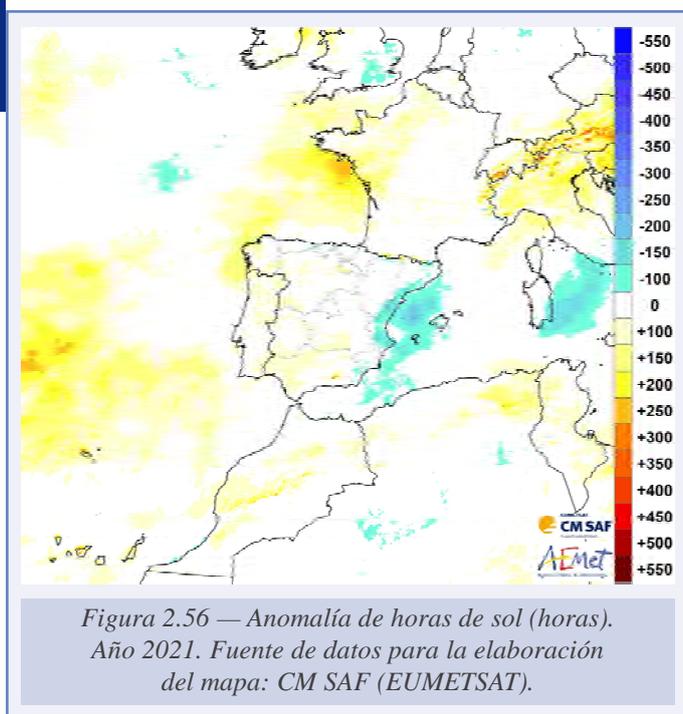


De acuerdo con los datos del producto SDU (*sunshine duration*) del Servicio de Aplicaciones Satelitales de EUMETSAT para la vigilancia del clima (CM SAF), el año 2021 terminó con un total de 2832 horas de sol en el promedio de la superficie del territorio español, cantidad muy próxima al valor medio del periodo 1983-2010 (2821).

En valores absolutos, como suele ser habitual, el mayor número de horas de sol durante 2021 se registró en las islas Canarias, con más de 3200 horas de sol en el sur y este del archipiélago. En la Península se superaron las 3200 horas de sol en amplias zonas de Andalucía y, de forma más dispersa en el sur de Badajoz y norte de Ciudad Real. En zonas de las comunidades del Cantábrico y de los Pirineos el número de horas de sol fue inferior a 2000 (figura 2.55).

En zonas del oeste de la Península y Canarias hubo un total anual de horas de sol mayor que la del promedio climático de referencia y, en el otro extremo, en el este de la Península y Baleares hubo déficit de insolación (figura 2.56).

El promedio de cada provincia o ciudad autónoma, las horas de sol registradas en 2021, la insolación normal anual y el déficit de horas de sol en % es el que se adjunta en la tabla 2.6. En las provincias de A Coruña, Pontevedra, Sevilla, Huelva, Las Palmas y Córdoba la insolación total anual excede en más de 100 h la de la climatología de referencia, mientras que el mayor déficit de insolación se ha producido en las provincias de Castelló/Castellón, Tarragona, València/Valencia y Alacant/Alicante, con un déficit superior a las 100 h.



2.4.1. Anomalías significativas de insolación

El episodio más anómalo de insolación se produjo durante la primavera. Mientras que en el oeste y tercio norte de la Península y en Canarias hubo superávit de insolación, en todas las provincias de la fachada mediterránea y en Baleares hubo déficit. El déficit de insolación

Insolación 2021 — Número de horas de sol (Promedio provincial)

Provincia	Insolación normal (promedio 1983-2010)	Insolación 2021	Anomalia	Provincia	Insolación normal (promedio 1983-2010)	Insolación 2021	Anomalia
A Coruña	2098	2213	+115	Jaén	3036	3114	+78
Alacant/Alicante	3072	2972	-101	La Rioja	2380	2437	+57
Albacete	2997	2987	-11	Las Palmas	3158	3263	+105
Almería	3202	3151	-51	León	2576	2639	+62
Araba/Álava	2091	2094	+3	Lleida	2747	2749	+2
Asturias	1856	1852	-4	Lugo	2070	2093	+23
Ávila	2792	2817	+25	Madrid	2953	2905	-48
Badajoz	3060	3153	+92	Málaga	3110	3139	+29
Barcelona	2805	2723	-82	Melilla	2959	2881	-78
Bizkaia	1880	1876	-3	Murcia	3118	3053	-64
Burgos	2413	2461	+48	Navarra	2426	2416	-11
Cáceres	3026	3109	+83	Ourense	2384	2475	+91
Cádiz	3106	3195	+88	Palencia	2698	2759	+61
Cantabria	1897	1861	-37	Pontevedra	2318	2432	+114
Castelló/Castellón	2875	2712	-163	Salamanca	2830	2925	+95
Ceuta	2860	2792	-67	Santa Cruz de Tenerife	2897	2957	+60
Ciudad Real	3037	3134	+97	Segovia	2659	2716	+56
Córdoba	3092	3193	+101	Sevilla	3188	3295	+107
Cuenca	2938	2917	-21	Soria	2681	2687	+6
Gipuzkoa	1830	1815	-14	Tarragona	2876	2741	-135
Girona	2654	2583	-71	Teruel	2786	2747	-39
Granada	3110	3166	+56	Toledo	3063	3070	+7
Guadalajara	2802	2812	+10	València/Valencia	2958	2845	-113
Huelva	3146	3251	+106	Valladolid	2855	2929	+74
Huesca	2837	2805	-32	Zamora	2829	2912	+83
Illes Balears	2950	2855	-96	Zaragoza	2897	2883	-14

Tabla 2.6. Insolación normal, insolación total en 2021 y anomalía en el promedio de la superficie de cada provincia. Fuente de datos para la elaboración de la tabla: CM SAF (EUMETSAT).

durante la primavera en las comunidades del Mediterráneo estuvo relacionado con la gran nubosidad, lo que dio lugar a un trimestre húmedo o muy húmedo en el sureste de Andalucía, en la Región de Murcia, gran parte de la Comunitat Valenciana y sur de Baleares, llegando a ser extremadamente húmedo en zonas del sur de Alicante, mientras que en las zonas de gran insolación, con poca nubosidad en el trimestre, la primavera fue seca o muy seca, incluso extremadamente seca en la mitad este del País Vasco, gran parte de Navarra y zona noroeste de Huesca.

No solo en amplias zonas de España, la primavera fue muy soleada (salvo las provincias mediterráneas). También lo fue en la Europa noratlántica y meridional (figura 2.57).

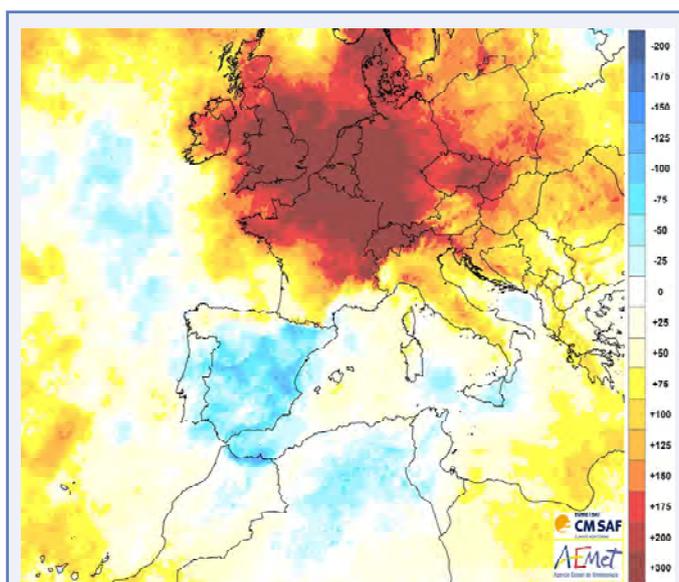


Figura 2.57 — Anomalía de insolación (horas) durante la primavera climática 2021. Fuente de datos para la elaboración del mapa: CM SAF (EUMETSAT).

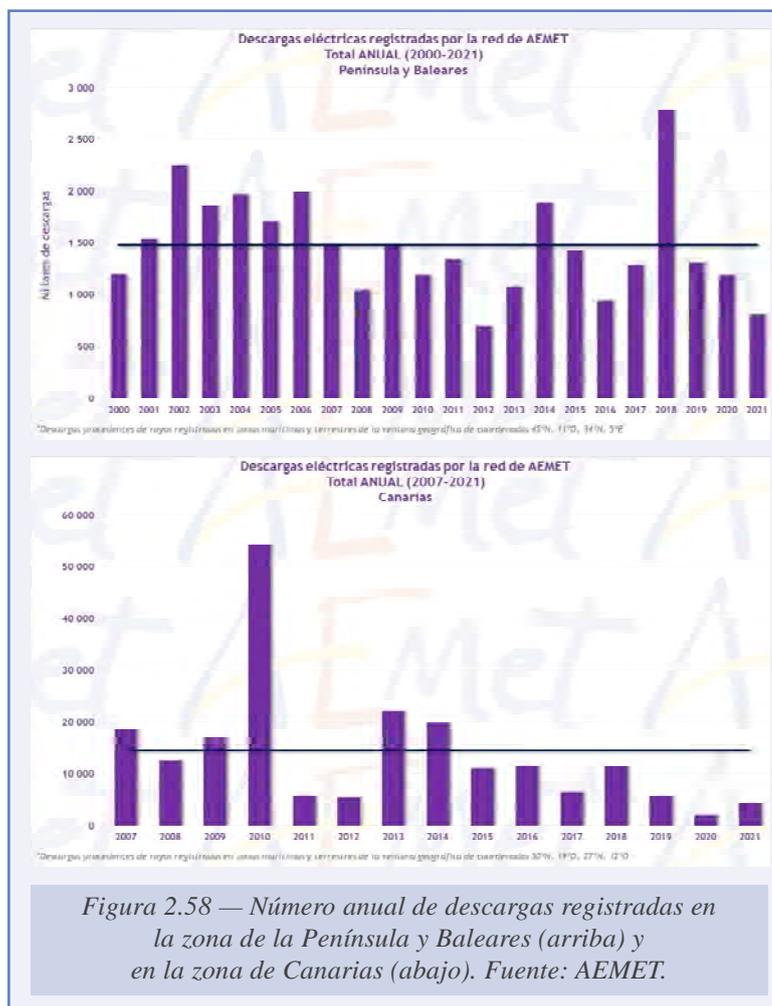
2.5. DESCARGAS ELÉCTRICAS Y TORMENTAS DURANTE 2021

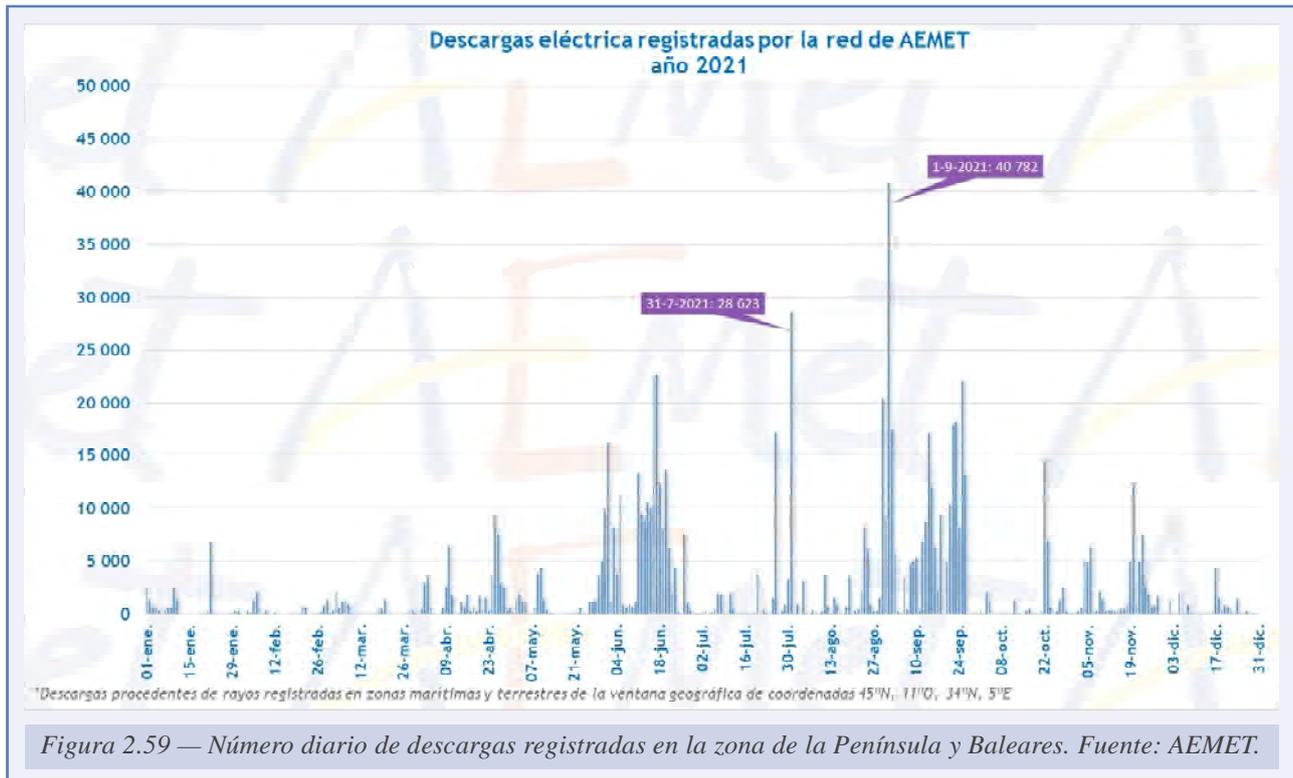
2021 ha sido un año en el que el número de descargas registradas, tanto en la zona de la Península y Baleares como en la de Canarias, ha sido inferior al del promedio y, en ambos casos, los registros de 2021 son los segundos más bajos de la serie anual. Por otra parte, hay zonas de la mitad oriental de la Península en las que el número de días de tormenta durante el año ha sido muy superior al promedio normal, mientras que en el tercio norte y en Andalucía occidental, sobre todo en zonas próximas al golfo de Cádiz, el número de días de tormenta en 2021 fue muy inferior al promedio climático.

Una parte significativa de las descargas que impactaron en tierra en Canarias fueron provocadas por la actividad del volcán de Cumbre Vieja de la isla de La Palma.

2.5.1. Descargas eléctricas

Las descargas registradas en zonas marítimas y terrestres de la ventana geográfica de coordenadas 45° N, 11° O, 34° N, 5° E, donde están situadas la Península, Baleares y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, han sido 810 340 (figura 2.58, arriba), y en las zonas marítimas y terrestres de la ventana geográfica de coordenadas 30° N, 19° O, 27° N, 12° O, donde están situadas las islas Canarias, se ha registrado 4328 (figura 2.58, abajo).

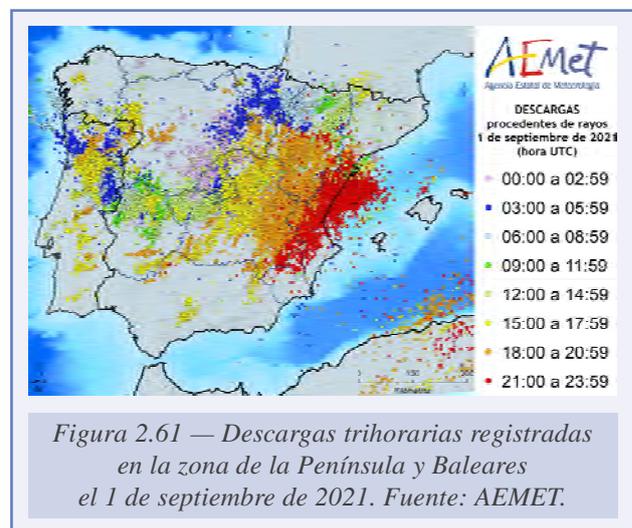
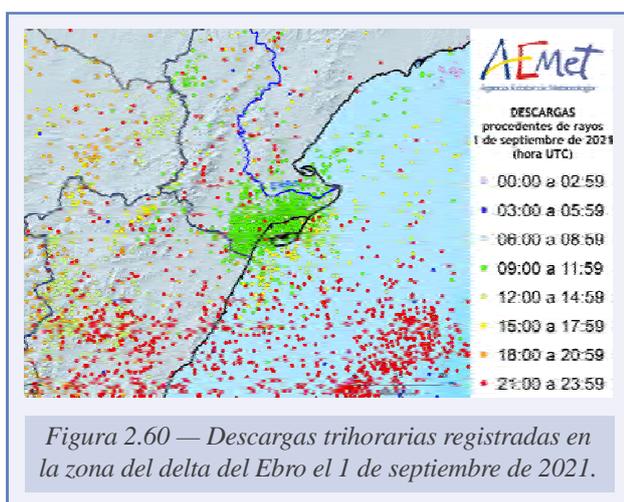


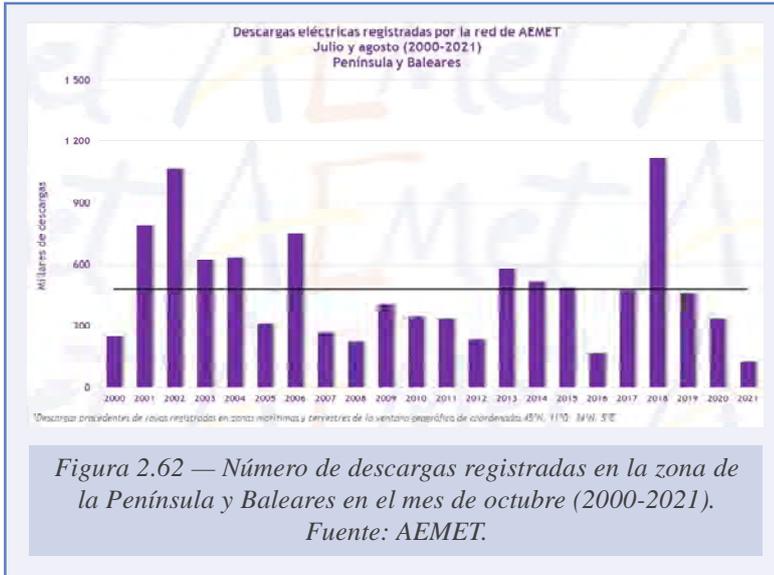


En la zona de la Península, el día de más descargas eléctricas fue el 1 de septiembre, con 40 782, seguido del 31 de julio, con 28 623. Durante los dos meses centrales del verano la actividad fue muy escasa (figura 2.59).

El episodio meteorológico más significativo, tanto por el número de rayos que generó como por los impactos asociados, se produjo el 1 de septiembre. Por la mañana se produjeron precipitaciones torrenciales y con tormenta en la zona sur del delta del Ebro, en la zona de Alcanar y Sant Carles de la Ràpita, que registró más de 1500 rayos entre las 09 y las 12 UTC (figura 2.60).

En la tarde del día 1 se formó una línea de turbonada muy activa que se extendía entre Zaragoza y Albacete, y que con el avance de la noche se fue desplazando hacia el este, produciendo precipitaciones de intensidad torrencial. En total, entre el episodio de la mañana y de la tarde-noche, se llegaron a registrar más de 40 000 descargas en el área de la Península (figura 2.61).

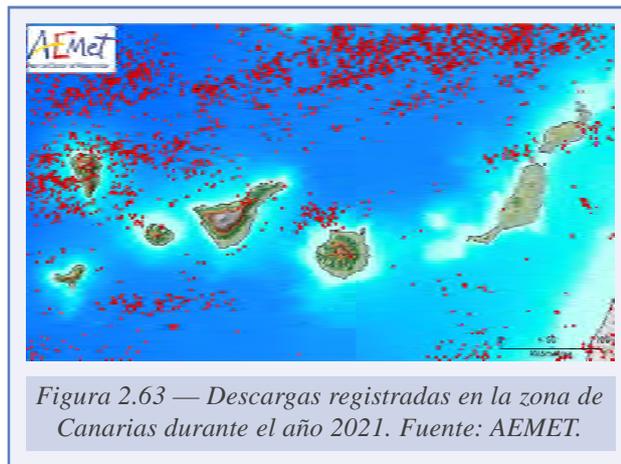




La causa principal de que el número de descargas durante el año 2021 haya sido muy bajo fue que durante los meses de julio y agosto la actividad fue escasa. La suma de los registros de descargas durante los meses centrales del verano de 2021 es el mínimo absoluto del periodo (figura 2.62).

Como en la Península, la actividad tormentosa en Canarias durante 2021 fue también escasa, registrándose el segundo valor más bajo de descargas desde el inicio de la serie, en 2007. De las 4328 descargas registradas en el área de Canarias, la mayoría impactaron en el Atlántico, al norte de las islas, y solo 43

impactaron en tierra (figura 2.63). Estos 43 impactos en tierra se registraron el 7 de enero (7), el 4 de febrero (3), el 5 de febrero (1), el 30 de octubre (8), el 3 de noviembre (1), el 19 de noviembre (1), el 25 de noviembre (11) y el 26 de noviembre (11) (fig. 2.64).



El episodio meteorológico más significativo en Canarias durante el año 2021, tanto por el número de rayos que generó como por los impactos asociados, se produjo el 7 de enero (figura 2.65). Más de la mitad de los rayos registrados en el año en la zona de Canarias (2299 de 4328) se observaron ese día al paso de la borrasca Filomena por las islas, que además provocó lluvias muy intensas y rachas de viento huracanadas.

Otro aspecto muy significativo de las descargas que se produjeron durante el año 2021 en Canarias, es que gran parte de los impactos que se registraron a partir del mes de octubre en la isla de La Palma fueron descargas provocadas por la actividad del volcán Cumbre Vieja. Si además de los impactos en tierra se contabilizan las descargas intranube, registradas por el sistema pero que no llegaron a tocar tierra, en total se llegaron a contabilizar 23 descargas relacionadas con la actividad volcánica, nueve de las cuales impactaron en tierra y el resto fueron descargas intranube. De esas 23 descargas, 14 se registraron el día 30 de octubre (figuras 2.66 y 2.67).

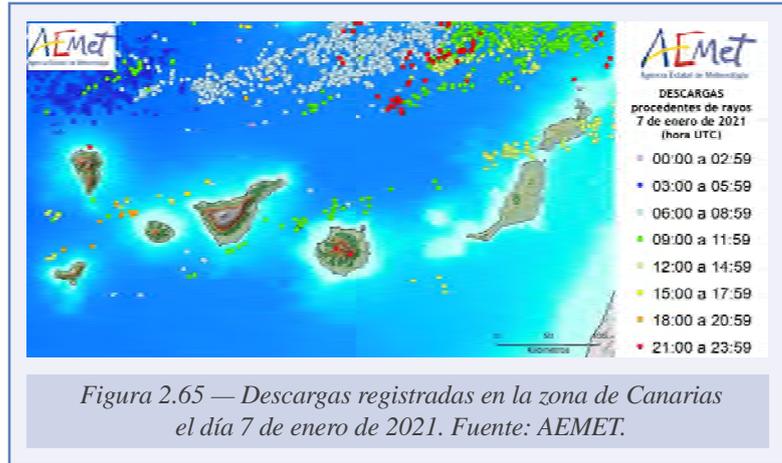


Figura 2.65 — Descargas registradas en la zona de Canarias el día 7 de enero de 2021. Fuente: AEMET.

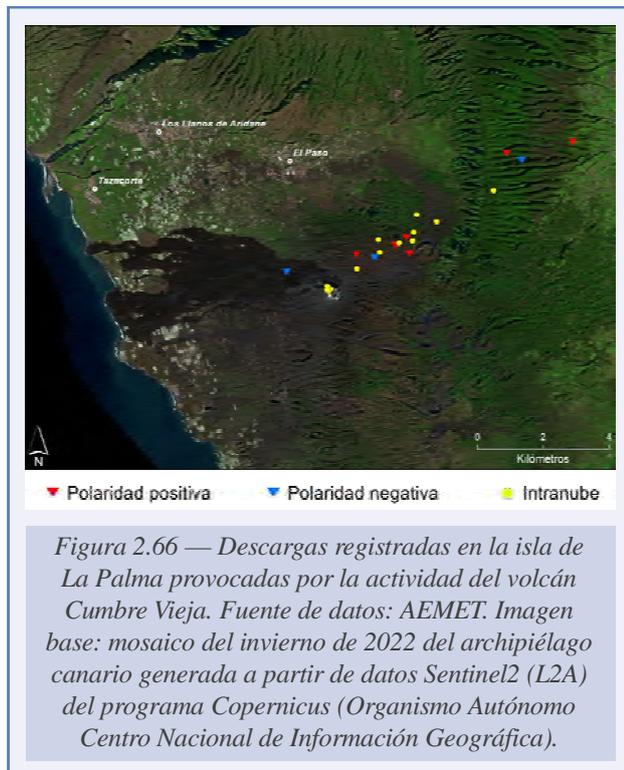


Figura 2.66 — Descargas registradas en la isla de La Palma provocadas por la actividad del volcán Cumbre Vieja. Fuente de datos: AEMET. Imagen base: mosaico del invierno de 2022 del archipiélago canario generada a partir de datos Sentinel2 (L2A) del programa Copernicus (Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica).

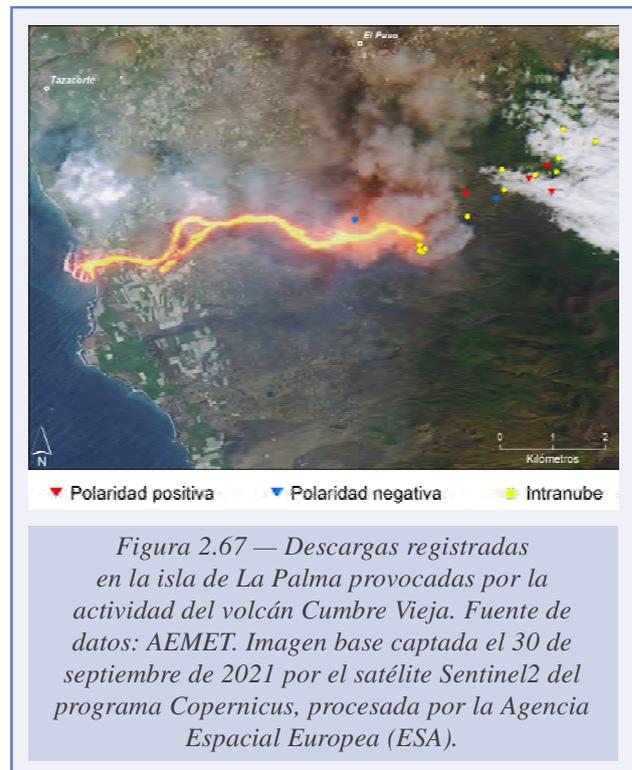
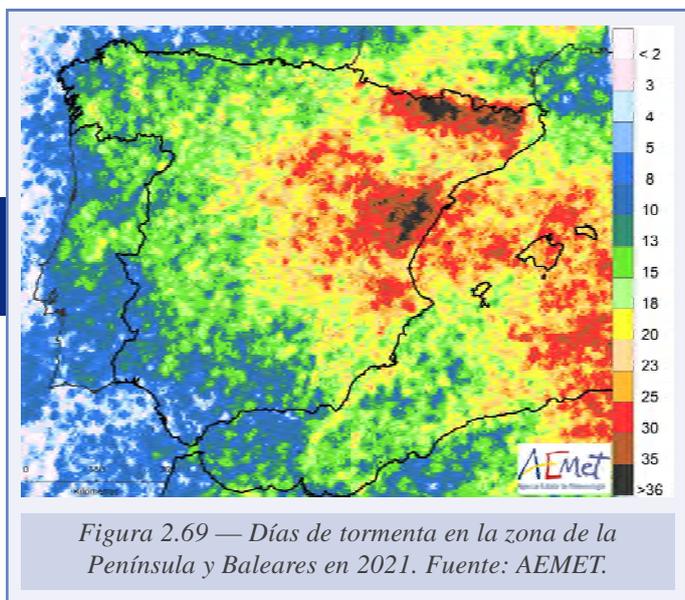
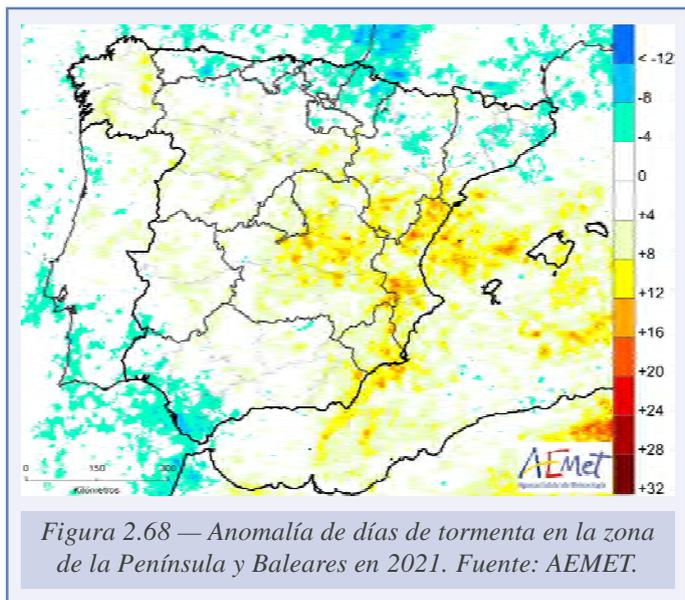


Figura 2.67 — Descargas registradas en la isla de La Palma provocadas por la actividad del volcán Cumbre Vieja. Fuente de datos: AEMET. Imagen base captada el 30 de septiembre de 2021 por el satélite Sentinel2 del programa Copernicus, procesada por la Agencia Espacial Europea (ESA).

2.5.2. Días de tormenta

A pesar de que en la zona de la Península el número anual de descargas ha sido inferior al del promedio de la serie, hay zonas en las que el número de días de tormenta durante el año ha sido muy superior al promedio normal, especialmente en la Comunitat Valenciana, Región de



Murcia, Cuenca, este de Toledo y zonas del Mediterráneo entre Baleares y el este y sureste de la Península. En el otro extremo, en el tercio norte y en Andalucía occidental, sobre todo en zonas próximas al golfo de Cádiz, el número de días de tormenta en 2021 fue muy inferior al promedio climático (figura 2.68).

En el interior de Castellón, este de Teruel y zonas de los Pirineos orientales, ha llegado a haber durante 2021 más de 35 días de tormenta, mientras que en el litoral andaluz el número de días de tormenta ha sido inferior a 8 (figura 2.69).

Finalmente, hay que dejar constancia de que durante el mes de abril de 2021 AEMET puso en operación un nuevo concentrador de rayos (TLP141 v1.2.5). En las primeras evaluaciones que se han realizado entre los registros del anterior sistema y del nuevo, se ha llegado a la conclusión de que el nuevo concentrador registra 2.6 veces más descargas que el anterior, aunque gran parte de este exceso de descargas registradas por el nuevo sistema son descargas intranube, no analizadas ni en este informe ni en los anteriores, en los que solo se han considerado los impactos en tierra.

Por lo que respecta a las descargas a tierra, que son las que se han venido analizando históricamente, durante el periodo de comparación de ambos sistemas se determinó que el nuevo concentrador registra aproximadamente un 5 % menos de descargas que el antiguo, debido a las mejores prestaciones del nuevo sistema, a

que el antiguo tendía a clasificar descargas intranube como descargas nube-tierra y, en menor medida, a que el concentrador antiguo proporcionaba falsas alarmas. Por tanto, hay que tener en cuenta que se ha producido una ruptura en la homogeneidad de la serie y es probable que el número total de descargas nube-tierra registradas por el nuevo concentrador sea inferior a las que se hubieran registrado con el sistema antiguo.

2.6. FENÓMENOS METEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS EXTREMOS

Los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos tienen, en muchas ocasiones, un importante impacto social por su carácter extraordinario y gran intensidad que los convierten en episodios adversos. En este apartado hacemos un repaso a las principales situaciones extremas vividas en 2021 en España.

2.6.1. Principales episodios de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos

A lo largo de 2021 se sucedieron numerosos episodios de fenómenos meteorológico y climáticos extremos en España. Los más destacados, por su extensión, intensidad e impacto social fueron los siguientes:

Temporal de nieve asociado a la borrasca Filomena y ola de frío posterior

La borrasca Filomena, sexta considerada de gran impacto de la temporada 2020-2021, fue nombrada por AEMET el 5 de enero en previsión de que se superase el umbral naranja por rachas máximas de viento en varias zonas de Canarias a partir del día siguiente. La borrasca dejó en el archipiélago, además de vientos intensos, abundantes precipitaciones que fueron de nieve en zonas altas los días 6 y 7. Posteriormente, se desplazó hacia la Península, donde previamente se había establecido un flujo de aire polar que mantenía las temperaturas muy bajas (con valores de hasta -16 °C) desde hacía prácticamente dos semanas. De hecho, entre los días 5 y 8 de enero se produjo en España la primera de las dos olas de frío asociadas a este episodio. Filomena dejó precipitaciones con intensidad torrencial en puntos de Andalucía, pero, sin duda, lo más destacado, por su excepcionalidad y duración, fueron las nevadas que cayeron entre los días 8 y 10 de enero, cubriendo buena parte del centro y este peninsular con una capa de entre 30 y 50 cm de grosor y provocando un gran impacto social, ya que se vieron afectadas vías de comunicación de primer orden y áreas densamente pobladas, como las ciudades de Madrid, Toledo o, en menor medida, Zaragoza.

A partir del día 11, y hasta el 17 de enero, el establecimiento de un anticiclón centrado en la Península provocó tiempo estable y cielos despejados, lo que junto a la capa de nieve que cubría el suelo dio lugar a una importante ola de frío. La jornada más gélida se registró el 12 de enero. Ese día, se registraron -26.5 °C en Torremocha del Jiloca (Teruel), -25.4 °C en Bello (Teruel) y -25.2 °C en Molina de Aragón (Guadalajara). Hubo también ese día récords de temperatura mínima absoluta en observatorios de la red principal de AEMET, como los -13.4 °C en Toledo (el récord anterior era de -9.8 °C), -21 °C de Teruel (récord anterior de -19 °C) y -21.3 °C en Calamocha (Teruel), cuyo récord anterior en el actual emplazamiento era de -20 °C .



Figura 2.70 — Imagen de la nevada asociada a la borrasca Filomena en Madrid (autor: Rubén del Campo).

Ola de calor de mediados de agosto

Si ya de por sí cualquier ola de calor que se produce en España tiene la naturaleza de fenómeno meteorológico extremo y adverso, la ocurrida en nuestro país entre los días 11 y 16 de agosto en el entorno de la Península y Baleares y entre el 15 y 19 de agosto en Canarias podría considerarse como un fenómeno extraordinario por varias razones: en primer lugar, se trató de la ola de calor más intensa registrada en el área geográfica de la Península y Baleares desde 1975, con una anomalía de la ola de 4,1 °C, y superando a olas de calor tan sobresalientes como las de finales de junio y comienzos de julio de 2019, julio de 2017 o agosto de 1987. Esta ola de calor, además, tuvo una extensión geográfica notable, llegando a afectar a 36 provincias. Solo dos olas de calor desde 1975 han afectado a más provincias. En cambio, con seis días de duración, no se encuentra entre las más largas.

Durante el episodio se batieron numerosos récords de temperatura máxima absoluta: diecinueve observatorios de la red principal de AEMET (aproximadamente la quinta parte del total) registraron la temperatura más elevada desde su puesta en funcionamiento. La estación de Murcia/Alcantarilla (Murcia) alcanzó 47 °C el día 15 de agosto y el día anterior, Montoro (Córdoba), llegó a 47.4 °C, temperatura que por el momento es la más elevada medida en territorio español por AEMET de manera confiable. Se puede encontrar más información sobre esta ola de calor y el resto de las que afectaron a España durante 2021 en el apartado 2.1.4 de este informe.

Episodio de lluvias torrenciales del 31 de agosto y 1 de septiembre

La presencia de una dana en niveles medios y altos de la troposfera, junto con el flujo de vientos muy húmedos procedentes tanto del Atlántico como del Mediterráneo, dio lugar a un episodio de precipitaciones de intensidad torrencial en numerosos puntos del área mediterránea peninsular, interior oriental y zona centro. Los chubascos fueron generalizados y estuvieron acompañados de una importante actividad eléctrica, y si bien los más intensos tuvieron un marcado carácter local, con grandes variaciones en la intensidad en pocos kilómetros, el impacto en bienes fue importante, especialmente en puntos de la provincia de Toledo. En la propia capital de esta provincia se registró un chubasco de 20 mm en veinte minutos el 1 de septiembre. En el observatorio de Daroca (Zaragoza), cuya serie es centenaria, se recogieron 95 mm a lo largo de ese día, convirtiéndose en la jornada con mayor cantidad de precipitación desde que hay registros. En el conjunto de la mitad sur de Navarra se trató del día más lluvioso de los últimos 50 años. Las precipitaciones también alcanzaron intensidad torrencial en puntos del sur de Cataluña y en la Comunitat Valenciana.

Otros episodios de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos ocurridos en 2021

Aunque no tuvieron tanto impacto social, merece la pena destacar otros episodios extremos acaecidos durante el año 2021, y que, por orden cronológico, son los siguientes:

- **Episodio de altas temperaturas a finales de enero.** Los últimos días de enero de 2021 estuvieron marcados por un episodio de temperaturas notablemente más altas de lo normal, tan solo dos semanas después de la intensa ola de frío posterior a la borrasca Filomena. En la ciudad de Alicante se alcanzaron 29.8 °C el día 28, convirtiéndose en la temperatura más alta registrada en una estación de la red principal de AEMET en la Península durante el mes de enero. Valencia, Jaén, Murcia, Tortosa, Zamora y Teruel batieron su récord de

temperatura máxima para el mes de enero el día 28. En el caso de esta última ciudad, el día 12 se había batido el récord de temperatura mínima absoluta.

- **Borrasca Justine (30 y 31 de enero).** Esta profunda borrasca, nombrada por el IPMA portugués el 26 de enero, afectó a la península ibérica con rachas de viento muy intensas y, especialmente, un temporal marítimo extremo en el Cantábrico, que dio lugar a la activación de avisos rojos por mar combinada con olas de 8 a 9 m.
- **Olas de calor en Canarias.** El verano de 2021 fue cálido en Canarias, y si bien no puede considerarse extraordinario por las temperaturas alcanzadas, es destacable que en su transcurso se produjesen tres olas de calor en menos de un mes, entre el 15 de agosto y 13 de septiembre (es decir, ya dentro del otoño meteorológico). Esto sucedía después de cinco veranos sin olas de calor en el archipiélago. Se contabilizaron un total de once días bajo ola de calor, tratándose de esta manera del cuarto año con mayor número de días en situación de ola de calor en Canarias, tras 1976, 2004 y 2012.
- **Borrasca Blas (6 al 17 de noviembre).** Esta borrasca mediterránea tuvo un largo periodo de existencia. De hecho, se convirtió en la borrasca de gran impacto con mayor duración desde que se comenzaron a nombrar en diciembre de 2017. Afectó fundamentalmente a Baleares y alcanzó gran repercusión mediática porque durante algunos momentos de su ciclo de vida compartió determinadas características con los ciclones tropicales, aunque finalmente no se pudo confirmar que se hubiese convertido en un *medicane*. De todas maneras, Blas convirtió a noviembre de 2021 en uno de los meses más lluviosos en Baleares desde que hay registros, especialmente en Menorca y Mallorca, islas que registraron más del triple de lluvia respecto a lo normal. Durante el episodio de lluvias asociado a Blas, se recogieron 476 mm en Son Torrella d'Escorca y 352 mm en Lluc, ambas estaciones ubicadas en la isla de Mallorca.
- **Temporal de lluvias en el cantábrico oriental y el Pirineo occidental durante los últimos días de noviembre y primeros de diciembre.** Aunque este episodio no afectó a grandes áreas, dejó grandes cantidades de precipitación en puntos del País Vasco y norte de Navarra, superiores a 300 e incluso 400 mm. Destacan los 670 mm acumulados en la localidad de Roncesvalles (Navarra) en 15 días. Además, el día 9 de diciembre fue el más lluvioso en la mitad norte de la Comunidad Foral en los últimos 40 años. Como consecuencia de las abundantes precipitaciones, se produjo una avenida histórica del río Ebro y parte de sus afluentes de la margen izquierda en los días posteriores.
- **Episodio cálido de los últimos días de diciembre.** La llegada de una masa de aire cálido de origen tropical, extraordinariamente cálida para la época, dio lugar a un episodio de altas temperaturas entre los días 30 y 31 de diciembre, que tuvo continuidad durante los primeros días de enero de 2022. Se batieron numerosos récords de temperatura máxima para diciembre, destacando el dato de Segovia, que con 22.6 °C superó la anterior efeméride por 2.8 °C; o Bilbao, que por primera vez desde que hay registros, superaba los 25 °C en el mes de diciembre. El carácter extremo de este episodio se hace más patente al tener en cuenta que los días 27, 28, 30 y 31 de diciembre fueron los más cálidos para esa fecha en el conjunto de España desde 1951. Los días 1 y 2 de enero de 2022 también fueron los más cálidos para esa fecha desde 1951 y se batieron numerosos récords de temperatura máxima para el mes de enero.

En la infografía de la figura 2.71 se muestran, a modo de resumen, los principales episodios de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos ocurridos en España en 2021.

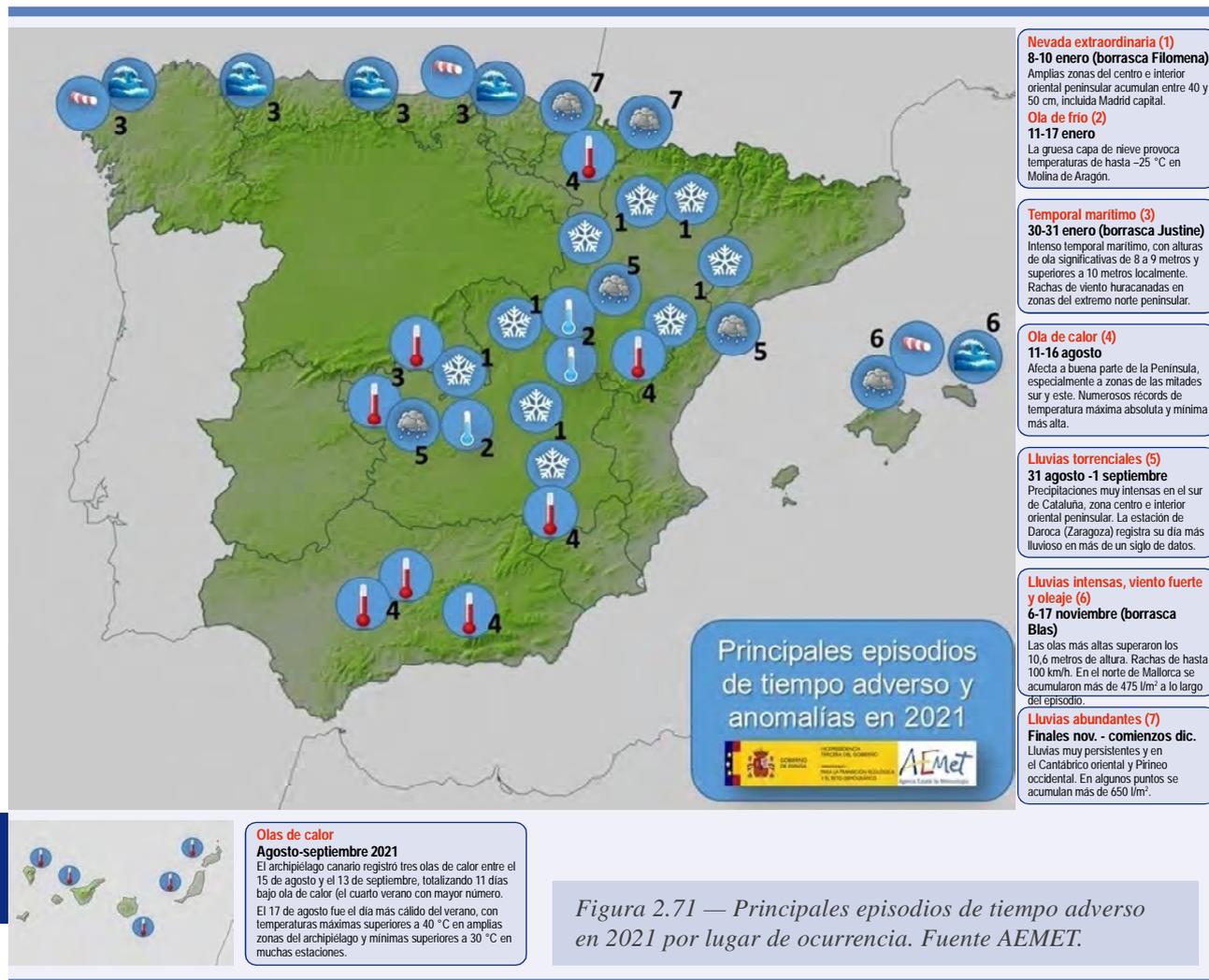


Figura 2.71 — Principales episodios de tiempo adverso en 2021 por lugar de ocurrencia. Fuente AEMET.

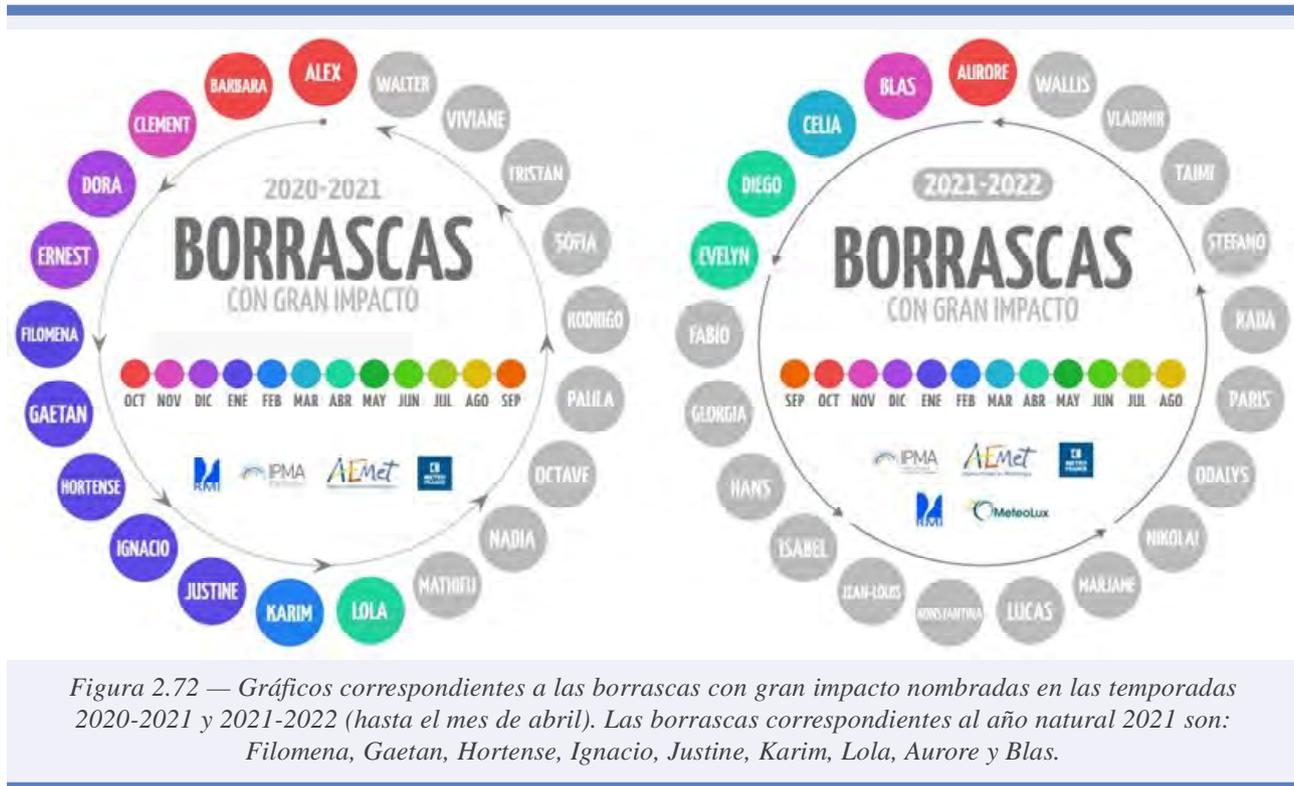
2.6.2. Borrascas con gran impacto y principales episodios de vientos intensos

Los vientos intensos asociados a borrascas de gran impacto causan, en ocasiones, daños a infraestructuras en amplias zonas de nuestro territorio. Otros fenómenos más locales, como los tornados, trombas marinas o, en general, vientos asociados a fenómenos convectivos, también son capaces de generar daños importantes, si bien en áreas más reducidas. También hay que señalar que el viento no se trata de un fenómeno que únicamente genere impactos, sino que tiene un papel protagonista en la generación de energía a partir de fuentes renovables, en este caso energía eólica.

En este subapartado se hace un repaso de las borrascas de gran impacto que fueron nombradas en 2021 por el grupo de nombramiento suroeste europeo de EUMETNET, compuesto ese año por el IPMA (Portugal), AEMET (España), Météo-France (Francia) y el RMI (Bélgica). Dado que uno de los requisitos para el nombramiento de una borrasca es su potencial para originar vientos muy intensos, que supongan la activación de avisos de nivel naranja (riesgo importante), el análisis del número de borrascas con gran impacto registrado cada año puede dar una idea de la frecuencia de temporales de fuertes vientos. Hay que señalar que, a partir de la temporada 2021-2022, cuyo comienzo tuvo lugar el 1 de septiembre, al criterio de nombramiento basado en la potencial activación de avisos de nivel naranja se le otorgó cierta flexibilidad,

pudiendo nombrarse una borrasca con activación únicamente de avisos de nivel amarillo (riesgo leve), siempre y cuando supusiera también la activación de avisos de nivel naranja por lluvias y/o nevadas.

En el año 2021 el grupo suroeste europeo de EUMETNET nombró un total de nueve borrascas con gran impacto, siete de ellas entre el invierno y la primavera y dos en otoño. Météo-France puso el nombre a una borrasca, AEMET a cinco y el IPMA a tres.



En la tabla 2.7 se detalla el nombre de cada borrasca con gran impacto, la fecha de su nombramiento y el servicio meteorológico perteneciente al grupo suroeste europeo de EUMETNET que le puso nombre:

Nombre	Fecha de nombramiento	Servicio meteorológico que puso el nombre
Filomena	5 de enero de 2021	AEMET
Gaetan	19 de enero de 2021	IPMA
Hortense	20 de enero de 2021	AEMET
Ignacio	22 de enero de 2021	AEMET
Justine	26 de enero de 2021	IPMA
Karim	17 de febrero de 2021	AEMET
Lola	21 de abril de 2021	IPMA
Aurore	20 de octubre de 2021	Météo-France
Blas	5 de noviembre de 2021	AEMET

Tabla 2.7. Borrascas con gran impacto nombradas por el grupo suroeste europeo de EUMETNET en 2021.

En cuanto a los fenómenos adversos asociados a rachas intensas de viento y temporal marítimo provocado por las borrascas con gran impacto, destacamos los siguientes¹:

- **Borrasca Filomena:** el viento no fue el factor más sobresaliente de esta borrasca, pese a lo cual dio lugar a rachas huracanadas en zonas elevadas de Canarias, donde destacan los 128 km/h en el alto Igualero (Vallehermoso, La Gomera) y 124 km/h en Izaña (Tenerife), ambas rachas alcanzadas el día 7 de enero. También son destacables los 108 km/h registrados en el aeropuerto de La Palma el día 6. El temporal marítimo que acompañó a los vientos generó oleaje de 4-5 m.
- **Borrasca Gaetan:** tuvo un ciclo de vida breve, pero suficiente como para originar rachas de viento huracanadas en zonas altas del tercio norte peninsular y en la costa occidental gallega. Destacaron los 147 km/h registrados en Valdezcaray (La Rioja), 136 km/h en Cabrales (Asturias), 125 km/h en Fisterra (A Coruña) y 122 km/h en Alto Campoo (Cantabria), todas ellas el 20 de enero.
- **Borrasca Hortense:** también tuvo un ciclo de vida muy corto. Se formó, al igual que su predecesora, dentro de un intenso flujo de viento zonal que circulaba sobre el Atlántico de oeste a este. Los vientos más intensos se registraron durante la noche del día 21 de enero y buena parte del día 22, y la principal característica de esta borrasca fue la formación de una intensa y duradera línea de turbonada que durante la madrugada y primeras horas de la mañana del 22 de enero atravesó el nordeste peninsular y Baleares, con rachas que llegaron a alcanzar los 179 km/h en Panticosa (Huesca). Se registraron otras rachas huracanadas (superiores a 120 km/h) en numerosos puntos de la Península y Baleares, destacando los 144 km/h de Sierra de Alfabia (Baleares), 136 km/h de Valdezcaray (La Rioja) y 132 km/h en Estaca de Bares (A Coruña). También hubo rachas huracanadas en zonas llanas, como Villadepera (Zamora) o Andorra (Teruel), con 124 y 123 km/h respectivamente, y muy destacables fueron también los 130 km/h registrados en el aeropuerto de Palma de Mallorca, que constituyen una efeméride desde 1975.

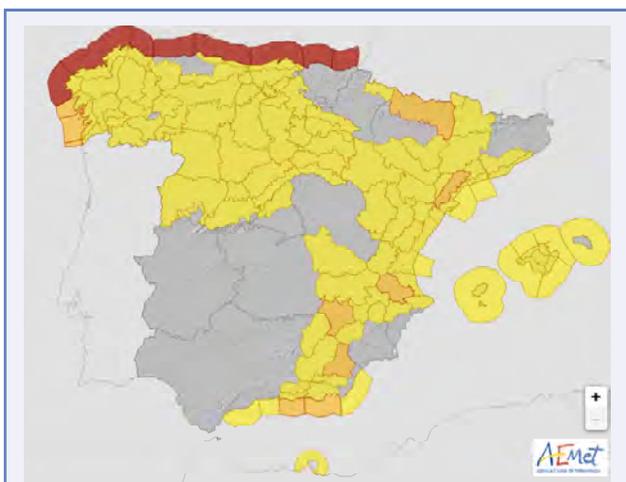
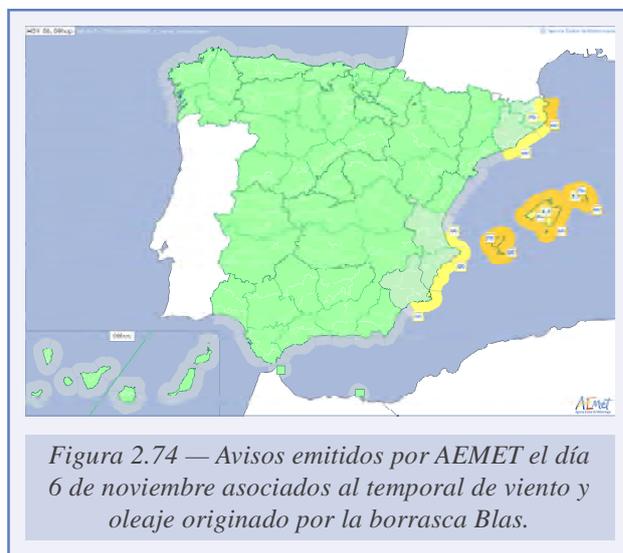


Figura 2.73 — Avisos emitidos el día 29 de enero asociados al temporal provocado por la borrasca Justine, entre los que destaca el nivel rojo (riesgo extremo) en el Cantábrico y costa atlántica del noroeste de Galicia por fenómenos costeros.

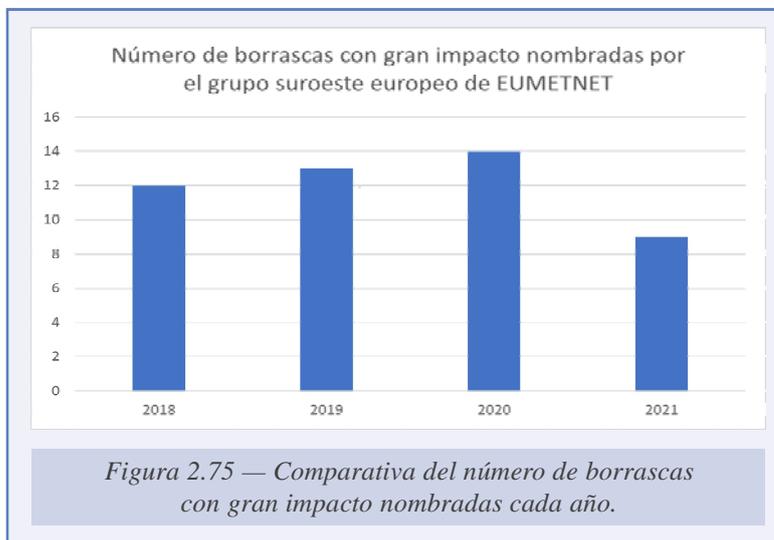
- **Borrasca Ignacio:** esta depresión, formada al igual que las dos anteriores en el seno de un intenso flujo zonal, todavía estaba en una fase inicial a su paso por el norte de España, donde dio lugar a rachas muy fuertes, entre las que destacan los 118 km/h de Estaca de Bares (A Coruña) el 24 de enero. En Baleares, se llegaron a medir 117 km/h, concretamente en Sierra de Alfabia, el día 23.
- **Borrasca Justine:** afectó a España entre los días 29 y 31 de enero. Generó un temporal marítimo extremo en el Cantábrico, lo que obligó a activar avisos de nivel rojo por fenómenos costeros. De hecho, las olas alcanzaron 8 a 9 m, llegándose a superar localmente los 10 m de altura significativa de oleaje. Las rachas de viento fueron muy fuertes en gran parte de la meseta norte y este de la Península, destacando los 156 km/h medidos en Machichaco (Bizkaia) el día 31 de enero y los 139 km/h en Estaca de Bares (A Coruña) el día 30.

¹ Se puede encontrar información detallada sobre las borrascas con gran impacto nombradas por el grupo suroeste europeo en la página web de AEMET: <https://www.aemet.es/es/conocerlas/borrascas/>

- **Borrasca Karim:** afectó a España a mediados de febrero, originando rachas de viento muy fuertes en la mitad norte peninsular, e incluso huracanadas en puntos de Galicia y Asturias. Sobresalen los 136 km/h de Chandrexa de Queixa (Ourense), 133 km/h en Cabrales (Asturias), 129 en Pajares-Valgrande (Asturias) y 123 en Velilla del Río Carrión (Palencia), todas ellas el día 20 de febrero.
- **Borrasca Lola:** los vientos más intensos asociados a esta borrasca no afectaron a España, cuyo ciclo de vida se desarrolló a finales de abril de 2021. Se registraron algunas rachas muy fuertes, entre las que destacan los 96 km/h medidos en el cabo de Gata (Almería) el día 24.
- **Borrasca Aurore:** fue la primera de la temporada 2021-22 y se desarrolló entre el 20 y 21 de octubre. No provocó impactos significativos en España, aunque algunas rachas de viento alcanzaron intensidad muy fuerte en el extremo norte peninsular. Se superaron los 100 km/h en Estaca de Bares (A Coruña), con 113 km/h y en Cabo Busto (Asturias), con 103 km/h.
- **Borrasca Blas:** tuvo un largo ciclo de vida que se desarrolló entre el 6 y 18 de noviembre. Afectó fundamentalmente a Baleares, pero también originó rachas intensas de viento y temporal marítimo en la costa mediterránea peninsular. El día 6 se midieron en la boya de Mahón alturas significativas de oleaje de 6 m, y las olas más altas superaron los 10.6 m. En cuanto al viento, no se alcanzaron rachas huracanadas, pero sí intensidades muy fuertes, entre las que destacan los 100 km/h de Puig d'Alfabis (Mallorca) el día 7 y los 95 km/h del aeropuerto de Menorca el día 6.



El grupo suroeste europeo comenzó a nombrar borrascas en diciembre de 2017, por lo que el primer año natural completo fue 2018. De los cuatro años naturales en los que ha habido nombramiento de borrascas con gran impacto, 2021 fue el de menor número: nueve borrascas, frente a las catorce de 2020, trece de 2019 y doce de 2018. Esta cantidad inferior estuvo condicionada por el bajo número de borrascas nombradas entre septiembre y diciembre de 2021 con respecto a los años anteriores: tan solo dos, frente a los cinco de 2020 y seis de 2019 y 2018 en el mismo periodo. Esta ausencia de borrascas de gran impacto sobre nuestro territorio durante el trimestre otoñal, y por tanto de temporales importantes de viento, coincide con el hecho de que el año 2021 fue el que menor velocidad media de viento registró para el conjunto del continente (COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE, 2021).



3. ANÁLISIS ESTACIONALES PARA ESPAÑA Y EL SECTOR ATLÁNTICO NORTE - EUROPA

Los episodios de tiempo adverso y los comportamientos climáticos extremos de meses o de estaciones son los aspectos del tiempo y el clima que tienen un mayor impacto en la sociedad y, en consecuencia, cada vez hay más interés por conocer la causa de estos extremos, su relación con el cambio climático y su predecibilidad que ayude a mitigar sus impactos.

En los extratropicos, los extremos de larga duración suelen estar asociados con la persistencia de ciertos regímenes de tiempo, a los que también suelen estar asociados los fenómenos extremos instantáneos. La predictibilidad de la persistencia de los regímenes de tiempo está basada en el conocimiento de los forzamientos externos que puedan condicionar el comportamiento de la corriente en chorro en latitudes medias, como pueden ser la intensidad del vórtice polar estratosférico (VPE), la temperatura superficial del agua del mar (TSM), la extensión del hielo marino, el estado del suelo, o los forzamientos tropicales (ENSO, MJO, ...). Pero determinar la influencia de cualquier forzamiento externo en la corriente en chorro es muy complejo debido a la fuerte inestabilidad propia del chorro que tiende a enmascarar la señal de los forzamientos en el ruido de la variabilidad natural.

En el año 2021, uno de los siete más cálidos registrados del globo, los extremos climáticos afectaron a todas las regiones del mundo: episodios de tiempo extremo invernal en el hemisferio norte (HN), eventos de calor extremo sin precedentes, fuertes lluvias e inundaciones, sequías, incendios forestales catastróficos e intensas tormentas tropicales. En España destacaron dos eventos históricos, las nevadas de enero asociadas a la borrasca Filomena y la excepcional ola de calor de agosto. En este capítulo nos detendremos principalmente en estos dos eventos.

3.1. FORZAMIENTOS EXTERNOS

Entre los forzamientos que han influido en el comportamiento del clima estacional en el HN y en el sector Atlántico Norte – Europa (ANE) durante 2021 cabe destacar:

- 1) Un vórtice polar estratosférico (VPE) 2020-21 muy débil en enero tras un calentamiento repentino estratosférico (CRE; ver anexo) que tuvo lugar a principios del año (figura 3.6), que favoreció una fase negativa de la Oscilación Ártica (AO) en la troposfera en enero y parte de febrero. Por el contrario, el VPE se mantuvo muy intenso en el otoño y principios del invierno 2021-22 favoreciendo una AO positiva.
- 2) A lo largo del año la Oscilación Casi Bienal (QBO) pasó de fase oeste (W-QBO) a fase este (E-QBO) (figura 3.1). Hay una evidencia creciente de que la QBO afecta a las teleconexiones entre el vórtice polar ártico y forzamientos en la superficie: anomalías en la temperatura del agua del mar, variaciones en la extensión del hielo marino ártico y de la superficie nevada en Eurasia. La fase W-QBO mitiga las teleconexiones, favoreciendo un vórtice polar fuerte, mientras lo contrario ocurre con la fase E-QBO (ANSTEY y SHEPHERD, 2014; LABE *et al.*, 2019). Sin embargo, los forzamientos en la superficie del Ártico en otoño de 2021 fueron bastante moderados para debilitar el VPE en el comienzo del invierno 2021-22, por lo que también el efecto de la E-QBO sobre las telecomunicaciones pasó desapercibido.

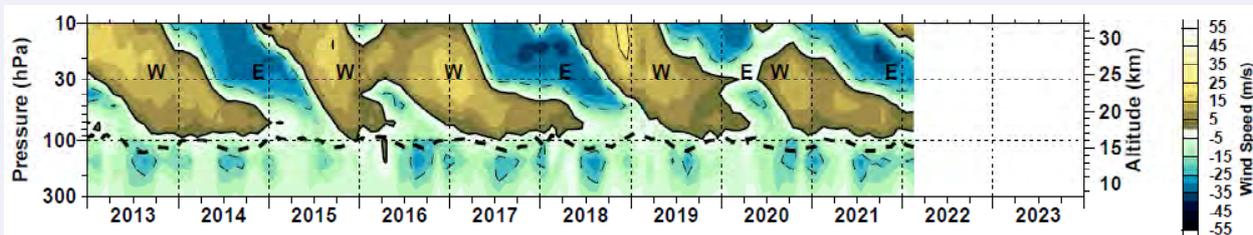
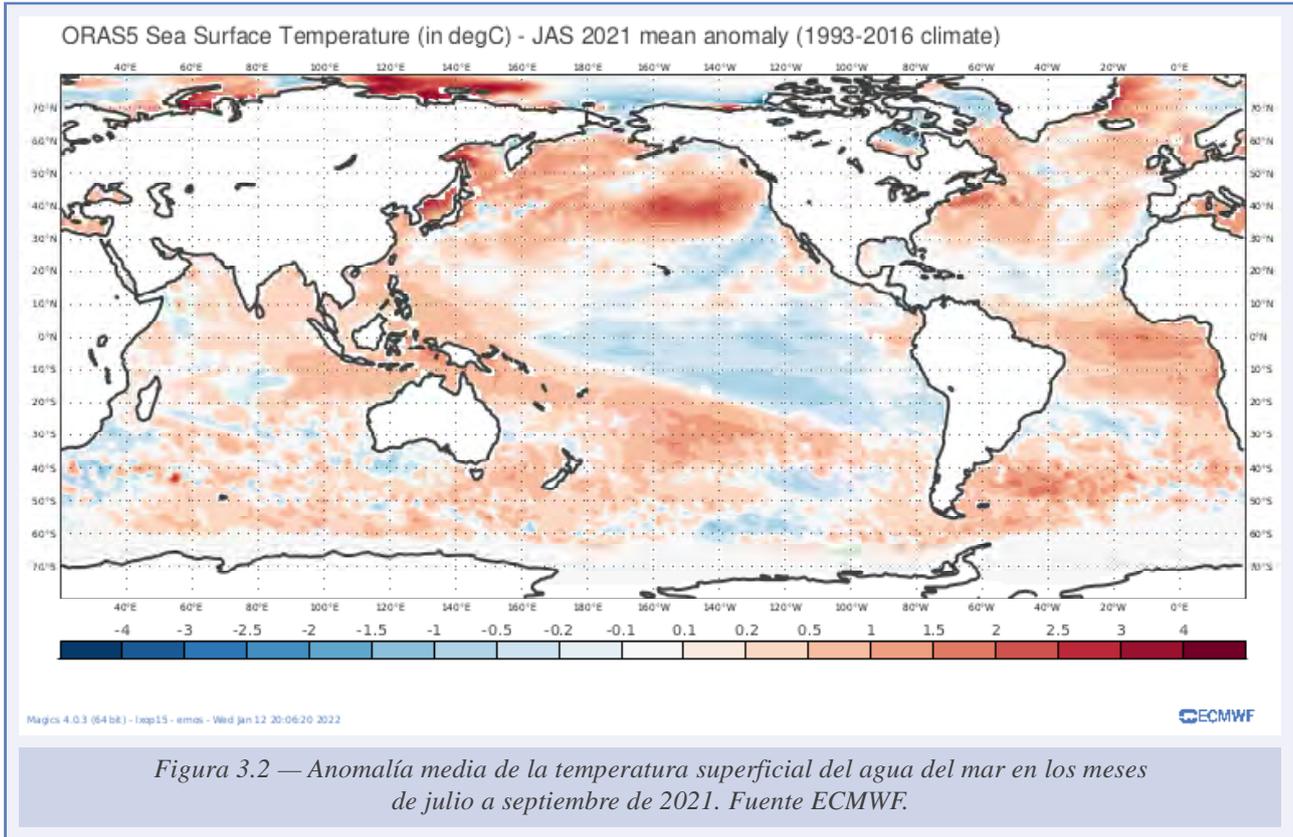


Figura 3.1 — Sección tiempo-altura (2013-2021) de los vientos medios mensuales (m/s) en la estación ecuatorial de Singapur; los estes están sombreados en azul. Fuente: NASA.

- 3) La TSM media anual en el Pacífico ecuatorial central y oriental fue inferior a la media, característica de la fase negativa del ENSO: La Niña (figura 3.2). Los distintos índices El Niño mostraron predominio de la fase negativa todo el año. En la figura 3.3 se muestra la evolución del índice NIÑO3.4 mensual. El ENSO de este verano fue de *continuidad* (continuidad respecto del ENSO del invierno 2020-21), lo que lo diferencia de la mayoría de los veranos del siglo XXI que habían visto ENSO de tipo *emergente* (nuevos eventos emergentes en la primavera, como el de 2020). Las consecuencias del tipo de ENSO son grandes para el monzón de verano de la India: un ENSO *emergente* es un gran predictor de la intensidad del monzón: La Niña emergente está asociada a precipitaciones más intensas, mientras El Niño emergente a precipitaciones monzónicas relativamente débiles. Un ENSO de *continuidad* produce anomalías de la TSM en verano en los trópicos atlánticos que afectan al monzón asiático amortiguando la relación ENSO *emergente*-monzón (ver por ejemplo: YANG y HUANG, 2021).



4) La Niña induce una anomalía positiva de la TSM en la zona ecuatorial atlántica debido a que, en esta zona, la circulación de Walker atenúa la fuerza de los alisios. Pero debido a que la Niña de verano de 2021 fue «de continuidad», las anomalías positivas ecuatoriales de la TSM presentaron máximos en el sudeste de la zona ecuatorial atlántica (figura 3.2), por lo que el Modo Atlántico Ecuatorial, o Niño Atlántico, estuvo en fase positiva.

El Niño Atlántico normalmente aparece en el verano boreal y genera convección profunda con influencia, mediante un mecanismo tipo Gill-Matsuno (KUCHARSKI *et al.*, 2009), en la intensidad de las lluvias de los monzones de África y de la India. En concreto, contrarresta la intensidad de las lluvias monzónicas en la India que suelen acompañar a la fase negativa del ENSO, y que tienen importantes efectos en la región mediterránea vía circulación monzón-desierto (RODWELL y HOSKINS, 2004).

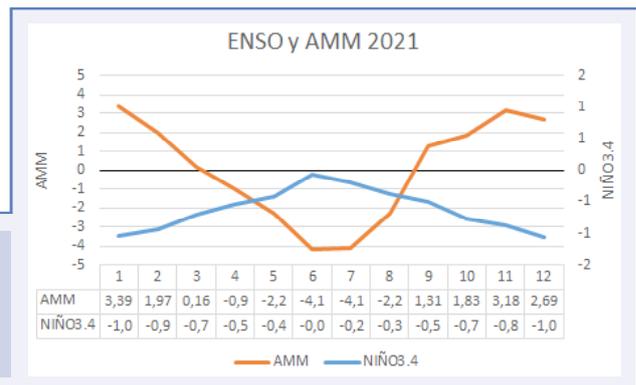


Figura 3.3 — Series temporales de los valores medios mensuales del índice AMM (línea naranja) y del índice El Niño 3.4 en 2021. Fuentes: NOAA, y del índice AMM.

Por otra parte, La Niña de continuidad indujo en el verano 2021 anomalías negativas de la TSM entre 10° y 20° N, y un gradiente meridional interhemisférico negativo de TSM sobre el Atlántico tropical. Este gradiente es recogido por el Modo Meridional Atlántico Sur (AMM, CHIANG y VIMONT, 2004), cuyos índices presentaron valores medios mensuales negativos desde abril a agosto y positivos el resto de los meses (figura 3.3).

Ciclones tropicales atlánticos

La actividad de los ciclones tropicales (CT) del Atlántico en la temporada de huracanes está influenciada por la variabilidad interanual de la TSM del Pacífico tropical, caracterizada por el ENSO (correlacionado con la cizalladura vertical del viento sobre el Atlántico tropical y las temperaturas de niveles altos de la troposfera), así como la variabilidad del gradiente interhemisférico en la TSM del Atlántico tropical caracterizado por el AMM (altamente correlacionado con la TSM, la cizalladura, la vorticidad y la convergencia en niveles bajos, y la presión a nivel del mar (ver VIMONT y KOSSIN, 2007, y también el anexo D). Las variaciones interanuales y decadales de ENSO y AMM brindan una previsibilidad sustancial del ambiente tropical y, en consecuencia, se utilizan con frecuencia métricas estrechamente relacionadas con ENSO y AMM como predictores de la actividad estacional de los CT. Sin embargo, estos impulsores a veces son insuficientes para dar cuenta de ciertos cambios intraestacionales.

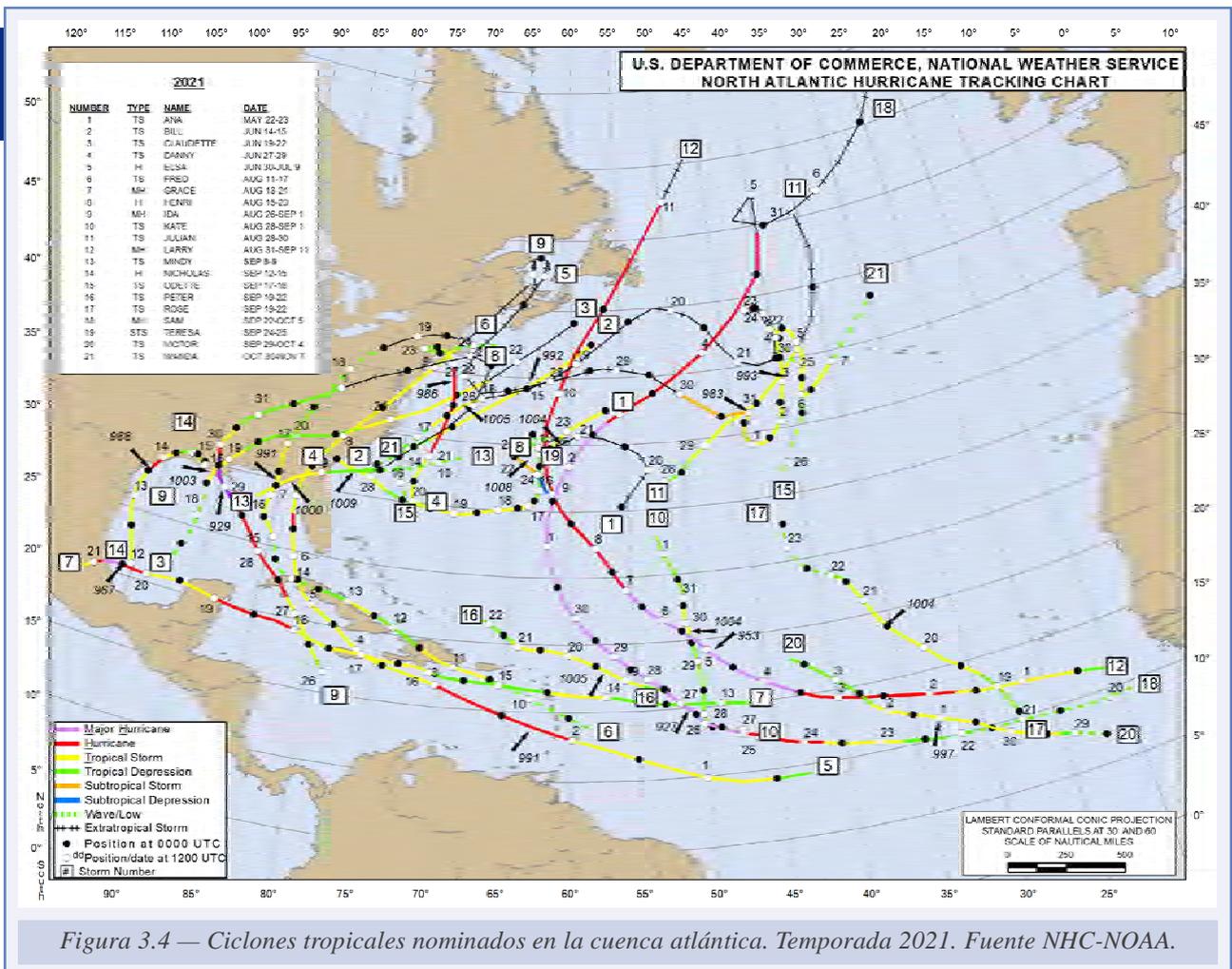


Figura 3.4 — Ciclones tropicales nominados en la cuenca atlántica. Temporada 2021. Fuente NHC-NOAA.

En el verano de 2021, La Niña fue favorable a una actividad alta de los CT, mientras que la fase AMM negativa (anomalías de la TSM frías en el Atlántico norte tropical y cálidas en el Atlántico sur tropical) en buena parte de la temporada de huracanes era a una disminución de la actividad.

La temporada de huracanes del Atlántico de 2021 fue bastante activa; terminó oficialmente el 30 de noviembre con 21 CT con nombre (figura 3.4) (dos de ellos subtropicales); tres alcanzaron la categoría de huracanes y cuatro la de huracanes mayores¹. En comparación con la temporada de 2020, el número de CT fue bastante inferior (con 30 nominados en 2020) y ninguno afectó a la zona entre la Península y las islas de la Macaronesia. La frecuencia de CT fue relativamente baja (4 CT) en junio y julio, meses con AMM muy negativo; alta desde la segunda decena de agosto hasta finales de septiembre, periodo en el que el AMM cambió a fase positiva mientras el índice NIÑO3.4 decreció hasta -0.5 °C.

¹ Los huracanes mayores son de categoría 3 y superiores en la escala de Saffir-Simpson.

3.2. ENERO-FEBRERO

El calentamiento repentino estratosférico y la gran nevada de la borrasca Filomena

Lo más destacable del invierno 2020-21 en España fueron las históricas nevadas de los días 8 y 9 de enero en la Península en las cuales tuvo un papel determinante el gran calentamiento repentino estratosférico (CRE; ver Anexo D) que tuvo lugar a finales de diciembre y principios de enero.

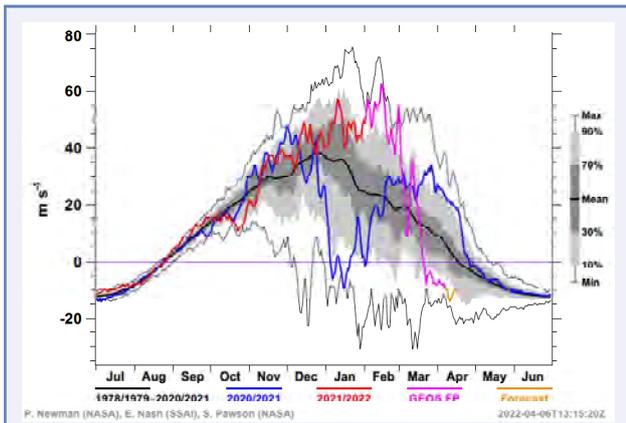


Figura 3.5 — Componente zonal del viento a 60° N y 10 hPa para las temporadas 2020-21 (azul), 2021-22 (rojo) y climatología (en tonos de grises, media, máximo, mínimo, y percentiles 10, 30, 70 y 90), obtenidas de datos de los reanálisis MERRA. Los últimos datos de 2021-22 (en magenta) son del sistema «Forward Prossesing» de GEOS. Fuente: NASA.

Los vientos medios zonales a 60° N son un buen *proxy* de la intensidad del VPE. Durante el CRE la circulación estratosférica del oeste del hemisferio norte, estos vientos que superaron los 45 m/s del oeste en diciembre, fueron reemplazados en cuestión de días por vientos débiles del este (línea azul de la figura 3.5), en lo que fue un evento de gran CRE. Este cambio fue acompañado de un calentamiento en los polos de unos 55 °C a 10 hPa.

El CRE tuvo un impacto descendente evidente, como ocurre en alrededor de dos tercios de los eventos de CRE (ver BALDWIN *et al.*, 2021). Este impacto se manifiesta en la aparición de una fase negativa persistente de la Oscilación Ártica (AO) o de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) en la troposfera que está muy ligada al aumento de la presión sobre el casquete polar y a las irrupciones de aire ártico en las latitudes medias. La subida de presión suele más acusada en la superficie polar debido a que, tras el calentamiento, el flujo en las capas próximas a la superficie tiende a acudir hacia el polo.

do a que, tras el calentamiento, el flujo en las capas próximas a la superficie tiende a acudir hacia el polo.

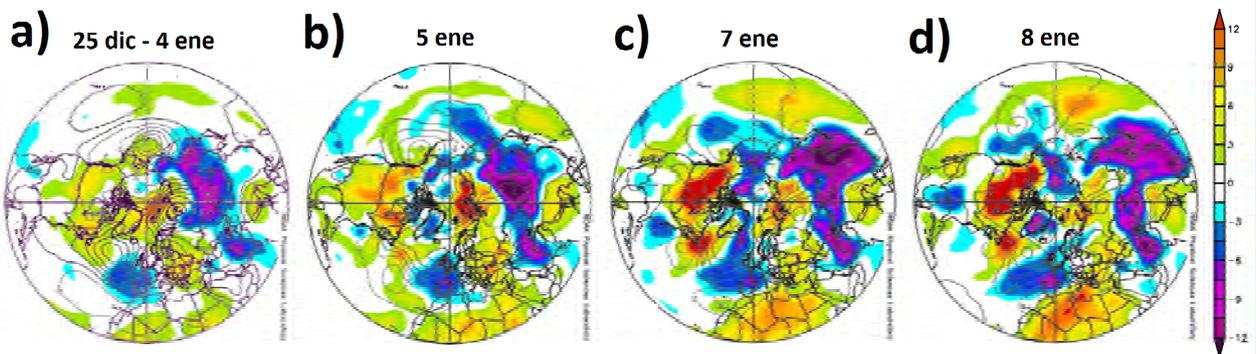


Figura 3.6 — Anomalía de la presión a nivel del mar (líneas de contornos) y anomalía de la temperatura en 925 hPa, a) 25 de diciembre a 4 de enero; b) 5 de enero; c) 7 de enero; d) 8 de enero. (Intervalo entre contornos 10 hPa salvo para a) que es 5 hPa). Fuente: NOAA.

En este caso sobre el Atlántico, tras el CRE, se produjo un aumento de presión en superficie sobre Groenlandia los días 6 y 7 que acabó causando la irrupción fría ártica que se muestra como anomalía de la temperatura del aire en 925 hPa (azul) el 7 de enero alcanzando las bajas presiones subtropicales asociadas a la borrasca subtropical Filomena (figura 3.6c).

En las guías de diagnóstico de niveles bajos del Sistema Nacional de Predicción de AEMET, para las 12 UTC de los días 6 a 8 enero (figura 3.7), se distingue: 1) sobre el Atlántico, al este del anticiclón de bloqueo situado al SE de Groenlandia, la nubosidad cumuliforme asociada a la irrupción de aire frío que desde el Ártico se expandía hacia el sur, sobrepasando las islas Canarias el día 8; 2) un proceso de frontogénesis que se evidenciaba en la formación de un tren de nubosidad de tipo alto corriente abajo de Filomena (figura 3.7b), con una nube de *hoja baroclina* sobre la Península, posiblemente debida a una amplificación local de la baroclinicidad relacionada con la gran altitud de la meseta Central (ver el gradiente de las anomalías de temperatura en 925 hPa entre el norte de la Península y el norte de África en la figura 3.6c); 3) el día 8 Filomena se profundiza al oeste de Marruecos, presentando frentes bien formados, creciendo la intensidad de un frente cálido que a las 12 UTC se encontraba sobre el mar de Alborán, propios de una borrasca de latitudes medias. Filomena había seguido una transformación similar a la transformación extratropical que sufren los ciclones tropicales cuando se desplazan a latitudes medias. El mismo día 8, la borrasca Filomena alcanzó la Península intensificándose mientras se aumentaba el gradiente de temperatura norte-sur en niveles bajos. Más detalles de esta transformación se pueden encontrar en (SÁNCHEZ-LAULHÉ y ROA, 2021).

En la figura 3.8 arriba, en la que está representada la anomalía de la altura de geopotencial normalizada para la estratosfera y la troposfera en el casquete polar, se muestra la relación entre la propagación hacia la troposfera inferior del calentamiento estratosférico, marcado por la presencia de un mínimo de la altura del geopotencial (señalado en la línea a trazos), y la nevada de Filomena. No fue el único evento de tiempo extremo invernal asociado al CRE; dos impactos descendentes posteriores con amplificación en superficie estuvieron ligados a nevadas y olas de frío en EE. UU. y Europa.

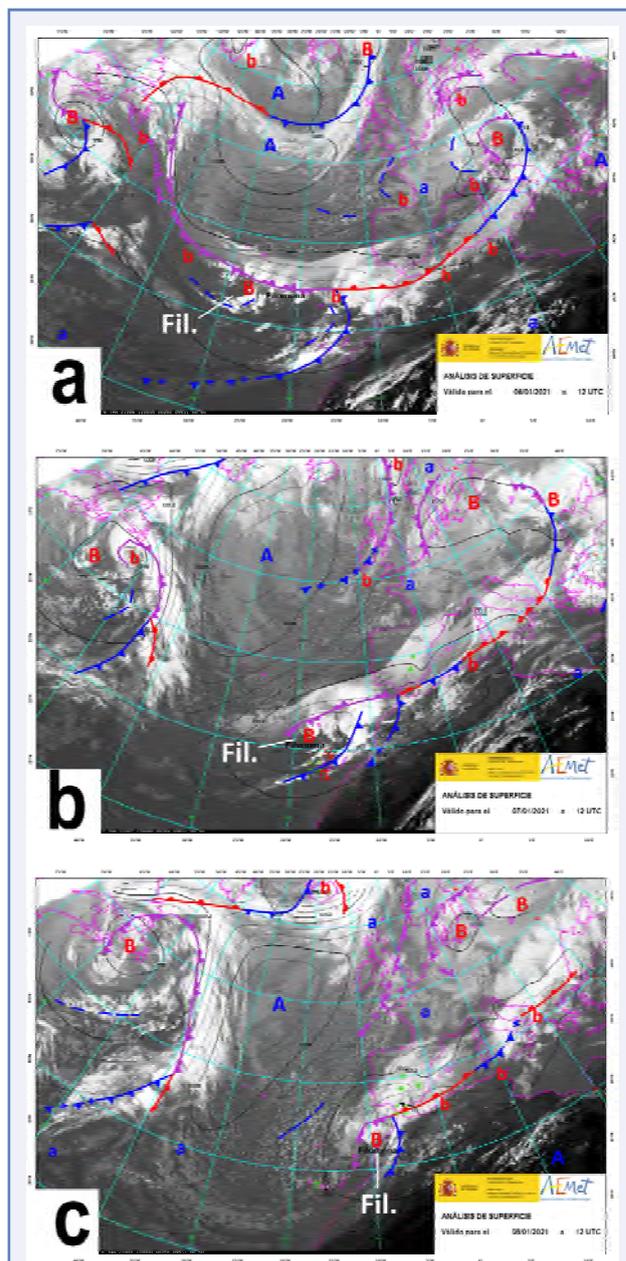


Figura 3.7 — Guías de diagnóstico del Sistema Nacional de Predicción de AEMET de las 12 UTC en superficie con el campo de presión a nivel del mar y los frentes sobre la imagen infrarroja 10.8 μm de Meteosat.

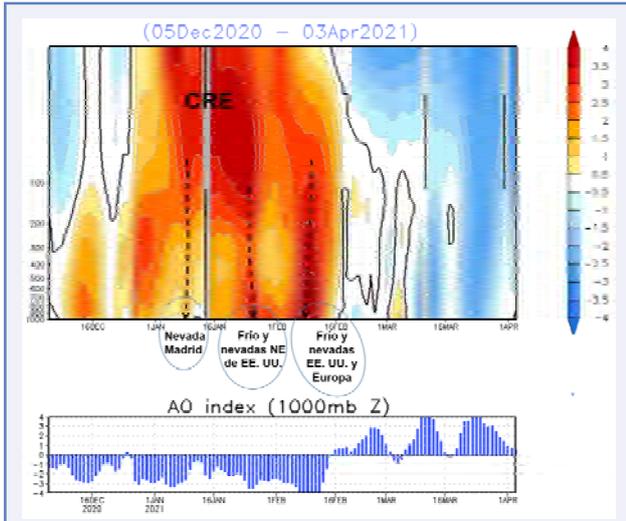


Figura 3.8 — Arriba: anomalías diarias de altura geopotencial normalizadas por sus desviaciones estándar para cada nivel en el periodo 1979-2000, promediadas sobre el casquete polar; hacia el polo de 65° N. Los colores azules (rojos) representan un vórtice polar fuerte (débil). Las líneas negras continuas muestran las anomalías cero. Abajo: índice AO a 1000 hPa. Fuente: CPC-NOAA.

Un factor que afecta la aparición de un impacto descendente inmediato es el índice AO troposférico existente en el momento del CRE. Según DOMEISEN *et al.* (2020), si la AO en superficie ya es negativa durante el calentamiento habrá un acoplamiento vertical con la AO estratosférica negativa inmediato, pero de corta duración. Por el contrario, si la AO troposférica es fuertemente positiva antes del CRE, el acoplamiento vertical es menos probable, al menos en el inicio del CRE. Lo mismo ocurre con la NAO: si hay una NAO negativa en el momento del CRE, el acoplamiento descendente es instantáneo, pero de corta duración, mientras que, en los demás casos, con frecuencia la NAO negativa aparece después del evento CRE. En este caso, la AO era negativa antes del CRE (figura 3.8 abajo), por tanto, cabría esperar un acoplamiento inicial breve.

Como consecuencia del CRE, los campos medios de altura de geopotencial en 300 hPa (Z300) y de presión a nivel del mar (PNM) de enero mostraron

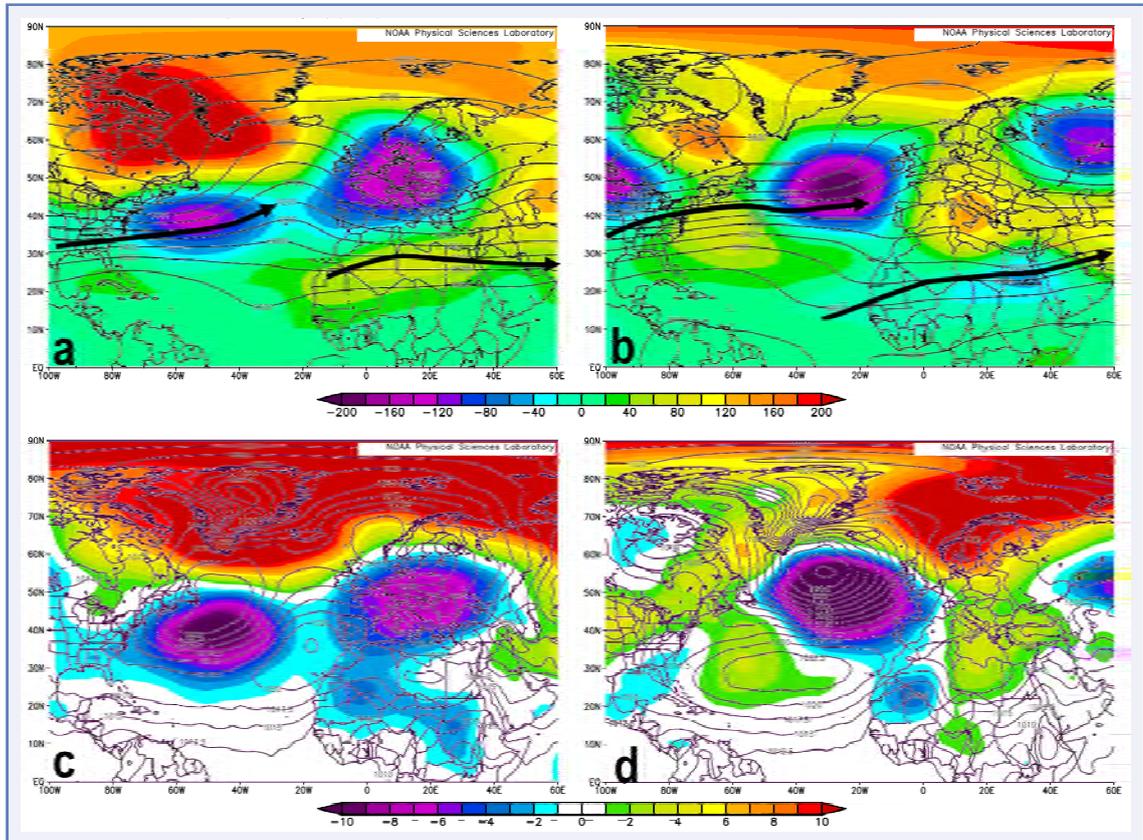


Figura 3.9 — Mapas medios de: la altura del geopotencial en 300 hPa (líneas) y sus anomalías (color) en m: a) enero, b) febrero; presión a nivel del mar (líneas) y sus anomalías (color) en hPa: c) enero, d) febrero. Fuente NOAA/ESRL. La posición de los chorros está marcada con flechas.

anomalías positivas en el casquete ártico y en el Atlántico norte subpolar, y predominaron las anomalías negativas en las latitudes medias (figura 3.9 a, c), lo cual indica índices AO (figura 3.8 abajo) y NAO positivos. Especialmente altas fueron las anomalías positivas en superficie, que fueron superiores a + 10 hPa (amplificación superficial). Casi toda Europa estuvo bajo las anomalías negativas que se tradujo en un mes más frío de lo normal en el oeste y la mayor parte del norte de Europa, y en cuanto a precipitaciones, más húmedo de lo normal en la mayor parte de Europa occidental. En España el mes de enero fue frío, el cuarto más frío del siglo XXI, y húmedo en cuanto a precipitaciones.

No obstante, hubo un marcado episodio cálido en la Península durante la última decena de enero y la primera semana de febrero en el que el sudoeste de Europa quedó bajo la masa tropical asociada a una amplia dorsal (figura 3.10), bastante estacionaria. Esto es consecuencia de la existencia de un VPE débil que tiene como efecto una gran amplitud de la ondulación, ralentización y desplazamiento hacia el ecuador de la corriente en chorro, que hace que las perturbaciones sinópticas tengan pequeña velocidad de propagación y provoquen eventos extremos cálidos y fríos invernales coincidentes en el tiempo. En este caso el episodio cálido de la Península coincidió con eventos fríos extremos en Norteamérica y Europa (figura 3.8).

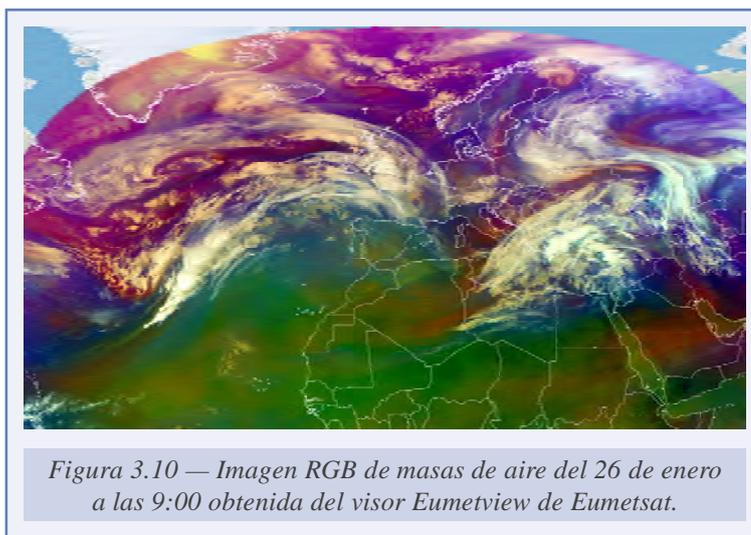
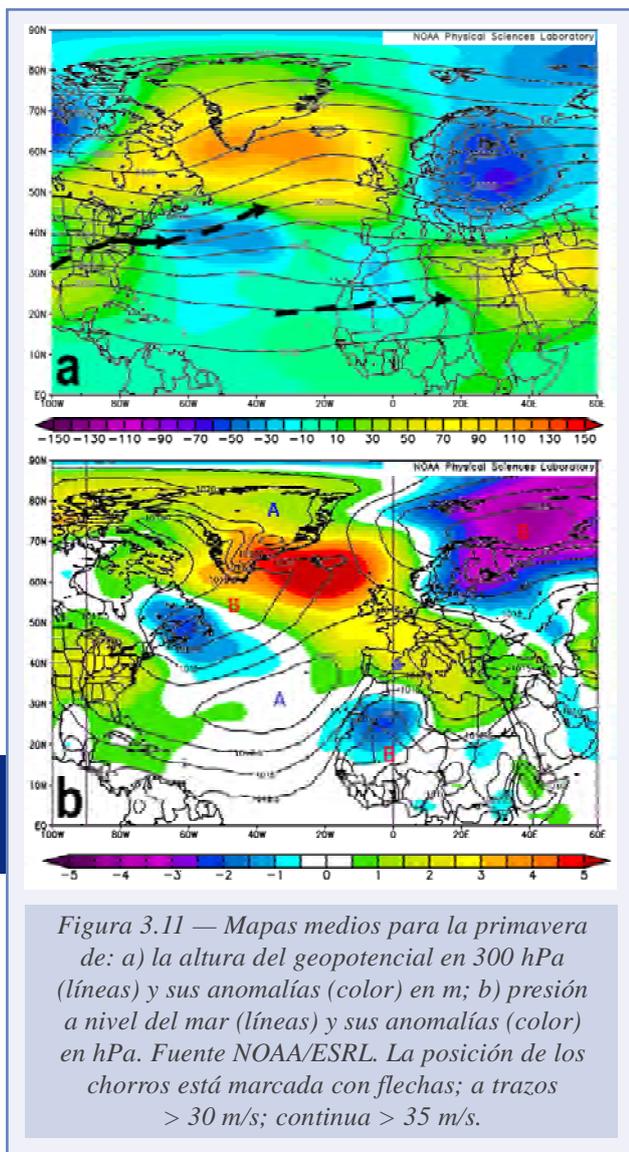


Figura 3.10 — Imagen RGB de masas de aire del 26 de enero a las 9:00 obtenida del visor Eumetview de Eumetsat.

El calentamiento anómalo desapareció y los oestes estratosféricos se recuperaron a principios de febrero (figura 3.5) aunque los efectos en la troposfera duraron hasta mitad de mes, manteniéndose la AO negativa y provocando olas de frío y nevadas en Norteamérica y Europa (figura 3.8). En la segunda quincena de febrero el VPE se hizo anómalamente intenso, situación que suele producirse al desaparecer un calentamiento anómalo por la cizalladura vertical negativa del viento en las capas bajas de la atmósfera que impide la propagación vertical de las ondas de Rossby de la troposfera hacia la estratosfera. En esta segunda parte del mes la AO se volvió positiva, aunque la NAO continuó siendo negativa. Las anomalías medias positivas de Z300 y de la PNM fueron dominantes en Europa y bloquearon el paso de borrascas y sus frentes, que solo afectaron al oeste de la península ibérica, y oeste de Francia y de las islas británicas. En conjunto el mes fue sustancialmente más cálido que el promedio de 1991-2020 en el sur de Europa, pero más frío que el promedio en el norte, especialmente en el noroeste de Rusia. En España muy cálido, el tercer febrero más cálido desde el comienzo de la serie en 1961. Sin embargo, las temperaturas en partes de Europa variaron sustancialmente durante el mes por el cambio de patrón predominante de circulación atmosférica. Las precipitaciones fueron más altas de la media en gran parte de Europa, particularmente en el oeste de la península ibérica, la mayor parte de Irlanda y el Reino Unido, y en una franja desde los Países Bajos hasta Europa del Este. Por el contrario, se observaron precipitaciones por debajo del promedio en algunas regiones de Europa, con las mayores anomalías en el suroeste de Noruega, extendiéndose hasta el sur del Báltico, sobre el arco alpino y Turquía.

3.3. PRIMAVERA



El VPE continuó muy fuerte (figura 3.5) y la AO troposférica siguió en fase positiva (figura 3.8) hasta que se produjo el calentamiento final estratosférico (CFE; ver anexo D) en abril. El CFE pudo haber tenido un carácter dinámico (similar a un CRE) que se plasmó en los mapas medios de la primavera (figura 3.11) en una anomalía positiva de la altura de geopotencial afectando a Groenlandia al norte de una anomalía negativa en latitudes medias (bloqueo de Groenlandia) que indica una propagación hacia la troposfera del CFE. Esta situación de bloqueo es más evidente en el mapa medio Z300 de abril (figura 3.13b) donde además se observa una anomalía positiva Z300 sobre los Urales que es indicativo de transmisión de energía ondulatoria de la troposfera hacia estratosfera y por tanto del carácter dinámico del CFE. En mayo, aunque el VPE había desaparecido, continuó existiendo un bloqueo de Groenlandia desplazado hacia latitudes más altas (figura 3.13c). El bloqueo estuvo posiblemente sostenido por un calentamiento persistente en las capas más bajas de la estratosfera procedente de la troposfera dada la persistencia de la anomalía Z300 en los Urales. La propagación de las ondas de Rossby hacia la estratosfera media estaría impedida por la cizalladura vertical del viento negativa debido a la disipación del VPE.

La temperatura media en marzo de Europa en conjunto (y de España) estuvo próxima a la media del periodo 1990-2020, que se explica por la distribución de anomalías Z300 en el continente, positivas en el noroeste y negativas en el sudeste (figura 3.13a).

El bloqueo de Groenlandia hizo que los meses de abril y mayo fueran más fríos de lo normal en Europa. Particularmente abril, fue el más frío en Europa desde el del año 2003. En este las anomalías Z300 solo afectaron marginalmente a la Península, siendo en conjunto el mes de abril normal en cuanto a temperaturas. Mientras, en mayo, con el desplazamiento hacia el polo del bloqueo de Groenlandia, sobre la Península se situó una anomalía positiva de geopotenciales (figura 3.13c) y fuera un mayo cálido, excepto en su parte más septentrional.

Para el conjunto de la primavera, Europa central y oriental estuvo bajo anomalías Z300 negativas y un flujo anómalo medio de componente norte (figura 3.11a), por lo que en promedio la temperatura para Europa fue 0.45 °C por debajo de la media 1991-2020; la cuarta primavera más fría desde 1998. La Península tuvo en conjunto un carácter cálido, pero debido al flujo de levante predominante en niveles bajos, fue normal o frío en la mayor parte de su tercio oriental y Baleares, y la cornisa cantábrica, y cálida o muy cálida en el resto de la España peninsular (figura 3.12).

En cuanto a la precipitación, la primavera fue más seca de la media en el sur de Europa y oeste de Francia, siendo muy seca en la España peninsular en conjunto, salvo en el SE donde fue húmeda o muy húmeda. En la mayor parte de Europa central y oriental, la primavera fue más húmeda que la media 1991-2020, consecuencia del predominio del régimen de tiempo NAO+ en mayo (figura 3.13c), con la reconstrucción de la corriente en chorro en las latitudes medias del Atlántico oriental y Europa.

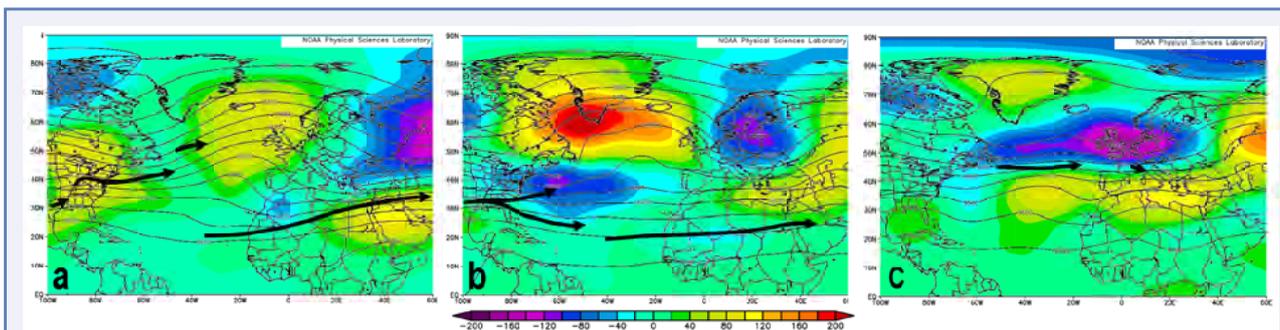
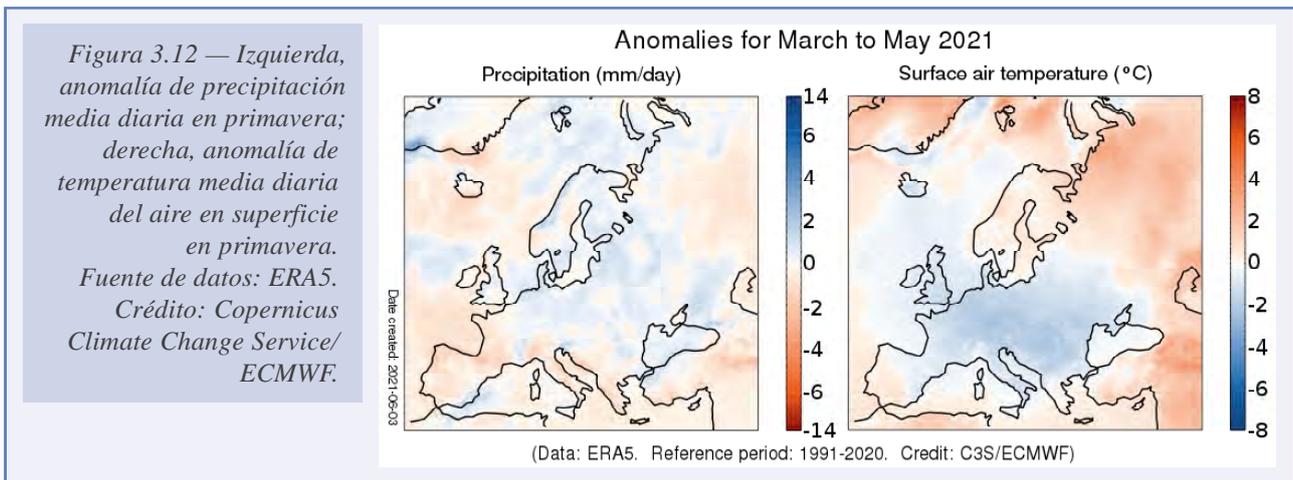
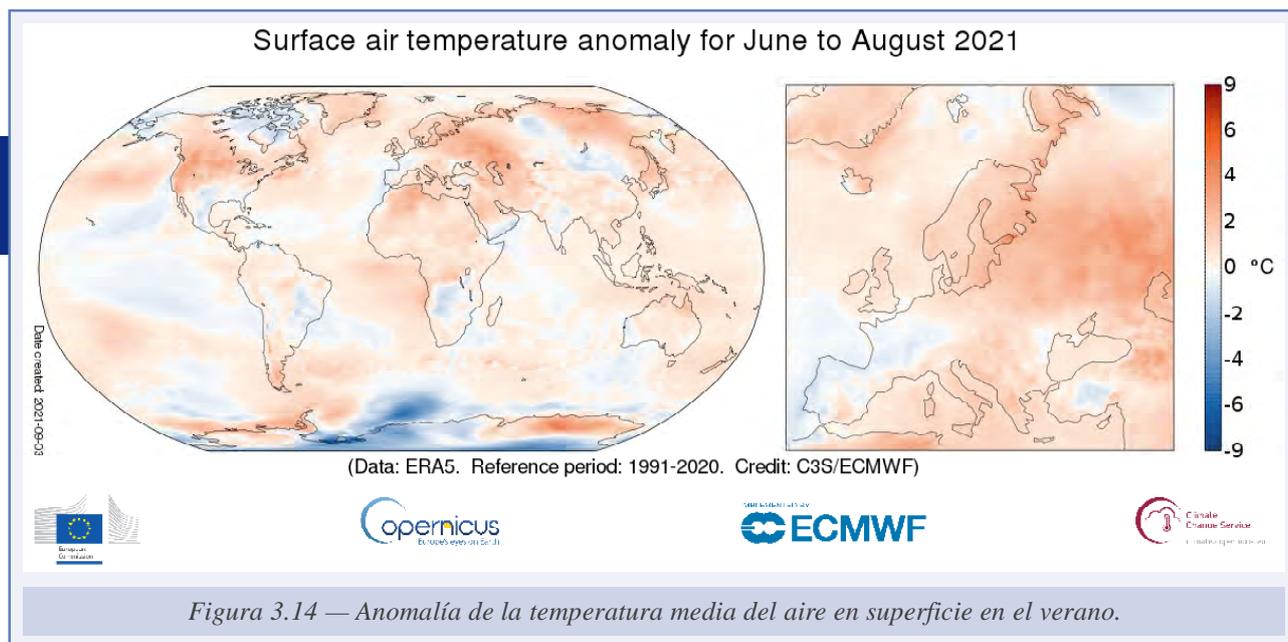


Figura 3.13 — Mapas medios mensuales para la primavera de la altura del geopotencial en 300 hPa (líneas) y sus anomalías (color) en m: a) marzo; b) abril; c) mayo. Fuente NOAA/ESRL. La posición de los chorros está marcada con flechas.

3.4. VERANO

El verano boreal (junio-julio-agosto) de 2021 fue el más cálido registrado en el conjunto de las áreas terrestres del mundo². En todos los continentes del hemisferio norte (HN) se produjeron olas de calor y episodios de lluvias intensas, acompañados de incendios forestales e inundaciones catastróficas. Las temperaturas medias estacionales fueron extremadamente altas desde la parte oriental de Siberia central hasta el norte de mar de Japón; en el sur de China; desde la parte occidental de Asia central hasta Europa oriental; en el noroeste del Oriente Próximo; en gran parte del norte de África; y desde la parte central hasta la occidental de América del Norte. La temperatura media junio-agosto de Europa fue 0.96 °C por encima de la media 1991-2020, lo que hace que sea el verano más cálido registrado. También en los EE.UU. fue el verano más caluroso registrado. El verano se puede calificar de Amplificación Ártica (AA). Las extensiones del mar de hielo ártico en junio, julio y agosto, fueron la sexta, cuarta y décima en los *rankings* respectivos de menor extensión. En la figura 3.14 se pueden observar las intensas anomalías positivas de temperatura en la mayoría de las regiones terrestres árticas, mientras que la superficie del agua del mar del océano Glacial Ártico se mantuvo relativamente fría respecto a los últimos años.



Olas de calor en el verano de 2021

La ola de calor más prominente de este verano aconteció en el oeste de América del Norte a fines de junio, superándose en muchos lugares los récords anteriores de temperatura máxima en 4 °C a 6 °C, y causando cientos de muertes. Portland (Oregón) batió récords tres días consecutivos, alcanzando 46.6 °C; Lytton, en el centro-sur de la Columbia Británica, registró 49.6 °C el 29 de junio, alcanzando un nuevo récord canadiense superando en 4.6 °C el récord previo. Más de 465 personas murieron en exceso en esa zona de Canadá y más de 600 en

² <https://www.carbonbrief.org/state-of-the-climate-summer-2021-sets-new-high-for-average-land-temperature>

Washington y Oregón. Un estudio de atribución rápido mostró que el evento habría sido casi imposible sin el cambio climático.

En el Valle de la Muerte (California) se alcanzó 54.4 °C el 9 de julio, que iguala la temperatura alcanzada en 2020 como registro más alto en el mundo desde al menos la década de 1930 (pendientes de homologación, ambos). Hubo numerosos incendios forestales importantes. El incendio Dixie en el norte de California, que comenzó el 13 de julio, había quemado unas 390 000 hectáreas hasta el 7 de octubre, el mayor incendio registrado en California.

En Siberia, una ola de calor persistente contribuyó a devastadores incendios forestales durante todo el verano que afectaron a más de 1.5 millones de hectáreas, los más grandes en la historia de Rusia. El humo que produjeron llegó hasta el polo norte, a 3000 km de distancia.

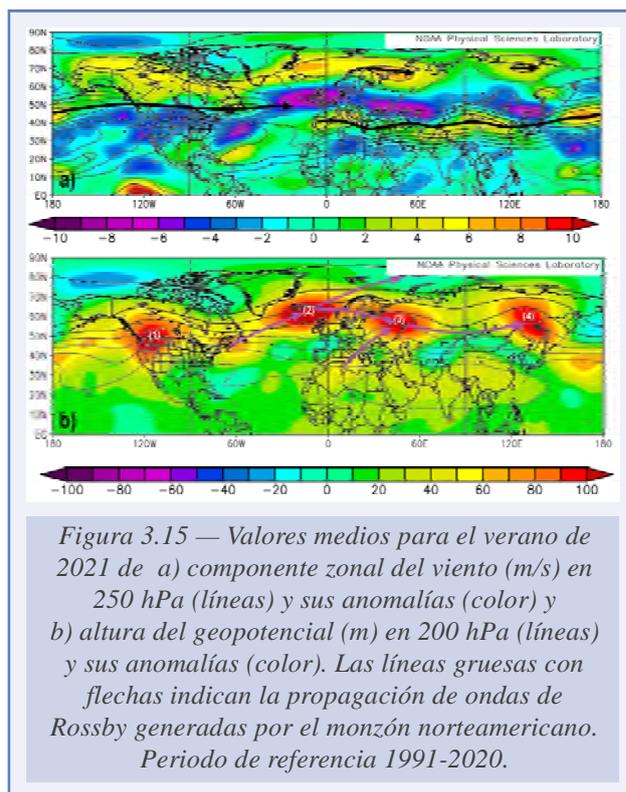
Pakistán, el norte de la India y parte de Medio Oriente también padecieron olas de calor, superando las temperaturas de 52 °C en algunos lugares. En Jacobabad (Pakistán) y en Ras al Khaimah (Emiratos Árabes Unidos), se registraron temperaturas de «bulbo húmedo» superiores a 35 °C, que parece ser el límite que el cuerpo humano puede soportar.

En julio y agosto se sucedieron olas de calor en la región mediterránea, que se propagaron de este a oeste desde finales de julio hasta mitad de agosto. El 20 de julio, se estableció un nuevo récord de Turquía con 49.1 °C en Cizre, y en Tbilisi (Georgia) se registró el día más caluroso con 40.6 °C. El 11 de agosto, una estación de Sicilia alcanzó 48.8 °C, récord europeo provisional, mientras que en Kairouan (Túnez) se estableció un récord de 50.3 °C. Se produjeron importantes incendios forestales en muchas partes de la región, siendo especialmente afectadas Argelia, el sur de Turquía y Grecia. España fue afectada por una intensa ola de calor del 11 al 16 de agosto: la estación de Montoro de AEMET estableció un récord nacional de temperatura máxima con 47.4 °C para España el día 14.

La circulación del verano

Como se observa en la figura 3.15a, la corriente en chorro media del verano casi circundaba el globo terrestre con una orientación casi zonal, propio de esta época del año. Además la circulación presentaba rasgos característicos de veranos de AA, como: a) las anomalías positivas de viento del oeste (componente u del viento) a unos 70° N, indicativo de chorros subpolares, debido al contraste de temperatura a lo largo de la costa ártica entre la superficie terrestre cálida y sin nieve del norte de los continentes y, un relativamente frío océano Ártico; y b) la banda de anomalías negativas de la componente u del viento sobre Eurasia, entre 45°-65° N, debida a la disminución del gradiente de temperatura norte-sur, que conllevaba una reducción muy pronunciada de la componente zonal del viento en el flanco norte del chorro subtropical asiático.

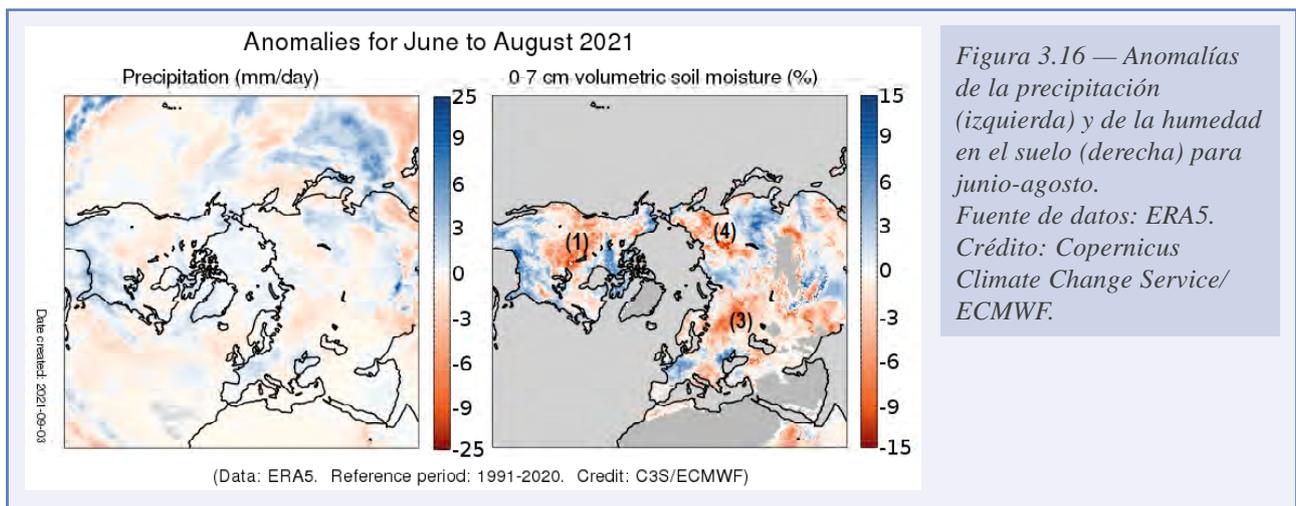
El campo medio de la altura del geopotencial en 200 hPa (Z_{200}) presentó cuatro anomalías positivas principales Z_{200} (figura 3.15b) en las latitudes medias y altas, sobre Norteamérica (1), el Atlántico



Norte oriental, Rusia occidental (3) y Siberia oriental (4) que bloquearon la circulación atmosférica en los continentes de latitudes medias causando las olas de calor: los movimientos descendentes intensos asociados a las dorsales de altura de geopotencial calientan adiabáticamente el aire, e inducen zonas poco nubosas que aumentan la radiación de onda corta neta descendente produciendo anomalías cálidas en superficie. Estas ondas de Rossby cuasiestacionarias con frecuencia actúan como teleconexiones circumplanetarias asociadas a los chorros de verano, estrechos y zonales, que actúan como guías de ondas (ver por ejemplo, BEVERLEY *et al.*, 2019) y que, a veces, producen una sincronización de extremos climáticos en partes distantes del mundo. Existe una creciente evidencia de que estas ondas planetarias se amplifican y mantienen por forzamientos subtropicales o tropicales con origen en la temperatura del agua del mar del Atlántico en los trópicos o subtropicos (LIU *et al.*, 2022), forzamientos del suelo continental (KOSTER *et al.*, 2014), o procesos internos de resonancia atmosférica (KORNHUBER *et al.*, 2017). En las figuras 3.15b y 3.16 se puede ver la correspondencia entre las anomalías Z200 continentales y las anomalías negativas de humedad en el suelo. La escasez de humedad en el suelo implica menor enfriamiento del suelo por evaporación y temperaturas más altas junto a la superficie. Entre las dorsales (3) y (4) de Rusia aparecía, sobre la meseta central de Siberia, una vaguada debida a una menor temperatura debido a la mayor humedad en el suelo producto de la mayor cobertura nivosa en esa región en la primavera, que genera una mayor evaporación y un máximo relativo de precipitación reciclada en verano.

Fuentes de ondas de Rossby

Hay que resaltar la existencia de una diferencia importante entre la distribución de los máximos de las anomalías positivas Z200 próximas a 60° N de este verano de 2021 y la tendencia observada por LIU *et al.* (2022) en la distribución de dichos máximos con el calentamiento climático. Según estos autores en estas latitudes la tendencia es a formarse tres anomalías positivas ubicadas en el este de Norteamérica y Groenlandia, Europa oriental y el este de Siberia, que forman parte de una onda casi estacionaria zonal de Rossby de número de onda 3.

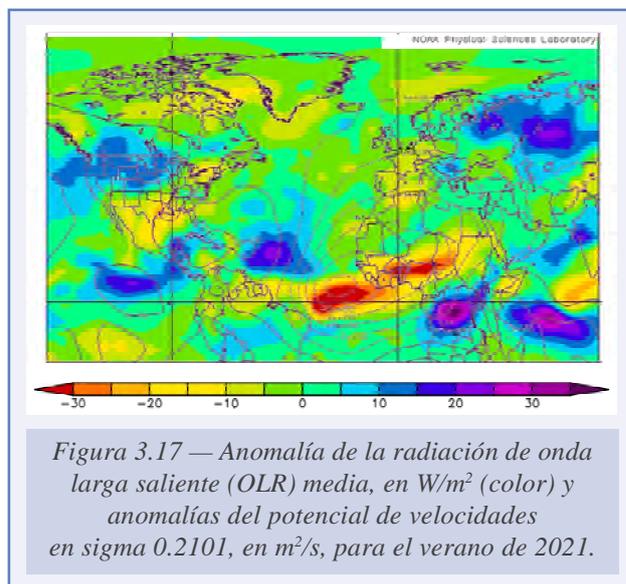


Las diferencias entre las anomalías Z300 de este verano y las indicadas por LIU *et al.* (2023) podrían deberse al intenso monzón de América del Norte, que generaría la siguiente dinámica (SÁNCHEZ-LAULHÉ, 2020):

- a) El calentamiento troposférico asociado a las precipitaciones del monzón produce, sobre el Atlántico subtropical occidental y el este de EE. UU., un mínimo en el campo medio del potencial de velocidades y divergencia del viento en niveles altos de la troposfera, señalada con D en la figura 3.18, que implica un acortamiento vertical de las columnas atmosféricas en dichos niveles altos.
- b) El mínimo del potencial de velocidades afecta al flanco sur de la corriente en chorro, una zona de fuerte vorticidad absoluta, marcada con una S en la figura 3.18, situada en el este de América del Norte, a unos 40° N, que es una zona de generación de ondas de Rossby (zona fuente). Durante su transcurrir de oeste a este a través de S, las partículas de aire en niveles altos pierden vorticidad absoluta a un ritmo aproximado de $d\zeta_a/dt = -\zeta_a D$, siendo positivas tanto la divergencia del viento, D , como la vorticidad absoluta, ζ_a . La disminución de la vorticidad genera una anomalía positiva Z200 sobre la costa atlántica de EE. UU. y una onda de Rossby cuya propagación hacia el NE se señala con línea gruesa con flechas en la figura 3.15b.
- c) La interacción de esta onda con la onda zonal propagándose desde las Rocosas genera el máximo de anomalía Z200 marcado como (2). Parte de la onda prosigue su trayectoria hacia al polo afectando en el mínimo de presión que predominó sobre el Ártico en el verano, y parte quedó capturada zonalmente en la guía de la onda zonal del chorro.
- d) La anomalía positiva (2) entre Islandia e Irlanda, hace situarse una vaguada en la zona NE de América-Groenlandia desplazando la anomalía positiva Z200 corriente arriba sobre la costa oeste norteamericana. Esta sería la principal diferencia con las anomalías indicadas por LIU *et al.* (2022).
- e) La anomalía desplazada hacia el Pacífico interactuaría con las ondas sinópticas móviles atrapadas en el chorro creciendo su amplitud por resonancia.
- f) Probablemente el monzón de América del Norte intervendría más directamente en la amplificación de la dorsal estacionaria sobre el oeste de Norteamérica a través de ondas de Rossby que se propagan hacia el oeste, asociadas al mecanismo monzón-desierto (RODWELL y HOSKINS, 1996).

Otra zona fuente de ondas de Rossby estacionarias existió en la entrada del chorro subtropical asiático, en el norte de África, también marcada con S en la figura 3.18, que dio lugar a una anomalía Z200, bastante intensa para su latitud, centrada en el estrecho de Sicilia, y a una onda de Rossby. En la figura 3.15b está representada esquemáticamente con una flecha la propagación de esta onda hacia el NE, contribuyendo a la anomalía Z200 de Rusia occidental; marcada con (3).

En la figura 3.17 se observa que la mayor anomalía del potencial de velocidad en el verano fue un mínimo situado sobre el Atlántico tropical oriental, inmediato a un mínimo de OLR, por lo que el forzamiento de esta circulación anómala fue el máximo de la temperatura de la superficie del mar en esta zona (figura 3.18) asociado a El Niño Atlántico. Se observa que los valores negativos de la anomalía del potencial de velocidades afectaron significativamente al Atlántico norte subtropical y el noroeste de África.



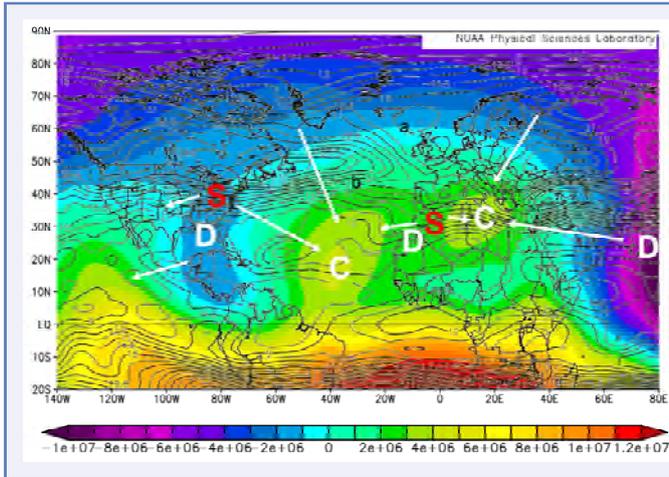


Figura 3.18 — Promedios para el verano de la velocidad del viento en 250 hPa (contornos en m/s) y del potencial de velocidades en la superficie sigma 0.2101 (color en m²/s). C y D son zonas de convergencia y de divergencia de viento. Las flechas blancas son perpendiculares a las líneas de potencial de velocidad y dirigidas hacia valores más altos del potencial de velocidades, indican esquemáticamente el flujo del viento divergente. S indican zonas fuentes de ondas de Rossby.

La ola de calor del 11 al 16 de agosto en España

En España el verano de 2021 tuvo un carácter normal, con una temperatura media sobre la España peninsular de 0.3 °C por encima de la media 1981-2010, siendo el octavo más frío del siglo XXI. Sin embargo, la ola de calor del 11 al 16 de agosto fue excepcional: la estación de Montoro de AEMET estableció un récord nacional de temperatura máxima con 47.4 °C para España el día 14 (AEMET, 2021), siendo este día, el segundo con la temperatura media de las máximas más elevada a nivel nacional, con 37.77 °C; el 13 de agosto el tercero; y el 15 el séptimo (RODRÍGUEZ BALLESTEROS, 2021), lo que da idea de la magnitud del episodio.

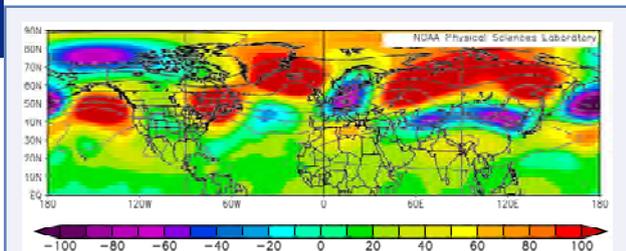


Figura 3.19 — Valores medios en agosto de 2021 de la altura del geopotencial (m) en 200 hPa (líneas) y sus anomalías (color). Período de referencia 1991-2020.

A finales de julio la circulación en el HN experimentó cambios importantes que afectaron a Europa y el Mediterráneo. El campo medio Z200 de agosto (figura 3.19) presentaba una anomalía positiva en la mayor parte del Ártico, que hacía que el índice de la Oscilación Ártica (AO) se volviera predominantemente negativo. Igualmente se volvió predominantemente negativo el índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), cuyo polo meridional principal se desplaza normalmente del Atlántico a Europa en el verano tardío, presentando una vaguada en Europa central. Por otra parte, sobre el Magreb se mantenía una anomalía anticiclónica en el Medi-

terráneo central. La vaguada europea y la anomalía anticiclónica mediterránea prolongaban el chorro subtropical asiático hasta la península ibérica.

La formación de una dana sobre Turquía el día 8 de agosto, causante de inundaciones en ese país, intensificó la dorsal/alta presión del Mediterráneo que al aumentar su escala provocó su desplazamiento hacia el oeste. En la figura 3.20 se pueden observar la baja sobre el mar Negro y Turquía y el anticiclón abarcando la mayor parte del Mediterráneo y el Magreb en el campo de altura del geopotencial en 700 hPa del día 9 de agosto a las 12 UTC. Con el desplazamiento del anticiclón hacia el oeste, los vientos cálidos procedentes de continente africano que inicialmente afectaban al oeste de Turquía, Grecia, Italia, Túnez y Argelia acabaron afectando a Marruecos, Francia y España, causando las olas de calor y los incendios forestales que se han descrito antes. Sobre Grecia y el oeste de Turquía los etesios, vientos del norte descendentes

fueron especialmente intensos, cálidos y secos, muy favorables a los incendios forestales. Sin embargo, en el Mediterráneo occidental y la península ibérica los vientos fueron de componente sur, débiles a moderados, lebeche en el sudeste peninsular, acompañados de abundante nubosidad de niveles medios y altos que se generaba principalmente en las proximidades del Mediterráneo. Los ascensos que generaron esta nubosidad se debieron a la circulación transversal directa de la entrada del chorro subtropical, que se fue desplazando hacia el oeste con el anticiclón mediterráneo. Las imágenes de vapor de agua $7.3 \mu\text{m}$ del satélite Meteosat (figura 3.21) recogen el origen tropical de la entrada «húmeda» por encima de la capa límite sahariana y el desarrollo de la nubosidad en el Mediterráneo y Península. Probablemente, y como indican PFAHL *et al.* (2015) para la formación de bloqueos, el desarrollo de nubosidad sobre la Península fue un factor clave en la intensidad de la ola de calor pues provocó el consiguiente recalentamiento del aire de procedencia tropical en niveles altos por liberación de calor latente, y posteriormente por calentamiento adiabático al descender en el seno del anticiclón. Contribuyó probablemente a este evento la existencia de un monzón del oeste de África más intenso de lo normal (figura 3.17).

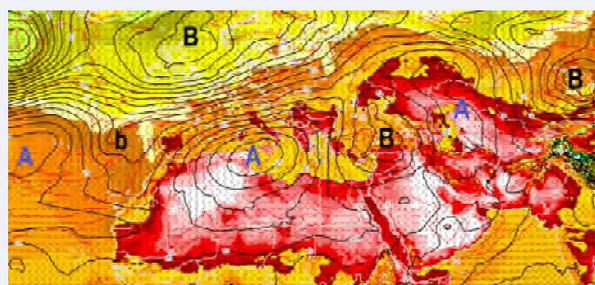
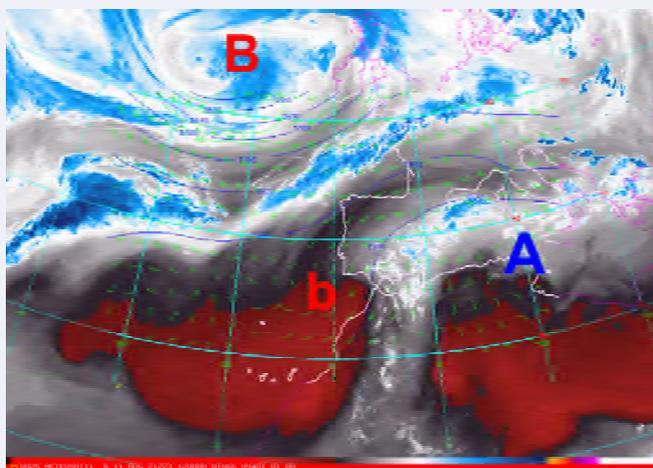


Figura 3.20 — Análisis del IFS del ECMWF del día 9 de agosto a las 12 UTC de: altura del geopotencial en 700 hPa (líneas negras); viento en 850 hPa (banderas viento); y temperatura a 2m (colores).

Figura 3.21 — Imagen de vapor de agua $7.3 \mu\text{m}$ del satélite Meteosat de 12 UTC del 11 de agosto. Superpuestos la altura del geopotencial (contornos azules) y vientos (banderas verdes) en 500 hPa previstos + 12 h del modelo ECMWF.

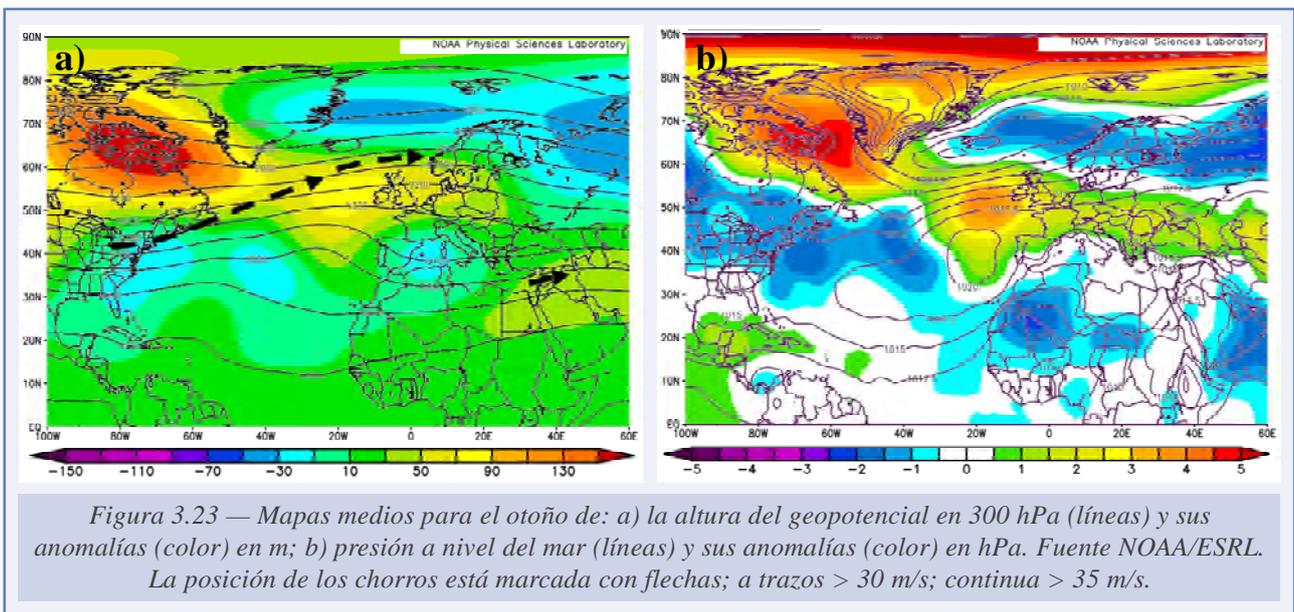
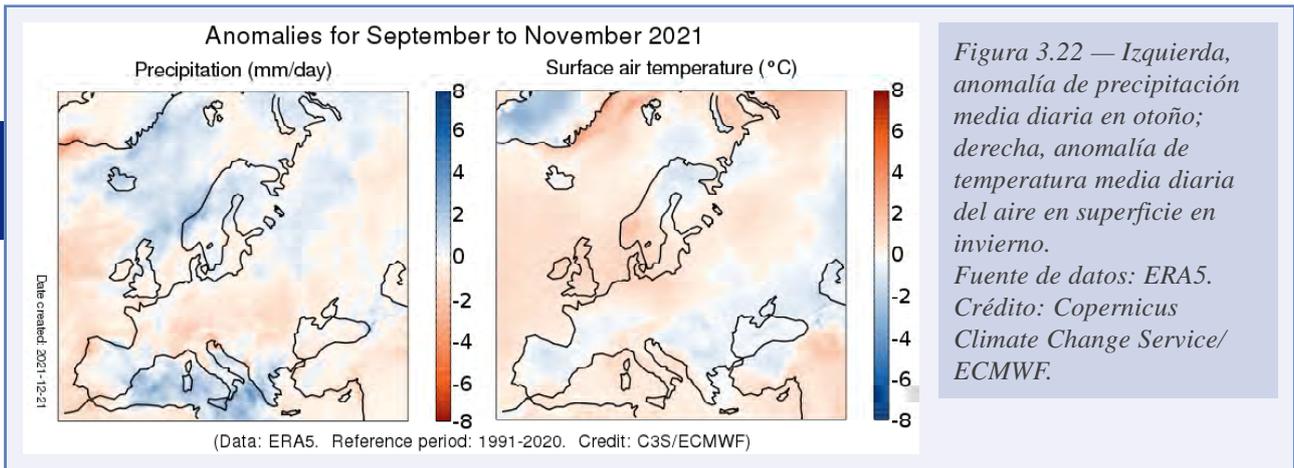


3.5. OTOÑO

En Europa las temperaturas fueron en promedio cercanas a las medias del periodo de referencia 1991-2020; relativamente cálidas en Irlanda, Gran Bretaña y el sur de Escandinavia y, en menor medida, centro, este de Europa y partes del sur, entre ellas el sudeste de la península ibérica; más frías de lo normal en buena parte de la península ibérica y Francia, en el extremo norte del continente y en los alrededores del mar Negro y en la península balcánica (figura 3.22, derecha).

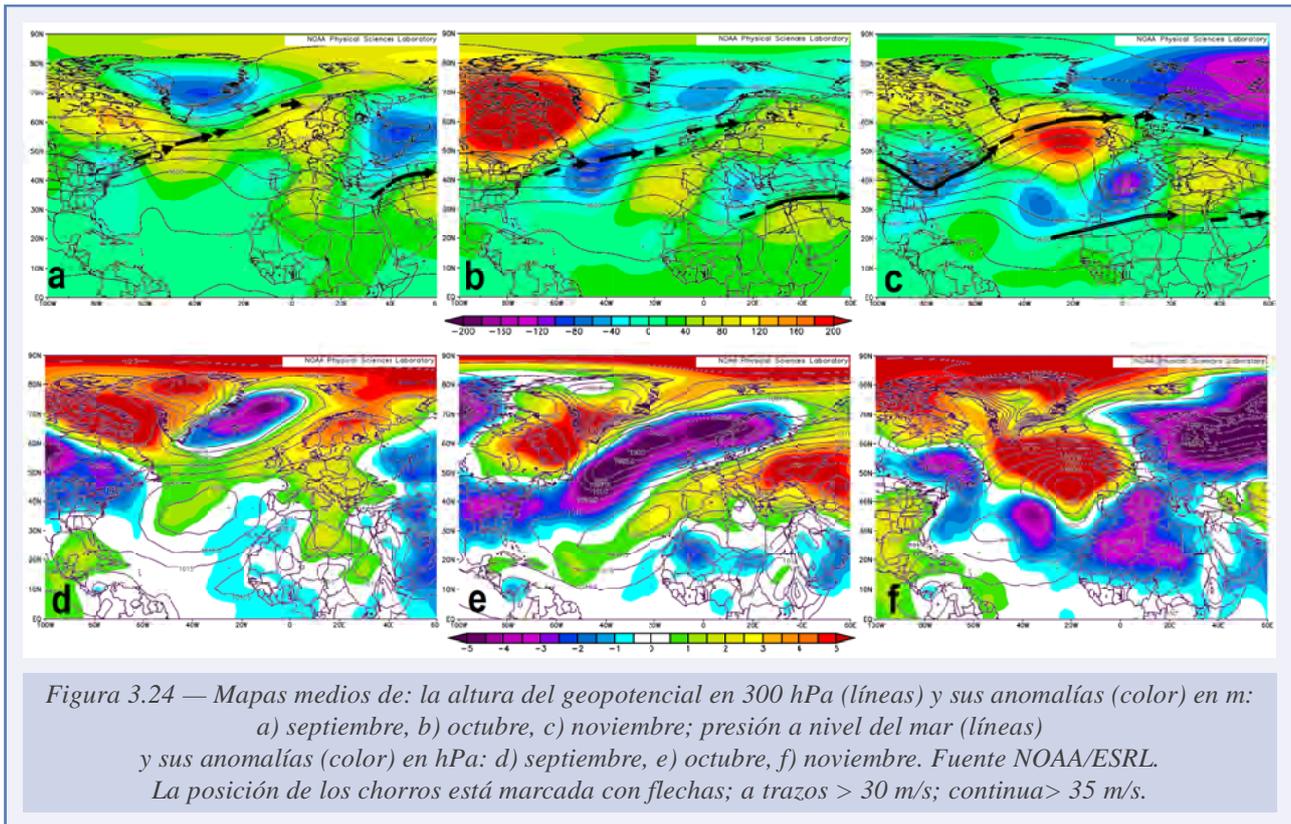
En cuanto a precipitaciones, las zonas más húmedas se localizaron en el norte y noreste de Europa, y en el Mediterráneo, donde ocurrieron inundaciones. En una gran zona que se extendía desde el este de Francia hasta el suroeste de Rusia las precipitaciones fueron menores que las medias (figura 3.22, izquierda). En la Península el reparto de la precipitación fue muy irregular con zonas muy húmedas y muy secas.

En general, las anomalías descritas se reflejaron en los mapas medios del otoño (figura 3.23): las zonas bajo anomalías positivas Z300 se corresponden con las anomalías negativas de temperatura, sin embargo, lo contrario no es cierto en zonas de influencia marítima, debido a las altas TSM tanto en el Atlántico norte como en el Mediterráneo; las anomalías positivas de



precipitación del norte de Europa ocurrieron en las proximidades de la posición media del chorro polar, y las del Mediterráneo bajo la anomalía negativa Z300, predominante en esta región.

La evolución mensual del otoño en altura (300 hPa) y en superficie se muestra en los campos Z300 y de PNM en la figura 3.24.



En septiembre tuvo una gran influencia la circulación subtropical en el sector ANE debido a una intensificación anómala de las lluvias monzónicas de la India: tras un mes de agosto con el Índice del Monzón de la India (IMI) por debajo de lo normal, el IMI alcanzó valores muy altos en septiembre (figura 3.25).

La relevancia del monzón produjo movimientos descendentes anómalos en el Mediterráneo, que se manifestaron en niveles altos de la troposfera (superficie sigma 0.2101; figura 3.26) por: un máximo relativo del potencial de velocidad, χ (ver anexo D), con centro en C (convergencia) sobre Libia; flujo de anómala componente norte sobre el Mediterráneo central; una anomalía negativa de la función de corriente³, ψ , (una vaguada en Z300; figura 3.24a) sobre el Mediterráneo oriental y una anomalía positiva de ψ (una dorsal en Z300) sobre el Mediterráneo occidental.

En latitudes más altas dominaron las anomalías de geopotenciales propias del régimen de bloqueo acopladas con las del Mediterráneo, con anomalía Z300 negativa sobre Groenlandia y anomalía positiva entre las islas británicas y Escandinavia. Esta última se prolongaba con la anomalía positiva del Mediterráneo occidental formando una dorsal con eje norte sur que

³ La interpretación de la función de corriente es similar a la de la altura del geopotencial, pero es más adecuada para latitudes bajas.

desviaba la corriente en chorro polar hacia el norte de Europa. Las vaguadas de Europa oriental y del Mediterráneo oriental también estuvieron acopladas, causando, probablemente, la aceleración de la circulación vertical-zonal monzón-Mediterráneo y el mantenimiento de la intensidad de las lluvias monzónicas.

La mayor parte de Iberia se situó bajo la parte delantera de una vaguada (anomalía negativa 300) situada al oeste de la dorsal de bloqueo, por lo que la Península fue una zona de convergencia de viento que produjo abundante nubosidad y precipitaciones en amplias zonas del interior, dando lugar a un mes normal o frío.

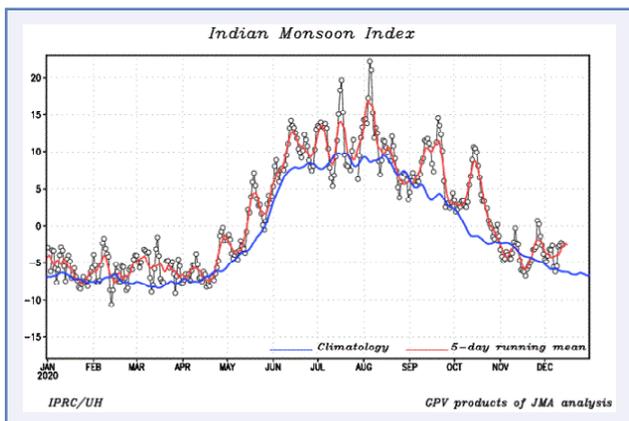


Figura 3.25 — Evolución del Índice del Monzón de la India, $IM\ Index = U850\ (40^{\circ}\ E-80^{\circ}\ E,\ 5^{\circ}\ N-15^{\circ}\ N) - U850\ (70^{\circ}\ E-90^{\circ}\ E,\ 20^{\circ}\ N-30^{\circ}\ N)$. Fuente: International Pacific Research Center (IPRC)/ Universidad de Hawái (UH).

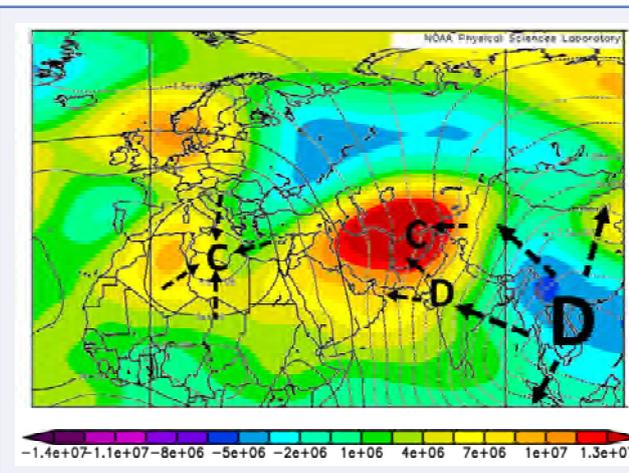
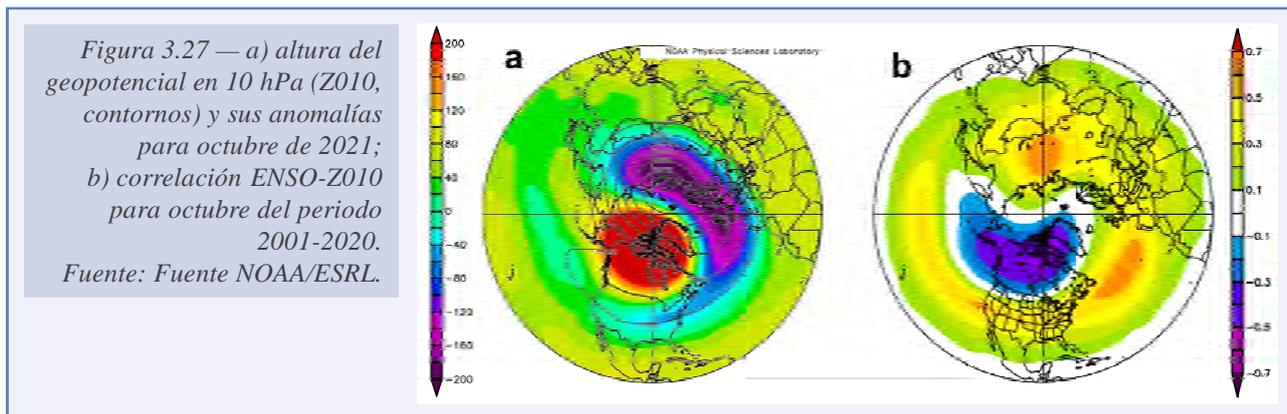


Figura 3.26 — Promedios para septiembre de la anomalía de la función de corriente (color en m/s^2) y del potencial de velocidades (color en m^2/s) en la superficie sigma 0,2101. C y D son zonas de convergencia y de divergencia de viento. Las flechas a trazos, perpendiculares a las líneas de potencial de velocidad y dirigidas hacia valores más altos del potencial de velocidades, indican esquemáticamente el flujo del viento divergente. Fuente NOAA/ESRL.

En octubre (figura 3.24b y e) las anomalías del Z300 y de la PNM del sector ANE fueron, en buena parte, reflejos de las anomalías de la altura del geopotencial de la estratosfera (Z010 en la figura 3.27), en particular la anomalía positiva del nordeste de Norteamérica y la anomalía negativa corriente abajo, sobre el Atlántico. Es de destacar que en octubre la variabilidad del vórtice polar, que va aumentando su intensidad debido a la disminución de la insolación, está muy relacionada con el ENSO. En el octubre las anomalías de la altura de geopotencial en la alta estratosfera (Z010, figura 3.27a) se explican por la correlación Z010-ENSO (figura 3.27b) dada la fase negativa de La Niña existente.

Las anomalías mediterráneas se desplazaron hacia el oeste, situándose la dorsal al oeste de la Península, desviando el chorro polar y las borrascas atlánticas hacia las islas británicas. El centro de la anomalía negativa se situó sobre el Mediterráneo central, afectando a todo el mar, desapareciendo la influencia del monzón en la zona. Por el contrario, la anomalía de bloqueo



de norte de Europa estuvo centrada en el oeste de Rusia, afectando a la mayor parte de Europa del norte y central. Como consecuencia el mes fue más cálido de lo normal en la mayor parte de Europa, especialmente en el norte, y más frío de lo normal en buena parte del sur, especialmente en el sudeste del continente. En cuanto a precipitaciones, el mes fue más seco de lo normal en la mayor parte del continente, salvo en la periferia norte afectada por el chorro polar (ver figura 3.22), y en buena parte del Mediterráneo, que fueron más húmedas de lo normal.

La situación en España se invirtió respecto al mes anterior al quedar la Península y Canarias bajo anomalías positivas Z300, y Baleares bajo anomalías negativas. Como consecuencia el mes fue cálido y seco en la España peninsular y Canarias, y frío y normal en cuanto a precipitaciones en las islas Baleares y parte de la costa peninsular mediterránea.

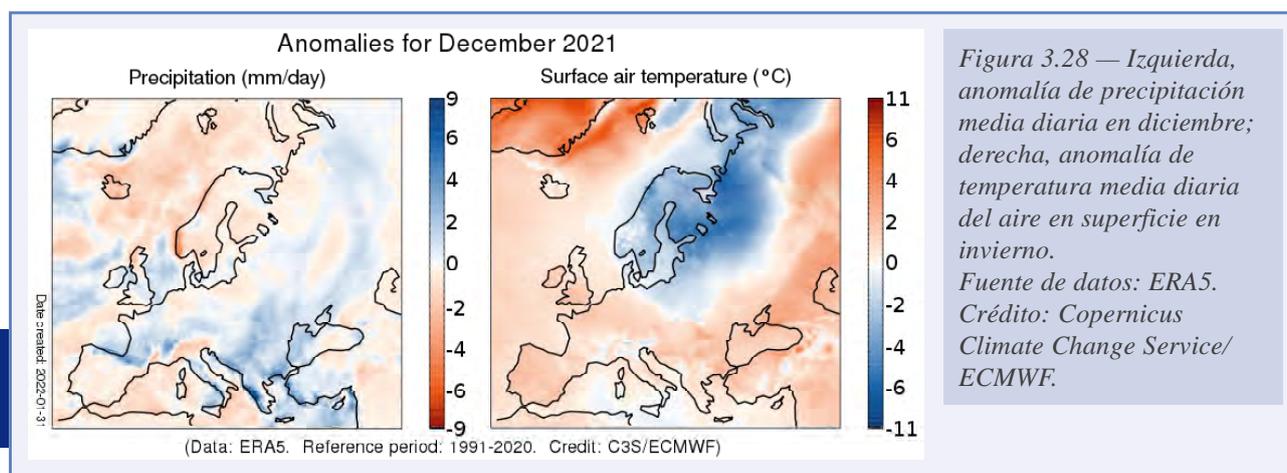
En noviembre predominó el régimen de tiempo de dorsal atlántica (figura 3.24c y f). El desplazamiento de la anomalía positiva Z300 de Norteamérica hacia el centro del Atlántico Norte fue acompañado por el desplazamiento de la vaguada atlántica hacia el oeste de Europa, quedando la Península y también Canarias bajo la anomalía negativa Z300 centrada en la costa mediterránea. La situación de la vaguada favoreció el flujo componente norte sobre buena parte de la Península, por lo que los sistemas orográficos favorecieron un reparto muy desigual de las precipitaciones con una parte muy húmeda que comprendía principalmente la cordillera Cantábrica y la cuenca del Ebro, y otra muy seca que incluía a Extremadura y Galicia. En cuanto a precipitaciones el mes fue frío o muy frío en toda España.

Durante noviembre y diciembre el VPE fue más intenso de lo normal (figuras 3.5 y 3.31). Los forzamientos en la superficie del Ártico del otoño fueron poco favorables para debilitar el VPE: la extensión del hielo marino del Ártico, aunque por debajo, evolucionó próxima a lo normal a largo plazo, con abundante hielo en los críticos mares de Barents y Kara, y la extensión y profundidad de la capa de nieve de Eurasia estuvo por encima de lo normal, pero no por mucho. No obstante, el VPE se perturbó adquiriendo una forma alargada desde el norte de Siberia hasta América del Norte, un tipo de perturbación del VPE que fue identificada por KRETSCHMER *et al.* (2018) para VPE débiles. Los estudios existentes indican que los VPE alargados, como los CRE, se producen por transmisión vertical de las ondas largas atmosféricas generadas en la troposfera, pero mientras en los CRE la energía de las ondas se absorbe en la estratosfera polar, generando un rápido calentamiento y aumento de la altura del geopotencial en la estratosfera, en los eventos de estiramiento del VPE la energía se refleja en la estratosfera y vuelve a la troposfera generando anomalías positivas de altura del geopotencial/PNM que amplían la dorsal y la vaguada climatológicas de Norteamérica y la dorsal climatológica sobre el océano Atlántico.

3.6. DICIEMBRE

Ha sido el diciembre más frío desde 2012 en Europa, aunque con notables contrastes de temperatura, siendo cálido en el oeste y en el sur, y frío en el noreste. Varios países experimentaron récords de temperatura a finales de mes. En cuanto a precipitaciones, fue húmedo en el centro y sur de Europa, y seco en los Alpes, Escandinavia, zonas de Europa del Este y de la península ibérica.

El mes en España en conjunto fue muy cálido y normal en cuanto a precipitaciones, aunque fue muy húmedo en el litoral cantábrico y muy seco en buena parte del litoral mediterráneo. Hubo dos episodios cálidos los días 10-16 y 20-31. El segundo fue especialmente intenso, con temperaturas extraordinariamente elevadas para la época del año en muchas zonas que se observaron principalmente en los últimos cinco días del mes.



El VPE se mantuvo más fuerte de lo normal durante el mes (figura 3.31), aunque se perturbó relativamente (eventos menores de calentamiento estratosférico) en la primera y en la última semana (figura 3.5) lo cual estuvo relacionado con el bloqueo en Groenlandia: anomalía positiva sobre Groenlandia y anomalía negativa extendiéndose desde el noroeste de Canadá hasta el oeste de las Azores en los campos medios de Z300 y PNM (figura 3.28). El bloqueo estuvo asociado al calentamiento del Ártico de la troposfera alta y parte inferior de la estratosfera, y a fases negativas de la NAO y de la AO en la mitad final del mes (figura 3.30). Aparentemente el flujo de energía procedente de la troposfera no fue absorbido por la estratosfera (caso de los CRE principales) sino que fue predominantemente reflejado de vuelta hacia la troposfera dando lugar a una irrupción ártica que afectó todo al este de Europa. Al gran recorrido de la irrupción fría contribuyó la conexión con la vaguada que se había propagado hacia el este tras afectar en noviembre a la Península. Esta distribución de las anomalías creó un notable gradiente de presión/altura del geopotencial que explica los contrastes de temperaturas en el continente. En cuanto a las precipitaciones, la posición de la corriente en chorro en el oeste europeo determina las anomalías húmedas en Irlanda y cara norte de los sistemas montañosos Cantábrico, Pirineos y Alpes, mientras que la vaguada del este de Europa determina las anomalías húmedas de los Balcanes y de la mitad oriental del Mediterráneo.

El carácter muy seco de las islas Canarias, bajo una zona de anomalía negativa Z300, se explica por el flujo seco de levante debido a la influencia de las bajas presiones en niveles bajos existentes en la zona del Chad y Mauritania (entrada derecha de la corriente en chorro subtropical; figura 3.29b).

La anomalía Z300 positiva de la Península y la negativa sobre Canarias (figura 3.29 b) denotan un área de anomalías de viento del ESE en la que se produjeron dos importantes bloqueos en este mes causados por un flujo tropical seco del ESE. Este flujo surgió como reacción a las intrusiones de aire frío sobre el desierto del Sahara ocurridas tras los episodios de debilitamiento del VPE. Los bloqueos se tradujeron en sendos episodios muy cálidos sobre la Península. La figura 3.32 muestra una imagen de vapor de agua del día 30 en el gran episodio cálido de final de año.

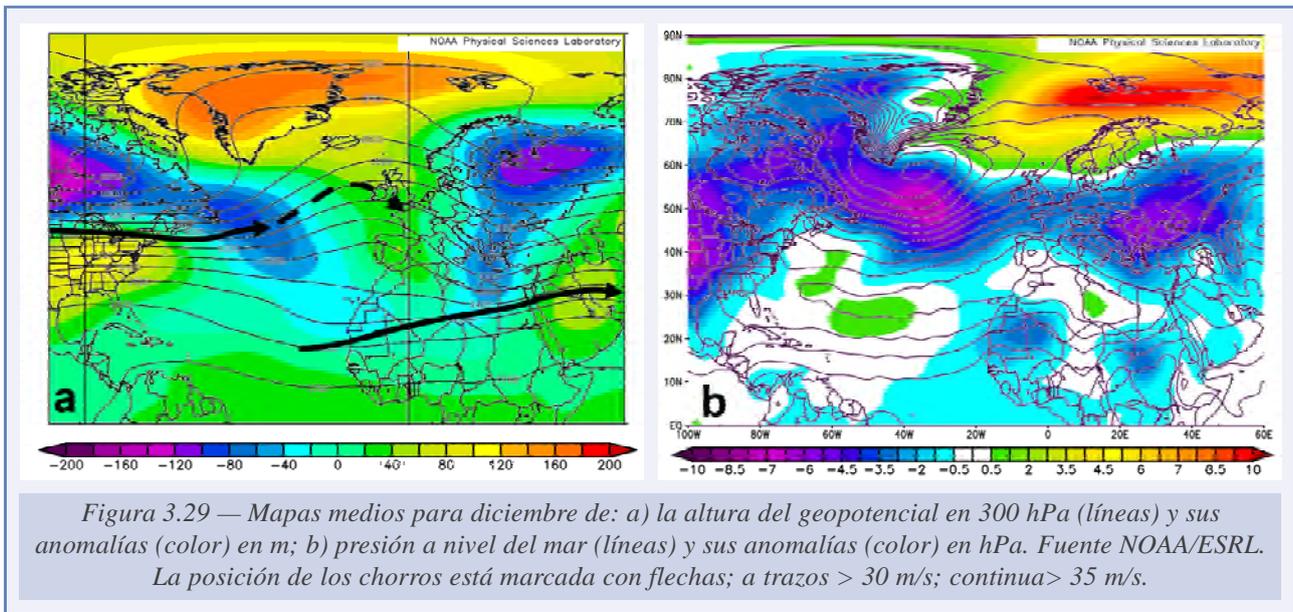
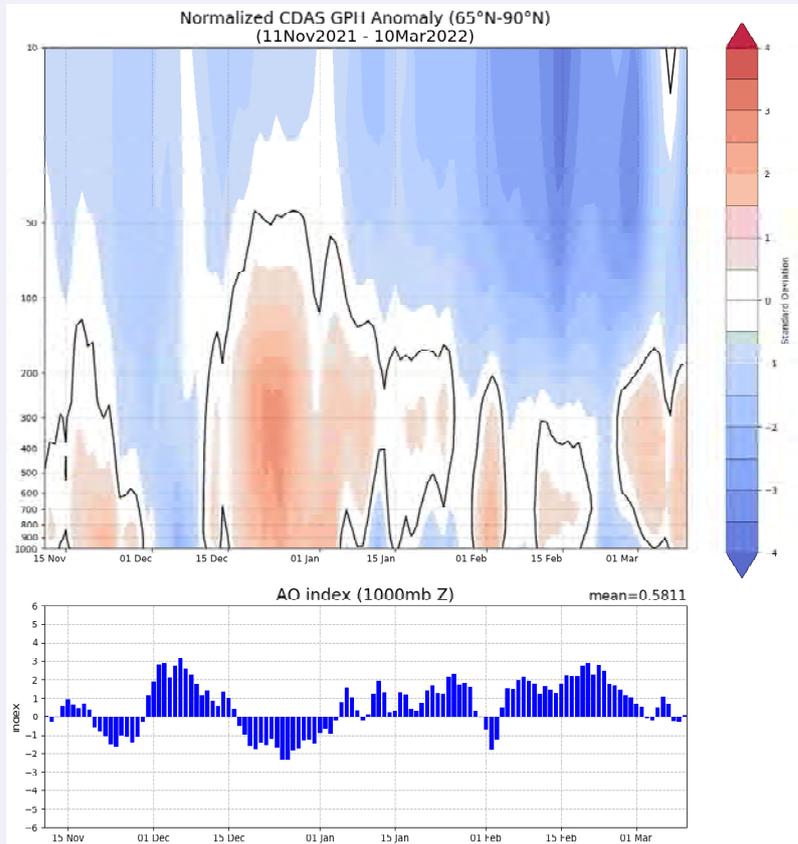
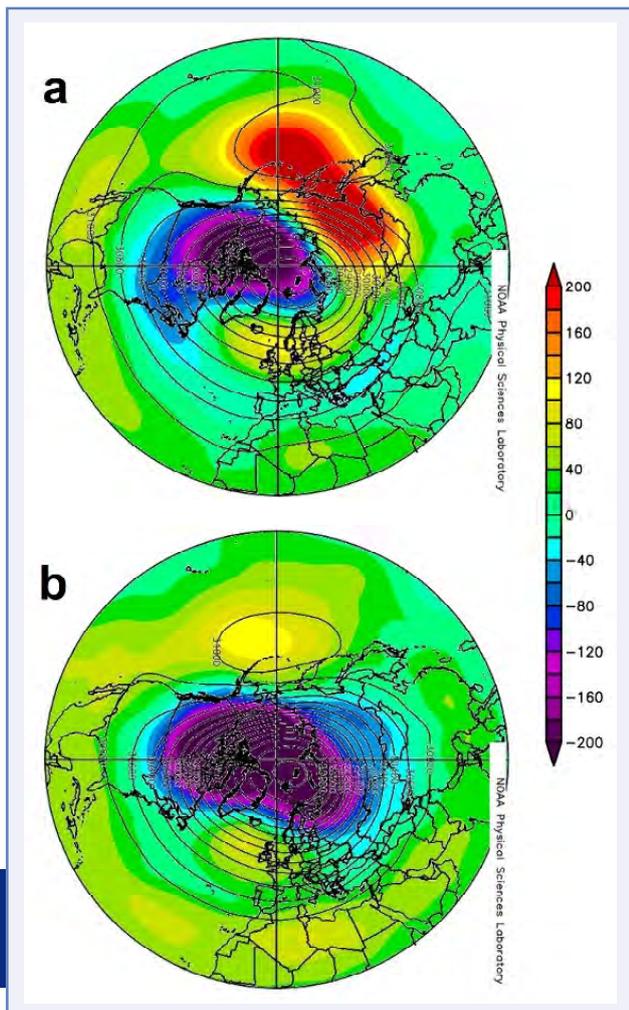


Figura 3.30 — Arriba: anomalías diarias de altura geopotencial normalizadas por sus desviaciones estándar para cada nivel en el periodo 1979-2000, promediadas sobre el casquete polar (hacia el polo de 65° N). Los colores azules (rojos) representan un vórtice polar fuerte (débil). Las líneas negras continuas muestran las anomalías cero. Abajo: índice AO a 1000 hPa. Fuente: CPC-NOAA.





Las perturbaciones de estiramiento del VPE han mostrado una tendencia creciente estadísticamente significativa tanto en otoño como en invierno (COHEN *et al.*, 2021), mayor aún que la de eventos CRE, que también está aumentando.

Figura 3.31 — Altura del geopotencial y anomalías en 10 hPa; a) en noviembre y b) en diciembre.

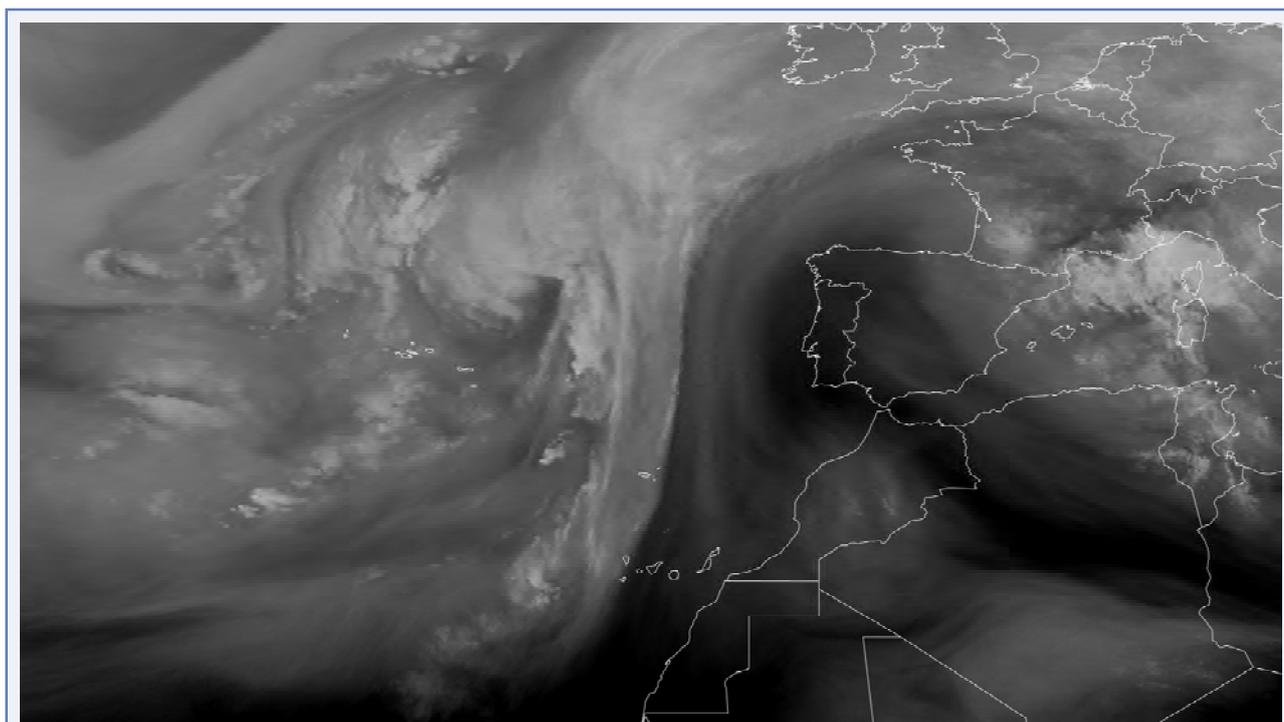


Figura 3.32 — Imagen de las 06 UTC del día 30 de diciembre del canal WV 6.3 del Meteosat. Fuente: EUMETSAT.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los siguientes organismos el uso de imágenes y datos que se hace en este documento:

- Copernicus Climate Change Service (**C3S**)
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (**ECMWF**)
- European Meteorological Services Network (**EUMETNET**)
- European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (**EUMETSAT**)
- European Space Agency (**ESA**)
- International Pacific Research Center (**IPRC**)/Universidad de Hawái (**UH**)
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (**KNMI**)
- Meteorological Office (**Met Office**) of United Kingdom
- National Aeronautics and Space Administration (**NASA**) of United States
- National Oceanic and Atmospheric Administration (**NOAA**) of United States

REFERENCIAS

- AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (AEMET), 2021. Resumen estacional climatológico: verano 2021. http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/estacionales/2021/Est_verano_21.pdf.
- ANSTEY, J. A. y SHEPHERD, T. G., 2014. High-latitude influence of the quasi-biennial oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140 (678), 1-21.
- BALDWIN, M. P., AYARZAGÜENA, B., BIRNER, T., BUTCHART, N., BUTLER, A. H., CHARLTON-PÉREZ, A. J. *et al.*, 2021. Sudden stratospheric warmings. *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000708. <https://doi.org/10.1029/2020RG000708>.
- BEVERLEY, J. D., WOOLNOUGH, S. J., BAKER, L. H. *et al.*, 2019. The northern hemisphere circumglobal teleconnection in a seasonal forecast model and its relationship to European summer forecast skill. *Clim. Dyn.*, 52(5): 3759-3771. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4371-4#citeas>.
- BUTLER, J. H. y MONTZKA S. A., 2021. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). Laboratorio de Vigilancia Mundial de los Laboratorios de Investigación del Sistema Tierra de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- CHAZARRA BERNABÉ, A., LORENZO MARIÑO, B., RODRÍGUEZ BALLESTEROS, C. y BOTÉY FULLAT, R., 2020. Análisis de las temperaturas en España en el periodo 1961-2018. Volumen 1. Rejillas mensuales de temperatura 1961-2018. Volumen 2. Series de temperaturas medias en España a partir de estaciones de referencia. Agencia Estatal de Meteorología. <https://doi.org/10.31978/666-20-004-x>.
- CHIANG, J. C. H. y VIMONT, D. J., 2004. Analogous meridional modes of atmosphere-ocean variability in the tropical Pacific and tropical Atlantic. *J. Climate*, 17 (21), 4143-4158. <https://doi.org/10.1175/JCLI4953.1>.
- COHEN, J., AGEL, L., BARLOW, M., GARFINKEL, C. I. y WHITE, I., 2021. Linking Arctic variability and change with extreme winter weather in the United States. *Science*. 2021 Sep 3; 373 (6559): 1116-1121. <https://doi.org/10.1126/science.abi9167>.
- COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S), 2020. European State of the Climate 2019. Retrieved from: <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019>.
- COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S), 2021. How close are we to reaching a global warming of 1.5 °C? Retrieved from: <https://climate.copernicus.eu/how-close-are-we-reaching-global-warming-15degc>.
- COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S), 2022. European State of the Climate 2021. Retrieved from: <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2021>.
- COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S), 2022. Greenhouse gas concentrations. Climate indicators. <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/greenhouse-gas-concentrations>.

- COUMOU, D., DI CAPUA, G., VAVRUS, S. *et al.*, 2018. The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nat. Commun.*, 9, 2959. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05256-8>.
- CRIPPA, M., GUIZZARDI, D., MUNTEAN, M., SCHAAF, E., SOLAZZO, E., MONFORTI-FERRARIO, F., OLIVIER, J. G. J. y VIGNATI, E. (2020). Fossil CO₂ emissions of all world countries - 2020 Report, EUR 30358 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-21515-8, doi:10.2760/143674, JRC121460. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2020.
- DOMEISEN, D. I. V., GRAMS, C. M. y PAPRITZ, L., 2020. The role of North Atlantic–European weather regimes in the surface impact of sudden stratospheric warming events. *Weather Clim. Dynam.*, 1, 373-388. <https://doi.org/10.5194/wcd-1-373-2020>.
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P. *et al.*, 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146: 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- KENDALL, M. y GIBBONS, J., 1990. Rank Correlation Methods. Charles Griffin Book. Oxford Univ. Pr.
- KORNHUBER, K., PETOUKHOV, V., PETRI, S. *et al.*, 2017. Evidence for wave resonance as a key mechanism for generating high-amplitude quasi-stationary waves in boreal summer. *Climate Dyn.*, 49, 1961-1979. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3399-6>.
- KRETSCHMER, M., COHEN, J., MATTHIAS, V. *et al.*, 2018. The different stratospheric influence on cold-extremes in Eurasia and North America. *npj Clim. Atmos. Sci.*, 1, 44. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0054-4>.
- KUCHARSKI, F., BRACCO, A., YOO, J. H. *et al.*, 2009. A Gill-Matsuno-type mechanism explains the tropical Atlantic influence on African and Indian monsoon rainfall. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 135, 569-579. <https://doi.org/10.1002/qj.406>.
- LABE, Z. M., PEINGS, Y. y MAGNUSDOTTIR, G., 2019. The effect of QBO phase on the atmospheric response to projected Arctic sea ice loss in early winter. *Geophysical Research Letters*, 46 (13). <https://doi.org/10.1029/2019GL083095>.
- LIU, Y., SUN, C. y LI J., 2022. The Boreal Summer Zonal Wavenumber-3 Trend Pattern and Its Connection with Surface Enhanced Warming. *Journal of Climate*, 35(2), 833-850. Retrieved Jan 17, 2022, from: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/35/2/JCLI-D-21-0460.1.xml>.
- McKEE, T. B., DOESKEN, N. J. y KLEIST, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186.
- PFAHL, S., SCHWIERZ, C., CROCI-MASPOLI, M. *et al.*, 2015. Importance of latent heat release in ascending air streams for atmospheric blocking. *Nature Geosci.*, 8, 610-614. <https://doi.org/10.1038/ngeo2487>.
- RASMUSSEN, E. M. y CARPENTER, T. H., 1983. The Relationship between Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperature and Rainfall over India and Sri Lanka. *Monthly Weather Review*, 111, 517-528.
- RODRÍGUEZ BALLESTEROS, C., 2021. ¿Sabes qué días han sido los de temperatura máxima más elevada desde 1941? <https://climaenmapas.blogspot.com/>.

- RODWELL, M. J. y HOSKINS, B. J., 1996. Monsoons and the dynamics of deserts. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 122: 1385-1404. <https://doi.org/10.1002/qj.49712253408>.
- SÁNCHEZ-LAULHÉ, J. M., 2020. Un invierno sin Amplificación Ártica. *Tiempo y Clima*, 5, 68. <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/2373/2574>.
- SÁNCHEZ-LAULHÉ, J. M. y ROA, A., 2021. El Calentamiento repentino estratosférico de enero de 2021 y la transformación extratropical de Filomena. *Tiempo y Clima*, 72. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/13600>.
- SCHUBERT, S. D., WANG, H., KOSTER, R. D., SUÁREZ, M. J. y GROISMAN, P. Y., 2014. Northern Eurasian Heat Waves and Droughts. *Journal of Climate*, 27 (9), 3169-3207. Retrieved Jan 17, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/9/jcli-d-13-00360.1.xml>.
- SEN, P. K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. Retrieved from <https://doi.org/10.237/2285891>.
- STROEVE, J. y NOTZ, D., 2018. Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environ. Res. Lett.*, 13, 103001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aade56>.
- TORRENCE, C. y WEBSTER, P. J., 1999. Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System. *Journal of Climate*, 12, 2679-2690. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)0122.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)0122.0.CO;2).
- VIMONT, D. J. y KOSSIN, J. P., 2007. The Atlantic meridional mode and hurricane activity. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07709. <https://doi.org/10.1029/2006GL029683>.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2021. *Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin)*, No. 17: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10904.
- YANG, X. y HUANG, P., 2021. Restored relationship between ENSO and Indian summer monsoon rainfall around 1999/2000. *The Innovation*, 2 (2), 100102. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100102>.
- ZHAI, P., PIRANI, A., CONNORS, S., PÉAN, C., BERGER, S., CAUD, N., CHEN, Y., GOLDFARB, L., GOMIS, M., HUANG, M., LEITZELL, K., LONNOY, E., MATTHEWS, J., MAYCOCK, T., WATERFIELD, T., YELEKÇI, O., YU, R., ZHOU, B., BELLOUIN, N., ... ZICKFELD, K. (eds.), 2021. IPCC, 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. <https://ipcc.ch/>.

ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN SINÓPTICA ESTACIONAL DEL AÑO 2021

En este apartado se realiza un breve resumen de la descripción sinóptica a lo largo del año 2021, resaltando aquellos episodios que han dado lugar a fenómenos meteorológicos singulares.

A1. Invierno (enero-febrero)

El año 2021 comenzó con altas presiones sobre el Atlántico Norte y bajas presiones sobre el continente europeo, canalizándose entre ambos sistemas un flujo polar de NW sobre la Península que permitía la entrada de una sucesión de frentes asociados a sistemas de bajas presiones que circulaban por el mar Cantábrico. Tras esta situación el anticiclón atlántico se trasladó hacia las islas británicas, permitiendo una circulación polar muy ondulada a latitudes bajas. Así, a partir del 4 de enero se formó una borrasca de gran impacto en el entorno de las Azores, nombrándose como Filomena el día 5. La borrasca se desplazó hacia el norte de las Canarias y desde ahí hacia la zona del golfo de Cádiz donde se encontraba el día 8. Filomena permitió la entrada de una masa de aire muy húmeda a la Península que convergió con otra masa de aire fría de origen polar, que estaba asentada sobre la Península como consecuencia del pasillo de vientos de componente norte dirigido por las altas presiones existentes en el Atlántico Norte que se extendían hacia las islas británicas y norte de Escandinavia, y las bajas presiones localizadas sobre centro Europa. El choque de masas de aire dio origen a un largo frente estacionario que provocó nevadas intensas en muchos puntos de la mitad centro y este peninsular (figura A-A1), las cuales dieron lugar a espesores históricos de nieve en cotas relativamente bajas.

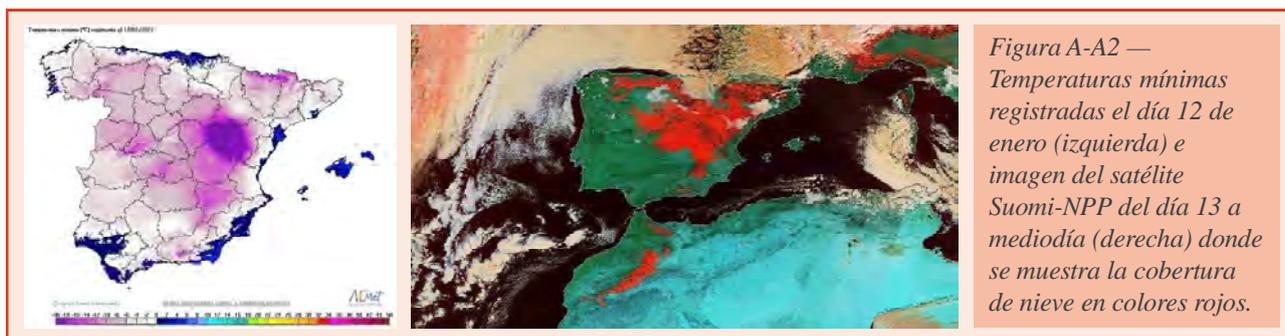
105

Figura A-A1 — Guía técnica de diagnóstico en superficie del día 8 de enero a las 12 UTC (izquierda) y nevada histórica sobre Madrid provocada por la borrasca Filomena (derecha).



Destacó en especial la nevada sobre la capital, Madrid, la cual tuvo un carácter extraordinario por los importantes espesores acumulados, del orden de 50 cm, ocasionando numerosos impactos en la mayoría de sectores socio-económicos, recibiendo por ello la denominación de nevada histórica. Además de la intensa nevada en la zona centro de la Península, Filomena provocó importantes acumulados de precipitación en las comunidades de Andalucía, Valencia y las islas Canarias, así como rachas de viento muy intensas en esta última comunidad.

Tras el paso de Filomena, a partir del día 11 de enero comenzó un periodo de estabilidad atmosférica reforzándose una situación anticiclónica sobre nuestro país a todos los niveles. La estabilidad, la permanencia en el suelo de importantes espesores de nieve (figura A-A2), el predominio del cielo despejado y la ausencia de viento en niveles bajos, dieron lugar a un periodo de heladas extraordinarias en numerosos puntos del interior (figura A-A2). Se registraron numerosas efemérides, entre las que destacaron los $-13.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ registrados en Toledo, los $-21.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ de Teruel y los $-21.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ de Calamocha.



Tras el predominio anticiclónico, comenzó el día 20 otro periodo donde se impuso la circulación zonal sobre la Península, afectada por el sucesivo paso de frentes asociados a profundos sistemas depresionarios que discurrían por el mar cantábrico y que provocaron rachas de viento muy intensas desde Galicia y toda la cornisa cantábrica, hasta Cataluña, Valencia y Baleares. Algunas de estas borrascas fueron clasificadas de gran impacto, denominándose en orden cronológico de la siguiente manera: Gaetán, Hortense, Ignacio y Justine. El paso de los distintos sistemas frontales y la advección de la masa de aire templada del Atlántico contribuyeron a derretir los importantes espesores de nieve acumulados durante el paso de la borrasca Filomena. Además, el paso de Justine provocó una fuerte circulación zonal de poniente sobre la Península que dio lugar a un aumento espectacular de las temperaturas máximas en el Levante batiéndose récords para un mes de enero en numerosos puntos de las comunidades de Valencia y Murcia, destacando así los $28.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el aeropuerto del Altet (Elche-Alicante) y los $27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la ciudad de Murcia.

El predominio de la circulación zonal llegó a su fin el último día de enero cuando la circulación atlántica se hizo más meridiana permitiendo el descuelgue de bajas hacia el oeste de la Península, prevaleciendo así la situación de Font denominada «Depresión Atlántica Ibérica». Esta situación se prolongó la primera semana de febrero llegando a su fin tras el paso de una nueva profunda vaguada que cruzó la Península de oeste a este y produjo una intensa circulación de sur, provocando precipitaciones en forma de barro en muchas zonas de la mitad este de nuestro país. A partir del 7 de febrero fue imponiéndose la estabilidad atmosférica, primero con el predominio del anticiclón subtropical y posteriormente con el dominio del anticiclón centro-europeo. La estabilidad se prolongó durante una semana y a partir de ahí comenzó un nuevo periodo de ondulación atlántica con ciclogénesis de profundas borrascas extratropicales a latitudes altas, entre ellas Karim (decimoprimeras de la temporada 2020/2021). Estas borrascas iban acompañadas de extensos sistemas frontales que barrían la Península y afectaban de forma más activa a Galicia y a la cornisa cantábrica. En la última semana de febrero una configuración de bloqueo Rex sobre el Mediterráneo occidental favorecía el descuelgue de danas desde el norte del Atlántico hacia el entorno del golfo de Cádiz, induciendo una importante circulación de sur sobre la Península y elevando significativamente las temperaturas máximas. A final del mes se empezó a fortalecer la situación de Font denominada «Anticiclón Atlántico Europeo» aumentando así la estabilidad atmosférica sobre nuestro territorio.

A2. Primavera (marzo, abril y mayo)

El mes de marzo comenzó con el desplazamiento del anticiclón «Atlántico Europeo» hacia las islas británicas, Escandinavia e interior de Europa. Este patrón típico de bloqueo favorecía el descuelgue de bajas atlánticas hacia el oeste peninsular y hacia la región del golfo de Cádiz, desde donde se trasladaban al norte de Argelia por la zona del Estrecho. Este patrón dio lugar al desarrollo de fuertes precipitaciones que acumularon cantidades importantes en puntos del sur peninsular y del Levante. Destacó la precipitación registrada el día 5 en la ciudad autónoma de Ceuta donde se observaron 132.2 mm en 24 horas de los cuales 83 mm se produjeron en tan solo una hora.

Los días 8 y 9 de marzo una borrasca fría se situó sobre la Península provocando precipitaciones generalizadas y bajas temperaturas con descenso de la cota de nieve, destacando una copiosa nevada sobre la ciudad de Burgos. A partir del día 10 el anticiclón subtropical fue ganando terreno por el sur peninsular e intensificándose a lo largo de los días a la par que se mantenía una circulación polar muy activa al norte del paralelo 50 °N donde circulaban extensas borrascas cuyos frentes rozaban Galicia y la costa cantábrica. La estabilidad se mantuvo hasta el día 18 cuando el anticiclón que llevaba días desplazándose hacia el norte se situó al oeste de Irlanda con eje en dirección meridiana. Con esta configuración y la presencia de una región de bajas presiones sobre gran parte del Mediterráneo occidental se produjo una advección de flujo del norte-noreste sobre la Península, provocando un acusado descenso de las temperaturas y precipitaciones más abundantes en el Cantábrico, Baleares y mitad oriental peninsular, siendo las precipitaciones en forma de nieve por encima de los 1000 m de altitud.

A partir del día 22 el anticiclón atlántico comenzó a desplazarse hacia el interior del continente europeo cesando la advección de norte sobre la Península e intensificándose el flujo del este sobre el Estrecho y las Canarias. En los últimos días de mes se impuso una situación de escaso gradiente bórico sobre la Península y dorsal en altura, con tiempo muy tranquilo. Por contra, en Canarias el flujo del este provocó un episodio de vientos muy fuertes y una intrusión de polvo de origen sahariano que afectó el día 23 a las islas más orientales. Además, entre los días 27 y 28 una borrasca con características subtropicales se situó al norte del archipiélago provocando precipitaciones en las islas más occidentales.

Abril continuó con el bloqueo anticiclónico sobre Europa occidental y el Atlántico Norte, permitiendo una intensa actividad ciclónica a latitudes relativamente bajas. De este modo se generaron diferentes borrascas sobre las Azores que alcanzaban el oeste peninsular, afectando la parte extrema de sus frentes a las Canarias. En general, las borrascas perdían intensidad a su llegada a la Península, pero inestabilizaban la atmósfera provocando tormentas dispersas y de poca importancia en muchas regiones, a excepción del día 10 cuando las tormentas presentaron una mayor intensidad llegando a observarse el desarrollo de alguna supercélula (figura A-A4).



Figura A-A3 — Borrasca de características subtropicales al norte del archipiélago canario el día 28 de marzo a mediodía. Imagen del satélite Suomi-NPP.

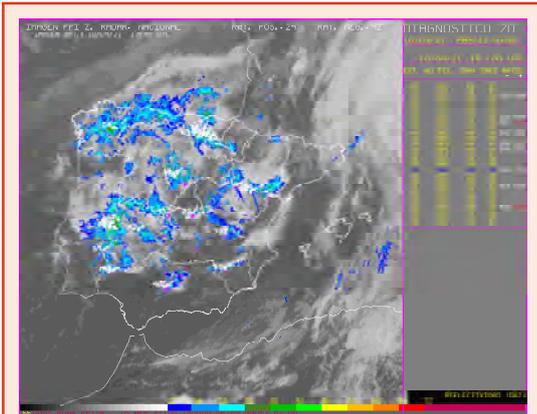


Figura A-A4 — Composición nacional radar. Convección generalizada con presencia de supercélulas en la Península durante el 10 de abril.



Figura A-A5 — Borrasca Lola el día 22 de abril sobre el Atlántico Norte. Imagen RGB natural del satélite Meteosat.

El trasiego de borrascas por la Península se prolongó gran parte del mes, reforzándose algunas de ellas en el golfo de Cádiz y dejando precipitaciones más importantes por la mitad suroccidental, sur y Levante. El día 22 una extensa vaguada atlántica dio origen a la formación en el Atlántico Norte de otra profunda borrasca a la que se denominó Lola (figura A-A5).

La borrasca fue desplazándose lentamente hacia el oeste hasta situarse frente a la Península sin llegar a entrar en ella, manteniéndose estacionaria a la vez que iba rellenándose. No obstante, el aire frío de la vaguada y el forzamiento dinámico en su zona delantera favorecían el desarrollo de tormentas por toda la Península. Así, abril acabó como un mes en el que predominó la inestabilidad en la Península y Baleares, a excepción de las Canarias donde dominó el régimen de alisios.

A partir del 3 de mayo se reforzó la estabilidad atmosférica sobre la Península comenzando un periodo de aproximadamente una semana con dominio del anticiclón atlántico extendiéndose hacia el Mediterráneo occidental, débil gradiente de presión en superficie y predominio de la circulación de sur que provocó un aumento significativo de las temperaturas máximas

por todo el interior, especialmente en los grandes valles, superándose en muchos puntos los 30 °C. A partir del día 9 el frente frío asociado a una profunda borrasca atlántica localizada sobre Irlanda barrió de oeste a este la Península provocando un descenso extraordinario de las temperaturas máximas, precipitaciones y tormentas generalizadas. Mientras tanto, en Canarias predominaba un régimen de alisios. A partir de entonces se reforzó el anticiclón subtropical en torno a la latitud 30 °N así como las bajas presiones alrededor del paralelo 50 °N, esta situación provocó una intensa circulación zonal sobre la Península que advechaba una masa de aire húmeda de gran recorrido marítimo y que incidía especialmente sobre Galicia (figura A-A6). Con esta

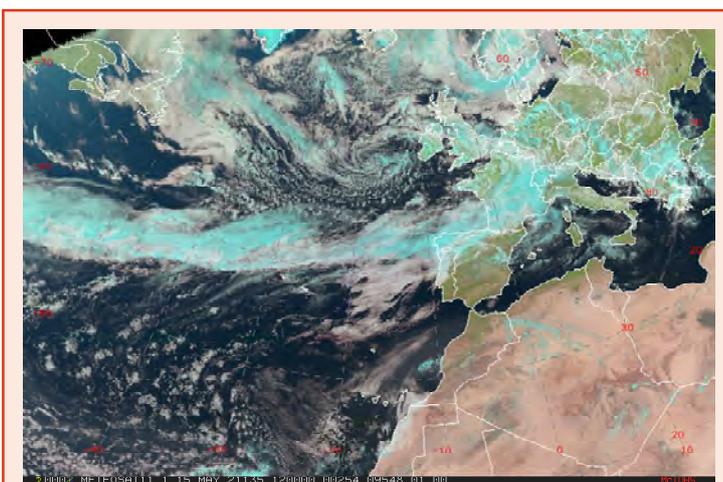


Figura A-A6 – Río atmosférico atlántico afectando a Galicia. Imagen RGB natural del satélite Meteosat de las 12 UTC del 15 de mayo de 2022.

configuración se observaron acumulados de precipitación por encima de los 200 mm en 24 horas en puntos de la provincia de A Coruña. A su vez, las temperaturas se dispararon por encima de los 35 °C en puntos del Levante como consecuencia de la componente térral del viento.

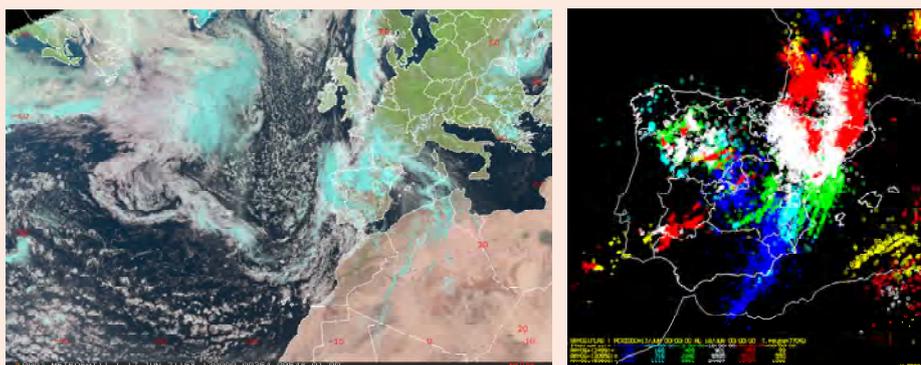
Durante la segunda quincena de mayo a nivel de superficie dominó el anticiclón subtropical atlántico, asentándose una situación de pantano barométrico sobre la Península provocando temperaturas altas por el interior sur peninsular. Por contra, en niveles altos se produjo el paso de diferentes vórtices y danas que provocaron una importante actividad convectiva que afectaron en particular a zonas del norte, centro y este peninsular. Destacó significativamente la actividad convectiva el día 23 en el sureste, llegándose a batir récords de acumulados en 24 horas para el mes de mayo en la ciudad de Murcia y en el aeropuerto del Altet (Alicante), donde se registraron valores de 60.4 y 61.0 mm en 24 horas, respectivamente.

A3. Verano (junio-agosto)

Durante las dos primeras semanas de junio el marco sinóptico se mantuvo muy estacionario con dominio en superficie de las bajas presiones relativas sobre la Península y el de las altas presiones frente a Portugal. En cambio, la situación en altura estaba completamente desacoplada con dominio de una vaguada en altura en el Atlántico frente a la Península. Con esta situación las temperaturas máximas fueron altas para la época en todo el interior. Estas temperaturas junto al aire frío en altura que acompañaba a la vaguada favorecían el desarrollo vespertino de la inestabilidad siendo un mes en el que predominaron las tormentas en gran parte del territorio peninsular. Las tormentas fueron especialmente intensas y estuvieron acompañadas de granizo. Las más destacadas se produjeron entre los días 1 y 5, y entre los días 12 y 14 del mes. Este último día se produjeron fuertes tormentas sobre las ciudades de Ourense y Logroño, observándose en esta última una granizada singular.

La situación sinóptica comenzó a cambiar el día 17 cuando una borrasca fría se centró sobre la Península generando intensa convección (figura A-A7) y un descenso acusado de las temperaturas máximas dando lugar a un periodo anómalo de temperaturas máximas (anomalías negativas de hasta 10 °C) que se prolongó hasta el día 22 en el tercio occidental y norte peninsular. Las tormentas siguieron produciéndose en muchos puntos de la Península, quedando limitados a su mitad septentrional a partir del día 24 debido al paso de frentes cuyos extremos barrían la cornisa cantábrica. La actividad tormentosa cesó el día 28. Respecto a Canarias, durante todo el mes dominó un régimen de alisios moderado, interrumpido por la circulación del este presente los días 8 y 9 que elevó de manera significativa las temperaturas en el archipiélago y provocó un episodio de calima.

Figura A-A7 —
Imagen RGB natural de las 12 UTC del satélite Meteosat (derecha) y rayos observados en 24 horas (izquierda) del día 17 de junio de 2022.



Durante los primeros días de julio se reforzaron las bajas presiones relativas por la mitad sur peninsular donde las temperaturas fueron relativamente altas para la época. En altura la circulación zonal débil de caída de dorsal condicionaba una atmósfera estable y una ausencia total de precipitaciones. Durante los días 10 y 11 se produjo la primera invasión del verano de la masa de aire continental africana que elevó las temperaturas por encima de los 40 °C en grandes áreas del sur, centro, norte y valles del este peninsular. Este episodio de calor finalizó rápidamente con el paso de una amplia vaguada sobre la Península los días 12 y 13 que además provocó precipitaciones en todo el litoral norte peninsular.

A partir del 14 de julio la circulación estuvo regida por el anticiclón localizado frente a las islas británicas y las bajas presiones relativas hacia el suroeste peninsular que se fueron desplazando hacia el centro peninsular. A su vez, en altura se reforzó una dorsal sobre la Península. Esta situación mantuvo un régimen de vientos de componente norte sobre el Cantábrico y del este sobre la vertiente mediterránea evitando que en estas zonas las temperaturas no se elevasen tanto, como sí lo hicieron en la mitad centro y suroeste. Este episodio cálido por el interior dio lugar a la primera ola de calor del verano entre los días 21 y 23. El intenso calor remitió el día 24 por la llegada de un frente atlántico a la Península tras la retirada hacia el este de la dorsal en altura y la aproximación por el norte de una borrasca atlántica acompañada en altura

por una vaguada. El paso de la vaguada provocó tormentas en general débiles en zonas altas del centro peninsular el día 25, y más intensas el día 26 en todo el Levante y Baleares. Hasta final de mes se reforzó de nuevo la situación de baja térmica al suroeste y dorsal en altura, factores que favorecieron temperaturas máximas muy elevadas en la mitad suroeste, centro y valle del Ebro. Mientras tanto, en Canarias casi todo el mes dominaron los alisios, interrumpidos intermitentemente por invasiones de la masa de aire continental africana con una duración media de estas invasiones de un par de días.

Agosto comenzó con el anticiclón subtropical extendido por la mitad sur peninsular y el paso de sucesivos frentes atlánticos circulando por la cornisa cantábrica, con temperaturas propias para la época. A partir del 11 y hasta el día 16 se produjo la ola de calor más intensa del verano, alcanzando su punto álgido entre los días 13 y 15 en los que se rebasaron los 45 °C en muchos puntos de Andalucía oriental y sureste de España (figura A-A8). El episodio cálido estuvo provocado por el dominio de las altas presiones subtropicales que se extendían por el Mediterráneo, así como por la influencia de una amplia vaguada al oeste peninsular con eje en dirección SW-NE que inducía flujo de suroeste en niveles altos de origen subtropical y de características muy secas. Un aspecto a destacar fue la intensa anomalía en las temperaturas máximas de más de 4 °C en términos medios, así como el récord absoluto de temperatura máxima de España observado el día 14 en la localidad de Montoro (Córdoba).

A medida que empezaba a remitir la ola de calor en la Península comenzó otra ola de calor en las Canarias que se prolongó entre los días 15 y 19 de agosto, observándose registros entre 42 y 45 °C. Además de las altas temperaturas en Canarias se añadió el fuerte viento de componente este con rachas que superaron los 70 km/h en amplias zonas del archipiélago.

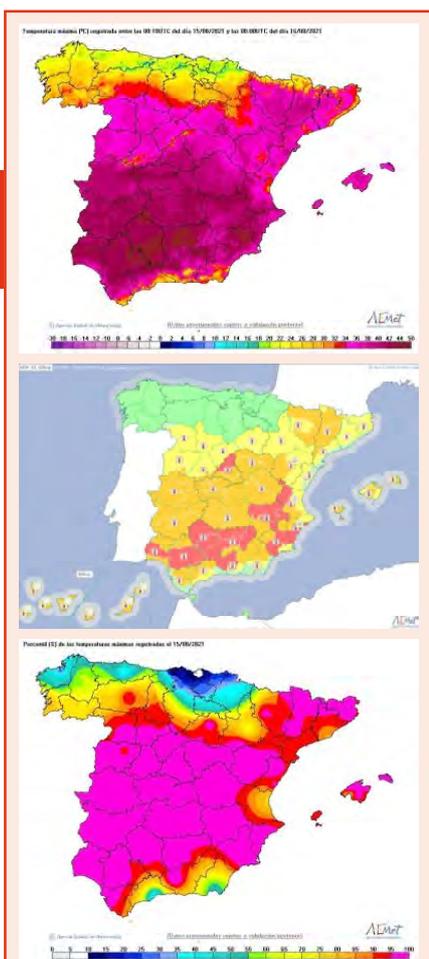


Figura A-A8 — Temperaturas máximas (arriba), percentiles (abajo) y avisos emitidos por temperaturas extremas el día 15 de agosto de 2022.

Tras las intensas olas de calor la situación meteorológica retornó a condiciones normales para la época con dominio de las bajas presiones relativas sobre el territorio peninsular, y el paso de algunos vórtices en altura que dieron lugar a tormentas dispersas en puntos del interior. En Canarias se recuperó también la situación normal de alisios.

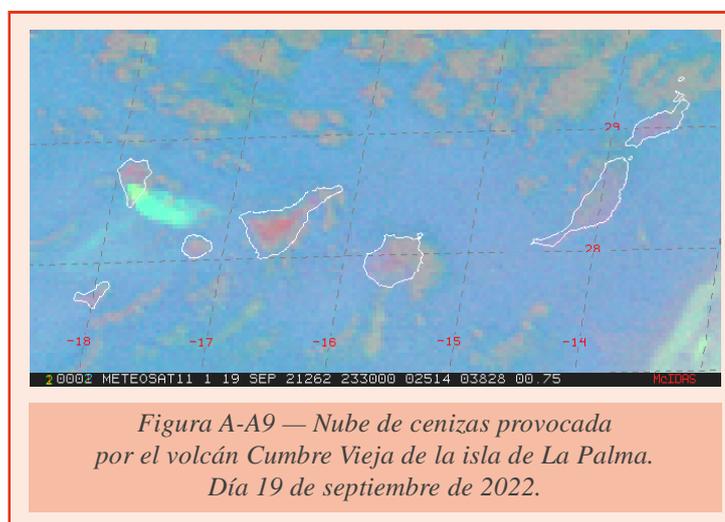
A4. Otoño (septiembre-noviembre)

El mes de septiembre comenzó con una configuración de tipo rex, altas presiones sobre las islas británicas y circulación de bajas atlánticas por el norte de la Península. Este marco sinóptico favoreció el desarrollo de tormentas generalizadas entre el 31 de agosto y el 3 de septiembre. El día 1 las tormentas adquirieron una gran intensidad en zonas del centro y este peninsular, destacando las precipitaciones acumuladas en 24 horas en localidades de Cuenca y Zaragoza donde se superaron los 100 mm. El episodio de tormentas finalizó el día 4 tras la retirada hacia el este de la vaguada en altura y el refuerzo de una dorsal anticiclónica sobre la Península. Entre tanto, en Canarias predominó el flujo de suroeste en superficie provocado por la existencia de una borrasca al noroeste de las islas que se mantuvo muy estacionaria durante la primera semana del mes. Esta situación dio lugar a una ola de calor en el archipiélago entre los días 5 y 7 de septiembre.

En la segunda semana del mes la situación sobre la Península se mantuvo relativamente tranquila. Lo más relevante fueron las elevadas temperaturas mínimas que se alcanzaron en el litoral norte con valores por encima de los 27 °C en Bilbao el día 7. Estas temperaturas fueron provocadas por la circulación de sur que originaba una borrasca estacionaria localizada al oeste de Portugal que mantenía sobre la Península una masa de aire de características subtropicales. Esta misma configuración dio lugar también a una nueva ola de calor sobre las Canarias que se prolongó desde el día 11 hasta el 13.

Entre los días 13 y 16 una borrasca fría afectó a la Península dando lugar a una nueva inestabilización de la atmósfera y a precipitaciones acompañadas de tormenta. Como hecho destacable, aunque ajeno a la meteorología, el domingo 19 comenzó la erupción del volcán Cumbre Vieja ubicado en la isla de La Palma, la erupción se inició dentro de un régimen de vientos de NW (figura A-A9).

Un nuevo episodio de tormentas repartidas por toda la Península tuvo lugar entre los días 20 y 25 cuando una vaguada en altura se descolgó de la circulación desde el interior del continente europeo hacia el suroeste. La vaguada terminó estrangulándose en varios vórtices o danas localizándose al principio por el noreste y norte, y propagándose posteriormente hacia el suroeste. Mientras, en superficie reinaba una situación de escaso gradiente bórico, aunque con una circulación débil del este provocada por el anticiclón atlántico que se extendía con una configuración inclinada en forma de cuña hacia las islas británicas. El día 23 se produjeron las tormentas más intensas en el cuadrante suroccidental, con acumulados en Lepe (Huelva) de 80 mm en una hora y de algo más de 130 mm en 12 horas. A partir del día 25 la dana al oeste de Portugal comenzó a



rellenarse y a desplazarse por el norte peninsular hasta embeberse en el seno de la circulación polar cesando así la actividad tormentosa el día 16. A partir de este día la estabilidad dominó hasta final de mes, tanto en la Península como en ambos archipiélagos, presentando la circulación en altura un flujo débil de poniente mientras que en superficie el anticiclón subtropical se extendía por gran parte del territorio.

Octubre empezó con una circulación polar muy activa en torno a los 50 °N que dio lugar a la formación de borrascas circulando por esa latitud. Algunos de sus frentes recorrieron la Península de oeste a este entre los días 3 y 5, siendo especialmente activo el del día 3 cuyos efectos más destacados fueron las precipitaciones que se produjeron de forma generalizada y las fuertes rachas de viento superiores a los 100 km/h que se observaron en puntos del litoral cantábrico. A partir del 6 se configuró un nuevo marco sinóptico con el asentamiento de un sistema de altas presiones sobre el Cantábrico reforzado por una extensa dorsal en altura que abarcaba desde las Canarias hasta Escandinavia. En la Península había un gradiente de presión muy débil con un mínimo relativo hacia el suroeste peninsular. De este modo el tiempo sensible fue el de temperaturas elevadas en la Península, escasez de precipitaciones, y flujo débil del este, aunque algo más intenso en el Estrecho. El anticiclón en superficie se trasladó hacia el interior del continente europeo manteniéndose la situación de bloqueo hasta el día 20. A partir de entonces la circulación atlántica se fue tornando más activa permitiendo así la llegada de una vaguada que fue descolgándose hacia el mar de Alborán hasta cerrarse en dana el día 22, dando lugar a precipitaciones tormentosas y de carácter torrencial en el cuadrante sureste peninsular y sur de las Baleares. Posteriormente, una sucesión de pequeños vórtices en altura que circularon por el norte de África y el mar de Alborán mantuvieron la inestabilidad en el sureste, traduciéndose esta en precipitaciones en general de carácter débil.

A partir del día 29 se configuró una situación de intenso flujo zonal a bajas latitudes que dio origen a un río atmosférico con incidencia directa sobre la mitad centro peninsular (figura A-A10). El río se mantuvo hasta el día 31 debido al continuo paso de frentes atlánticos. Por su parte, las Canarias se mantuvieron todo el mes de octubre bajo el dominio de los alisios gobernados por el anticiclón subtropical.

Durante la primera semana de noviembre la circulación atlántica comenzó a ondularse y a formarse una amplia vaguada sobre el Atlántico que acabó descolgándose sobre la Península y formando una dana sobre el Mediterráneo occidental próxima a Argelia. Así, el día 6 se produjo la ciclogénesis de la borrasca Blas (figura A-A11), la cual se mantuvo estacionaria en

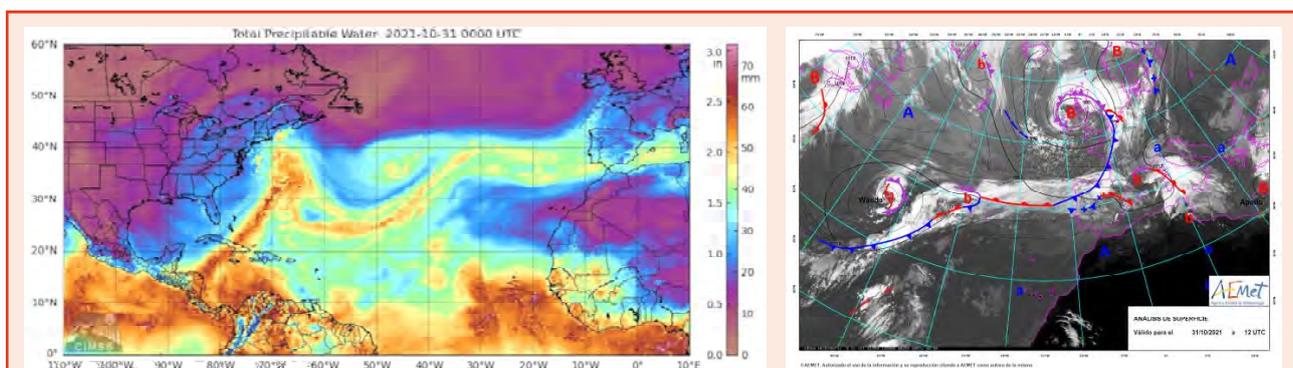


Figura A-A10 — Agua precipitable (izquierda; fuente: Universidad de Wisconsin-Madison) y guía de diagnóstico de niveles bajos (derecha) del 31 de octubre de 2022. Situación correspondiente al río atmosférico incidiendo sobre la Península.

esta parte del Mediterráneo durante más de diez días, configuración que se corresponde con el tipo «Depresión Balear» de la clasificación de Font. Los efectos más destacados de Blas fueron las intensas rachas de viento que superaron los 100 km/h en muchas zonas marítimas de la vertiente mediterránea, así como las notables acumulaciones de precipitación observadas en Baleares, especialmente en la sierra de Tramontana donde se registraron más de 400 mm a lo largo de todo el tiempo que se mantuvo la borrasca. Mientras tanto, en Canarias predominó un régimen de alisios gobernado por el anticiclón subtropical con centro al norte de las islas y las bajas relativas localizadas sobre Marruecos.

El día 17 la borrasca Blas terminó por desgastarse imponiéndose una situación anticiclónica que dominaba el norte peninsular, y otra ciclónica con más influencia por el sur provocada por el desplazamiento de una borrasca atlántica desde las Canarias hacia la Península, y una región de bajas presiones al norte de África. Esta configuración dio lugar al desarrollo de precipitaciones por la mitad sur peninsular entre los días 18 y 20.

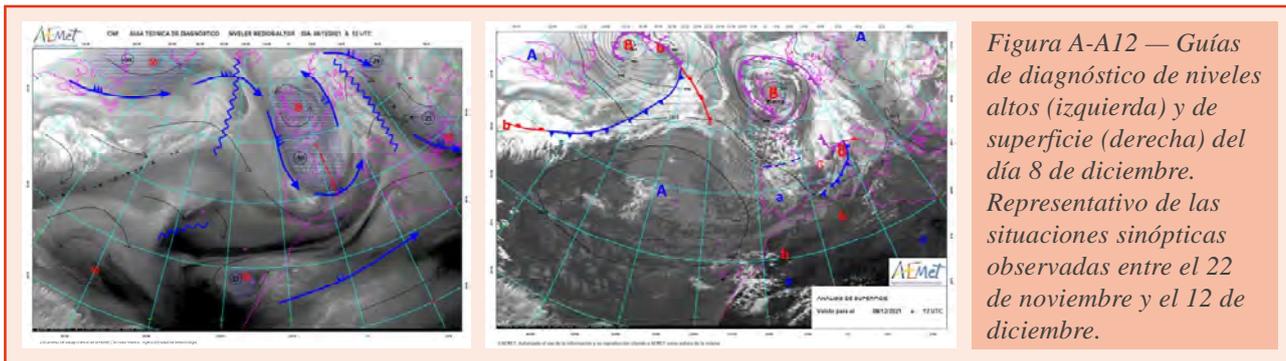
La última decena de noviembre estuvo caracterizada por dos invasiones de aire polar ártico sobre la Península. Una primera se produjo entre los días 22 y 25 dando lugar a tiempo invernal en todo el territorio, con precipitaciones generalizadas (de nieve por encima de los 800 m) y heladas por todo el interior. Destacó también el viento en el litoral norte mediterráneo, llegándose a emitir avisos de nivel en el prelitoral sur de Tarragona. La segunda invasión de aire polar se produjo el día 27 prolongándose hasta el 29. En este episodio, las heladas se repitieron de nuevo por todo el interior peninsular pero las nevadas quedaron más restringidas al Cantábrico, emitiéndose avisos rojos por nevadas copiosas y acumulaciones de precipitación en las comarcas del interior de Navarra, País Vasco y Cantabria el día 28. Ambas invasiones estuvieron provocadas fundamentalmente por una configuración de altas presiones con disposición meridiana frente a las islas británicas y bajas presiones sobre Europa occidental y en los entornos de los golfos de León y Génova. El archipiélago canario se mantuvo al margen de la primera invasión fría al encontrarse afectado por una borrasca atlántica que dejó precipitaciones en todas las islas, en cambio, la segunda invasión sí alcanzó al archipiélago, aunque con mucha menos intensidad que a la Península.

A5. Invierno (diciembre)

La circulación polar sobre el Atlántico se mantuvo muy ondulada desde mediados de noviembre hasta el 12 de diciembre, produciéndose una alternancia de pasos de vaguadas y dorsales de gran amplitud por la Península. Las vaguadas se profundizaban hacia la mitad norte del Mediterráneo occidental marcando un claro flujo de NNW sobre la Península (figura A-A12), provocando abundantes precipitaciones en el Cantábrico oriental, alto Ebro y en los Pirineos orientales, destacando acumulados de más de 200 mm a lo largo de la semana del 6 al 12 de diciembre. También esta situación provocó vientos intensos en todo el litoral norte y mitad este peninsular y Baleares.



Figura A-A11 — Borrasca Blas sobre el Mediterráneo occidental afectando a las Baleares. Imagen del canal visible del satélite Meteosat del día 9 de noviembre de 2022 a las 14:40 UTC.



Desde el día 13 de diciembre comenzó un dominio anticiclónico sobre la Península y Baleares debido a la extensión hacia el sur de las altas presiones británico-escandinavas, dando lugar a un periodo de estabilidad. Este periodo se caracterizó por la ocurrencia de persistentes nieblas en los valles del norte peninsular (figura A-A13), especialmente en el valle del Ebro, así como por el cambio a un régimen de vientos de componente este sobre la Península y Baleares. Por contra, el archipiélago canario que durante la primera parte del mes estuvo bajo dominio anticiclónico, donde predominó el flujo de norte y del este, a partir del 13 comenzó a estar sometido a la acción de bajas atlánticas y con un mayor predominio de la componente oeste del viento.

La situación de estabilidad se prolongó hasta el día 20 cuando un rosario de frentes atlánticos asociados a una continua regeneración de bajas atlánticas frente a la Península afectó durante los siguientes seis días a la mitad occidental peninsular. A partir del día 27 y hasta final de año se configuró un marco anticiclónico a todos los niveles en todo el cuadrante suroccidental de Europa y el Mediterráneo occidental, con escaso gradiente bórico en la Península. La situación de bloqueo y gran estabilidad dio lugar a temperaturas máximas extraordinarias para la época que superaron los 20 °C en todo el litoral mediterráneo y gran parte del litoral cantábrico.



ANEXO B. OLAS DE CALOR Y FRÍO: DEFINICIÓN Y METODOLOGÍA. EVOLUCIÓN

B1. Ola de calor. Definición y metodología

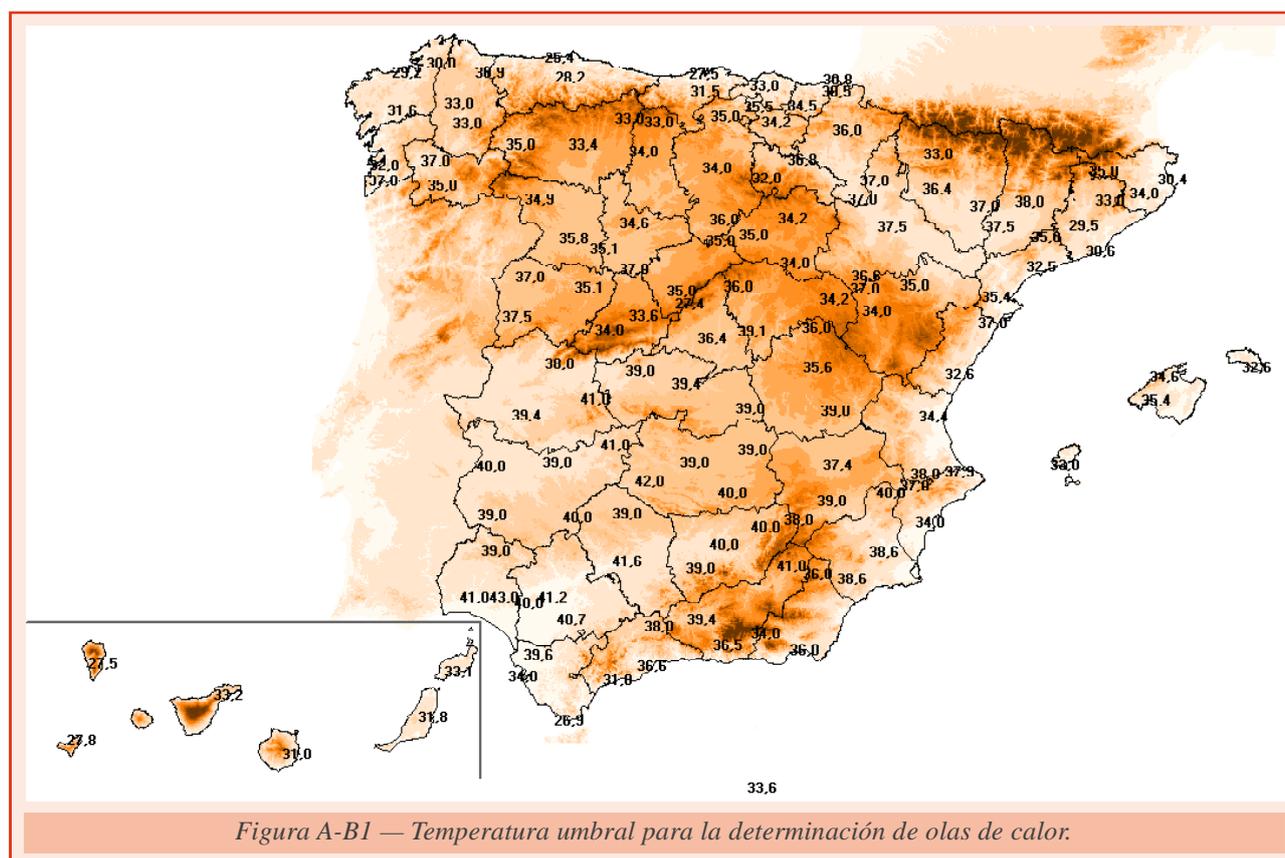
Se considera ola de calor un episodio de al menos tres días consecutivos, en que como mínimo el 10% de las estaciones consideradas registran máximas por encima del percentil del 95% de su serie de temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto del periodo 1971-2000.

A continuación, se describe la metodología empleada:

En primer lugar se procede a determinar las estaciones en base a una serie de requisitos: tienen que funcionar en la actualidad, tener una serie suficientemente larga para poder calcular sus percentiles y distribuirse uniforme sobre el territorio. Con estas premisas se seleccionan 137 estaciones, de las que 6 pertenecen a Canarias.

A continuación, se calcula para cada estación una *temperatura umbral*, que de acuerdo al criterio establecido, es el percentil del 95% de su serie de temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto del periodo 1971-2000. El mapa de la figura A-B1 representa la distribución de temperatura resultante y la ubicación de las estaciones.

115



El siguiente paso consiste en localizar los episodios, que según los criterios fijados, serán considerados olas de calor, y se realiza en tres etapas:

Primera etapa. Se obtienen para cada una de las 137 estaciones seleccionadas, sus *episodios cálidos*, entendiendo como tales, episodios de al menos tres días consecutivos con temperatura máxima que iguala o supera su temperatura umbral. Dado que es bastante improbable que una ola de calor se presente fuera de los meses veraniegos, solo se estudia el periodo comprendido entre el 1 de junio y el 30 de septiembre.

Segunda etapa. Se determinan los *días cálidos*, considerando como tales a aquellos en que al menos el 10 % de las estaciones consideradas están dentro de uno de los *episodios cálidos* localizados en la primera etapa.

Tercera etapa. Finalmente se localizan las olas de calor, que son todos aquellos episodios de tres o más *días cálidos* consecutivos. Cuando dos olas de calor están separadas por tan solo un día, se consideran una única ola.

Los datos de Canarias se han procesado de manera independiente, pero con una variación respecto al criterio general, ya que al utilizarse solamente seis estaciones, bastaría con que uno de los observatorios registrase un episodio cálido para que se considerase ola de calor en el archipiélago; por ello, en Canarias, se exige que sean al menos dos las estaciones que registren un episodio cálido para que constituya una ola de calor.

Los tres factores que determinan la intensidad de una ola de calor son los siguientes: las temperaturas alcanzadas durante la misma, su duración y el territorio afectado, para lo que es necesario cuantificar estos aspectos para cada una de las olas, para que sean comparables.

Con el fin de estimar el territorio afectado durante una ola de calor, se ha determinado el día que más provincias la registraron, asignando a la ola dicho máximo. Se considera que un día determinado una provincia está viviendo una ola de calor cuando al menos uno de los observatorios estudiados está dentro de un episodio cálido, es decir, no es suficiente con que supere la temperatura umbral de manera puntual.

Para establecer la magnitud de las temperaturas, en primer lugar se han determinado las estaciones con algún día de episodio cálido durante la ola de calor, y se ha tomado la media de las temperaturas máximas de estas estaciones para el día más cálido como dato representativo; a esta temperatura se la ha denominado *temperatura máxima de la ola*. También se ha calculado para cada estación la anomalía máxima de las temperaturas registradas durante la ola con respecto a su temperatura umbral, asignando como valor representativo para la ola la media de dichas anomalías; a este valor se le denomina *anomalía de la ola*.

Así pues, los cuatro valores elegidos para caracterizar una ola de calor son:

- su duración;
- el número de provincias afectadas;
- la temperatura máxima de la ola;
- la anomalía de la ola.

Los resultados para la Península, Baleares, Ceuta y Melilla se presentan en la tabla A-B1, y para Canarias en la tabla A-B2.

Tabla A-B1. Olas de calor en Península, Baleares, Ceuta y Melilla desde 1975.

Año	Inicio	Fin	Duración (días)	Anomalia de la ola (°C)	Temperatura máxima de la ola (°C)	Provincias afectadas
2021	21/07/2021	23/07/2021	3	2.0	37.0	16
2021	11/08/2021	16/08/2021	6	4.1	40.2	36
2020	18/07/2020	20/07/2020	3	1.3	36.0	11
2020	25/07/2020	02/08/2020	9	3.1	37.0	23
2020	05/08/2020	10/08/2020	6	2.5	37.0	27
2019	26/06/2019	01/07/2019	6	4.0	38.8	29
2019	20/07/2019	25/07/2019	6	2.0	36.8	30
2019	06/08/2019	10/08/2019	5	3.3	37.9	11
2018	31/07/2018	07/08/2018	8	3.1	38.6	36
2017	13/06/2017	21/06/2017	9	2.6	37.1	30
2017	12/07/2017	16/07/2017	5	3.9	41.1	14
2017	28/07/2017	30/07/2017	3	1.6	37.7	12
2017	02/08/2017	06/08/2017	5	2.9	37.7	23
2017	20/08/2017	22/08/2017	3	2.2	37.4	11
2016	17/07/2016	19/07/2016	3	3.5	37.0	20
2016	26/07/2016	28/07/2016	3	1.3	37.0	13
2016	22/08/2016	25/08/2016	4	1.8	36.0	12
2016	03/09/2016	07/09/2016	5	3.3	39.0	29
2015	27/06/2015	22/07/2015	26	3.4	37.6	30
2015	27/07/2015	29/07/2015	3	2.3	38.7	10
2013	05/07/2013	09/07/2013	5	2.4	37.7	13
2012	24/06/2012	28/06/2012	5	2.1	38.3	25
2012	08/08/2012	11/08/2012	4	3.7	39.5	40
2012	17/08/2012	23/08/2012	7	2.8	36.2	30
2011	25/06/2011	27/06/2011	3	1.6	37.8	15
2011	19/08/2011	21/08/2011	3	2.3	37.1	19
2009	16/08/2009	20/08/2009	5	1.8	35.9	15
2008	03/08/2008	05/08/2008	3	1.5	36.9	17
2007	28/07/2007	31/07/2007	4	1.9	39.4	11
2006	24/07/2006	26/07/2006	3	2.0	35.3	9
2006	04/09/2006	06/09/2006	3	2.6	36.5	15
2005	14/07/2005	17/07/2005	4	2.3	36.8	18
2005	05/08/2005	08/08/2005	4	2.8	38.9	19
2004	27/06/2004	29/06/2004	3	1.4	38.4	17
2004	24/07/2004	26/07/2004	3	2.7	40.0	10
2003	20/06/2003	23/06/2003	4	2.2	36.1	17
2003	30/07/2003	14/08/2003	16	3.7	37.2	38
2001	21/06/2001	25/06/2001	5	1.8	36.0	19
1998	07/08/1998	12/08/1998	6	2.4	35.6	26
1995	17/07/1995	24/07/1995	8	3.3	39.1	30
1994	29/06/1994	05/07/1994	7	2.9	38.6	22
1993	05/08/1993	07/08/1993	3	2.0	37.0	13
1993	18/08/1993	20/08/1993	3	2.8	35.1	18
1992	27/07/1992	29/07/1992	3	1.6	35.3	13
1992	04/08/1992	06/08/1992	3	1.4	39.7	14
1991	12/07/1991	19/07/1991	8	1.8	39.0	25
1991	03/08/1991	06/08/1991	4	1.9	38.6	22
1991	13/08/1991	18/08/1991	6	1.8	37.3	20
1991	25/08/1991	29/08/1991	5	2.6	36.1	16
1990	17/07/1990	24/07/1990	8	2.8	37.1	32
1990	02/08/1990	05/08/1990	4	2.3	36.8	19
1989	16/07/1989	21/07/1989	6	2.5	37.4	36
1989	30/07/1989	02/08/1989	4	2.1	39.0	17
1988	05/09/1988	08/09/1988	4	2.4	38.6	28
1987	11/08/1987	16/08/1987	6	4.0	37.5	27
1987	12/09/1987	17/09/1987	6	2.8	34.1	13
1985	22/07/1985	25/07/1985	4	1.3	37.9	23
1984	22/07/1984	24/07/1984	3	1.9	39.4	12
1982	05/07/1982	09/07/1982	5	3.5	38.5	29
1981	11/06/1981	16/06/1981	6	2.6	38.7	20
1981	28/07/1981	30/07/1981	3	2.7	38.0	21
1979	27/07/1979	29/07/1979	3	1.7	38.3	22
1978	14/07/1978	17/07/1978	4	3.0	39.3	27
1976	05/08/1976	07/08/1976	3	1.9	38.5	14
1975	13/07/1975	16/07/1975	4	2.5	40.4	14

Tabla A-B2. Olas de calor en Canarias desde 1975

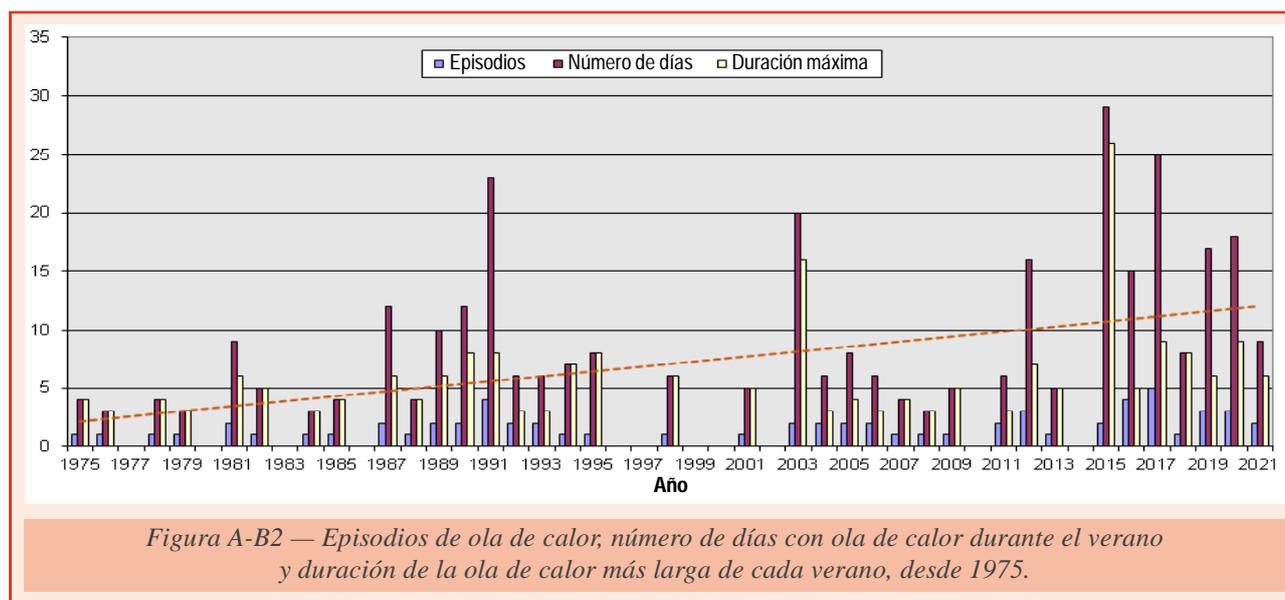
Año	Inicio	Fin	Duración (días)	Anomalía de la ola (°C)	Temperatura máxima de la ola (°C)	Provincias afectadas
2021	15/08/2021	19/08/2021	5	5.8	35.1	2
2021	05/09/2021	07/09/2021	3	1.3	28.9	1
2021	11/09/2021	13/09/2021	3	2.0	29.6	1
2015	10/08/2015	13/08/2015	4	2.7	30.7	2
2015	22/09/2015	25/09/2015	4	1.2	28.9	1
2013	20/08/2013	23/08/2013	4	2.4	32.7	2
2012	25/06/2012	27/06/2012	3	7.1	39.0	1
2012	17/07/2012	23/07/2012	7	4.2	33.5	2
2012	19/08/2012	22/08/2012	4	2.9	31.9	2
2012	20/09/2012	26/09/2012	7	1.7	29.4	1
2011	20/06/2011	23/06/2011	4	5.0	37.4	1
2010	27/08/2010	31/08/2010	5	3.9	33.5	2
2009	24/07/2009	01/08/2009	9	6.0	36.5	2
2007	28/07/2007	31/07/2007	4	6.8	37.4	2
2006	03/09/2006	07/09/2006	5	5.7	35.3	2
2005	20/07/2005	22/07/2005	3	2.9	32.6	2
2005	04/09/2005	08/09/2005	5	5.4	34.8	2
2004	23/07/2004	29/07/2004	7	6.9	36.2	2
2004	04/08/2004	06/08/2004	3	0.9	30.4	2
2004	17/08/2004	21/08/2004	5	2.0	29.6	1
2004	26/08/2004	31/08/2004	6	5.0	34.9	2
2003	12/08/2003	14/08/2003	3	1.8	29.4	1
2003	13/09/2003	20/09/2003	8	1.6	29.3	1
2002	15/09/2002	18/09/2002	4	1.5	29.0	1
1999	05/08/1999	07/08/1999	3	0.8	28.4	1
1999	27/08/1999	29/08/1999	3	3.8	33.1	2
1998	05/08/1998	07/08/1998	3	3.2	34.9	2
1990	05/08/1990	11/08/1990	7	5.9	35.4	2
1990	26/08/1990	28/08/1990	3	4.8	35.9	1
1987	07/09/1987	16/09/1987	10	6.7	35.4	2
1986	05/09/1986	07/09/1986	3	4.9	34.4	2
1985	03/09/1985	05/09/1985	3	3.7	35.1	1
1984	17/07/1984	19/07/1984	3	3.2	35.3	2
1983	05/09/1983	07/09/1983	3	6.1	36.1	2
1983	25/09/1983	27/09/1983	3	4.9	35.0	2
1982	24/07/1982	27/07/1982	4	5.8	36.7	2
1980	06/08/1980	09/08/1980	4	4.3	34.7	2
1978	11/09/1978	13/09/1978	3	5.6	33.7	2
1976	05/08/1976	15/08/1976	11	6.1	35.3	2
1976	28/08/1976	10/09/1976	14	2.3	30.9	1

B2. Evolución de las olas de calor registradas en España desde 1975

De acuerdo con la definición y metodología descritas en el punto B1 de este anexo, la evolución de las olas de calor registradas en nuestro país desde 1975 puede verse en los gráficos que siguen a continuación.

El gráfico de la figura A-B2 representa, para cada año, el número de episodios de ola de calor, el número total de días y la duración de la ola de calor más larga para Península, Baleares, Ceuta y Melilla. Como se puede observar en la citada figura, destacan los años 1989, 1991, 2003, 2012, 2015, 2016, 2017 y 2018 por las siguientes razones:

- 2017 por ser el año con más olas de calor, concretamente 5, que totalizan 25 días; le siguen 1991 y 2016 con 4, que totalizan 23 días en 1991 y 15 en 2016.
- 2003 por registrar la segunda ola de calor más larga, con 16 días y miles de víctimas mortales repartidas por gran parte de Europa.
- 2015 por ser la ola de calor más larga en los años considerados, 26 días, superando en 10 días a la de 2003.

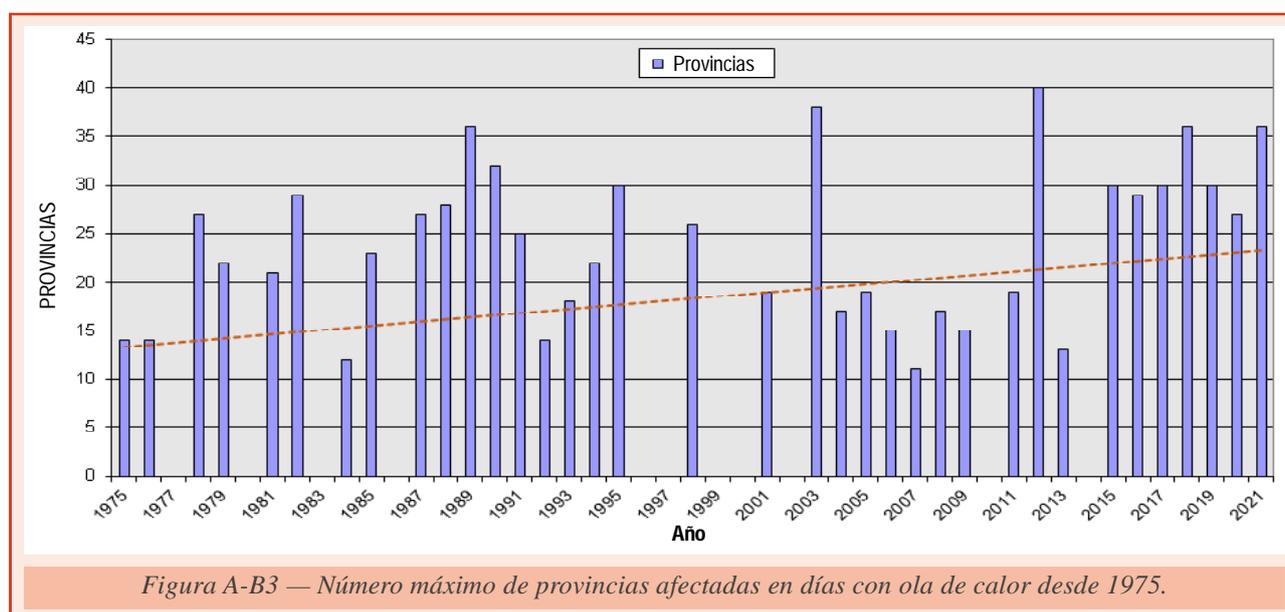


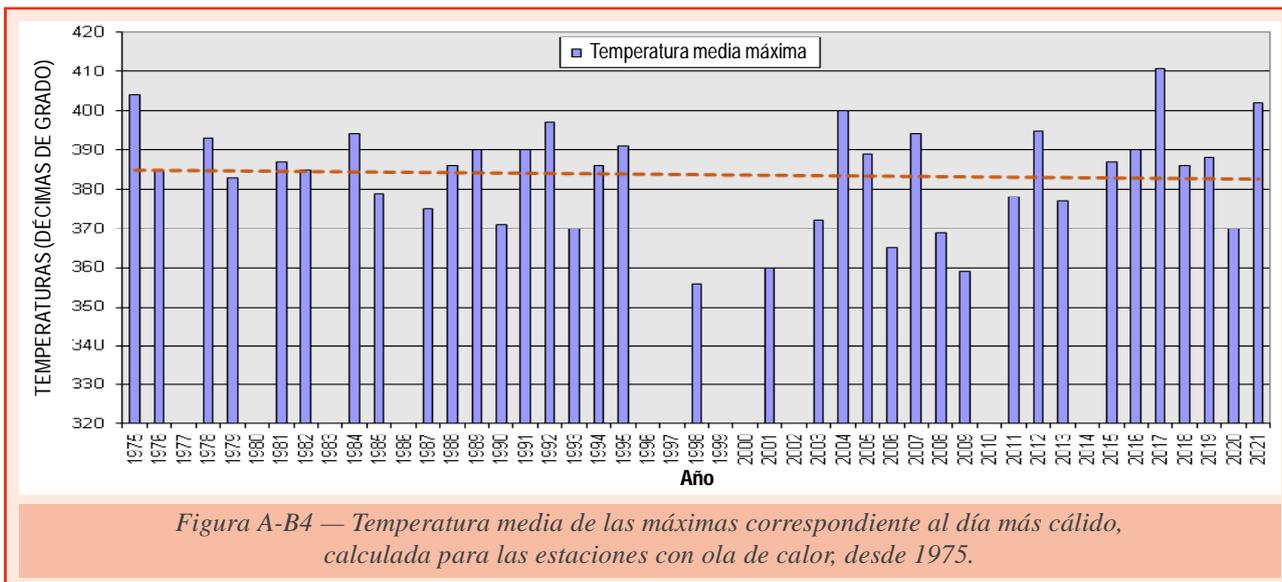
— 2012 por ser la ola de calor más extensa, con 40 provincias afectadas el 10 de agosto, le sigue 2003 con 38 provincias los días 3 y 4 de agosto y las de 1989 y 2018 con 36 provincias con ola de calor, los días 19 de julio de 1989 y 3 de agosto de 2018.

Con línea discontinua se muestra la línea de tendencia del número anual de días con ola de calor, cuya pendiente indica que el número de días con ola de calor aumenta a razón de 2,1 días cada 10 años.

El gráfico de la figura A-B3 muestra el número máximo de provincias afectadas en días con ola de calor para Península, Baleares, Ceuta y Melilla. Destacan especialmente los años 2012, con 40 provincias afectadas los días 9 y 10 de agosto y el 2003, con 38 provincias los días 3, 4 y 9 de agosto.

Con línea discontinua se incluye la línea de tendencia que muestra también una pendiente positiva que indica que las olas de calor van ganando en extensión a razón de 2,1 provincias cada 10 años.



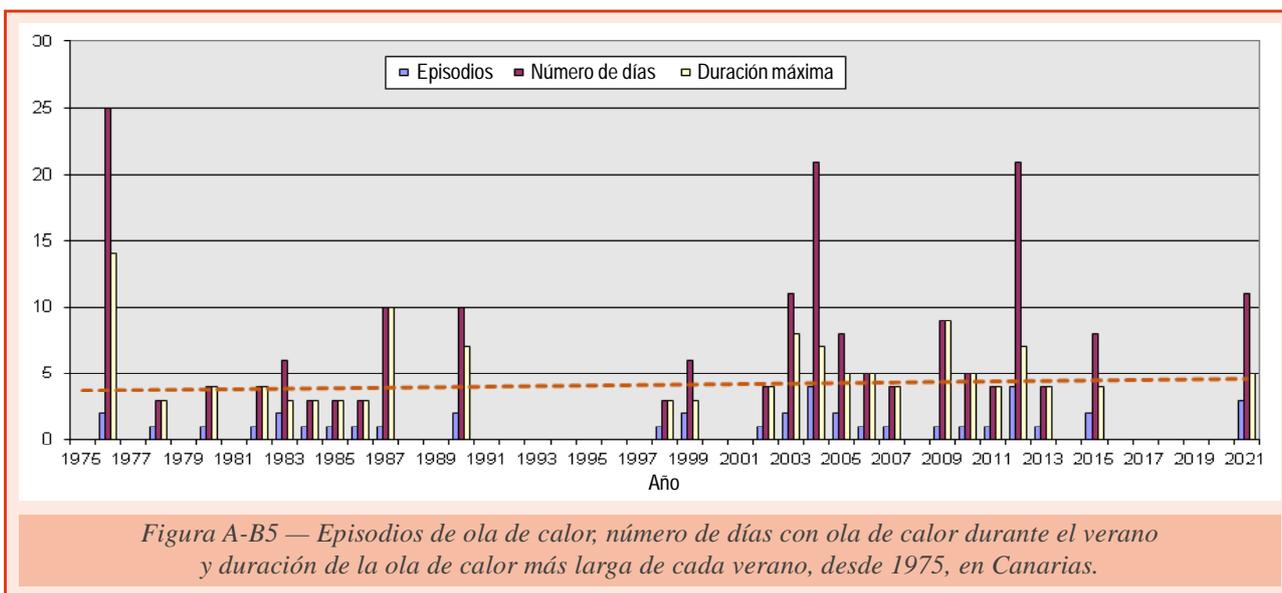


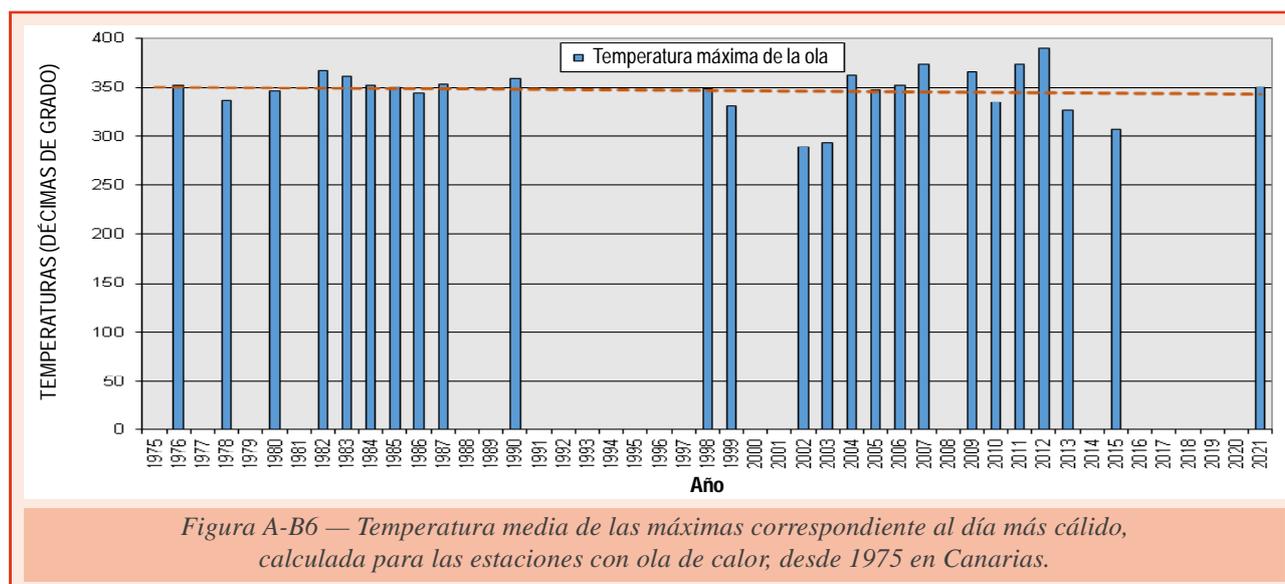
La figura A-B4 representa la temperatura máxima de la ola más alta para cada año para Península, Baleares, Ceuta y Melilla. Destacan la de 2017, con una temperatura máxima de la ola de 41.1 °C, correspondiente al día 13 de julio, seguida de la de 1975 con 40.4 °C el día 16 de julio, aunque en ambos casos se trata de olas de calor que afectan fundamentalmente al centro y sur peninsular.

En este caso, la línea de tendencia muestra una pendiente negativa, equivalente a una disminución de 0.4 °C cada 10 años, que podría deberse a la mayor extensión, llegando a zonas situadas más al norte.

El gráfico de la figura A-B5 representa para Canarias el número de episodios de ola de calor, el número total de días y la duración de la ola de calor más larga. Sobresale el año 1976, tanto por el número total de días con ola de calor (25 días) como por la ola más larga, con 14 días de duración.

En Canarias la línea de tendencia del número anual de días con ola de calor no muestra tendencia.





La figura A-B6 representa la temperatura máxima de la ola más alta para cada año, desde 1975 en Canarias. La más elevada, 39.0 °C, se alcanzó el año 2012, concretamente el 27 de junio; en segundo lugar se encuentra con 37.4 °C de los días 22 de junio de 2011 y 30 de julio de 2007. Esta variable disminuye a razón de 0.17 °C cada 10 años.

B3. Ola de frío. Definición y metodología

Se considera ola de frío 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 % de su serie de temperaturas mínimas diarias de los meses de enero y febrero del periodo 1971-2000.

A continuación, se describe la metodología empleada:

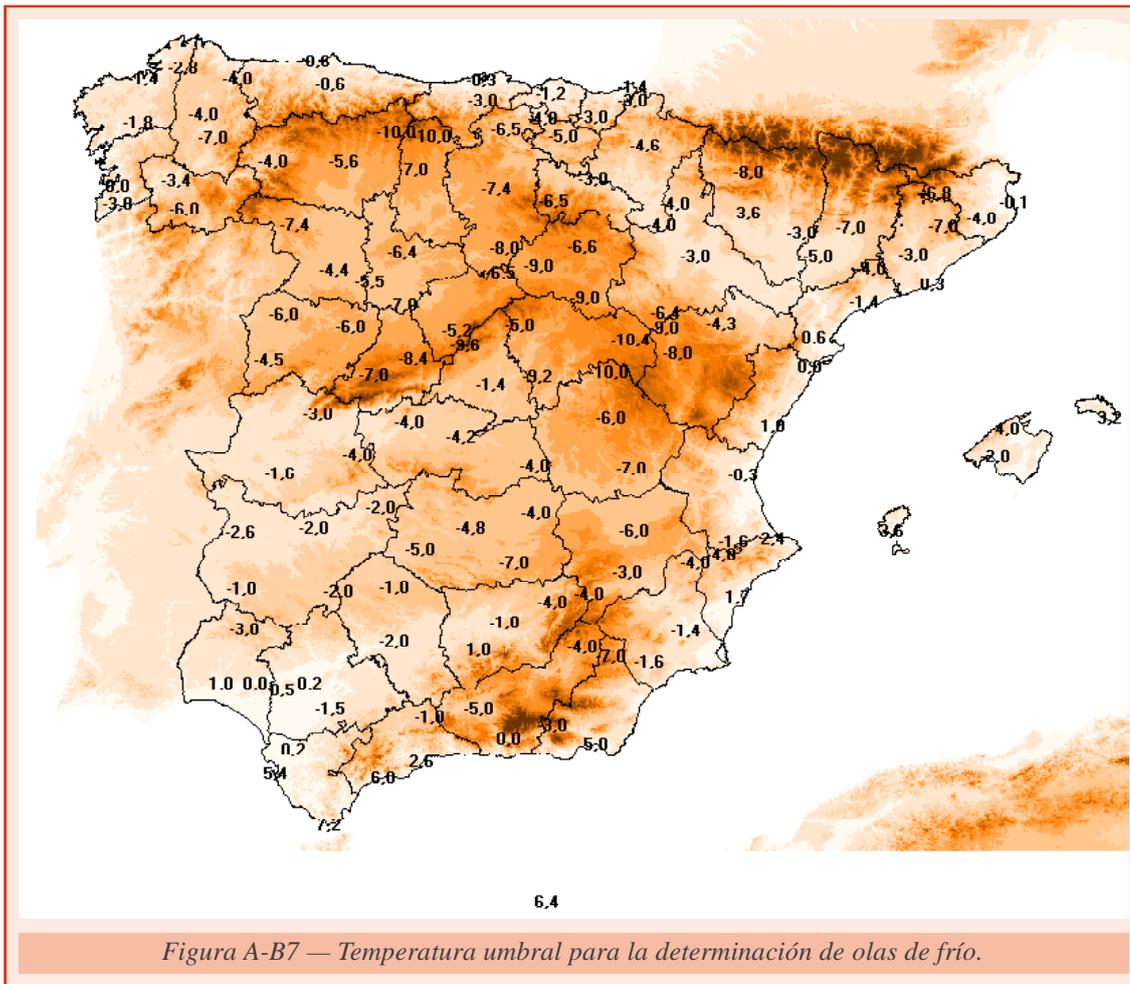
En primer lugar se procede a determinar las estaciones en base a una serie de requisitos: tienen que funcionar en la actualidad, tener una serie suficientemente larga para poder calcular sus percentiles y distribuirse uniformemente sobre el territorio. Con estas premisas, finalmente se seleccionan 131 estaciones. Canarias, por lo suave de sus temperaturas, queda fuera del estudio.

El mapa de la figura A-B7 muestra la distribución de las 131 estaciones utilizadas para el estudio y la temperatura umbral de las mismas.

El segundo paso consiste en determinar para cada estación una *temperatura umbral*, que de acuerdo a la definición de ola de frío empleada, es el percentil del 5 % de su serie de temperaturas mínimas diarias de los meses de enero y febrero del periodo 1971-2000.

El siguiente paso consiste en localizar los episodios, que según los criterios fijados, serán considerados olas de frío, y se realiza en tres etapas:

Primera etapa. Se obtienen para cada una de las 131 estaciones del estudio, sus *episodios fríos*, entendiendo como tales, episodios de al menos tres días consecutivos con temperatura mínima igual o inferior a su temperatura umbral. Dado que es bastante improbable que una ola de frío se presente fuera de los meses invernales,



solo se estudia el periodo comprendido entre el 1 de noviembre y el 28 (o 29) de febrero, que equipararemos con el invierno. Ello no implica que fuera de estos meses no puedan darse temperaturas anormalmente bajas para la época del año de que se trate, pero normalmente sus efectos no serán tan acusados, especialmente para la salud humana, y por ello no parece muy adecuado emplear el calificativo ola de frío para estos episodios.

Segunda etapa. Se determinan los *días fríos*, considerando como tales a aquellos en que al menos el 10 % de las estaciones consideradas están dentro de uno de los *Episodios fríos* localizados en la primera etapa.

Tercera etapa. Finalmente se localizan las olas de frío, que son todos aquellos episodios de tres o más *días fríos* consecutivos. Cuando dos olas de frío están separadas por tan solo un día, se consideran una única ola.

Los tres factores que determinan la intensidad de una ola de frío son: las temperaturas registradas, la duración y el territorio afectado.

Para estimar el territorio afectado durante una ola de frío, se ha determinado el día que más provincias la registraron, asignando a la ola dicho máximo. Se considera que un día determinado una provincia está viviendo una ola de frío cuando al menos uno de los observatorios estudiados está dentro de un episodio frío, es decir, no es suficiente con que la mínima registrada no alcance la temperatura umbral de manera puntual.

Para establecer la magnitud de las temperaturas, en primer lugar se determinan las estaciones con algún día de episodio frío durante la ola de frío, quedándonos con la media de las temperaturas mínimas de estas estaciones para el día más frío como dato representativo; a esta temperatura la denominaremos como *temperatura mínima de la ola*. Además, se ha calculado para cada estación la anomalía para el día más frío registrado durante la ola, con respecto a su temperatura umbral, asignando como valor representativo para la ola la media de dichas anomalías; a este valor se le denominará como *anomalía de la ola*.

Así pues, los cuatro valores elegidos para caracterizar una ola de frío son:

- su duración;
- el número de provincias afectadas;
- la temperatura mínima de la ola;
- la anomalía de la ola.

Los resultados se presentan en la tabla A-B3.

Tabla A-B3. Olas de frío desde 1975.

Invierno	Inicio	Fin	Duración (días)	Anomalía de la ola (°C)	Temperatura mínima de la ola (°C)	Provincias afectadas
2020-2021	05/01/2021	08/01/2021	4	-2,3	-4.0	16
2020-2021	11/01/2021	18/01/2021	8	-4,1	-7.6	30
2018-2019	04/01/2019	08/01/2019	5	-1,6	-4.6	19
2018-2019	11/01/2019	13/01/2019	3	-2.0	-3.9	12
2017-2018	04/12/2017	06/12/2017	3	-1.5	-5.3	13
2016-2017	18/01/2017	20/01/2017	3	-2.5	-4.0	15
2014-2015	30/12/2014	01/01/2015	3	-1.6	-4.4	17
2011-2012	02/02/2012	05/02/2012	4	-2.9	-4.9	31
2011-2012	08/02/2012	15/02/2012	8	-3.3	-5.5	39
2011-2012	21/02/2012	23/02/2012	3	-1.9	-7.0	17
2010-2011	22/01/2011	26/01/2011	5	-2.8	-6.3	23
2009-2010	18/12/2009	21/12/2009	4	-4.4	-9.0	19
2009-2010	09/01/2010	11/01/2010	3	-3.1	-6.0	24
2009-2010	11/02/2010	14/02/2010	4	-2.1	-5.1	20
2008-2009	07/01/2009	12/01/2009	6	-3.5	-4.4	22
2007-2008	16/11/2007	18/11/2007	3	-3.5	-8.8	16
2007-2008	13/12/2007	18/12/2007	6	-2.5	-6.1	21
2006-2007	26/01/2007	29/01/2007	4	-3.0	-6.2	22
2005-2006	20/12/2005	26/12/2005	7	-2.3	-6.5	25
2005-2006	28/01/2006	30/01/2006	3	-3.2	-7.1	19
2004-2005	08/01/2005	11/01/2005	4	-1.6	-5.3	18
2004-2005	26/01/2005	02/02/2005	8	-5.1	-7.0	31
2004-2005	17/02/2005	19/02/2005	3	-2.1	-5.2	20
2002-2003	11/01/2003	16/01/2003	6	-2.2	-5.3	36
2002-2003	16/02/2003	18/02/2003	3	-2.4	-6.3	16
2001-2002	13/12/2001	29/12/2001	17	-5.0	-8.4	32
1998-1999	04/12/1998	08/12/1998	5	-1.3	-3.6	11
1998-1999	01/02/1999	03/02/1999	3	-2.5	-5.7	12
1998-1999	13/02/1999	15/02/1999	3	-2.4	-6.1	15
1995-1996	21/02/1996	23/02/1996	3	-2.1	-3.3	17
1994-1995	24/12/1994	28/12/1994	5	-2.2	-3.8	26
1993-1994	18/01/1994	23/01/1994	6	-1.7	-4.6	21
1992-1993	02/01/1993	05/01/1993	4	-1.3	-3.8	15
1992-1993	24/02/1993	26/02/1993	3	-3.1	-7.2	11
1991-1992	19/01/1992	25/01/1992	7	-2.4	-4.1	16
1990-1991	21/12/1990	23/12/1990	3	-1.9	-5.1	19
1990-1991	14/01/1991	16/01/1991	3	-2.0	-4.5	14
1990-1991	13/02/1991	15/02/1991	3	-2.3	-5.9	17
1988-1989	22/11/1988	25/11/1988	4	-3.1	-7.2	19
1988-1989	30/12/1988	04/01/1989	6	-2.2	-6.3	28

Tabla A-B3 (continuación). Olas de frío desde 1975.

Invierno	Inicio	Fin	Duración (días)	Anomalía de la ola (°C)	Temperatura mínima de la ola (°C)	Provincias afectadas
1986-1987	14/01/1987	21/01/1987	8	-2.7	-4.3	28
1986-1987	19/02/1987	22/02/1987	4	-2.4	-5.4	19
1985-1986	09/02/1986	12/02/1986	4	-3.9	-7.5	23
1984-1985	29/12/1984	31/12/1984	3	-1.8	-3.4	11
1984-1985	04/01/1985	17/01/1985	14	-5.5	-7.2	45
1983-1984	15/02/1984	17/02/1984	3	-0.9	-5.2	18
1982-1983	20/01/1983	23/01/1983	4	-2.0	-5.8	21
1982-1983	08/02/1983	18/02/1983	11	-4.8	-6.6	44
1980-1981	30/11/1980	13/12/1980	14	-3.0	-4.8	26
1980-1981	29/12/1980	04/01/1981	7	-2.1	-5.2	25
1980-1981	10/01/1981	15/01/1981	6	-2.6	-3.4	18
1980-1981	31/01/1981	03/02/1981	4	-2.2	-5.6	24
1979-1980	20/12/1979	23/12/1979	4	-3.1	-5.7	13
1979-1980	14/01/1980	16/01/1980	3	-2.1	-5.1	13
1978-1979	20/12/1978	22/12/1978	3	-2.5	-7.3	13
1977-1978	13/01/1978	15/01/1978	3	-2.6	-2.8	12
1977-1978	12/02/1978	14/02/1978	3	-2.8	-5.8	26
1975-1976	21/12/1975	25/12/1975	5	-2.2	-6.5	24
1975-1976	28/12/1975	04/01/1976	8	-2.1	-6.1	14
1975-1976	16/01/1976	20/01/1976	5	-1.4	-5.1	13
1975-1976	25/01/1976	28/01/1976	4	-3.1	-5.4	25

B4. Evolución de las olas de frío registradas en España desde 1975

De acuerdo a la definición y metodología descritas en el punto B3 de este anexo, la evolución de las olas de frío registradas en nuestro país desde 1975 puede verse en los gráficos que siguen a continuación.

El gráfico de la figura A-B8 representa para cada invierno el número de episodios de ola de frío, los días que totalizan, y la duración de la ola de frío más larga. Destaca el invierno 1980-1981 que totaliza 31 días con ola de frío repartidos en 4 episodios y el invierno 1975-1976 con 22 días en 4 episodios. La ola de frío más larga, con 17 días de duración, se registró en el invierno 2001-2002, concretamente entre los días 13 y 29 de diciembre; las siguientes en duración, con 14 días, se producen durante los inviernos 1980-1981 y 1984-1985. También se aprecia como son varios los inviernos en que no se registra ninguna ola de frío.

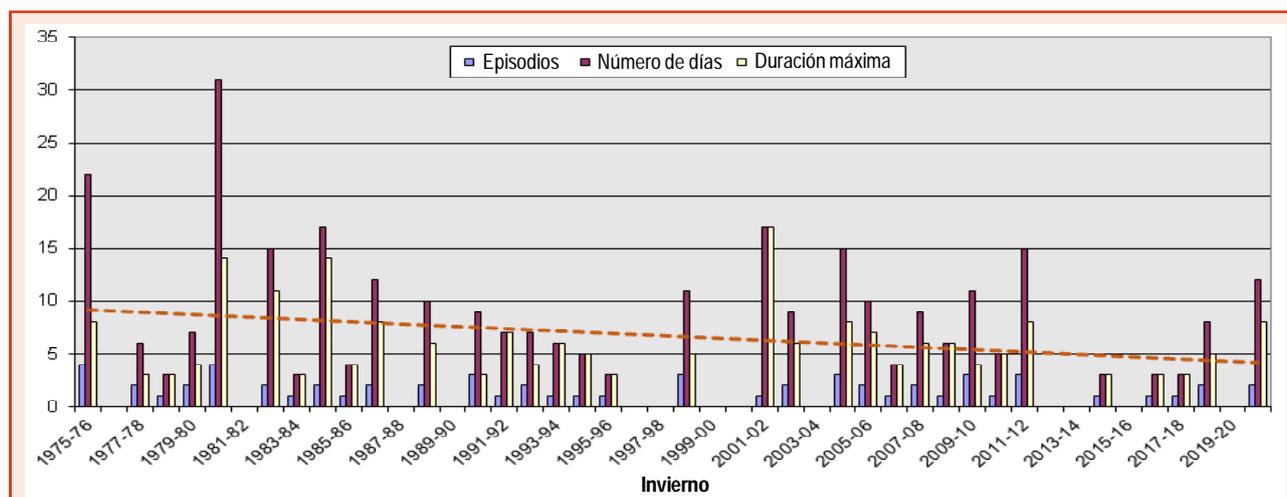
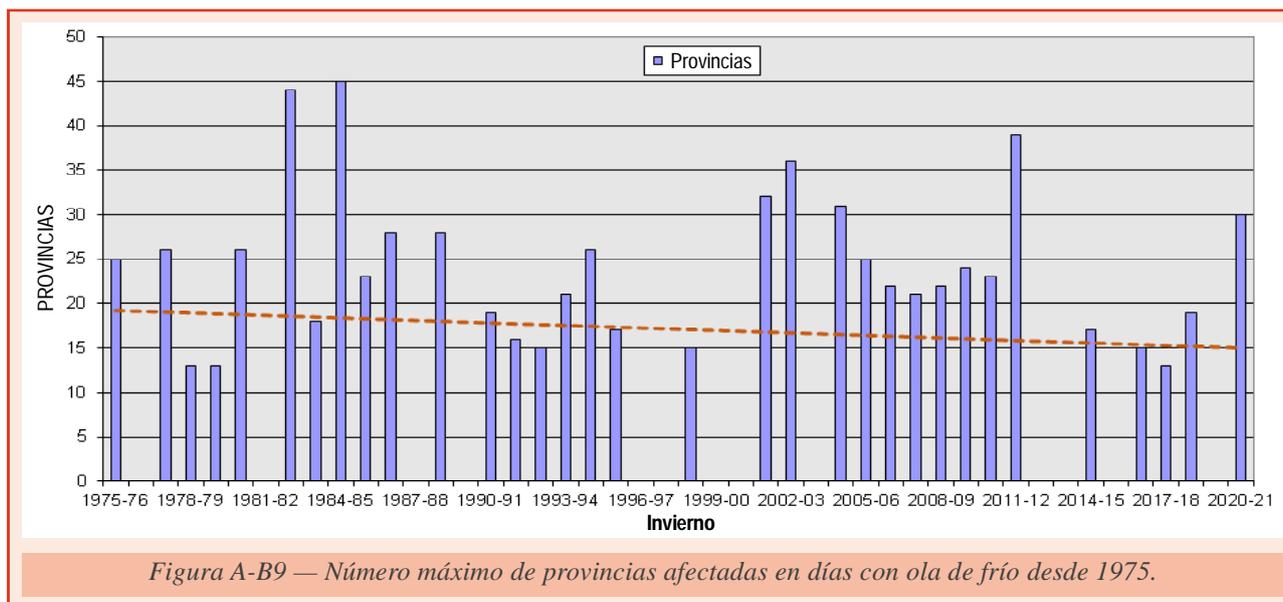


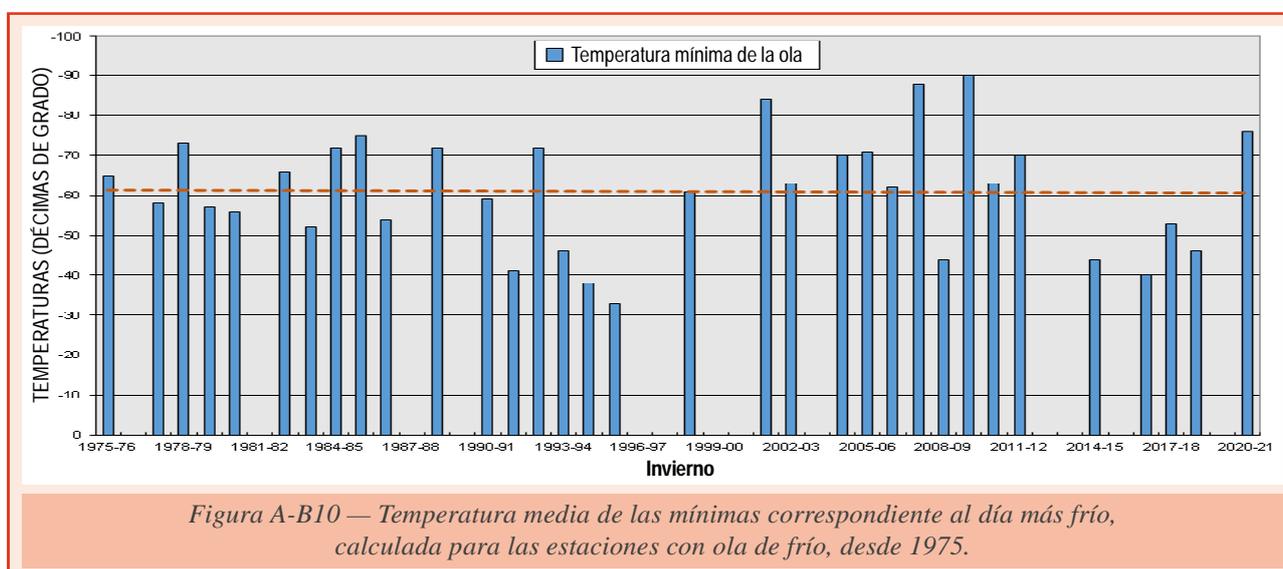
Figura A-B8 — Episodios de ola de frío, número de días con ola de frío durante el invierno y duración de la ola de frío más larga de cada invierno, desde 1975.



Con línea discontinua se muestra la línea de tendencia del número de días con ola de frío de cada invierno, que indica una disminución de 1,1 días cada 10 años.

El gráfico de la figura A-B9 muestra el número máximo de provincias afectadas en días con ola de frío, destacando especialmente los inviernos 1984-1985, con 45 provincias afectadas los días 14 y 15 de enero, y el 1982-1983, con 44 provincias el 13 de febrero. La tercera ola en este sentido corresponde al invierno 2011-2012 y alcanzó a 39 provincias el 12 de febrero de 2012. La línea de tendencia, que se muestra con línea discontinua, indica que las olas de frío van disminuyendo su extensión a razón de 1,0 provincias cada 10 años.

El gráfico de la figura A-B10 representa la temperatura mínima de la ola más baja para cada invierno, desde 1975. El valor más bajo, con -9.0°C , corresponde al invierno 2008-2009, concretamente al día 20 de diciembre; en segundo lugar figura el invierno 2007-2008, con un valor de -8.8°C el 17 de noviembre. En este caso la línea de tendencia indica que la temperatura mínima de la ola aumenta a razón de 0.2°C cada 10 años. Al mirar la gráfica parecería que la pendiente es negativa, pero debe tenerse en cuenta que la escala del eje de ordenadas está en sentido decreciente.



ANEXO C.

NOTAS PARA LA OBSERVACIÓN FENOLÓGICA DE LA GOLONDRINA COMÚN (*HIRUNDO RUSTICA*)

La golondrina común, *Hirundo rustica* LINNAEUS 1758, es un ave muy conocida y fácil de identificar por su morfología, vuelo y costumbres (figura A-C1). Tiene dorso negro azulado de reflejos metálicos, partes inferiores blancas crema, frente y garganta rojas y cola larga ahorquillada. Su vuelo es rápido y ágil; con trayectoria irregular, zigzagueante y con rapidísimos quiebros, a pocas decenas de metros o a ras de suelo, vuelo a veces tan rasante que le permite incluso beber de la superficie de charcas y embalses. Utiliza como posaderos los hilos telegráficos, cercas de alambre y más raramente ramas secas para descansar o arreglarse el plumaje. Sus presas son insectos voladores de diferentes grupos, aunque su base alimenticia la constituyen los dípteros. En días fríos, nublados o lluviosos la caza se desarrolla en las capas inferiores ya que los insectos se acercan al suelo o se protegen bajo las copas de los árboles. Con buen tiempo caza a más altura, quizás a la del vuelo del avión común, pero nunca llegan a coincidir con los vencejos. Es un ave muy asociada al hábitat rural, periurbano y, en menor medida, urbano; vive en los pueblos y los campos próximos, más o menos abiertos, con algunas construcciones agrarias y arbolado disperso.



Figura A-C1 — Golondrina común (*Hirundo rustica*), obra de Luis Pascual Repiso.

Cría en el norte de África, casi toda Europa y gran parte de Asia. Su migración está muy condicionada por la temperatura y la disponibilidad de insectos en el aire. La golondrina es un ave muy condicionada por el clima y la temperie; algunos autores dicen que *Hirundo rustica* llega a las distintas localidades cuando se alcanzan temperaturas medias diarias de 9 °C. No obstante, a comienzo de la temporada de paso prenupcial y llegadas, las isofenas de llegada quedan algo retrasadas respecto a la isoterma de 9 °C, mientras que al final están algo adelantadas aunque se sigue manteniendo el paralelismo (según el mapa para Europa de SOUTHERN de 1938 adaptado por BERNIS en 1966). Algunos

años se acusa una notable disminución de efectivos poblacionales que puede estar relacionada con largos periodos de sequía en las áreas de invernada; también los fuertes vientos que soportan al atravesar el Sahara occidental y las tardías olas de frío en abril o mayo pueden causar daños en sus poblaciones.

La migración prenupcial se realiza de enero (o antes) a abril, con el máximo en marzo. Aunque algunas golondrinas permanecen como sedentarias o como invernantes en zonas próximas a humedales y regadíos de Andalucía, Extremadura y del litoral levantino (sobre todo en el sur de Sevilla-Huelva y en el oeste de Cádiz) y los primeros avistamientos de ejemplares migrantes en paso prenupcial se observan normalmente a primeros de enero por las costas de Cádiz y Huelva; las primeras llegadas con asentamiento por el valle del Guadalquivir se producen a mediados de febrero. A primeros de marzo llegan a zonas costeras o bajas del sur de Pontevedra

y a zonas de la costa mediterránea andaluza. Durante la segunda mitad de marzo se generalizan por la franja litoral gallega y toda la mediterránea, el valle del Ebro, Extremadura y ambas mesetas. Durante abril llegan a las Béticas, Gredos oriental-Guadarrama, serranías orensanas, gran parte de Asturias y el Pirineo catalán. Las llegadas más tardías suelen ser a primeros de mayo en la serranía de Cuenca y las parameras de Molina de Aragón. Por Gibraltar penetran en dirección nordeste hacia Europa encontrando las barreras de las sierras andaluzas, sistema Ibérico y los Pirineos; por otra parte, otro flujo sigue las costas portuguesas para después de atravesar Galicia y Asturias dirigirse a Bretaña e islas británicas. En los valles del Guadiana, Tajo y Duero penetran y llegan de oeste a este (figura A-C2).

La primera puesta varía según regiones y se produce entre principios de abril y finales de mayo, (4-5 huevos, raramente 6-7). Hacia los 14-15 días nacen los pollos que permanecen en el nido durante 22-23 días. Tras la independencia de los jóvenes en zonas mediterráneas tiene lugar una segunda puesta de menor número de huevos y en años muy favorables, una tercera. En estos casos, los pollos de la primera nidada, permanecen junto a sus padres y pueden colaborar en la cría de las otras nidadas.

La partida tiene lugar a mediados o finales de agosto en los Pirineos, zonas bajas del País Vasco, serranías de Cuenca y Albarracín, sierras orensanas, lucenses, leonesas y del occidente asturiano. Durante septiembre se van de ambas mesetas y normalmente a finales parten de la baja Extremadura y valle del Guadalquivir. En estos momentos se vuelven más gregarias y sociables, observándose grupos de aves posadas que anuncian la partida. Estos bandos se hacen muy notorios al anochecer, concentrándose frecuentemente en dormideros tradicionales desde los que emiten continuamente un agradable pero ruidoso gorjeo. El viaje se realiza en bandos poco densos que vuelan a poca altura, con las aves dispersas que con vuelo recto ocupan un frente amplio.

Las aves europeas, en su viaje migratorio postnupcial hacia el sur, se desplazan fundamentalmente por las provincias mediterráneas ibéricas y cruzan el estrecho de Gibraltar entre finales de agosto y septiembre, mientras que las españolas vuelan por el interior peninsular y cruzan a África en la primera quincena de agosto. El flujo de migrantes, en su viaje hacia el sur, cruza el Mediterráneo casi por doquier aunque las mayores concentraciones se producen en las costas de las penínsulas ibérica e itálica. El área de invernada ocupa la totalidad de África al sur del Sahara aunque la mayoría de las golondrinas ibéricas pasan el invierno en el entorno geográfico del golfo de Guinea. Es sorprendente como un ave con un peso menor de 20 g puede realizar viajes de hasta 15 000 km desde las llanuras siberianas al África austral, atravesando gran variedad de paisajes y climas.

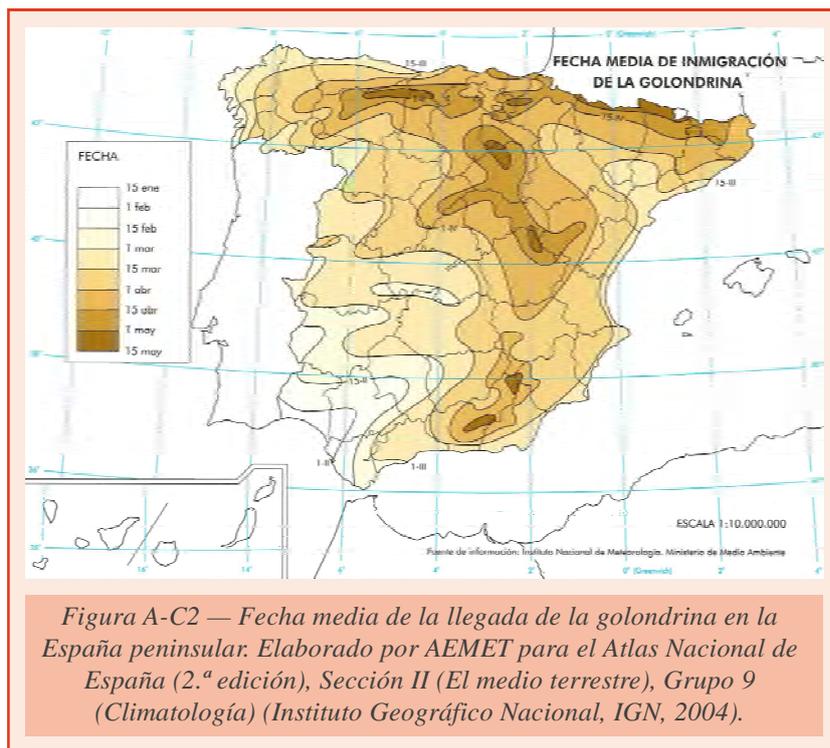


Figura A-C2 — Fecha media de la llegada de la golondrina en la España peninsular. Elaborado por AEMET para el Atlas Nacional de España (2.ª edición), Sección II (El medio terrestre), Grupo 9 (Climatología) (Instituto Geográfico Nacional, IGN, 2004).

ANEXO D.

NOTAS SOBRE FENÓMENOS Y CIRCULACIONES ASOCIADOS A LA VARIABILIDAD DE INTERANUAL A SUBESTACIONAL DEL SISTEMA CLIMÁTICO

D1. ENSO

Hasta el presente la mayor fuente de variabilidad climática en escalas de tiempo de hasta un año es El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la evolución acoplada de la capa superior del océano Pacífico tropical (El Niño) y la atmósfera tropical (la Oscilación del Sur). Aunque su origen está en el Pacífico tropical, su influencia se extiende a las tres cuencas oceánicas y a latitudes medias y altas por teleconexiones atmosféricas. Por vía troposférica a través de ondas meridionales planetarias de Rossby forzadas o por vía estratosférica (GARFINKEL, 2019), el ENSO causa en zonas alejadas del Pacífico ecuatorial, principalmente oceánicas, anomalías de temperatura, la humedad y viento cerca de la superficie, así como de la nubosidad. Las alteraciones originan variaciones en los flujos en superficie de calor, momento y agua que inducen cambios en la temperatura de la superficie del mar (TSM), salinidad, espesor de la capa de mezcla y corrientes de las capas superiores oceánicas. Estos cambios a su vez alteran las condiciones de la atmósfera.

Los episodios fuertes de fase positiva de ENSO, El Niño, están relacionados con grandes incrementos de la temperatura global anual. En 2015 se batió el récord de temperatura global anual por el margen más amplio hasta la fecha. Previamente, el incremento más amplio lo ostentaba 1998, cuando la temperatura anual sobrepasó el récord de 1997 en 0.12 °C. Ambos, 1997-1998 y 2015-16, fueron los últimos episodios fuertes de El Niño. La variabilidad del desequilibrio del balance energético de la Tierra está muy influenciado por los cambios de circulación relacionados a ENSO; durante los años más frescos de La Niña emite menos radiación térmica y el sistema climático gana más calor, mientras lo contrario ocurre para los años más cálidos de El Niño.

Diversas investigaciones han detectado la existencia de una señal consistente del ENSO en el clima de Europa; que sería una señal variable, con dependencia estacional, no lineal respecto al ENSO, modificable por otros factores, y posiblemente no estacionaria en el tiempo, siendo el final del invierno la época en que se podría detectar una señal más robusta (BRÖNNIMANN, 2007). En relación a la conducta no estacionaria de la respuesta, varios estudios han detectado un fuerte impacto de los episodios extremos ENSO sobre la lluvia euro-mediterránea a finales del invierno y principios de primavera durante 1900-1930 y 1970-1990, con anomalías positivas de precipitación asociadas a El Niño, y por contra una señal débil en el periodo intermedio, que ha sido imputado por LÓPEZ-PARAGES (2014) a cambios en el flujo medio en niveles altos de la troposfera causados por la variabilidad en la TSM asociados a la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO).

El monzón indio está fuertemente influenciado por El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) en escalas interanuales [RASMUSSEN y CARPENTER, 1983]. Sin embargo, la fuerza de la anticorrelación entre los índices ENSO y la lluvia monzónica de la India (IMR) varía en épocas decenales y se debilitó sustancialmente durante los años 80 y 90 [TORRENCE y WEBSTER, 1999]. KUCHARSKI *et al.* [2007] encontraron que la TSM del Atlántico tropical modula la relación ENSO-monzón de la India y reprodujo las tendencias observadas en la serie temporal de la IMR durante el periodo 1950-1999 con una serie de experimentos conjuntos.

Fuente de ondas de Rossby

El campo de viento horizontal puede ser dividido en una parte no divergente (rotacional o solenoidal) y otra divergente (o irrotacional). El primero está relacionado a la función de corriente, ψ , y el segundo al potencial de velocidad, χ .

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_\psi + \mathbf{v}_\chi = \mathbf{k} \times \nabla\psi + \nabla\chi,$$

La componente solenoidal del viento, \mathbf{v}_ψ , es mucho mayor que la irrotacional, \mathbf{v}_χ , aunque no contribuye al movimiento vertical atmosférico.

Como

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{v}_\chi = \nabla^2\chi = D,$$

siendo D la divergencia del viento, las zonas de divergencia ($D > 0$) corresponden a mínimos del potencial de velocidades (fuentes del campo de viento), por el contrario zonas de convergencia ($D < 0$) a máximos del campo del potencial de velocidad (sumideros).

Para niveles altos, la ecuación no lineal de la vorticidad se puede escribir simplificada (despreciando los términos de advección vertical y *twisting* por la pequeña velocidad vertical en este nivel, y los términos de rozamiento al tratar escalas de longitud planetaria) como:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \right) \zeta_a = -\zeta_a D$$

ζ_a es la componente vertical de la vorticidad absoluta, $\zeta_a = \zeta + f$, siendo ζ la componente vertical de la vorticidad relativa y f el parámetro de Coriolis.

La advección de vorticidad por el viento divergente no es necesariamente pequeña aunque generalmente $|\mathbf{v}_\psi| \gg |\mathbf{v}_\chi|$, pues el viento divergente, al contrario que el rotacional, forma con frecuencia un gran ángulo con las líneas de vorticidad absoluta constante. Pasando la advección de vorticidad por el viento divergente al segundo miembro:

$$\frac{\partial \zeta_a}{\partial t} + \mathbf{v}_\psi \cdot \nabla \zeta_a = -\zeta_a D - \mathbf{v}_\chi \cdot \nabla \zeta_a$$

Lo que significa que la vorticidad se puede generar por estiramiento de los vórtices debido a la divergencia, y por la advección de vorticidad por el viento divergente. Los términos de forzamiento de la vorticidad, derecha de la ecuación, pueden ser agrupados en la forma compacta en el término $S = -\nabla(\mathbf{v}_\chi \cdot \zeta_a)$, denominado **término fuente de Rossby**.

Las ondas de Rossby generadas en los trópicos

La mayor influencia externa en la conducta del chorro se halla en los trópicos, basta con observar los grandes cambios en el tiempo que provoca un evento El Niño en buena parte del mundo. Durante las fases del ENSO, al cambiar la localización de la gran convección en el Pacífico tropical, se generan temporalmente en los trópicos ondas largas de Rossby que se propagan a lo largo de las corrientes en chorro, alterando los patrones de tiempo en regiones muy distantes.

Las zonas donde se crean ondas de Rossby, son aquellas en las que el parámetro fuente de la onda de Rossby, S , toma valores distintos de cero. S es la velocidad de cambio en vorticidad absoluta de un volumen de aire que se mueve siguiendo la parte no divergente del flujo, y la adquiere por estiramiento vertical (producto de la divergencia y la vorticidad absoluta) y/o por la advección de vorticidad absoluta por la parte divergente del flujo (ver recuadro).

Las zonas donde S toma valores significativos se pueden diagnosticar como áreas de divergencia o convergencias de vientos en niveles altos que, además, tienen en sus proximidades valores relativamente altos de vorticidad absoluta o/y de gradiente meridional de la vorticidad absoluta. Las áreas de divergencia (convergencia) en niveles altos son zonas de ascenso (descenso) de aire en la troposfera.

D2. Regímenes de tiempo euroatlánticos

Aunque las ondas extratropicales de escala planetaria están ancladas geográficamente, cambian con el tiempo, ya sea porque los patrones de calentamiento en la atmósfera varían debido a diversos propulsores (*drivers*) climáticos: externos (TSM, hielo marino, cobertura nivosa, actividad solar, forzamiento radiativo de los GEI), o procesos internos (ENSO, NAO, IOD, ...). Una consecuencia del comportamiento transitorio de las ondas planetarias atmosféricas es que las anomalías en el clima en escalas de tiempo estacionales ocurren normalmente en grandes regiones geográficas, y mientras en algunas de estas regiones las anomalías climáticas son de un signo, simultáneamente a miles de kilómetros de distancia, las anomalías son de signo opuesto. Estas variaciones simultáneas en el clima, a menudo de signo opuesto, en partes distantes del mundo se conocen comúnmente como «teleconexiones».

Esta variabilidad se concreta en unas circulaciones, llamadas regímenes del tiempo, de número limitado, con escalas de tiempo mayores que las asociadas con los sistemas baroclinos. Espacialmente están bien definidas (generalmente el ancho de una cuenca oceánica) y una fuerte dependencia longitudinal, con máxima intensidad y varianza temporal sobre los océanos del norte, especialmente durante el invierno.

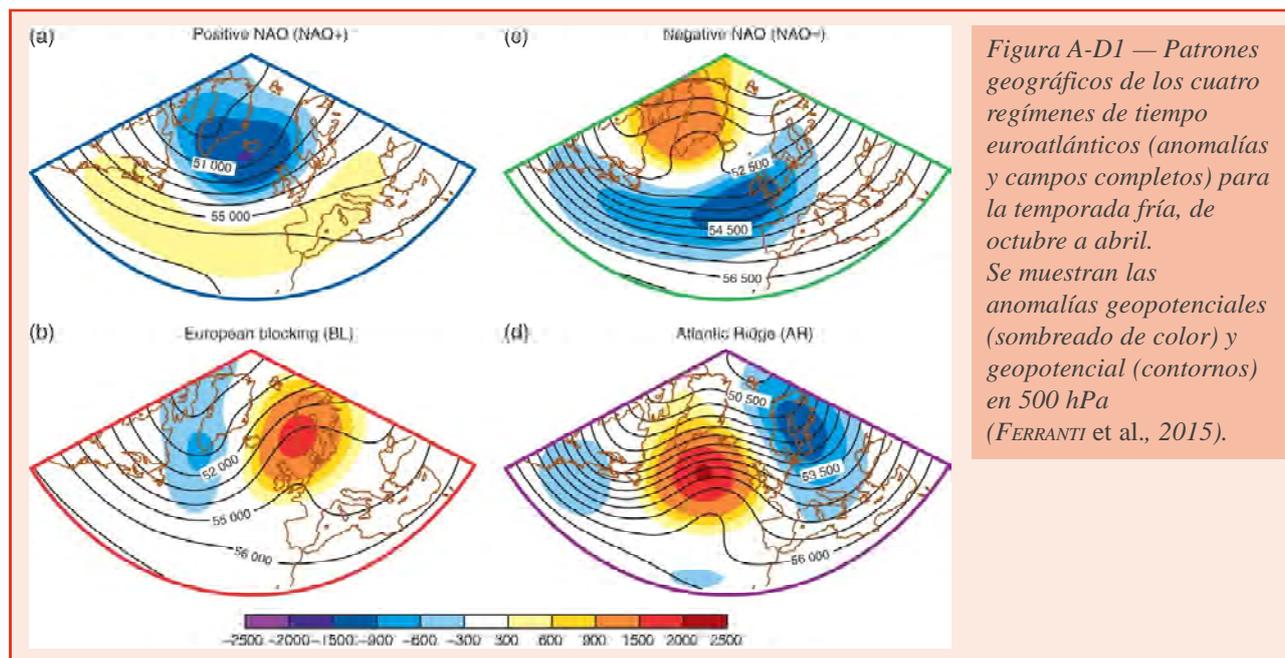
La variabilidad intraestacional de la circulación atmosférica del Atlántico Norte se puede describir como transiciones entre los regímenes de tiempo del sector Atlántico Norte-Europa (ANE), y la variabilidad climática interanual (objeto de este informe anual) se puede describir por la frecuencia de ocurrencia de los regímenes de tiempo, bajo la hipótesis de clima casi estacionario a largo plazo.

Se pueden aplicar diferentes métodos para obtener los regímenes de tiempo en un dominio geográfico dado, todos ellos conducen a patrones similares (MICHELANGELI *et al.*, 1995).

Regímenes de invierno

La figura A-D1 muestra las cuatro principales funciones ortogonales empíricas (EOF) obtenidas por FERRANTI *et al.* (2015) de la altura geopotencial a 500 hPa calculadas para el sector ANE (30° N a 88.5° N, 80° W a 40° E), a partir de 29 años de periodos de invierno extendidos (octubre a marzo) de ERA ECMWF. Para el cálculo de EOF se utilizaron medias de 5 días consecutivos, eliminando el ciclo estacional medio.

Los patrones de las figuras A-D1 a) y c) capturan las fases negativas y positivas de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO); NAO- y NAO +, respectivamente. El tercer grupo (figura A-D1b) es el régimen de Bloqueo Escandinavo (BL), que exhibe un dipolo de presión



zonal con la anomalía negativa sobre el Atlántico centrada próxima al sur de Groenlandia y la anomalía positiva centrada en Escandinavia. El cuarto patrón (figura A-D1d), es el régimen de Dorsal Atlántica (AR), que muestra una fuerte dorsal anticiclónica al oeste de Europa occidental que cubre casi toda la cuenca atlántica, que refleja una expansión hacia el norte del alta de las Azores, y una anomalía negativa sobre Escandinavia y el Mediterráneo. El régimen AR recuerda el denominado patrón de teleconexión del Atlántico Este en fase negativa (BARNSTON y LIVEZEY, 1987).

NAO+ es el más frecuente de los regímenes (32.3%, según FERRANTI *et al.*, 2015), seguido por BL (26.1%). La frecuencia de ocurrencia de los regímenes NAO- (21.4%) and AR (20.2%) son menores. Las dos fases de la NAO y de la AR describen las tres localizaciones preferidas de la corriente en chorro del Atlántico Norte (WOOLLINGS *et al.*, 2010), a saber, los regímenes NAO-, NAO+ y AR se corresponden a las posiciones sur, central y norte del chorro. Sin embargo, la frecuencia relativa de cada régimen exhibió una variabilidad pronunciada decadal y multidecadal a lo largo del siglo XX.

Con el régimen AR, la localización del alta de las Azores se desplaza hacia el norte, lo que aumenta significativamente la probabilidad de ocurrencia de extremos fríos en la península ibérica en invierno.

El régimen BL produce un aumento de la ciclogénesis, precipitaciones por encima de la media en la región mediterránea (XOPLAKI, 2002), y a episodios de lluvia extrema en la costa mediterránea española.

La NAO es una redistribución de la masa atmosférica entre el Ártico y el Atlántico subtropical, que se manifiesta como una oscilación norte-sur en los campos de presión a nivel del mar y de altura del geopotencial en el Atlántico Norte. La NAO ocurre todo el año aunque es más fuerte y de mayor extensión en el invierno siendo en esta estación el modo dominante de variabilidad climática en la región del Atlántico Norte. La NAO presenta una fuerte variabilidad interanual a interdecadal (HURRELL, 1995; HURRELL y VAN LOON, 1997; CASSOU, 2004) y es el principal responsable de la fuerte variabilidad de precipitación interanual observada en la península ibérica (por ejemplo, RODRÍGUEZ-PUEBLA *et al.*, 1998, TRIGO *et al.*, 2002). NAO-

induce precipitaciones por encima de lo normal en el sur de Europa, y en particular en los sectores oeste y suroeste de la península ibérica.

El régimen NAO+ intensifica los vientos del oeste en el Atlántico y sitúa la corriente en chorro polar en una posición latitudinal intermedia, más baja que en el régimen de Dorsal Atlántica y más alta que en el régimen NAO-, favoreciendo temperaturas más altas de lo normal en Europa central y del norte, y en el norte del Mediterráneo, y temperaturas más frías en el sur del Mediterráneo. Sin embargo, la NAO no juega un papel relevante en la variabilidad de la temperatura en el Mediterráneo occidental (TRIGO *et al.*, 2006). En cuanto a precipitaciones, la NAO+ está asociada a condiciones húmedas en el norte de Europa y secas en la península ibérica, Canarias, noroeste de África y amplias zonas del norte del Mediterráneo.

La Oscilación Ártica (AO)

La Oscilación Ártica o Modo Anular del Norte (NAM; THOMPSON y WALLACE, 2000) es una fluctuación invernal en la amplitud de un patrón caracterizado por bajas presiones en el Ártico y fuertes vientos del oeste en las latitudes medias. La NAO y la oscilación similar sobre el Pacífico NPO se han interpretado como la manifestación regional del modo anular.

El índice AO (NAM a 1000 hPa) y el índice NAO están fuertemente correlacionados. El invierno NAM/AO está vinculado a la circulación atmosférica de verano. Las anomalías atmosféricas de verano son similares a las de verano NAM. El NAM de invierno y el NAM de verano subsiguiente tienen correlaciones rezagadas significativas.

El vínculo entre el NAM de invierno y el NAM de verano se puede interpretar como una transición preferida de un modo en invierno a un modo similar en verano. Por ejemplo, es probable que una circulación de invierno en una fase positiva del NAM de invierno sea seguida por una circulación de verano en una fase positiva del NAM de verano. De manera similar, la fase negativa probablemente seguirá a la fase negativa. La continuación de la misma fase en verano posiblemente se ve facilitada por las condiciones de los límites de la primavera, como la capa de nieve, como sugirieron OGI *et al.* [2003a, 2003b]. Cuando la polaridad de la NAO/AO de invierno es positiva, la capa de nieve de primavera-verano sobre las costas árticas de Eurasia y América del Norte se reduce, lo que a su vez mejora el contraste térmico meridional entre el océano Ártico más frío y los continentes más cálidos circundantes.

NAO y forzamiento tropical

La mayor influencia externa en la conducta del chorro se halla en los trópicos, basta con observar los grandes cambios en el tiempo que provocan los eventos ENSO en buena parte del mundo al cambiar la localización de la gran convección en el Pacífico tropical. Las consiguientes ondas de Rossby que generan, acaban propagándose a lo largo de la corriente en chorro alterando los patrones de tiempo en regiones muy alejadas. Con respecto al Atlántico Norte, FELDESTEIN (2003) demostró que la NAO, aunque es un fenómeno derivado de la interacción entre el flujo medio y las perturbaciones (ciclones y anticiclones sinópticos) en latitudes medias, puede ser disparada por la propagación de ondas de Rossby desde los trópicos. KNIGHT *et al.* (2017) demostraron que el patrón de tiempo extratropical asociado con la precipitación récord en el Reino Unido del invierno 2013-2014 podría haber tenido su origen en la convección amazónica intensa, y LI *et al.* (2020) relacionaron eventos de precipitación estacional en Europa a teleconexiones tropico-extratropicos, y en particular el papel de las anomalías tropicales en promover dinámicas extratropicales a través de la propagación de ondas de Rossby.

Regímenes de verano

Los regímenes de tiempo para los meses cálidos son bastante parecidos, aunque las anomalías positivas y negativas son menos intensas y sus centros están desplazados con respecto a los del invierno (figura A-D2).

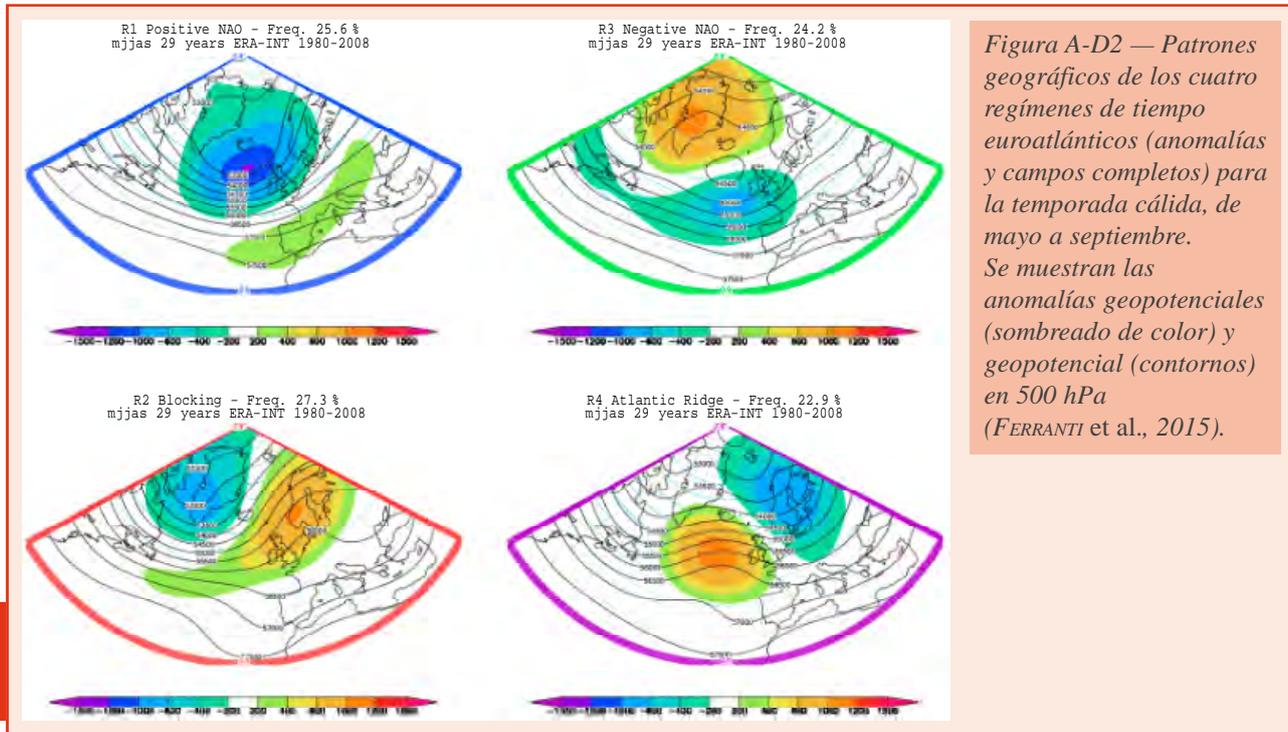


Figura A-D2 — Patrones geográficos de los cuatro regímenes de tiempo euroatlánticos (anomalías y campos completos) para la temporada cálida, de mayo a septiembre. Se muestran las anomalías geopotenciales (sombreado de color) y geopotencial (contornos) en 500 hPa (FERRANTI et al., 2015).

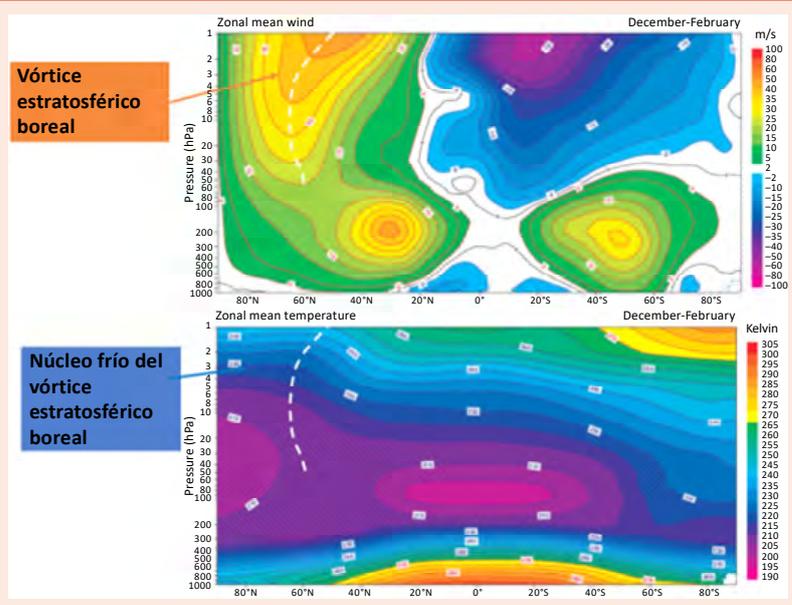
El vórtice polar de la estratosfera y el tiempo y el clima en invierno en el HN

El vórtice polar de la estratosfera (VPE) es una región de gran vorticidad que se forma en invierno con el establecimiento del chorro estratosférico polar. El chorro polar se forma por las diferencias de temperatura en invierno en la estratosfera, entre la zona polar, donde no se recibe radiación solar en la noche polar y se enfría por emisión de la infrarroja hacia el espacio, y la zona tropical, que se calienta enormemente debido a la absorción de la parte ultravioleta de la radiación solar por la capa de ozono que alberga la estratosfera. Los vientos del chorro polar pueden superar los 250 km/h, velocidad comparable a la de los vientos de los huracanes más violentos. La intensidad de los vientos del chorro aísla el aire del vórtice polar de la estratosfera de las latitudes medias, que alcanza temperaturas inferiores a -85°C , lo que resulta crucial en la formación del agujero de la capa de ozono sobre la Antártida.

Hay muchos procesos que influyen y son inherentes a la estratosfera en una amplia gama de escalas de tiempo. Por ejemplo, los sistemas meteorológicos sinópticos (bloques, o dorsales persistentes en la troposfera, y ciclones extratropicales), pueden contribuir a desestabilizar el VPE, generando incluso los calentamientos repentinos de la estratosfera, que luego a su vez, puede afectar a las sendas de tormentas troposféricas sobre los océanos durante semanas o meses. La convección tropical, asociada con la Oscilación Madden-Julian y a la ENSO, puede influir en la estratosfera extratropical a través de ondas a escala planetaria, y ser influenciada

Figura A-D3 — Arriba: viento zonal medio; abajo: temperatura zonal media, para los meses de diciembre a febrero.

Fuente: Atlas ERA40 (KALLBERG, 2005).



por los vientos estratosféricos tropicales asociados a la Oscilación Casi Bienal (QBO). La QBO también puede influir en el tiempo de superficie extratropical. Se ha hallado que las condiciones de contorno de la superficie (cubierta de nieve, hielo marino y temperaturas de la superficie del mar) tienen relaciones interanuales significativas con la estratosfera polar (BUTLER, 2019).

Calentamiento repentino de la estratosfera (CRE)

Un CRE es un fenómeno caracterizado por un rápido incremento en la temperatura, de más de 25 °C en menos de una semana, en la estratosfera¹ del invierno boreal, (hasta más de 80 °C en algunos casos). Puede ir acompañado de la desaparición del chorro polar nocturno² y de su reemplazo por vientos del este. Simultáneamente la estratopausa desciende en algunos lugares hasta 20 km.

Si la temperatura media zonal aumenta hacia el polo desde los 60° N y el viento zonal medio se vuelve del este desde el polo a esta latitud al nivel de 10 hPa (32 km) o por debajo, se califica como «CRE mayor» o «gran CRE». Durante un gran CRE, el vórtice polar se rompe o se desplaza en cuestión de días y la circulación estratosférica sufre enormes cambios. Los grandes CRE tienden a ocurrir cada tres o cuatro años en promedio, pero ha habido periodos más largos sin ningún gran CRE.

Durante un gran CRE el vórtice polar resulta, o desplazado completamente del polo, o dividido en dos. Estos dos tipos de calentamiento son con frecuencia referidos respectivamente como calentamiento «onda-1» y calentamiento «onda-2». Algunos grandes calentamientos muestran un carácter híbrido, siendo el vórtice polar primero desplazado y posteriormente dividido.

¹ Normalmente la estratosfera sobre los polos se extiende aproximadamente entre las altitudes de 10 y 50 km.n

² El chorro polar nocturno es una corriente en chorro del oeste que se desarrolla en invierno en la estratosfera, con máximo a unos 25 km, y en latitudes altas (alrededor de 60°).

El fenómeno CRE fue descubierto por Scherhag en 1952, y su mecanismo fue explicado teóricamente por Matsuno en 1971. Las ondas tienen la propiedad de que pueden producir efectos en regiones alejadas de sus fuentes. Como las olas generadas por un temporal pueden perder su energía en una playa al otro lado del mundo, y causar efectos significativos, las ondas que se producen en la baja atmósfera (por la orografía, o por calentamiento) pueden producir efectos significativos en niveles altos. Matsuno postuló y demostró que los cambios en el flujo medio observados en los CRE, que incluyen la desaceleración del flujo zonal medio y la elevación de las temperaturas cerca del polo en la estratosfera, eran atribuibles a los efectos de la propagación vertical de ondas planetarias forzadas en la troposfera por perturbaciones de gran escala. Trabajos posteriores han confirmado que los CRE están causados por una rápida amplificación de ondas planetarias que se propagan a lo largo de la corriente en chorro del oeste hacia la estratosfera transportando y depositando momento, creando también una circulación meridional fuerte. En la alta estratosfera las anomalías del viento zonal medio se propagan lentamente desde la alta estratosfera subtropical hacia la zona polar de la baja estratosfera y a la troposfera (KODERA *et al.*, 1990) produciendo un gran calentamiento en la estratosfera polar por calentamiento adiabático. Su efecto en la troposfera es inducir un patrón similar al de la fase negativa de la AO, o a la fase negativa de la NAO (KODERA *et al.*, 2000).

La fuerte asociación entre CRE y la actividad transitoria de las ondas planetarias en la troposfera ofrece una explicación inmediata de por qué no ocurren CRE en el invierno del hemisferio sur (HS). Las ondas planetarias son generadas por el relieve y los contrastes entre las temperaturas de tierra y mar, y debido a que la mayoría de la superficie de la Tierra en el HS es océano, las ondas planetarias son más débiles que en el HN. En consecuencia el vórtice polar del HS es más fuerte y resiliente a cualquier incremento en la actividad de las ondas planetarias en la troposfera.

VPE, Oscilación Ártica y NAO

La variabilidad del VPE del HN, incluidos los eventos de VPE débil (CRE) y su contrapartida el VPE fuerte (definido como fuerte un VPE cuyo viento zonal medio diario a 60° N y 10 hPa supera los 41.2 m s⁻¹, TRIPATHI *et al.*, 2015), es importante para el tiempo diario, ya que puede afectar el estado de la oscilación ártica (AO) y la NAO (BALDWIN y DUNKERTON, 2001; KIDSTON *et al.*, 2015), que son esencialmente medidas de la fuerza del flujo de oeste de latitudes medias en el HN y el Atlántico Norte, respectivamente. En general, los eventos de vórtice débil (fuerte) son seguidos por fases negativas (positivas) de la AO/NAO.

En general, los eventos de vórtice débil (fuerte) son seguidos por fases negativas (positivas) del AO/NAO. Sin embargo, se ha demostrado que la relación entre los CRE y la AO/NAO varía caso por caso y solo existe una relación robusta en aproximadamente la mitad de los CRE mayores observados (KARPECHKO *et al.*, 2018) Las razones exactas por las que algunos eventos estratosféricos se acoplan al tiempo superficial y otros no, no se conocen bien y es un área de investigación activa.

El calentamiento final de la estratosfera (CFE)

El CFE (en inglés SFW: *Stratospheric Final Warming*) se define como el primer día que la componente zonal del viento medio promediada zonalmente a 10 hPa y 60° N ($U_{10_{60}}$) adquiere componente este y no es seguido por un intervalo mayor de diez días consecutivos de $U_{10_{60}}$

del oeste hasta el siguiente invierno (BUTLER y GERBER, 2018). El CFE marca la transición a una estratosfera en «modo verano». Aunque, por razones puramente estadísticas, tomamos la primavera como los meses de marzo a mayo, meteorológicamente el inicio de la primavera ocurre con la desaparición del vórtice polar estratosférico. La fecha de los CFE es muy variable de un año a otro y está controlada por la estructura del flujo estratosférico y las variaciones en la propagación vertical de las ondas planetarias troposféricas (BLACK *et al.*, 2006). En distintos trabajos se hace referencia a CFE tempranos y CFE tardíos. Los CFE tempranos suelen ocurrir a primeros de marzo, y son más frecuentes cuando no ha existido CRE en el invierno previo (como el de este invierno), y tienen una evolución rápida. Los CFE tardíos suelen darse a mitad de marzo, frecuentemente cuando han existido CRE durante el invierno, y evolucionan más gradualmente. Los CFE son promovidos radiativamente cuando el sol vuelve al polo ártico, pero también pueden serlos por forzamiento dinámico por ondas como ocurre en los CRE.

Hielo marino ártico y VPE

A lo largo del invierno la variación en la extensión del hielo ártico ocurre en aquellos mares que no están limitados en su parte sur por la costa, o sea, los mares de Barents-Kara, Groenlandia y Labrador en el sector del Atlántico, y los mares de Ojotsk y Bering en el sector del Pacífico. La falta de hielo marino en estos dos sectores árticos genera ondas de Rossby estacionarias anómalas en la troposfera que pueden interferir constructivamente/destructivamente con el patrón de ondas estacionarias climatológicas, amplificando/amortiguando las ondas climatológicas de escala planetaria. Consecuentemente, la interferencia fortalece o suprime la propagación vertical hacia la estratosfera de las ondas, desacelerando o acelerando el flujo estratosférico.

Cuando la pérdida de hielo se confina principalmente en el sector atlántico del Ártico, el VPE se debilita. Si se confina en el sector pacífico, el VPE se fortalece (MCKENNA *et al.*, 2018).

D3. Referencias

- BALDWIN, M. P. y DUNKERTON, T. J., 2001. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 294: 581-584.
- BARNSTON, A. G. y LIVEZEY, R. E., 1987. Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1083-1126.
- BLACK, R. X., MCDANIEL, B. A. y ROBINSON, W. A., 2006. Stratosphere-Troposphere Coupling during Spring Onset. *J. Climate*, 19, 4891-4901.
- BRÖNNIMANN, S., 2007. Impact of El Niño-Southern Oscillation on European climate. *Reviews of Geophysics*, 45: 3.
- BUTLER, A. H., 2019. Stratosphere-troposphere coupling across timescales. *US CLIVAR Variations*, Spring 2019.
- BUTLER, A. H. y GERBER, E. P., 2018. Optimizing the definition of a sudden stratospheric warming. *J. Clim.*, 31: 2337-2344.
- CASSOU, C., TERRAY, L., HURRELL, J. W. *et al.*, 2004. North Atlantic winter climate regimes: spatial asymmetry, stationarity with time and oceanic forcing. *J. Climate*, 17, 1055-1068.

- FELDSTEIN, S. B., 2003. The dynamics of NAO teleconnection pattern growth and decay. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129: 901-924.
- FERRANTI, L., CORTI, S. y JANOUSEK, M., 2015. Flow-dependent verification of the ECMWF ensemble over the Euro-Atlantic sector. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, 916-924.
- GARFINKEL, C. I., 2019. Stratospheric pathway of the MJO and ENSO for boreal winter surface climate. *US CLIVAR Variations*, Spring 2019, Vol. 17, No. 1.
- HURRELL, J. W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269: 676-679.
- HURRELL, J. W. y VAN LOON, H. 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Clim. Change*, 36: 301-326.
- KARPECHKO, A. Y., CHARLTON-PÉREZ, A., BALMASEDA, M. *et al.*, 2018. Predicting sudden stratospheric warming 2018 and its climate impacts with a multimodel ensemble. *Geophys. Res. Lett.*, 45: 13538-13546.
- KALLBERG, P., BERRISFORD, P., HOSKINS, B. J. *et al.*, 2005. ERA-40 Atlas. ERA-40 Project Report Series, 19. ECMWF. pp 199.
- KIDSTON, J., SCAIFE, A. A., HARDIMAN, S. C. *et al.*, 2015. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nat. Geosci.*, 8: 433-440.
- KNIGHT, J. R., MAIDENS, A., WATSON, P. A. G. *et al.*, 2017. Global meteorological influences on the record UK rainfall of winter 2013-14. *Environmental Research Letters*, 12 (074001).
- KODERA, K., KURODA, Y. y PAWSON, S., 2000. Stratospheric sudden warming and slowly propagating zonal-mean zonal wind anomalies, *J. Geophys. Res.*, 105, 12351-12359.
- KODERA, K., YAMAZAKI, K., CHIBA, M. y SHIBATA, K., 1990. Downward propagation of upper stratospheric mean zonal wind perturbation to the troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1263-1266.
- KUCHARSKI, F., BRACCO, A., YOO, J. H. y MOLTENI, F., 2007. Lowfrequency variability of the Indian monsoon-ENSO relationship and the tropical Atlantic: The 'weakening' of the 1980s and 1990s. *J. Clim.*, 20, 4255-4266.
- LI, R. K. K., WOOLLINGS, T., O'REILLY, C. y SCAIFE, A. A., 2020. Tropical atmospheric drivers of wintertime European precipitation events. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146: 780-794.
- LÓPEZ-PARAGES, J., RODRÍGUEZ-FONSECA, B. y TERRAY, L., 2014. A mechanism for the multi-decadal modulation of ENSO teleconnection with Europe. *Clim. Dyn.*, 45 (3-4): 867-880.
- MATSUNO, T., 1971. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, 28, 1479-1494.
- McKENNA, C. M., MAYCOCK, A. C., FORSTER, P. M. *et al.*, 2021. Stringent mitigation substantially reduces risk of unprecedented near-term warming rates. *Nat. Clim. Chang.*, 11, 126-131 (2021).
- MICHELANGELI, P. A., VAUTARD, R. y LEGRAS, B., 1995. Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *J. Atmos. Sci.*, 52: 1237-1256.
- OGI, M., YAMAZAKI, K. y TACHIBANA, Y., 2004. The summertime annular mode in the Northern Hemisphere and its linkage to the winter mode. *J. Geophys. Res.*, 109, D20114.

- RASMUSSEN, E. M. y CARPENTER, T. H., 1983. The Relationship between Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperature and Rainfall over India and Sri Lanka. *Monthly Weather Review*, 111, 517-528.
- SCHERHAG, R., 1952. Die explosionsartigen Stratosphärenwärmungen des Spätwinter 1951/1952. *Ber. Dtsch. Wetterdienstes U.S. Zone*, 38, 51-63.
- THOMPSON, D. W. J. y WALLACE, J. M., 1998. The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 25: 1297-1300.
- TORRENCE, C. y WEBSTER, P. J., 1999. Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System. *Journal of Climate*, 12, 2679-2690.
- TRIPATHI, O. P., CHARLTON-PÉREZ, A., SIGMOND, M. *et al.*, 2015. Enhanced long-range forecast skill in boreal Winter following stratospheric strong vortex conditions. *Environ. Res. Lett.*, 10: 104007.
- WOOLLINGS, T., HANNACHI, A. y HOSKINS, B., 2010. Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136: 856-868.
- XOPLAKI, E., 2002. Climate variability over the Mediterranean. PhD thesis, University of Bern, Switzerland.

ANEXO E. EFEMÉRIDES CLIMATOLÓGICAS

Efemérides de temperatura media anual más alta registradas en el año 2021

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Media 2021 (°C)	Efeméride anterior		Diferencia (°C)	Datos desde
					°C	Año		
5796	Morón de la Frontera	87	Sevilla	19.5	19.3	2017	0.2	1956

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más elevado de temperatura media anual.

Efemérides de temperatura media anual de las mínimas más alta registradas en el año 2021

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Media mínimas 2021 (°C)	Efeméride anterior		Diferencia (°C)	Datos desde
					°C	Año		
B278	Palma de Mallorca/Son San Juan	8	Baleares	12.2	12.1	2020	0.1	1954
5796	Morón de la Frontera	87	Sevilla	12.7	12.6	2010	0.1	1956

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más elevado de temperatura media anual de las mínimas.

Efemérides de temperatura máxima diaria más alta registradas en el año 2021 (extremos absolutos de la serie)

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Máxima 2021		Efeméride anterior		Diferencia (°C)	Datos desde
				°C	Día	°C	Fecha		
8175	Albacete/Los Llanos	702	Albacete	43.3	14-agosto	42.6	17/07/1978	0.7	1939
2444	Ávila	1130	Ávila	38.8	14-agosto	37.6	24/07/1995	1.2	1983
3469A	Cáceres	394	Cáceres	43.7	14-agosto	43.2	13/07/2017	0.5	1982
8096	Cuenca	948	Cuenca	41.5	13-agosto	39.7	10/08/2012	1.8	1955
5530E	Granada/Aeropuerto	567	Granada	46.0	14-agosto	45.7	12/07/2017	0.3	1972
5514	Granada/Base aérea	687	Granada	43.8	13-agosto	43.5	13/07/2017	0.3	1931
3129	Madrid/Barajas	609	Madrid	42.7	14-agosto	42.2	24/07/1995	0.5	1945
3196	Madrid/Cuatro Vientos	690	Madrid	42.2	14-agosto	40.8	03/08/2018	1.4	1945
3200	Madrid/Getafe	620	Madrid	42.6	14-agosto	41.6	24/07/1995	1.0	1951
3175	Madrid/Torrejón	607	Madrid	42.8	14-agosto	41.9	28/06/2019	0.9	1951
7178I	Murcia	61	Murcia	46.2	15-agosto	45.7	04/07/1994	0.5	1984
7228	Murcia/Alcantarilla	75	Murcia	47.0	15-agosto	46.1	04/07/1994	0.9	1940
9263D	Pamplona/Aeropuerto	459	Navarra	41.6	14-agosto	41.4	10/08/2012	0.2	1975
2465	Segovia	1005	Segovia	38.7	13-agosto	38.6	24/07/1995	0.1	1988
2030	Soria	1082	Soria	38.5	13-agosto	38.0	28/07/1951	0.5	1943
8368U	Teruel	900	Teruel	41.3	14-agosto	40.2	13/07/2017	1.1	1986
3260B	Toledo	515	Toledo	44.2	13-agosto	43.1	10/08/2012	1.1	1982

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más elevado de temperatura máxima diaria.

Efemérides de temperatura máxima diaria más baja registradas en el año 2021 (extremos absolutos de la serie)

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Máxima 2021		Efeméride anterior		Diferencia (°C)	Datos desde
				°C	Día	°C	Fecha		
3175	Madrid/Torrejón	607	Madrid	0.0	8-enero	0.4	02/02/1963	-0.4	1961

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más bajo de temperatura máxima diaria.

Efemérides de temperatura mínima diaria más alta registradas en el año 2021 (extremos absolutos de la serie)

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Mínima 2021		Efeméride anterior		Diferencia (°C)	Datos desde
				°C	Día	°C	Fecha		
8175	Albacete/Los Llanos	702	Albacete	25.1	15-agosto	23.6	13/07/2019	1.5	1939
5270B	Jaén	580	Jaén	30.1	13-agosto	30.0	01/08/2003	0.1	1983
3200	Madrid/Getafe	620	Madrid	26.6	14-agosto	26.0	05/08/2017	0.6	1951
3195	Madrid, Retiro	667	Madrid	26.1	14-agosto	25.9	03/08/2018	0.2	1920

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más elevado de temperatura mínima diaria.

Efemérides de temperatura mínima diaria más baja registradas en el año 2021 (extremos absolutos de la serie)

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Mínima 2021		Efeméride anterior		Diferencia (°C)	Datos desde
				°C	Día	°C	Fecha		
3196	Madrid/Cuatro Vientos	690	Madrid	-13.0	12-enero	-11.4	05/02/1963	-1.6	1945
8368U	Teruel	900	Teruel	-21.0	12-enero	-19.0	26/12/2001	-2.0	1986
3260B	Toledo	515	Toledo	-13.4	12-enero	-9.6	27/01/2005	-3.8	1982

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más bajo de temperatura mínima diaria.

Efemérides de precipitación anual más baja registradas en el año 2021

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Precipitación 2021 (mm)	Efeméride anterior		Diferencia (mm)	Datos desde
					mm	Año		
C249I	Fuerteventura/Aeropuerto	25	Las Palmas	16.8	24.6	2019	-7.8	1970

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más bajo de precipitación anual.

141

Efemérides de racha máxima diaria del viento registradas en el año 2021 (extremos absolutos de la serie)

Indicativo	Estación	Altitud (m)	Provincia	Máxima 2021		Efeméride anterior		Diferencia (km/h)	Datos desde
				km/h	Día	km/h	Fecha		
B278	Palma de Mallorca/Son San Juan	8	Baleares	130	22-enero	118	08/02/1996	12	1975

Listado de una selección de estaciones principales de AEMET en las que se ha superado el anterior valor más elevado de racha máxima diaria.

ANEXO F. LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AA	Amplificación Ártica
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AMM	Atlantic Meridional Mode (Modo Meridional Atlántico)
AMO	Atlantic Multi-decadal Oscillation (Oscilación Multidecenal del Atlántico)
ANE	Atlántico Norte - Europa
AO	Arctic Oscillation (Oscilación Ártica)
C3S	Copernicus Climate Change Service (Servicio de Cambio Climático de Copernicus)
CFC	Clorofluorocarbono
CFE	calentamiento final de la estratosfera
CPC	Climate Prediction Center (Centro de Predicción Climática)
CRE	calentamiento repentino de la estratosfera
CT	ciclón tropical
dana / DANA	depresión aislada en niveles altos
E-QBO	East Quasi-Biennial Oscillation (fase este de la Oscilación Casi Bienal)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio)
EDGAR	Emissions Database for Global Atmospheric Research (Base de Datos de Emisiones para la Investigación Atmosférica Global)
ENSO	El Niño-Southern Oscillation (El Niño-Oscilación del Sur)
EOF	Empirical orthogonal functions (funciones ortogonales empíricas)
ESA	European Space Agency (Agencia Espacial Europea)
ESRL	Earth System Research Laboratory (Laboratorio de Investigación del Sistema Tierra)
EUMETNET	European Meteorological Services Network (Red de Servicios Meteorológicos Europeos)
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos)
GEI	Gas de efecto invernadero
HN	hemisferio norte
HS	hemisferio sur
IECLE	Informe sobre el estado del clima de España
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IMI	Índice del monzón de la India
IMR	Indian monsoon rainfall (lluvia monzónica de la India)
IOD	Indian Ocean Dipole (dipolo del océano Índico)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)

IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera (Instituto Portugués del Mar y la Atmosfera)
IPRC	International Pacific Research Center
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut / Royal Netherlands Meteorological Institute (Instituto Real de Meteorología de los Países Bajos)
MJO	Madden-Julian Oscillation (Oscilación Madden-Julian)
NAM	Northern Annular Mode (Modo Anular del Norte)
NAO	North Atlantic Oscillation (Oscilación del Atlántico Norte)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, de los Estados Unidos)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional del Océano y de la Atmosfera, de los Estados Unidos)
NPO	North Pacific Oscillation (Oscilación del Pacífico Norte)
OLR	outgoing longwave radiation (radiación de onda larga saliente)
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PNM	presión a nivel del mar
ppb	número de moléculas de un gas traza por mil millones (10^9) de moléculas de aire seco (del inglés <i>parts per billion</i>)
ppm	número de moléculas de un gas traza por millón (10^6) de moléculas de aire seco (del inglés <i>parts per million</i>)
ppt	número de moléculas de un gas traza por billón (10^{12}) de moléculas de aire seco (del inglés <i>parts per trillion</i>)
QBO	Quasi-Biennial Oscillation (Oscilación Casi Bienal)
RMI	Royal Meteorological Institute (Instituto Real Meteorológico de Bélgica)
SAF	Satellite Application Facilities
SDU	Sunshine duration (duración de la insolación)
SPI	Standardized Precipitation Index (índice de precipitación estandarizado)
TSM	temperatura de la superficie del mar
UH	Universidad de Hawái
UTC	universal time coordinated (tiempo universal coordinado)
VAG	Vigilancia de la Atmosfera Global de la OMM
VPE	vórtice polar estratosférico
W-QBO	West Quasi-Biennial Oscillation (fase oeste de la Oscilación Casi Bienal)
WMO	World Meteorological Organization (Organización Meteorológica Mundial, OMM)

