

REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y BOLETÍN DE LA ASOCIACIÓN METEOROLÓGICA ESPAÑOLA



# Tiempo y Clima

ENERO 2024 N° 83





# SUMARIO

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN METEOROLÓGICA ESPAÑOLA  
ENERO 2024 - NÚMERO 83 - QUINTA ETAPA

PRESENTACIÓN .....	3
ACTIVIDADES AME, por Manuel Palomares y Fernando Bullón.....	4
AZARES DEL CLIMA: Puntos críticos del Sistema Climático, por José Antonio López Díaz.....	8
Predicción numérica del tiempo: ¿basada en leyes o en datos?, por Ernesto Rodríguez Camino.....	9
Tormentas del día 6 de julio de 2023 en la comarca del Bajo Aragón (Teruel), por Ismael Sanambrosio, Arcadio Blasco y María José Martín.....	14
NOTICIAS: Entra en vigor el nuevo acuerdo de EUMETNET; La OMM confirma que en 2023 la temperatura mundial batió récords; Relevo en la cúpula de AEMET, por Manuel Palomares.....	19
CRÓNICA DEL TIEMPO, por Federico Franco, Andrés Chazarra, Ana Morata y Rubén del Campo.....	22
FOTOGRAFÍA: Reafirmando mi locura, por Enric Navarrete Bachs; Las fotos del verano .....	28
LA IMAGEN DEL OTOÑO: 22 de octubre de 2023: Borrasca Bernard, por Darío Cano.....	32
AGROFENOLOGÍA: Resumen agro-fenológico del otoño de 2023 en España, por Juan Antonio de Cara.....	34
Episodio de mar de fondo del sur en Canarias (del 9 al 16 agosto de 2023), por Irene Peñate y Eduardo Portillo.....	37
TRAZAS DE LA TEMPERIE: Las inundaciones del 6 de julio de 2023 en la ciudad de Zaragoza, por Rafael Requena .....	40
El índice SPI y la ecología de la sequía, por Ramiro Romero Fresneda y Juan Antonio de Cara García.....	42
Recuperando la memoria de Lise Meitner, la científica que descubrió la fisión nuclear (Viena 1878 – Cambridge 1968), por María Asunción Pastor y Carmen Rus .....	48
Recuperando la memoria del matemático francés Laurent Schwartz (1915-2002), por María Asunción Pastor Saavedra.....	52
REUNIONES Y CONGRESOS: La Cumbre del Clima de Dubái sienta las bases de un futuro sin combustibles fósiles, por Vera Estefanía; Próximas citas....	55
LIBROS: <i>Towards the "Perfect" Weather Warning: Bridging Disciplinary Gaps through Partnership and Communication</i> de Brian Golding, por Ernesto Rodríguez Camino; <i>Cómo funciona el mundo de Vaclav Smil</i> , por Ernesto Rodríguez Camino .....	58

## EDITA:

Asociación Meteorológica  
Española

## DIRECTOR:

José María Sánchez-Laulhé  
Ollero

## REDACCIÓN:

Ernesto Rodríguez Camino  
María Asunción Pastor Saavedra  
Manuel Palomares Calderón  
Fernando Aguado Encabo  
Amadeo Uriel González  
José Luis Sánchez Gómez

## DIRECCIÓN POSTAL:

Revista Tiempo y Clima  
Apartado 60025  
28080, MADRID

## WEB:

pub.ame-web.org

Revista de difusión gratuita  
entre los socios de la AME.

Diseño: Alfredo Niño

Dep. Leg: M-10961-1976

EDICIÓN IMPRESA

ISSN: 2340-6607

EDICIÓN DIGITAL

ISSN: 2340-6631

## COLABORACIONES:

Se invita a enviar contribuciones  
y correspondencia relativa  
a todos los aspectos de la  
meteorología, climatología y  
ciencias afines.

La responsabilidad por  
las opiniones vertidas en  
dichas contribuciones es  
exclusivamente de sus autores.

## FOTO PORTADA

Título: "Diamond Beach" Autor: Imanol Zuaznabar García

Fotografía captada en la hora dorada de la tarde del 2 de noviembre de 2023, desde la mejor  
playa de Islandia y quizás una de las más especiales del mundo, Diamond Beach, donde podemos  
ver infinidad de bloques de hielo procedentes del inmenso glaciar Vatnajökull.

# PRESENTACIÓN

Estimados lectores, ¡Feliz 2024!

Del 13 al 15 de marzo de este año nuestra asociación organizará en Cádiz y San Fernando las Jornadas Científicas de la AME. Las últimas se celebraron en León en 2018 pues, aunque tienen una periodicidad bienal, las Jornadas previstas para 2020 y 2022 tuvieron que suspenderse a causa de la pandemia de COVID-19.

La elección de Cádiz y San Fernando como sedes está muy justificada, primero por la importancia de los fenómenos meteorológicos que se generan en la provincia de Cádiz y su entorno, y segundo por la importancia histórica de dos gaditanos en el nacimiento de la Meteorología española que queremos homenajear: Augusto Arcimis, vecino de Cádiz, primer director de la institución que actualmente es la Agencia Estatal de Meteorología, creada en 1887 con el nombre de Instituto Central Meteorológico (ICM), y primer meteorólogo profesional, y Cecilio Pujazón, nacido en San Fernando, director del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) entre 1869 y 1891, que representó a España en el II Congreso Internacional de Meteorología de 1875, y fundó en el ROA el primer organismo meteorológico

de la Península con fines informativos y de predicción del tiempo, el Servicio Meteorológico Costero en 1884, tres años antes de que se creara el ICM, e impulsó las observaciones meteorológicas en los buques militares. Más sobre la preparación de las Jornadas se puede leer en la sección Actividades AME.

La sección Noticias se ocupa del nombramiento de presidenta de AEMET a María José Rallo del Olmo en un momento en el que esta organización tendrá que adaptarse a los cambios que la IA va a provocar en la generación de predicciones (ver artículo "Predicción numérica del tiempo: ¿basada en leyes o en datos?"), y en el que el cambio climático se está intensificando. "En el año 2023 vimos un mero anticipo del futuro catastrófico que nos espera si no actuamos ahora", ha afirmado António Guterres (ver artículo "La Organización Meteorológica Mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords" en la sección Noticias). Le deseamos a la Presidenta todo el éxito posible.

Espero que todos disfrutéis con la revista y poder saludar a muchos de vosotros en Cádiz.

**José María Sánchez-Laulhé Ollero**  
Director de *Tiempo y Clima*

## Preparación de las Jornadas Científicas de 2024

Durante el último trimestre la Junta Directiva de la AME ha incrementado notablemente el ritmo en la organización de las próximas Jornadas Científicas de la AME, en conjunción con el 22.º Encuentro Hispano – Luso de Meteorología, que tendrán lugar en Cádiz y San Fernando desde el 13 al 15 de marzo de 2024.

En diciembre se abrió al público el sitio web de las Jornadas con la dirección <https://jornadas.ame-web.org/> que, además de incrementar la información preliminar que contenía el primer anuncio, permite realizar en línea la inscripción en las Jornadas y la presentación de comunicaciones. Se ha fijado el 1 de febrero como fecha límite de recepción de resúmenes de comunicaciones, aunque podría prorrogarse si fuera necesario.

En el momento de redactar esta información, existen todavía dudas acerca del programa de actividades que se están tratando con las instituciones locales que han ofrecido su colaboración: el Ayuntamiento de Cádiz y el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando, a muy corta distancia de Cádiz. El plan en principio es reunirse en Cádiz el miércoles día 13 y el viernes día 15, mientras que el jueves la Jornadas se celebrarían en el histórico observatorio de San Fernando

por gentil invitación del ROA que ofrecería además una visita guiada. La cena de confraternización de las Jornadas se celebrará ese mismo jueves, día 14, ya en Cádiz.

Solamente en proyecto está la posible celebración de un homenaje a Augusto Arcimis Werle, vecino de Cádiz durante largo tiempo, primer director del Instituto Central Meteorológico (ahora AEMET) entre 1888 y 1910 y primer meteorólogo profesional en España.

Para difundir eficazmente la celebración de las Jornadas y facilitar el mayor éxito posible, la AME está recibiendo la colaboración de varias instituciones científicas:

- La Asociación Portuguesa de Meteorología y Geofísica (APMG) que es además coorganizadora con la AME del Encuentro Hispano – Luso que culminará con una mesa redonda sobre servicios climáticos en la Península Ibérica.
- La Asociación Española de Climatología.
- La Asociación Catalana de Meteorología.
- El Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (departamento de ciencias de la Tierra).
- CLIVAR-ES.

Muchas gracias a todos ellos. Están contribuyendo también a la difusión de la Jornadas en el mundo académico los miembros de la Junta Directiva que son

profesores universitarios y además estamos difundiendo la convocatoria a través de las redes sociales en las que participa la AME.

## Aula Morán y otras videoconferencias

Las actividades de divulgación a través de videoconferencias, dentro del ámbito del Aula Morán o de otros foros, han continuado durante el último cuatrimestre de 2023. En esos meses y excluidas las charlas sobre fotografía de las que se informa más adelante, han tenido lugar las siguientes:

**“Atribución de eventos extremos al C.C.: el caso del derecho en el Mediterráneo en 2022”. Juan Jesús González Alemán (Meteorólogo en AEMET).**

**“MEDINA, la divulgación meteorológica para todos los públicos”. Marta Ferri Llorens (AEMET).**

**“¿Qué sabemos de las precipitaciones de granizo? Lecciones aprendidas en los últimos 15 años”. José Luis Sánchez Gómez, catedrático de Física Aplicada en la Universidad de León.**

**“Los aerosoles y el clima: el papel del Observatorio Atmosférico de Izaña”. África Barreto Velasco, Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (AEMET).**

Nuestro agradecimiento a las personas que han colaborado desinteresadamente con la AME en estas actividades de divulgación científica y a los socios que están produciendo, organizando o presentando las conferencias: Carmen Rus, Encarna Serrano, Fernando Aguado, César Zancajo, Francisco Javier Martínez, José Antonio López, Ernesto Rodríguez, José Ignacio Prieto y Amadeo Uriel (la mayoría de ellos se encarga también del mantenimiento de la página web, blog y actividad en redes sociales).

Recordamos que, tanto las actividades del Aula Morán, como las de los concursos de fotografía que tienen lugar a través de videoconferencia, están disponibles en nuestro canal de YouTube para cualquier persona que no pudiera asistir en su día o desee repasar el contenido.



El Real Observatorio de la Armada en San Fernando, Cádiz. Fuente: Ministerio de Defensa

## Blog y redes sociales

La AME tiene una página en Internet, [www.ame-web.org](http://www.ame-web.org) y un blog donde se incluyen, en formato reducido, noticias externas de interés sobre diversos campos de meteorología y clima o bien noticias de la propia AME. Se puede acceder a través de AME <https://wp.ame-web.org/>.

La AME está además presente en las redes sociales o canales de Facebook siguientes:

Instagram – <https://www.instagram.com/a.meteorologicaes>

X (Twitter) – [https://twitter.com/ame\\_asociacion](https://twitter.com/ame_asociacion)

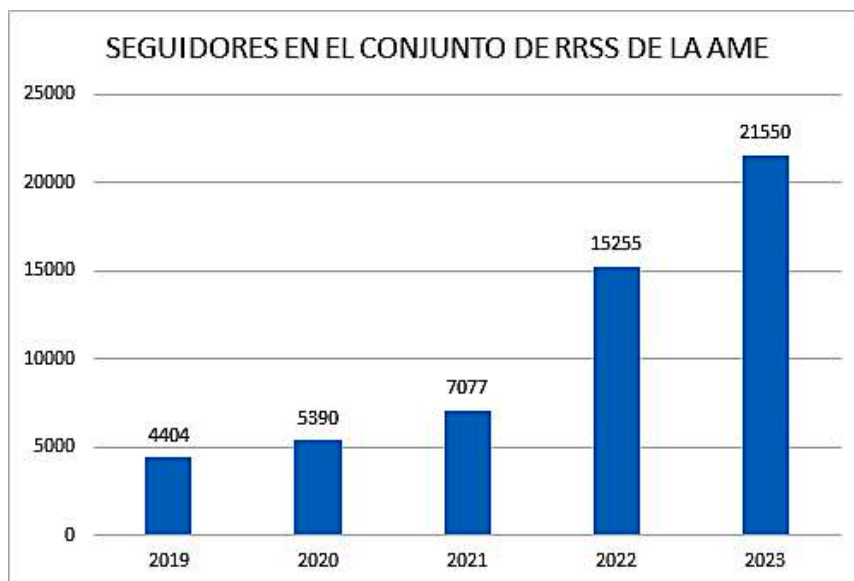
Facebook – <https://www.facebook.com/AME.asociacionMeteorologica/>

YouTube – [https://www.youtube.com/channel/UCtBbHi8ZH6W-qEtZQWtMBlw?view\\_as=subscriber](https://www.youtube.com/channel/UCtBbHi8ZH6W-qEtZQWtMBlw?view_as=subscriber)

Linkedin – <https://www.linkedin.com/in/ame-asociaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica-esp%C3%B3la-7871871a5/>

Este año se ha registrado un crecimiento extraordinario en el acceso a las redes sociales de la AME. Desde que comenzamos a recopilar estadísticas en 2019 con 4404 seguidores, hemos alcanzado la notable cifra de 21 550 seguidores en 2023. Este aumento refleja el compromiso y la dedicación del equipo de socios encargado, así como el interés y apoyo de nuestra creciente comunidad en línea. Estamos muy agradecidos a todos ellos.

Sin embargo, los accesos a la página web de la AME han sufrido un importan-



te descenso en 2023 y 2022 sobre las cifras de 2021 y 2020. Estas cifras tienen sin duda relación con el alto uso de las redes sociales en los años “pandémicos” y a algunas dificultades técnicas a las que nos hemos enfrentado desde 2022. El objetivo ahora es superar esas dificultades, hacer la página cada vez más atractiva y alcanzar un mayor éxito de audiencia incluso superando las 422 514 visitas registradas en 2021.

## Sociedad Meteorológica Europea (EMS)

La EMS que tiene como miembros a las sociedades meteorológicas de los países europeos y de la que la AME es miembro

fundador, celebró su reunión científica anual a principio de septiembre en Bratislava (República Eslovaca). La siguiente tendrá lugar la primera semana de septiembre de 2024 en Barcelona, en el histórico edificio de la Universidad.

La AME está colaborando con la EMS y también con la Asociación Catalana de Meteorología, que es el primer organizador local del evento, para contribuir al éxito de esa importante reunión en Barcelona. A este efecto, tanto el presidente de la AME, Ernesto Rodríguez, como el secretario, Manuel Palomares, son miembros del Comité de Ciencia y Programa que se está encargando de la preparación.

## Asamblea General de FLISMET

El pasado 15 de diciembre de 2023 se reunió por videoconferencia el Consejo de Representantes de FLISMET (Federación Latinoamericana e Ibérica de Sociedades de Meteorología) para celebrar su Asamblea General Ordinaria con cuatro puntos en el orden del día. A la reunión asistieron representantes de cinco de las siete sociedades meteorológicas que componen actualmente la federación (CAM, Argentina; SBMET, Brasil; SOMETCUBA, Cuba; AME, España; OMMAC, México; APMG, Portugal; y ADeIV, Uruguay).

José Luis Sánchez, vicepresidente de la AME y presidente saliente de FLISMET, presentó la memoria de actividades de



Captura de la presentación: “Los aerosoles y el clima: el papel del Observatorio Atmosférico de Izaña” por África Barreto en el Aula Francisco Morán



→ FLISMET en 2023 entre las que destacan la aprobación de los nuevos estatutos de la federación, la constitución y actividad de los grupos de trabajo (Formación; Eventos y Profesionalización) y el fortalecimiento de los vínculos con otras organizaciones supranacionales como el IFMS (International Forum of Meteorological Societies). Los representantes de las sociedades presentes comentaron sus principales novedades y también lo que están realizando en sus distintas áreas de actividad (congresos, publicaciones, divulgación, programas en las que están involucradas, etc.).

Los tres grupos de trabajo antes mencionados quedaron constituidos en 2023 y con responsable asignado, pero solo dos han registrado actividad: el de formación, que presentó una oferta de cursos a desarrollar en los congresos de las sociedades afiliadas, aunque finalmente ninguno se llegara a concretar, y el de eventos, que organizó el 12 de julio de 2023 una mesa redonda con cuatro ponentes titulada "Los ciclones tropicales, temporada 2022, perspectiva 2023 y estado actual de los modelos numéricos para pronóstico de trayectorias" que fue celebrada en abierto por videoconferencia desde la plataforma de comunicación de FLISMET, como ya informó Tiempo y Clima en el número de octubre.

El Consejo de Representantes aprobó por unanimidad aceptar el ofrecimiento de la Organización Mexicana de Meteorólogos (OMMAC) para ostentar la Comisión Directiva de FLISMET en los próximos dos años. De acuerdo a los nuevos estatutos, la sociedad mexicana OMMAC proveerá los cargos de presidente y vicepresidente de FLISMET, y a ellos se unirá como vocal asesor el miembro de la Comisión Directiva saliente Fernando Aguado (AME, España). El Consejo agradeció a la Comisión Directiva saliente, ostentada por la Asociación Meteorológica Española la labor realizada y, especialmente según consta en el acta de la asamblea, "al Dr. José Luis Sánchez por su liderazgo y trabajo en los últimos años, reconociendo el valor y prestigio que su persona le ha brindado a la federación."

## Concursos fotográficos

### FOTO-OTOÑO'2023:

El 28 de diciembre de 2023 se publicaron, en la habitual gala a través de videoconferencia, los resultados del Foto-otoño'2023. Dos semanas después, el 10 de enero de 2024, tuvo lugar la tertulia del concurso, en la que se repasaron algunas de las más de 300 fotografías que se subieron a Fotometeo durante los meses del otoño, que en muchos casos fueron comentadas por sus propios autores. Las grabaciones de ambos eventos están disponibles en el canal de YouTube de la AME.

El concurso contó con una participación récord de 64 participantes que presentaron un total de 228 fotografías. Terminado el plazo de admisión, el comité seleccionó las 50 fotografías que pasaron a la votación del jurado, que tuvo lugar entre el 7 y el 26 de diciembre de 2023. El resultado de la votación se puede ver accediendo al álbum el concurso en Fotometeo y pinchando en "Más valorados", de manera que las 50 fotografías que pasaron al jurado se muestran ordenadas según la puntuación obtenida.

La fotografía ganadora del concurso, con 202 puntos, fue "Aurora y fotógrafo en Stockness", de Roberto Porto, que consi-

gue así el primer puesto por primera vez en un concurso estacional. Anteriormente ya había conseguido quedar en segunda y en tercera posición en varias ocasiones. La fotografía muestra una impresionante aurora de varios colores sobre el cielo estrellado, en un espectacular marco natural de playa y montañas nevadas junto a las costas de Islandia. Esta fotografía la podemos ver en la sección "Las fotos del otoño" como ganadora del mes de octubre.

La segunda clasificada, con 195 puntos, fue "Stratus fluctus", de Nany Lavado Fernández, que consigue así su mejor clasificación hasta ahora en un concurso estacional de la AME. En este caso la autora estaba fotografiando unas sorprendentes imágenes de la ciudad de Málaga vista desde un lugar elevado y envuelta parcialmente por el "taró" (niebla costera). En el momento de la fotografía los estratos presentaban protuberancias en su parte superior en forma de fluctus. Esta fotografía fue la ganadora del mes de noviembre.

El tercer puesto fue para "Aurora en Bruarfoss", con 193 puntos, a muy poca distancia de la segunda clasificada. El autor fue Imanol Zuaznabar, también habitual en los primeros puestos de los concursos

# METEOFOTÓGRAFOS

Alberto Lunas

Jueves, 11 de enero de 2024  
20:00 h. peninsular española

Asociación Meteorológica Española

**Meteovideo'2024**

**Plazo para participar: Hasta el 10 de febrero de 2024**

<http://fotometeo.ame-web.org>  
[fotoconcursos@ame-web.org](mailto:fotoconcursos@ame-web.org)

estacionales. La fotografía, como la ganadora, muestra un cielo poblado de auroras boreales sorprendentes en el cielo de Islandia, esta vez sobre un paisaje muy diferente de la ganadora, pero igualmente muy emblemático: la cascada de Bruarfoss.

Completan la sección de las fotos del otoño la cuarta clasificada y ganadora de septiembre, "Solitaria", de Carlos Castillejo, que muestra una de las habituales tormentas que se forman por convergencias sobre la fachada marítima del Maresme, en las inmediaciones de la ciudad condal.

Además de las tres fotografías que ganaron en cada uno de los meses para los que se podían presentar fotografías para el concurso, otras dos fotografías del concurso han sido publicadas en este número de nuestra revista: en la portada "Diamond Beach" de Imanol Zuaznabar, también desde Islandia, y en la contraportada, "Cortinas", de David Esteban, fotografía tomada en la isla de Mallorca.

## METEOFOTÓGRAFOS

El 11 de enero de 2024 tuvo lugar la tercera entrevista de la serie "Meteofotógrafos", iniciada en julio de 2023. El entrevistado en esta ocasión fue Alberto Lunas, quién compartió con los asistentes aproximadamente una treintena de fotografías de entre todas las que ha realizado a lo largo de su extensa trayectoria como fotógrafo de nubes. Los asistentes pudieron disfrutar con las imágenes y los comentarios de su autor. Al final se pudo disfrutar de su video-montaje "El callejón de las tormentas", ganador de la última edición del Concurso Meteovideo en 2022

El siguiente entrevistado está previsto que sea David Mancebo, el próximo 17 de abril a las 20 h peninsular.

## METEOVÍDEO2024

Al cierre de este número de TyC ya estaba abierto el plazo para participar en el concurso bienal que corresponde a este año, el Meteovideo'2024. El 10 de febrero será el último día de admisión, comenzando a continuación la votación del jurado. La publicación de los resultados está fijada para el 20 de marzo a las 20 h peninsular, en la gala que tendrá lugar a través de videoconferencia.

## METEOINVIERNO'2024

Y como siempre también al cierre de TyC estaban publicadas las bases del próximo concursos estacional, con algunos

cambios. El principal afecta al propio nombre del concurso, que pasa a ser Meteoinvierno en lugar de Fotoinvierno. Con este cambio de nombre se espera remarcar la temática de estos concursos, para los que se pide que se presenten fotografías que tengan un claro contenido meteorológico (nubes y/o fenómenos meteorológicos). Este cambio de nombre coincide además con el hecho de que con esta edición se cumple el 10.º aniversario, con cuarenta ediciones que se han celebrado ininterrumpidamente, desde que estos concursos se iniciaran con el Fotoprimavera de 2014. Las bases contienen otros cambios respecto a las de las ediciones anteriores, básicamente con el objetivo de evitar que varias fotos muy similares del mismo o de diferentes autores, puedan pasar al jurado, limitándose a tres el número de fotos de cada autor que como máximo se pasarán al mismo. De este modo también se pretende favorecer que haya fotos de un mayor número de autores que lleguen a la fase final del concurso con posibilidades de alcanzar los primeros puestos.

Por lo demás, se mantiene el máximo de cinco fotos por autor, tomadas en los meses de diciembre de 2023, y enero y febrero de este año. El plazo se cerrará el 10 de marzo y la gala de presentación de resultados se ha fijado para el miércoles 3 de abril a las 20 h a través de videoconferencia. La tertulia está prevista para el 10 de abril a la misma hora y también por videoconferencia.

**Meteoinvierno'2024**

**¡¡¡10 años de concursos estacionales de la AME!!!**

**Plazo: Hasta el 10 de marzo de 2024**

<http://fotometeo.ame-web.org>  
[fotoconcursos@ame-web.org](mailto:fotoconcursos@ame-web.org)



# AZARES DEL CLIMA

POR JOSÉ ANTONIO LÓPEZ DÍAZ

## Puntos críticos del Sistema Climático

En el Sistema Climático muchos procesos en escalas de tiempo pequeñas son aproximables linealmente. Los sistemas lineales son básicamente predecibles, su respuesta frente a pequeñas perturbaciones se puede acotar, y por tanto no deparan grandes sorpresas. En cambio los sistemas no lineales pueden mostrar evoluciones que súbitamente (frente a las escalas temporales de referencia) experimentan cambios importantes tras sobrepasar un determinado umbral. En este caso se habla de que el sistema presenta un punto crítico o de inflexión (*tipping point*). A estos puntos críticos del Sistema Climático está dedicada la extensa publicación *Global Tipping Points Report 2023* de la universidad de Exeter. Esta publicación contiene un tratamiento detallado de muchos aspectos relacionados con los puntos críticos, desde su definición y discusión conceptual, pasando por el análisis de los puntos críticos en la criosfera, la biosfera, circulaciones atmosféricas y oceánicas, nubes, sensibilidad climática dentro del Sistema Climático. Además aborda con profundidad los impactos de estos potenciales fenómenos, y también se adentra en los puntos críticos de la respuesta socioeconómica de la humanidad.

El Sistema Climático contiene muchos ejemplos de dinámica no lineal que sabemos que tienen, o pueden potencialmente tener, puntos críticos, en algunos casos con consecuencias catastróficas. En estos casos el tratamiento del riesgo es muy complejo. El paradigma clásico para el tratamiento de riesgos combina la probabilidad del suceso con sus consecuencias debidamente valoradas, para estimar la esperanza matemática como producto de la probabilidad por el valor de la pérdida asociada a cada suceso. Esto proporciona una escala que permite comparar diferentes riesgos.

Pero a medida que la pérdida potencial crece y la probabilidad asociada decrece esto deja de tener sentido, básicamente porque el esquema basado en la esperanza matemática presupone para su racionalidad

la posibilidad de repeticiones, como sucede en los juegos de azar mientras las sumas apostadas no conduzcan a la bancarrota de algún participante, y de hecho del análisis de este caso surgieron estas ideas<sup>1</sup>.

Pero cuando hablamos de consecuencias catastróficas, de una escala enorme, la idea de repetición resulta inadecuada o problemática, y con ello la de esperanza matemática de la pérdida para valorar el riesgo. Por poner un ejemplo sencillo, la mayoría de nosotros no consideramos que sea lo mismo jugar cien euros en una lotería con una posibilidad entre diez mil de ganar, que jugar cien mil euros en una lotería con una posibilidad entre diez millones de ganar, aunque en términos de esperanza matemática de la ganancia son equivalentes.

Pero, además de este problema conceptual, sucede que las probabilidades, cuanto más bajas, mayor suele ser el error relativo que se comete al estimarlas, lo que se explica porque al situarse muy allá en la cola de las distribuciones los detalles de estas se desdibujan rápidamente. Otro tanto sucede con la estimación de las consecuencias de sucesos catastróficos, y por razones similares en lo esencial. En suma la incertidumbre de cualquiera de los parámetros de descripción de estos sucesos singulares se dispara. Además, como se sabe desde antiguo, los riesgos que no dan señales de alarma son a menudo los peores<sup>2</sup>.

Probablemente los puntos críticos más alarmantes son los que provienen de la criosfera, no en vano los últimos 2.5 millones de años, el periodo Cuaternario, han estado dominados climáticamente por la sucesión de glaciaciones y periodos interglaciales. Los principales puntos críticos de la criosfera que reseña el informe, todos ellos con un periodo de siglos-milenios, son:

En cambio, para el hielo marino ártico en verano el informe constata que, según las últimas investigaciones, el temor a un proceso no lineal acelerado de desaparición inducido por la retroalimentación del albedo<sup>3</sup> no tendría fundamento, al compensarse esta retroalimentación hielo-albedo positiva por retroalimentaciones negativas en invierno. El efecto total es una respuesta aproximadamente lineal de la extensión de hielo marino ártico veraniego al calentamiento global.

Un aspecto novedoso de la publicación es que aborda también, con bastante detalle, los "puntos críticos" (definidos por analogía con los de un sistema físico) en la evolución socioeconómica de la humanidad en lo relativo a la emisión de gases de efecto invernadero. Se incluyen la posible irrupción en el mercado de los vehículos eléctricos una vez sobrepasado un umbral de precio, o la expansión masiva de las fuentes de energía renovables. Aquí echo en falta que no se mencione el punto crítico que supondrá, según las previsiones de los expertos, la irrupción de la energía de fusión en algunos decenios. Esta tiene el potencial de transformar radicalmente el panorama energético de la humanidad, pasando de usar la energía solar como hasta ahora (en forma fósil en los combustibles fósiles, como radiación recibida o en forma de energía cinética del viento) a tener múltiples mini-soles en la Tierra. O en una escala menor, el potencial del hidrógeno como vector y reservorio energético en combinación con las energías renovables, potencialmente resolviendo el talón de Aquiles de las renovables, su almacenamiento.

### Referencias

● *Global Tipping Points (report 2023)*  
University of Exeter (Global Systems Institute)  
<https://global-tipping-points.org/>

Región	Umbral crítico del calentamiento global, en °C	Elevación del nivel del mar (máx), en m
Capa de hielo de Groenlandia	0.8 - 3	7
Capa de hielo de la Antártida Occidental	1 - 3	3
Cuencas marinas de la Antártida Oriental	2 - 6	19
Capa hielo no marino de la Antártida Oriental	6 - 10	34

<sup>1</sup> En 1654, considerado el año "oficial" del surgimiento de la ciencia de la probabilidad, Pascal y Fermat resolvieron un problema que llevaba más de un siglo preocupando a los matemáticos de la época, en especial a los italianos desde el siglo XVI. Se trataba de dos jugadores que apuestan inicialmente una suma determinada, el que gana se lleva todo. Se supone entonces que la autoridad irrumpe antes de la finalización del juego (en esa época eso podía perfectamente suceder pues las autoridades a menudo prohibían los juegos de azar). La pregunta es cómo repartir justamente la suma apostada entre los dos jugadores, en casos en que uno lleva ventaja respecto al otro en sentido probabilístico. La solución que dieron Pascal y Fermat empleaba el concepto de esperanza matemática aunque sin formular con precisión esta idea clave (este honor le cupo a Huygens pocos años después, que generalizó la idea a otros muchos casos). En concreto, la cantidad total apostada debe repartirse de forma proporcional a las probabilidades de ganar de cada jugador. Esto corresponde, en lenguaje moderno, a asignar a cada jugador su esperanza matemática de ganancia.

<sup>2</sup> "Quod apud Bactrianos vulgo usurpabant, ...altissima quaeque flumina minimo sono labunt", *Historiae Alexandri Magni* of Q. Curtius Rufus (traducido, "Lo que se solía decir entre los bactrianos, .... los ríos más profundos fluyen casi sin ruido")

<sup>3</sup> Al ser el albedo del mar mucho menor que el del hielo, la desaparición de este reduce el albedo, lo que a su vez aumenta la absorción de energía solar de la superficie, acelerándose la desaparición del hielo.



# Predicción numérica del tiempo: ¿basada en leyes o en datos?

E. RODRÍGUEZ CAMINO, AME

## 1 Primeros pasos

Cuando en enero de 1904, el físico noruego Vilhelm Bjerknes publicó su trascendental artículo "El problema de la predicción del tiempo desde el punto de vista de la mecánica y la física" en *Meteorologische Zeitschrift*, en tan solo siete páginas desarrolló la idea de un modelo matemático de la dinámica atmosférica basado únicamente en las leyes de la física, particularmente la mecánica y la termodinámica, en contraposición a la práctica generalizada de predecir el tiempo basada en las observaciones y métodos empíricos de predicción. Aunque su modelo no era practicable en aquellos días –por lo que su propuesta tardó en encontrar aceptación en el campo de la meteorología– hoy sabemos que su idea fue revolucionaria y marcó el desarrollo posterior de la predicción numérica del tiempo (PNT) y de la meteorología moderna.

En 1922, Lewis Fry Richardson sentó en su libro titulado "Weather Prediction by Numerical Process" (Predicción del Tiempo mediante Proceso Numérico) las bases teóricas y prácticas para implementar la PNT. Richardson desarrolló la propuesta

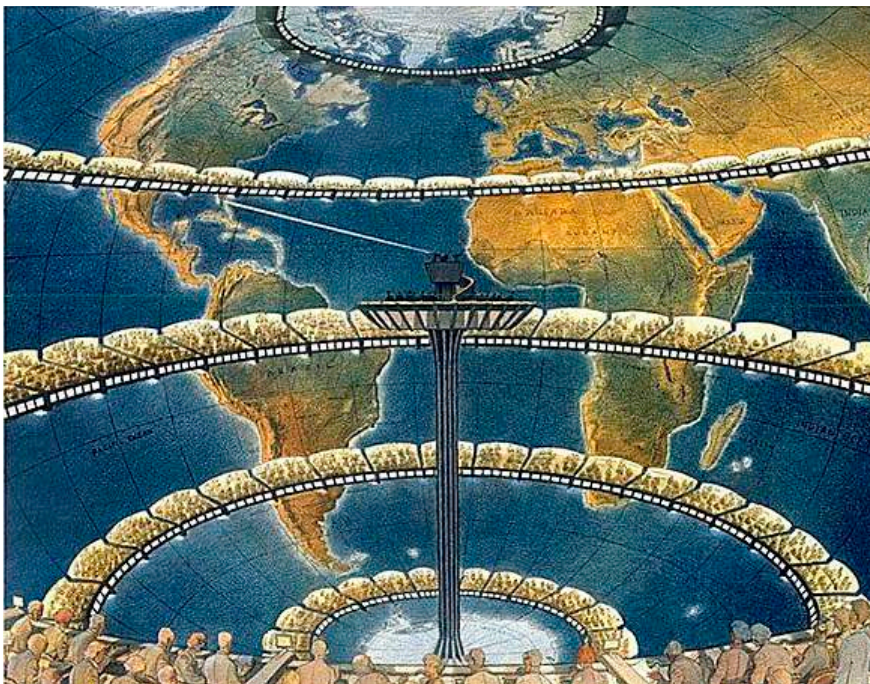
de Bjerknes de integrar las ecuaciones diferenciales que describen la evolución de la atmósfera a partir de unas condiciones iniciales determinadas por las observaciones. Aunque Richardson desarrolló un plan muy ambicioso basado en el uso de incipientes métodos numéricos para resolver las ecuaciones diferenciales, también reconoció las limitaciones tecnológicas de su tiempo ("quizás algún día en un futuro lejano será posible hacer avanzar los cálculos más rápido que lo que avanza el tiempo... pero eso es un sueño") ya que se requerirían avances significativos tanto en la tecnología informática como en los métodos numéricos para realizar de forma práctica los cálculos rápidos y precisos que se precisaban.

En la década de 1930, Carl-Gustaf Rossby contribuyó significativamente a la mejor comprensión de los patrones de circulación atmosférica y de los fenómenos a gran escala regidos por la formación y propagación de lo que posteriormente se denominaron ondas de Rossby, que son oscilaciones que se producen en la atmósfera (y también en los océanos) y que tienen su origen en el principio de conser-

vación de la vorticidad potencial. Su trabajo en este campo inició los fundamentos para el desarrollo posterior de modelos filtrados para la predicción numérica del tiempo.

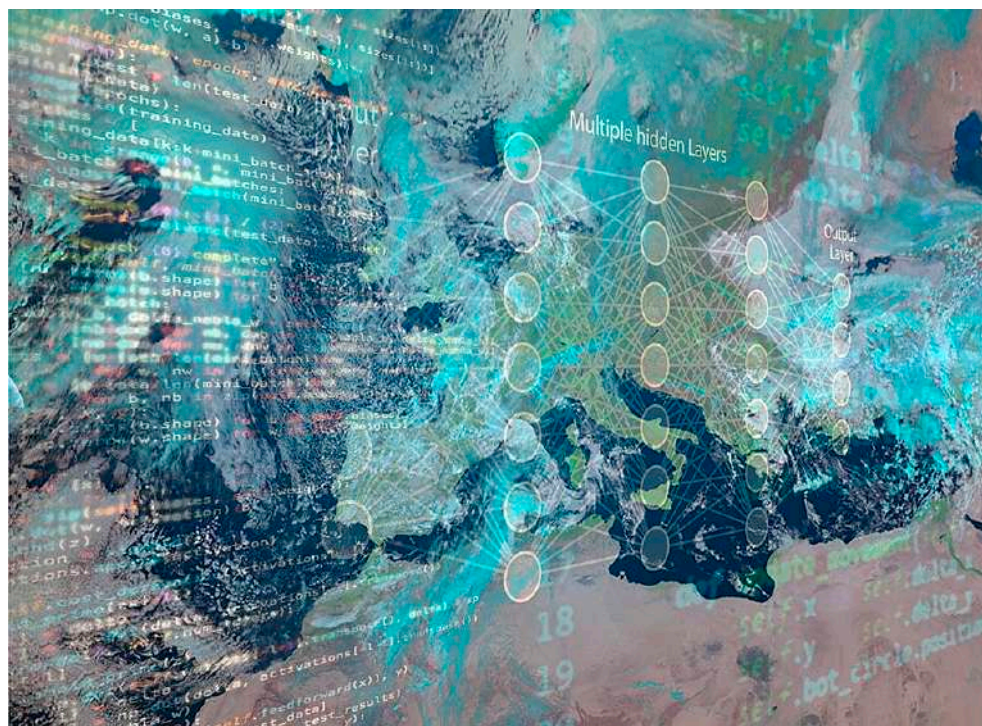
El ENIAC (acrónimo de *Electronic Numerical Integrator And Computer*) fue uno de los primeros ordenadores de uso general, aunque su propósito inicial era para uso militar por el ejército de los Estados Unidos. En su desarrollo fueron decisivas las ideas de John von Neumann, mientras que la implementación práctica fue dirigida por el ingeniero John Presper Eckert y el físico John Mauchly. Su puesta en marcha en 1945 simultáneamente con la creación de un grupo de meteorología en Princeton dirigido por Jule Charney fue decisivo para generar la primera predicción numérica operativa del tiempo basada en un modelo barotrópico para la ecuación de la vorticidad, siguiendo las ideas del propio Rossby, para simular solamente las ondas de gran escala y poder simplificar y hacer resoluble el problema de cálculo de acuerdo a la capacidad del ENIAC. El mismo Charney junto con von Neumann y con Ragnar Fjörtoft firmaron en 1950 el artículo que describe la primera predicción numérica operativa del tiempo (Smagorinsky 1983).

Los pioneros de la informática von Neumann y Mauchly estaban ambos interesados en la predicción numérica del tiempo, pero querían abordar el problema desde direcciones diametralmente opuestas. Mauchly, aunque era físico, tenía una formación sólida como ingeniero y quería analizar grandes volúmenes de datos meteorológicos para poder así revelar las posibles relaciones entre los ciclos meteorológicos y los ciclos de las manchas solares, y posteriormente utilizar esas relaciones para predecir el tiempo. Por el contrario, von Neumann, que tenía una gran formación teórica en matemáticas y física, retomó la línea de trabajo de Bjerknes, Richardson y Rossby planteando la hipótesis de que el tiempo podría predecirse aplicando las leyes de la física a la atmósfera, subdividiendo ésta en una rejilla de puntos y resolviendo las ecuaciones correspondientes en



Representación artística del concepto de fábrica de predicciones planteado por Richardson.  
(Fuente: Francois Schuiten).

# Predicción numérica del tiempo: ¿basada en leyes o en datos?



Uso de técnicas de ML para realizar predicciones del tiempo. (Fuente: Elaboración sobre imagen MTG-I1 EUMETSAT)

cada punto. En cualquier caso, ambos enfoques requerían una inmensa cantidad de cálculos que superaba la capacidad humana y de ahí la necesidad de realizar los cálculos con un ordenador electrónico. Mauchly y von Neumann ejemplifican los dos enfoques opuestos y complementarios del progreso científico, en general, y de la predicción numérica del tiempo en particular: el enfoque basado en datos y el enfoque basado en hipótesis. El enfoque de la ciencia basado en datos, también denominado inductivismo, es una rama del empirismo, que basa la adquisición del conocimiento a partir de la experiencia. El enfoque basado en hipótesis, también denominado deductivismo, es una rama del racionalismo que basa la adquisición del conocimiento a partir del razonamiento (Saravanan 2022).

Finalmente, la línea deductivista basada en las leyes físicas descritas en forma de ecuaciones diferenciales defendida inicialmente por von Neumann se impuso y durante los últimos 70 años de desarrollo de la predicción numérica del tiempo hemos asistido a grandes hitos que han permitido mejorar la calidad y precisión de las predicciones. El aumento en la resolución de los modelos que ha avanzado en paralelo con el desarrollo de ordenadores cada vez más potentes, la asimila-

ción de más y mejores observaciones con algoritmos cada vez más sofisticados, el desarrollo de parametrizaciones físicas cada vez más detalladas y complejas, la introducción de la predicción por conjuntos para describir el comportamiento caótico de la atmósfera, entre otros hitos científicos y tecnológicos, han permitido alcanzar un nivel de desarrollo en la predicción numérica del tiempo que ha llegado a ser calificada como una revolución silenciosa (*quiet revolution*, en inglés) en el área de las ciencias físicas comparable a otras revoluciones científicas recientes como la simulación del cerebro humano o la evolución inicial del universo (Bauer *et al.* 2015).

## 2 Sistemas de predicción basados en técnicas de aprendizaje automático

En los años más recientes estamos asistiendo a una eclosión de la inteligencia artificial generativa, en forma de modelos de lenguaje e imagen. Este surgimiento de técnicas basadas en inteligencia artificial (IA) y el subconjunto de la misma basado en aprendizaje automático (ML por *machine learning*, en inglés) ha sido impulsado por: i) un aumento sin precedentes en el volumen de datos (cientos de terabytes de datos que probablemente se producirán

en un solo día con las predicciones meteorológicas a escala kilométrica) de los que se hace cada vez más difícil extraer toda la información relevante utilizando métodos convencionales; ii) un aumento del conocimiento en IA y ML; iii) desarrollos en hardware informático para permitir el entrenamiento de herramientas de aprendizaje automático con miles de millones de parámetros entrenables a partir de muchos terabytes de datos; iv) disponibilidad y facilidad de uso de software de código abierto. No obstante, el uso de algunos algoritmos de ML y modelos estadísticos está bien establecido en la comunidad de PNT, por ejemplo, mediante el uso de análisis de componentes principales o el uso de técnicas de asimilación de datos que también pueden interpretarse como ML. Sin embargo, en lo que respecta al uso de técnicas complejas de aprendizaje automático, como las redes neuronales profundas, la ciencia del sistema terrestre todavía está rezagada respecto de otras disciplinas de investigación. El mismo Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés) publicó en 2021 en su hoja de ruta en este campo para la próxima década una lista de aplicaciones basadas en ML que están siendo implementadas, exploradas y planificadas en las diferentes partes de la cadena operativa de su sistema de predicción. Se puede mencionar entre otras muchas otras aplicaciones de las técnicas de ML: uso de redes neuronales para monitorizar observaciones, uso de redes neuronales para la asimilación de datos SMOS de humedad del suelo en la superficie terrestre, el uso de redes neuronales para las ligaduras débiles en el marco de la asimilación 4D-Var, emulación del esquema de parametrización para el arrastre de ondas de gravedad, emuladores para generar código del modelo tangente lineal y adjunto en la asimilación de datos 4D-Var, árboles de decisión para el posprocesamiento de predicciones por conjuntos de precipitación, etc. (Dueben *et al.* 2021).

La situación ha cambiado rápidamente en los dos últimos años cuando grandes empresas tecnológicas como NVIDIA, Huawei y Google DeepMind avanzaron en la calidad de las predicciones meteorológicas con sus respectivos modelos FourCastNet, Pangu-Weather y GraphCast basados exclusivamente en ML hasta acercarse a la pericia del modelo IFS del ECMWF. El mismo ECMWF ha desarrolla-



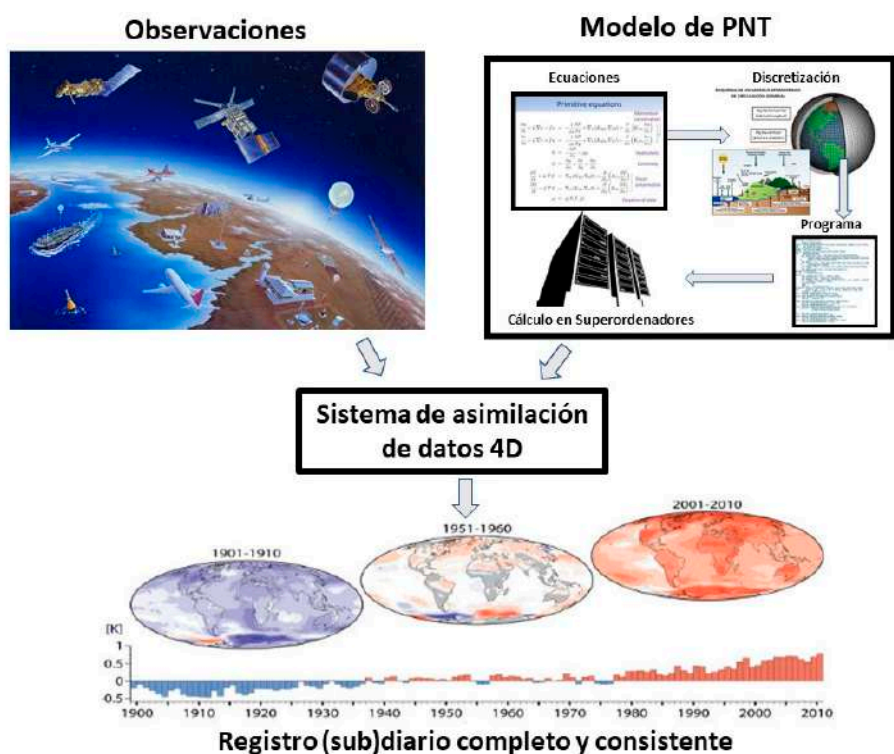
do su propio modelo íntegramente basado en ML (denominado Artificial Intelligence/Integrated Forecasting System (AIFS)) con código abierto para comparar con los arriba mencionados y explorar vías alternativas de trabajo. Ha trascendido mucho en los medios de comunicación que estos modelos basados en ML requieren para generar su predicción de sólo un minuto en una única unidad de procesamiento gráfica (GPU, del inglés) y que por lo tanto consumen una ínfima cantidad de energía en comparación con el modelo IFS. Sin embargo, la lectura no es tan simple ya que todos estos modelos basados exclusivamente en ML actualmente dependen en gran medida del IFS ya que utilizan datos del reanálisis ERA5 (generados con el IFS) para su entrenamiento, validación y establecimiento de condiciones iniciales. La calidad de las predicciones se ha medido fundamentalmente utilizando el error cuadrático medio, siendo los modelos ML en su fase de entrenamiento diseñados para minimizar precisamente este mismo índice. La evaluación de la calidad de las predicciones es una tarea mucho más compleja que la simple comparación de un único índice de verificación, normalmente hay que considerar una batería de índices que miden diferentes aspectos de

la predicción, también hay que considerar si se suavizan o no las predicciones de los eventos extremos (que es donde las predicciones tienen más valor), y sobre todo hay que verificar si las predicciones muestran o no una imagen físicamente consistente de todas las variables. El diseño de la fase de entrenamiento es esencial en las predicciones basadas exclusivamente en ML para optimizar uno u otro aspecto de las predicciones (Chantry *et al.* 2023).

### 3 El reanálisis como herramienta para estudiar el clima

Como hemos visto el reanálisis es un elemento esencial para entrenar, evaluar e inicializar las predicciones exclusivamente basadas en ML. La idea de generar reanálisis se remonta a 1988, cuando Bengtsson y Shukla se plantearon recalcular la serie de análisis generados para producir condiciones iniciales en los sistemas operativos de predicción numérica del tiempo. Esta serie de análisis cumplía la necesidad diaria de generar condiciones iniciales pero al mismo tiempo adolecían de varias limitaciones. En primer lugar, los primeros sistemas de asimilación de datos tenían fuertes limitaciones para asimilar ciertos

tipos de observaciones no convencionales y no eran tan potentes como los sistemas posteriores de asimilación variacional 4D. En segundo lugar, los cambios en los modelos de predicción introducidos con el tiempo generaban además inconsistencias en la serie temporal de análisis. Un reanálisis es en definitiva una reconstrucción retrospectiva de condiciones meteorológicas pasadas utilizando un único sistema avanzado de asimilación 4D y un único modelo numérico. Un reanálisis asimila todas las observaciones disponibles con un código único tanto para asimilación como para predicción. El objetivo principal de un reanálisis es proporcionar conjuntos coherentes y consistentes de análisis a lo largo de un período de tiempo específico que pueda ser utilizado para fines climáticos. A pesar de estar disponibles los reanálisis, su uso para realizar estudios climáticos, en particular, de cambio climático se demoró. De hecho, aunque los primeros reanálisis comenzaron a estar disponibles en las décadas de 1980 y 1990, la comunidad científica tardó todavía algún tiempo en aprovechar completamente estos conjuntos de datos para estudios de cambio climático a largo plazo. Debido a la necesidad de datos consistentes y de larga duración para evaluar las tendencias climáticas, los conjuntos de datos de reanálisis se convirtieron en herramientas valiosas ya que permiten examinar las variabilidades y tendencias de una amplia gama de variables climáticas consistentes entre sí a lo largo de décadas, proporcionando una base sólida para investigar el cambio climático, para validar modelos climáticos, para realizar estudios de impacto y, desde la irrupción de los sistemas de predicción basados en ML, para entrenar estos sistemas. Los reanálisis, sin embargo, han estado sujetos a ciertas críticas debido a las discrepancias que hay entre los diferentes reanálisis –si bien estas diferencias permiten caracterizar la incertidumbre–, su insuficiente resolución espacial para ciertas aplicaciones, sus sesgos y su dependencia de los modelos, etc. Estas características de los reanálisis pueden hacer que éstos no sean adecuados para ciertas aplicaciones climáticas.

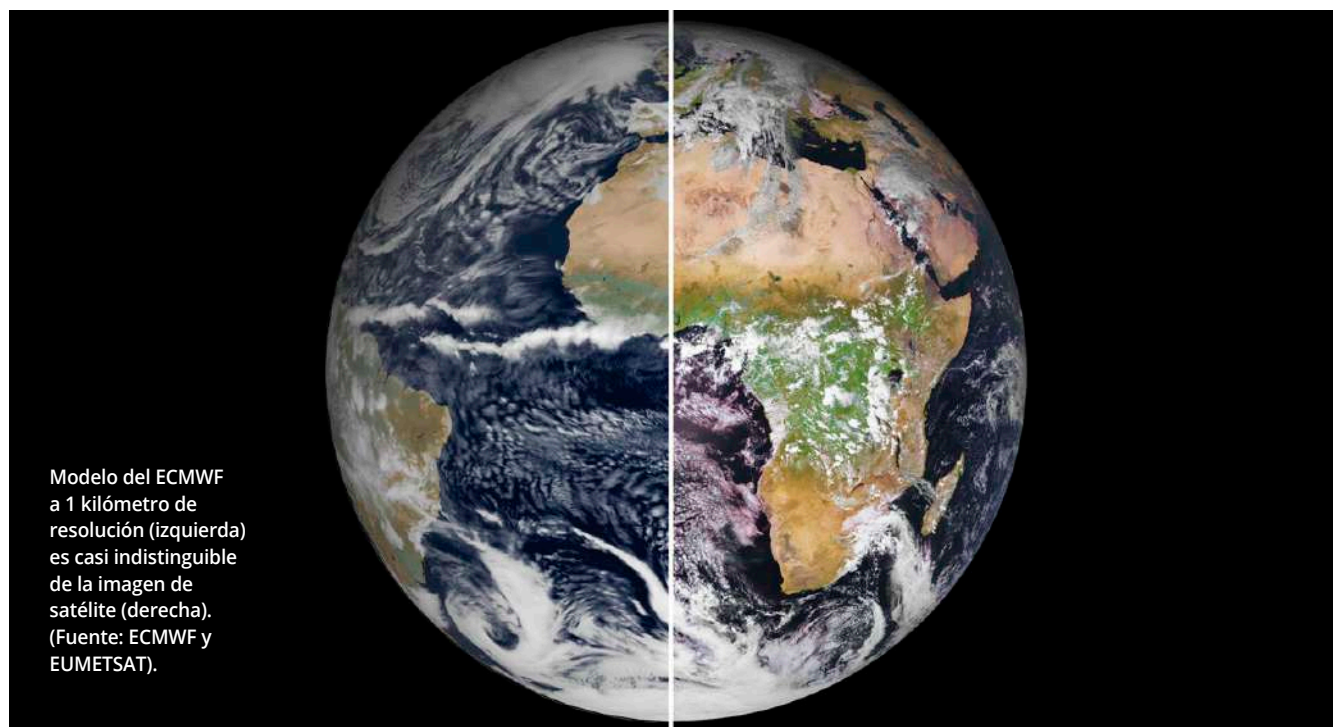


El reanálisis combina observaciones pasadas de la atmósfera con un modelo de PNT en un sistema de asimilación de datos para proporcionar un registro completo y consistente de condiciones meteorológicas. (Fuentes: OMM, Copernicus).

### 4 Gemelos digitales del sistema Tierra

Un gemelo digital es un sistema informático que imita la estructura, el contexto y el comportamiento de un sistema (o

## Predicción numérica del tiempo: ¿basada en leyes o en datos?



sistema de sistemas) real bien sea natural, diseñado (normalmente de ingeniería) o social, que se actualiza dinámicamente con datos de su gemelo físico, y que tiene una capacidad predictiva para informar decisiones que generan valor. La interacción bidireccional entre lo virtual y lo físico es el elemento fundamental de los gemelos digitales. Los gemelos digitales son inmensamente prometedores para acelerar los descubrimientos científicos y revolucionar las industrias. Pueden llegar a ser una herramienta fundamental para la toma de decisiones basada en una combinación sinérgica de modelos y datos. Los usos de gemelos digitales son diversos y proliferan, con aplicaciones en múltiples áreas de la ciencia, la tecnología y la sociedad, y su potencial tiene un alcance muy amplio (NAP 2023).

Sin embargo, el término “gemelo digital” referido al sistema Tierra puede llegar a ser engañoso ya que nunca será posible duplicar la complejidad del sistema Tierra en su multiplicidad de escalas, procesos y retroalimentaciones. Y aquí quizás vendría a cuento una mención al cuento de Jorge Luis Borges titulado “Del rigor en la ciencia” en el que abordó el tema de la exactitud y la representación. En este cuento, Borges presenta la idea de un imperio en el que el arte de la cartografía se ha llevado a tal extremo que el mapa del imperio es del mismo tamaño que el imperio mismo. Esta situación

lleva a problemas prácticos y filosóficos, ya que el mapa, siendo tan detallado y exacto, se convierte en un objeto inútil y problemático. Esta historia se ha interpretado de muchas maneras a lo largo del tiempo, pero una de las lecturas más comunes es la crítica a la idea de que cualquier representación, por más detallada y precisa que sea, siempre será una simplificación o una interpretación de la realidad, y nunca podrá capturar completamente la complejidad y la totalidad de lo que pretende representar. Es decir, aplicado al caso de los gemelos digitales siempre habrá una gran distancia y diferencia entre el gemelo digital, necesariamente más simple, y el sistema Tierra de una complejidad difícilmente alcanzable. En cualquier caso, se puede decir que lo que distingue un gemelo digital de una simulación es quizás la utilización de métodos y enfoques más eficientes, heredando el concepto de gemelo digital todos los esfuerzos en modelización que se han venido realizando durante décadas. Aunque el concepto de gemelo digital se va a utilizar principalmente para realizar predicciones del tiempo y escenarios hipotéticos de proyecciones climáticas, su uso cada vez más extendido posiblemente será para experimentar y aprender más sobre la física del sistema climático en general.

Las predicciones de muy alta resolución –también llamadas hiperlocales–

se van a beneficiar no sólo de modelos desarrollados a las resoluciones kilométricas y mayores, sino también de la incorporación de nuevos tipos de datos capaces de capturar los intrincados detalles de las condiciones atmosféricas locales, características superficiales e interacciones humanas. Además de datos de satélite y radar de alta resolución que pueden proporcionar información detallada sobre patrones de nubes, intensidad de precipitación, contenido de humedad atmosférica y otros fenómenos y procesos locales, se pueden incorporar datos de sensores y redes asociados al internet de las cosas (IoT, de su acrónimo en inglés), incluyendo sensores de IoT integrados en áreas urbanas influenciados por islas de calor urbanas, infraestructuras, usos del suelo y actividades humanas, extracción de datos meteorológicos a partir de datos generados para otros fines (p.ej., atenuación de las señales de comunicación por microondas entre torres de telefonía móvil pueden proporcionar una imagen precisa y detallada de la distribución espacial y la cantidad de precipitación), imágenes hiperespectrales, etc.

Con la irrupción de técnicas basadas en ML, lo que realmente se plantea no es si un gemelo digital se basará en ecuaciones o en datos sino cómo será la combinación adecuada de teoría física, integración numérica y/o aproximaciones ML. Además, hay que considerar que el número de



grados de libertad que no están resueltos en el sistema Tierra excede con creces el número de grados de libertad disponibles en los datos. Por lo tanto, se necesita información previa adicional (por ejemplo, ecuaciones que rigen la física y las leyes de conservación, conocimientos específicos del dominio) para poder reducir las demandas de datos (Willard *et al.* 2020; Kashinath *et al.* 2021).

Sin embargo, lo realmente relevante de un gemelo digital es la explicabilidad (es decir, comprender los pasos desde la entrada hasta la salida) del mismo. La explicabilidad influye en la confianza en las predicciones, y el hecho de que estas herramientas puedan usarse de manera más amplia y cómo hacerlo, que permitan realizar ajustes y optimizaciones y que se promueva el aprendizaje de nueva ciencia (NAP 2023).

## 5 Conclusiones y perspectivas

Parece que nos encontramos en una encrucijada o punto de bifurcación en la evolución de los modelos de predicción numérica del tiempo y por extensión de los modelos climáticos, si bien estos últimos poseen unas características que hacen que los enfoques basados en datos contemplen otras soluciones distintas a las que se aplican en la predicción del tiempo. Se ha comprobado que los modelos predictivos basados en ML pueden

reducir drásticamente el coste computacional de una predicción una vez que el modelo ha sido convenientemente entrenado y evaluado. Este menor coste computacional de las predicciones deja la puerta abierta a la construcción de *ensembles* con muchos más miembros de los que actualmente se calculan permitiendo realizar una exploración más exhaustiva de las posibles evoluciones atmosféricas y su incertidumbre. No es descabellado pensar que se podría pasar de *ensembles* basados en decenas de miembros a *ensembles* basados en centenas o incluso millares de miembros. Además de cara a la distribución de las predicciones, y a la vista de los resultados obtenidos con técnicas de ML, se podría contemplar distribuir directamente unas condiciones iniciales generadas con sofisticados métodos de asimilación de datos a la vez que un modelo de predicción basado en ML de forma que el usuario calculase rápidamente sus propias predicciones para reducir sustancialmente el flujo de datos (Chancry *et al.* 2023).

Parece claro que la modelización convencional basada en las ecuaciones físicas que se ha venido desarrollando en los últimos 70 años va a experimentar grandes transformaciones en los próximos tiempos incorporando de distintas formas los avances experimentados por las técnicas basadas en ML. Los modelos basados en ecuaciones físicas han

sido el ingrediente clave para generar tanto condiciones iniciales para las predicciones numéricas operativas como para los reanálisis. Un tipo de modelos híbridos que se beneficien de las ventajas de ambos enfoques con modelos basados en ecuaciones físicas para verificar, entrenar y mejorar el sistema y modelos basados en datos para optimizar el cálculo de las predicciones e incrementar los recursos de la predicción por conjuntos podría conducirnos a un nuevo paradigma en la predicción numérica del tiempo que integrase lo mejor de ambos enfoques que ahora desde algunas instancias se presentan como contrapuestos.

Los principales centros operativos de predicción numérica del tiempo tienen un acceso inigualable a los datos del sistema Tierra y la experiencia en el desarrollo de modelos basados en leyes físicas. Los datos son el ingrediente esencial de cualquier modelo basado en ML por lo que se plantea ahora es el equilibrio óptimo entre modelización física y modelización ML para seguir mejorando los pronósticos. Además, ciertos enfoques y líneas de desarrollo, como por ejemplo la predicción unificada (*seamless*, en inglés) a lo largo de las diferentes escalas temporales, tendrán que ser repensados y reformulados cuando se integren los modelos basados en ecuaciones físicas y en datos en forma de modelos híbridos.

## Referencias

- Bauer, P., Thorpe, A., Brunet, G., 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525(7567), 47-55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>
- Bengtsson, L., and Shukla, J., 1988. Integration of Space and In Situ Observations to Study Global Climate Change. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 69, 1130-1143, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1988\)069<1130:IOSA IS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1988)069<1130:IOSA IS>2.0.CO;2)
- Bjerknes, V., 1904. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteorologische Zeitschrift* 21 No.1 pp. 1-7.
- Borges, J.L., 1946. Del rigor de la ciencia. Cuentos completos, Editorial Debolsillo, 2023, 560 páginas, ISBN-10: 8499891624, ISBN-13: 978-8499891620
- Chantry, M., Ben Bouallegue, Z., Magnusson, L., Maier-Gerber, M., Dramsch, J., 2023. The rise of machine learning in weather forecasting. *ECMWF Science Blog*, <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2023/rise-machine-learning-weather-forecasting>

<https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2023/rise-machine-learning-weather-forecasting>

- Charney, J.G., Fjörtoft, R. and Neumann, J.V., 1950. Numerical integration of the Barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2(4), 237-254. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1950.tb00336.x>
- Düben, P., Modigliani, U., Geer, A., Siemen, S., Pappenberger, F., Bauer, P., Brown, A., Palkovic, M., Raoult, B., Wedi, N., Baousis, V., 2021. Machine learning at ECMWF: A roadmap for the next 10 years. *ECMWF Technical memorandum No. 878*, <https://doi.org/10.21957/ge7ckgm>
- Kashinath, K., Mustafa, M., Albert, A., Wu, J.L., Jiang, C., Esmailzadeh, S. *et al.*, 2021. Physics-informed machine learning: case studies for weather and climate modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2194), 20200093, <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0093>
- NAP, 2023. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26894>

*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26894>

- Richardson, L.F., 1922. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge Univ. Press. Second Edition 2007, ISBN: 978-0-521-68044-8.
- Saravanan, R., 2022. *The Climate Demon: Past, Present and Future of Climate Prediction*. Cambridge University Press. ISBN-10: 1009018043; ISBN-13: 978-1009018043; 398 páginas.
- Smagorinsky, J., 1983: The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modeling: Early recollections. *Advances in Geophysics*, 25, 3-37, [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60170-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60170-3)
- Willard, J., Jia, X., Xu, S., Steinbach, M., and Kumar, V., 2020. Integrating physics-based modeling with machine learning: a survey. *arXiv:2003.04919*. <https://doi.org/10.1145/1122445.1122456>

# Tormentas del día 6 de julio de 2023 en la comarca del Bajo Aragón (Teruel)

ISMAEL SANAMBROSIO BEIRÁN, ARCADIO BLASCO LOUREIRO Y MARÍA JOSÉ MARTÍN GARCÍA, AEMET ARAGÓN

Durante el día 6 de julio de 2023 la situación sinóptica descrita fue favorable al desarrollo de fenómenos convectivos en zonas del N y del NE de la península ibérica. Entre las 11:30 y las 15:30 UTC (13:30 y 17:30 horas locales) una estructura convectiva de carácter supercelular afectó a una serie de comarcas de Aragón. Se trata de una estructura convectiva con intensos parámetros radar, con un alto grado de organización y con una alta probabilidad de provocar en superficie fenómenos adversos o muy adversos, como pueden ser: intensidad de precipitación fuerte o muy fuerte (entre 15 y 60 mm/h), rachas de viento muy fuertes (entre 71 y 120 km/h) incluso huracanadas (más de 120 km/h) asociadas a las intensas corrientes descendentes de aire que se desarrollan en su interior, tornados, así como granizo e incluso granizo severo (de más de 2 cm de diámetro).

## Análisis general de la situación meteorológica

### NIVELES MEDIOS Y ALTOS:

A las 12 UTC del día 06/07/23 se puede apreciar una circulación del SO sobre la península ibérica, con un máximo de viento de unos 85 kt situado prácticamente en la diagonal de la misma. Al O se sitúa una zona de bajos geopotenciales en el seno de una masa fría de origen polar con una estructura compleja, que abarca gran parte de Europa occidental hasta Islandia, bajando por el Atlántico Norte hasta Madeira y enlazando por el O peninsular. Se pueden apreciar varias vaguadas, destacando por su proximidad y por su repercusión aquella cuyo centro (núcleo frío a  $-15^{\circ}\text{C}$ ) se encuentra en el extremo noroccidental de Galicia. Más hacia el S, al noroeste de Madeira, hay otro vórtice que se desplaza hacia el NE, y que alcanzará la Península en las próximas horas. Corriente abajo del chorro se sitúa una extensa dorsal sobre el Mediterráneo y norte de África que lleva asociada una masa más cálida y húmeda de origen subtropical, afectando también a las islas Canarias, inmersas en un flujo del SO con una banda seca que atraviesa la mitad occidental del archipiélago.

### NIVELES BAJOS:

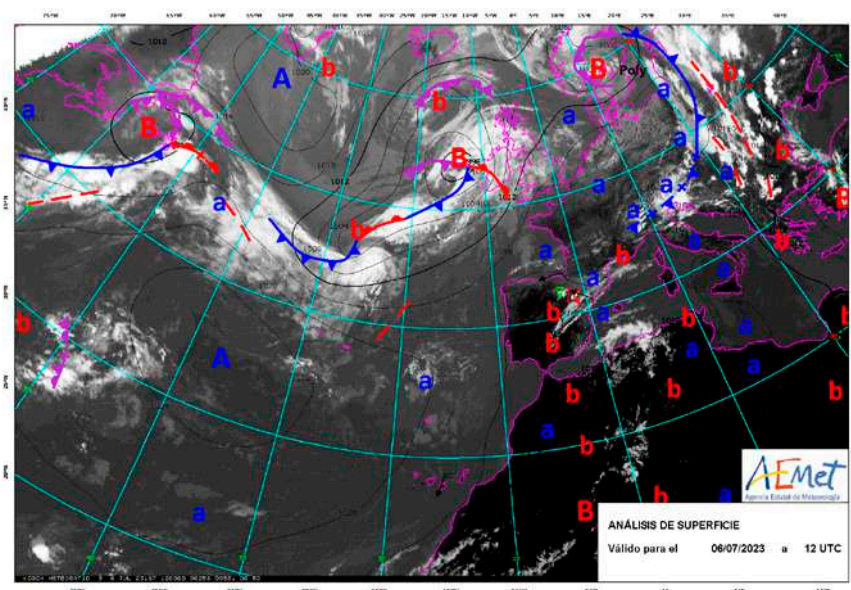
En superficie a las 12 UTC, figura 1, se encuentra el anticiclón de las Azores centrado al SO de dicho archipiélago, adentrándose en forma de cuña en la Península desde el noroeste por el Cantábrico hacia Pirineos. Con el calentamiento diurno se habían desarrollado bajas presiones relativas en el interior y sur peninsular. Esta configuración genera una zona de convergencias en

el cuadrante NE, donde confluye un flujo seco y cálido del O y SO con otro del E y SE que remonta el valle del Ebro desde el Mediterráneo, aportando humedad. En latitudes más altas, un conjunto de borrascas se desplazan desde el O por el Atlántico norte, desviándose hacia el NE debido a la presencia de una amplia zona de altas presiones que se extiende por Centroeuropa y el Mediterráneo.

## Condiciones meteorológicas en la zona de estudio

En las horas centrales del día 06/07/23 se desarrolla un marcado calentamiento diurno y, como consecuencia de ello, una baja térmica que abarca gran parte de la Penín-

sula. Esta configuración genera la entrada de un flujo mediterráneo y convergencias en fronteras orográficas del cuadrante NE, principalmente en el sistema Ibérico, donde se inician las tormentas que, posteriormente, se desplazan hacia zonas del valle del Ebro, guiadas por el flujo del SO en niveles medios. En la figura 2 se muestra el mapa de viento en superficie según el modelo HARMONIE-AROME V43 en la pasada de las 12 UTC del día 06/07/23. Se resaltan con un color más intenso las zonas de convergencias más marcadas entre los citados flujos: uno seco y cálido del SO y NO y otro del SE, cálido y con un aporte de humedad importante. El incremento en la humedad debido a la entrada del flujo mediterráneo queda patente en la figura 3, donde se muestra el análisis de las 12



© AEMET. Autorizado el uso de la información y su reproducción citando a AEMET como autora de la misma.

Figura 1. Análisis de superficie junto con la imagen HRVIS del satélite MSG para las 12 UTC del día 6 de julio de 2023.



HARMONIE-AROME v43 06-07-2023 12Z Previsto para el Jue. 6 a las 12Z

Viento en superficie

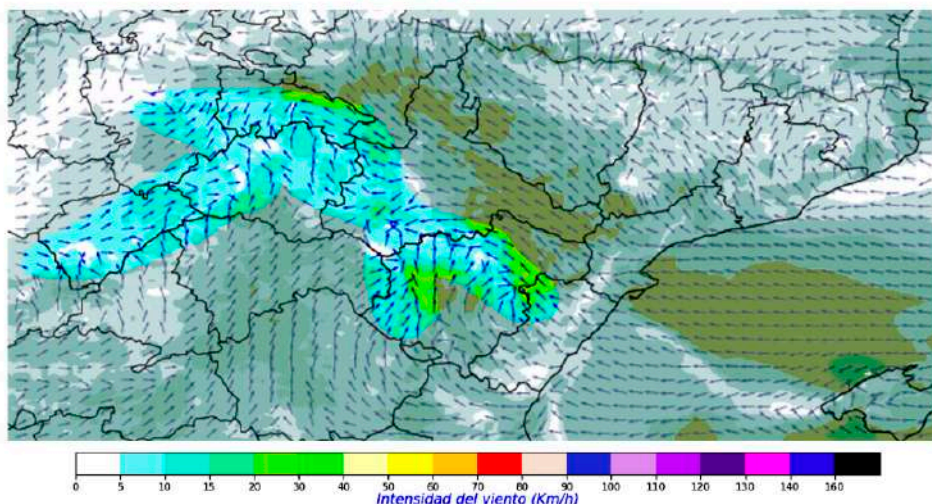


Figura 2. Viento en superficie del análisis de las 12 UTC del HARMONIE-AROME V43 del día 06/07/2023 con realce cromático de las zonas de convergencia.

UTC del HARMONIE-AROME V43, respectivamente, de la humedad relativa a 2 m (izq.) y agua precipitable total (dcha.). En los mapas de humedad a 2 m es donde mejor se aprecia el diferente carácter de las dos masas de aire. También se observa cómo el límite entre las dos masas y la distribución del contenido de agua precipitable viene determinado principalmente por los obstáculos orográficos que rigen la entrada del flujo mediterráneo.

Pasamos ahora a analizar algunos parámetros convectivos.

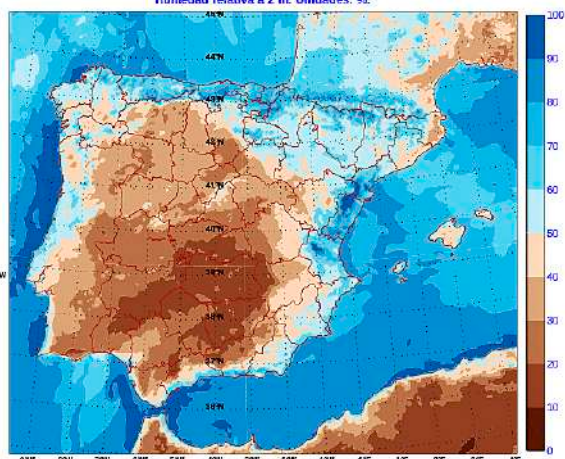
El MUCAPE indica la cantidad de energía potencial disponible cuando una burbuja de aire asciende libremente a partir del NCL (nivel de convección libre, nivel a partir del cual la burbuja está más caliente que el entorno) cuando se calcula para la burbuja más inestable. En la figura 4 se muestra el MUCAPE a las 12, según la pasada de las 12 UTC de ese día del

modelo HARMONIE-AROME V43.

Se puede apreciar como a las 12 UTC la inestabilidad es muy elevada en la provincia de Zaragoza y noreste de Teruel, con un MUCAPE por encima de 1500 J/kg. Seis horas más tarde, la inestabilidad disminuye en el entorno del valle del Ebro y en zonas del N de Aragón debido al enfriamiento en superficie provocado por la precipitación. Sin embargo, la provincia de Teruel sigue manteniendo unos valores de MUCAPE muy elevados, salvo en el extremo occidental, lo que favorece que continúe la actividad convectiva.

La cizalladura vertical del viento favorece la organización de las tormentas, ya que puede modular el ascenso generado por la expansión de una bolsa de aire frío (como el de un frente de racha), influir en la capacidad de una corriente ascendente para desarrollar rotación o en la forma-

HARM (0.025°) 20230706 a 12 UTC. H+000. Validez: Jueves, 6 de Julio de 2023, a 12 UTC. Humedad relativa a 2 m. Unidades: %.



HARM (0.025°) 20230706 a 12 UTC. H+000. Validez: Jueves, 6 de Julio de 2023, a 12 UTC. Agua precipitable total (desde la superficie hasta el nivel de 300 hPa). Unidades: mm.

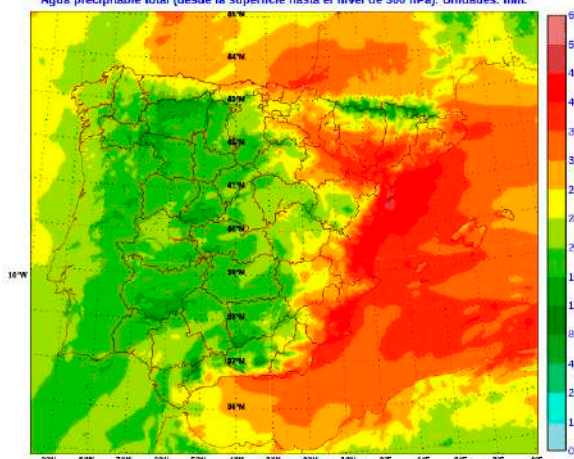


Figura 3. Análisis de las 12 UTC del HARMONIE-AROME V43 del día 06/07/2023 donde se representa la humedad relativa a 2m (izq.) y el agua precipitable total (dcha.).

HARM (0.025°) 20230706 a 12 UTC. H+000. Validez: Jueves, 6 de Julio de 2023, a 12 UTC.

MUCAPE bajo el nivel de 350 hPa (sombreado). Unidades: J/kg.

Altura de la burbuja más inestable (rayado en verde, sobre 1500 m; en naranja, sobre 3000 m).

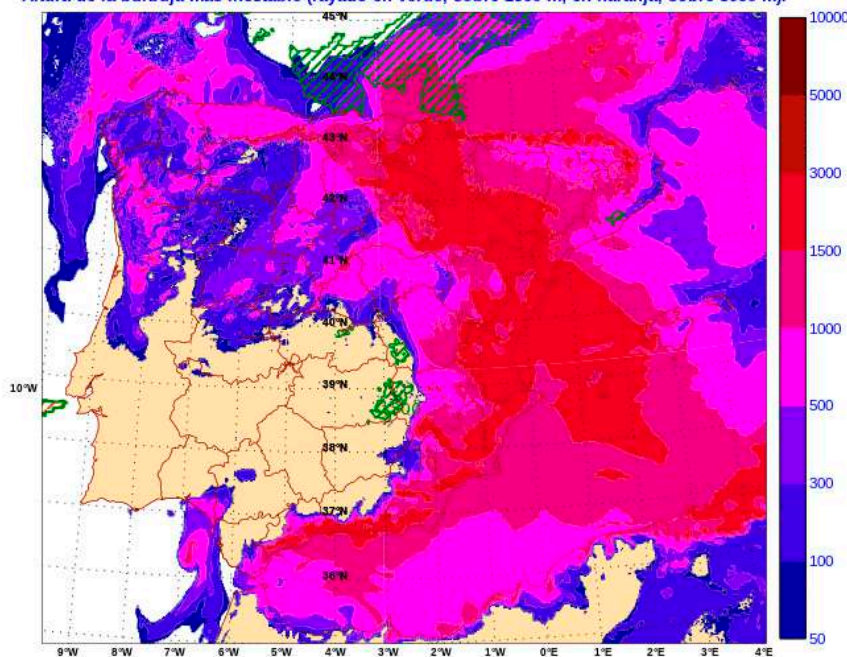


Figura 4. Análisis de las 12 UTC del HARMONIE-AROME V43 del día 06/07/2023 con el MUCAPE.



## Tormentas del día 6 de julio de 2023 en la comarca del Bajo Aragón (Teruel)

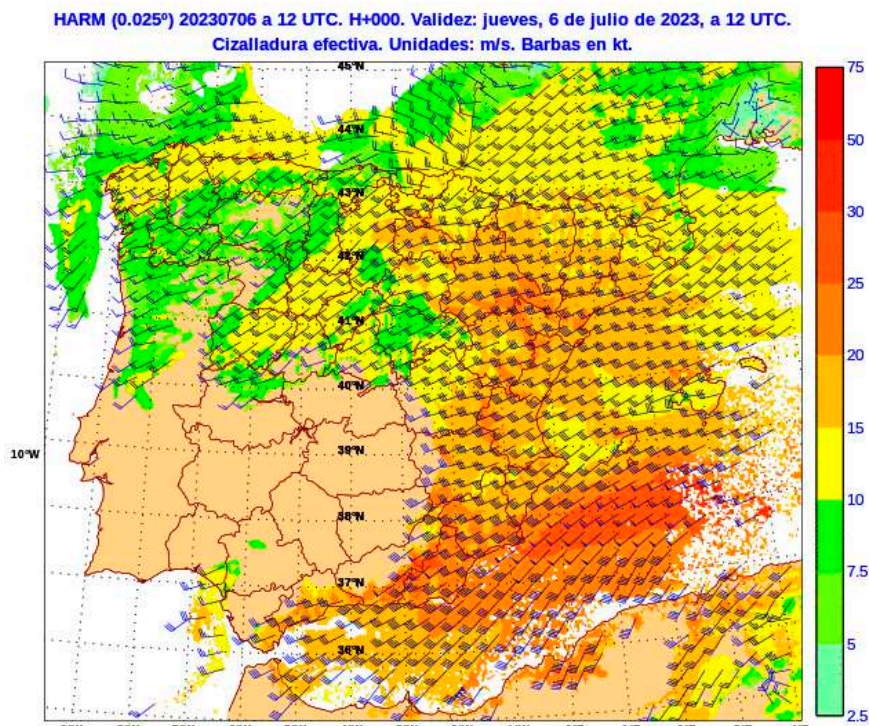


Figura 5. Análisis de las 12 UTC del HARMONIE-AROME V43 del día 06/07/2023 donde se representa la CIZE.

ción y evolución de sistemas convectivos de mesoescala. Los ingredientes idóneos para la formación de supercélulas son un ambiente muy inestable y una elevada cizalladura en los primeros 6 kilómetros de la atmósfera. En la figura 5 se muestra la cizalladura efectiva vertical unidireccio-

nal del viento (CIZE) calculada en la capa inestable, del análisis de las 12 UTC del HARMONIE-AROME V43. Los valores son muy elevados: a las 12 UTC se encuentran entre los 15 y 20 m/s en la provincia de Zaragoza y en casi toda la provincia de Teruel, aunque hay una zona que coincide

con la frontera entre las dos provincias en la que este valor supera los 20 m/s.

Resumiendo lo expuesto hasta ahora, si se tienen en cuenta los valores de CAPE, cizalladura y otros parámetros convectivos que no se presentan en el informe, en las zonas de la Ribera del Ebro y Bajo Aragón, estamos ante un entorno meteorológico favorable a la formación de estructuras convectivas altamente organizadas que podrían ser de tipo supercélular.

Para describir y caracterizar con mayor detalle las estructuras convectivas que afectaron a la zona de estudio se van a analizar los datos del radar de Zaragoza. Lo primero que se puede destacar es la presencia en el SO de la provincia de Zaragoza de un proceso de *storm splitting* (proceso de división de células convectivas), que se aprecia en la imagen combinada de máximos de reflectividad (figura 6), donde se pueden ver las dos estructuras convectivas que se acaban de separar, ambas con un gran desarrollo vertical y altos valores de reflectividad, mayores en la célula situada más al S que se mueve hacia la derecha, en dirección O-E. En esta imagen se ha resaltado con círculos de color blanco, el marcado grado de organización de ambas células, con altas reflectividades hasta niveles altos y una estructura claramente inclinada en la vertical.

Las estructuras convectivas descritas después de su rápido desarrollo, se mantienen muy activas y con parámetros radar que ponen de manifiesto su alto grado de intensidad. En concreto la célula situada al S mantiene su desplazamiento hacia el E, afectando a las áreas próximas a los límites entre la Comarca Central de Zaragoza, Campo de Cariñena, Campo de Belchite, para adentrarse posteriormente en las comarcas turolenses del Bajo Martín y Bajo Aragón, manteniendo en todo momento valores muy intensos de reflectividad y gran desarrollo vertical que alcanza más de 14 o 16 km. Más adelante, en la imagen de reflectividad de rango corto de las 14:36 UTC (figura 7) se aprecian los intensos valores de reflectividad y el marcado patrón en "V-notch" de esta supercélula que se desplaza ya por la comarca del Bajo Martín en la provincia de Teruel. En la imagen de Ecotop, figura 8, se puede ver que mantiene su gran desarrollo vertical que alcanza más de 14 o 16 km. En la imagen de VIL y en la imagen combinada de máximos de reflectividad (figuras 9 y 10) se pueden ver cómo esta estructura con-

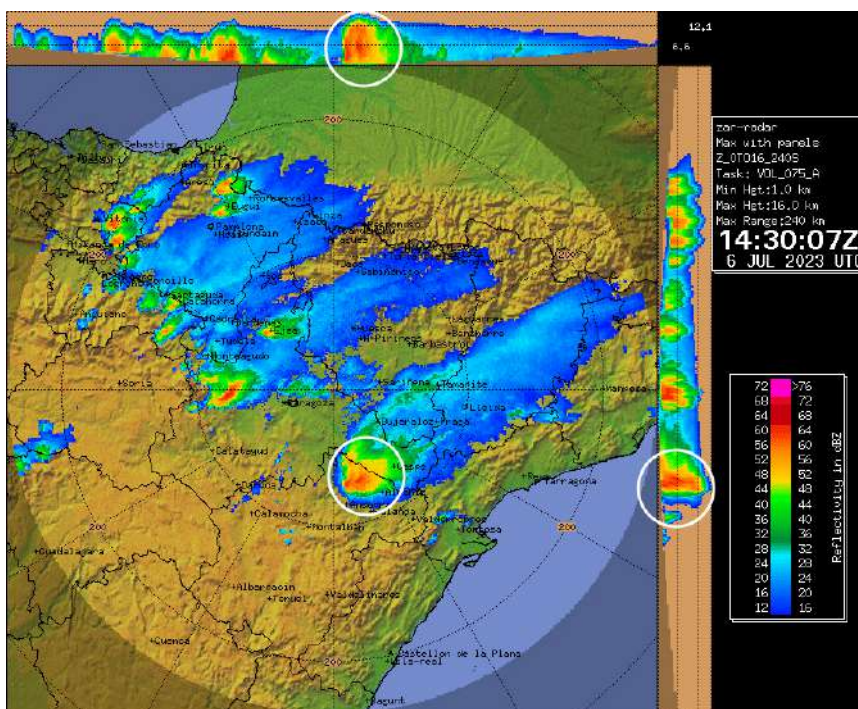


Figura 6. Imagen combinada de Máximos de Reflectividad en paneles, del radar de Zaragoza del día 6 de julio de 2023 a las 12:40 UTC. Se resalta con círculos blancos el desarrollo convectivo en proceso de *storm splitting*.



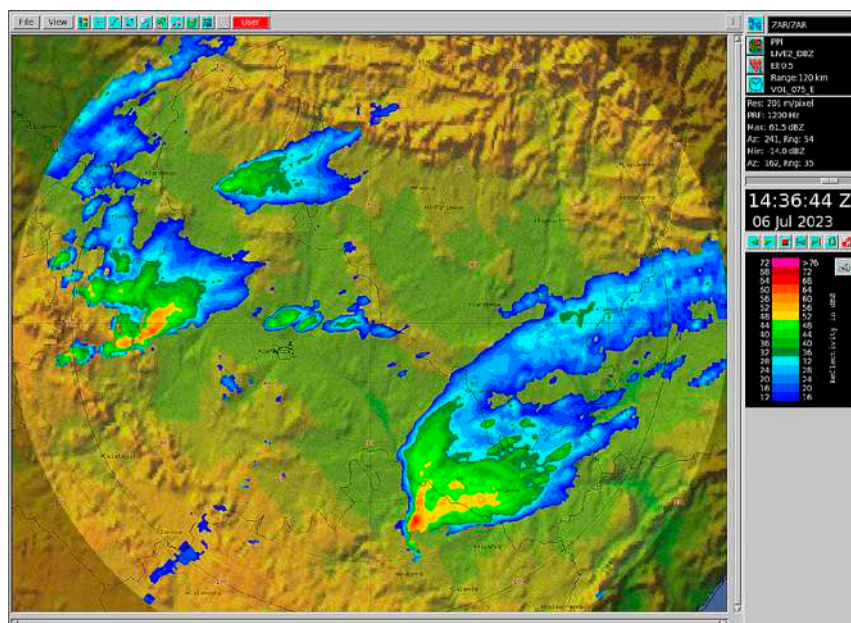


Figura 7. Imagen de reflectividad de rango corto del radar de Zaragoza correspondiente al día 6 de julio de 2023 a las 14:36 UTC (imagen cortesía de David Momblona).

vectiva mantiene este marcado desarrollo vertical con un alto grado de organización, resaltando la gran extensión horizontal con más de 32 l/m<sup>2</sup> de valores de VIL. Se puede ver también un corte vertical de esta célula (figura 11) en el que se pueden apreciar claros patrones, como la Región de Eco Débil Acotado (REDA) o la Zona Abalconada (ZB) que son característicos de estructuras supercelulares.

En la tabla 1 se muestran los valores de rachas máximas de viento registrados en las Estaciones Meteorológicas Automáticas de AEMET en Andorra (Teruel) y en sus proximidades. En todas ellas las racha máxima de viento (RACHA en km/h) son muy fuertes (valores por encima de 70 km/h) o están próximas a este valor. En el caso de Andorra, la racha que figura en esta tabla se produjo a las 18:50 UTC, ocasionada por otra estructura convectiva, aunque al paso de la supercélula estudiada, en el intervalo de tiempo entre las 16:00 y las 17:00 locales (14:00 y 15:00 UTC) se registró también una racha de viento, algo inferior a esta, que alcanzó los 62.0 km/h.

## Conclusiones

Durante el día 6 de julio de 2023 la situación sinóptica descrita era favorable al desarrollo de fenómenos convectivos en zonas del N y del NE de la península ibérica, en especial durante las primeras horas de la tarde se instala en grandes áreas del NE peninsular una región de gran inestabilidad. La configuración específica de estos valores máximos de inestabilidad, de un importante flujo del S o del SE en áreas del Valle del Ebro con marcadas zonas de convergencia en las zonas de mayor orografía y una marcada cizalladura vertical del viento tuvo como consecuencia que durante las primeras horas de la tarde se desarrollase convección de mucha intensidad y con un alto grado de organización desplazándose de O a E a lo largo de esta zona.

Por medio de las imágenes del radar de Zaragoza se comprueba que entre las 11:30 y las 15:30 UTC (13:30 y 17:30 horas locales) una estructura convectiva de carácter supercelular, altamente organizada

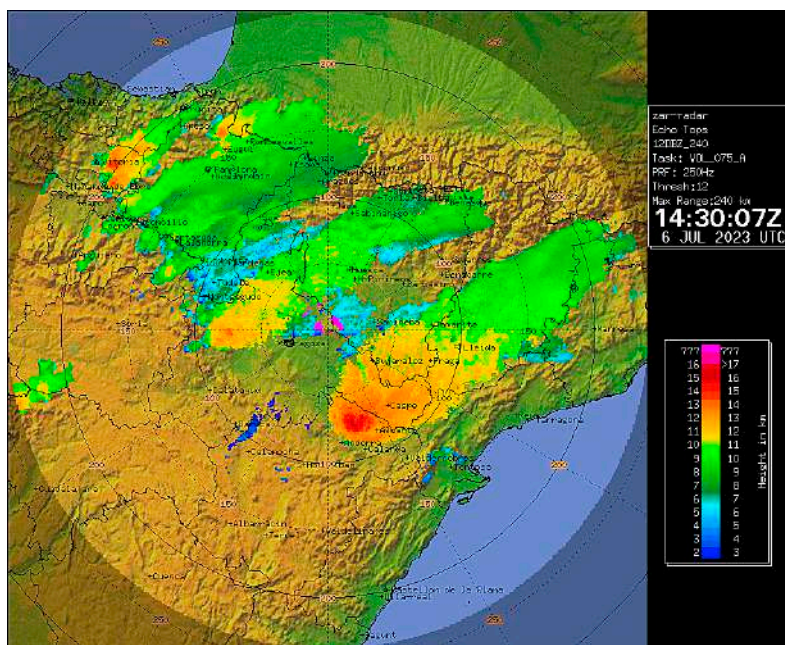


Figura 8. Imagen de Ecotop del radar de Zaragoza correspondiente al día 6 de julio de 2023 a las 14:30 UTC.

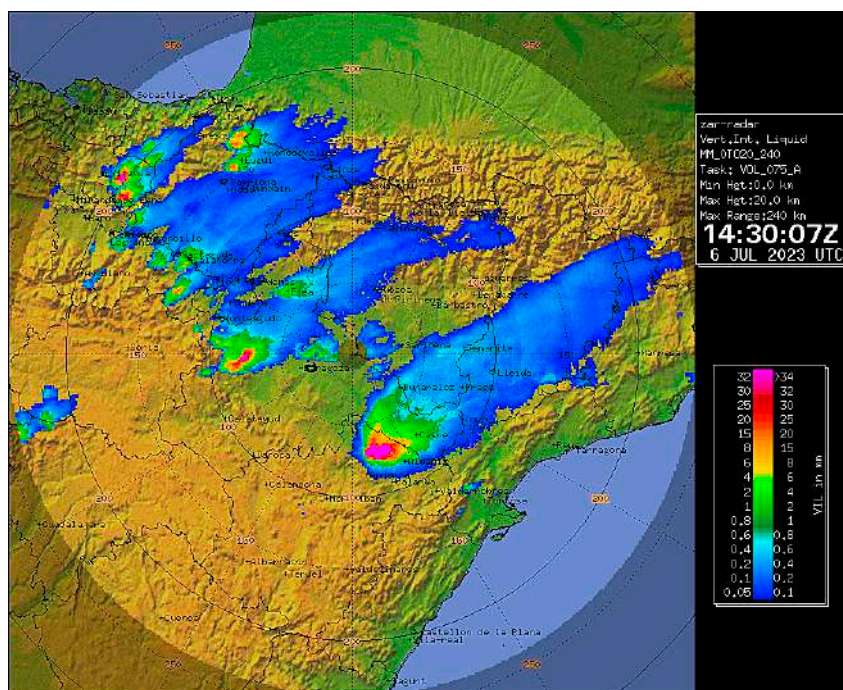
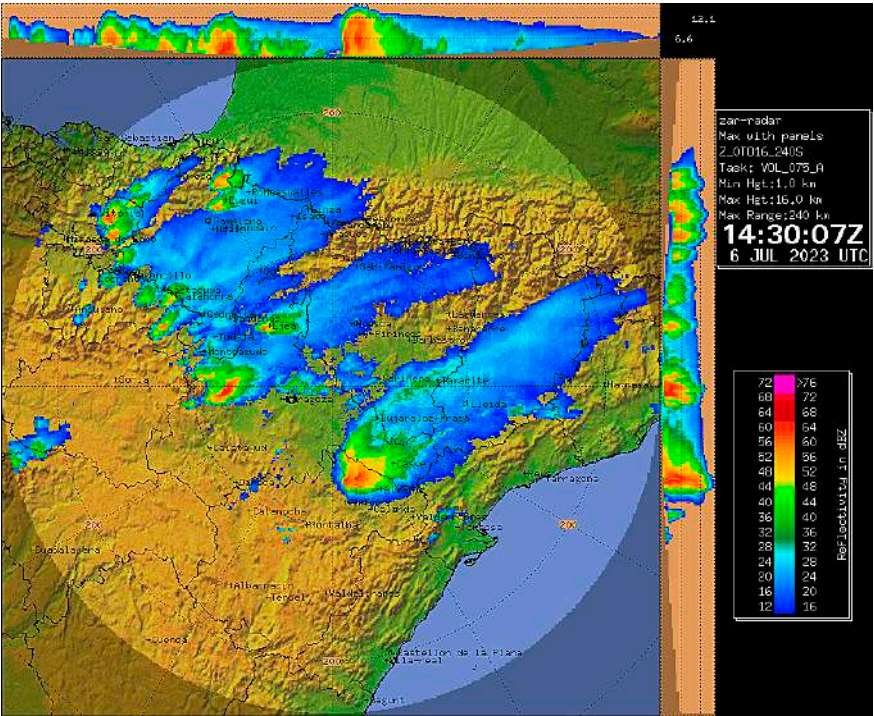


Figura 9. Imagen de VIL (Vertically Integrated Liquid) del radar de Zaragoza correspondiente al día 6 de julio de 2023 a las 14:30 UTC.



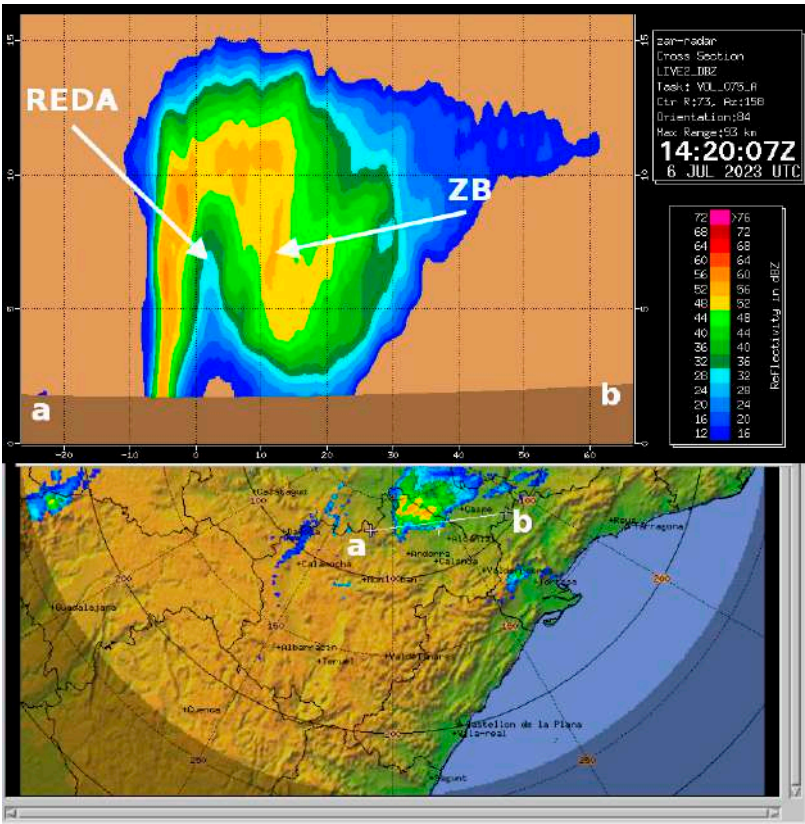
# Tormentas del día 6 de julio de 2023 en la comarca del Bajo Aragón (Teruel)



y que provenía de un proceso de *storm splitting* (proceso de división de células convectivas) afectó a las siguientes comarcas de Aragón: Comunidad de Calatayud, Valdejalón, Campo de Cariñena, Comarca Central de Zaragoza, Campo de Belchite, Bajo Martín, Bajo Aragón, Bajo Aragón-Caspe y Matarraña. Se trata de una estructura convectiva con intensos parámetros radar y con un alto grado de organización lo que supone una alta probabilidad de provocar en superficie fenómenos adversos o muy adversos, como pueden ser intensidad de precipitación fuerte o muy fuerte (entre 15 y 60 mm/h), rachas de viento muy fuertes (entre 71 y 120 km/h) incluso huracanadas (más de 120 km/h) asociadas a las intensas corrientes descendentes de aire que se desarrollan en su interior, tornados, así como granizo e incluso granizo severo (de más de 2 cm de diámetro).

Por otro lado, la mayor parte de los datos registrados en las Estaciones Meteorológicas Automáticas (las EMA) de AEMET en el entorno del Bajo Aragón de la provincia de Teruel, ver la tabla 1, entran dentro de la categoría de vientos muy fuertes. El hecho de que en la EMA de Andorra no se hayan registrado rachas de viento especialmente intensas hay que valorarlo teniendo en cuenta que es un hecho contrastado que en situaciones de convección de cierta intensidad, se producen grandes diferencias en la intensidad de los fenómenos en superficie en distancias muy cortas. Por este motivo no se puede descartar que en determinados puntos del área afectada por la célula convectiva analizada se pudiesen haber producido vientos y precipitaciones más fuertes que los que se han registrado en las EMA, así como granizo severo, e incluso algún tornado.

En base a estas últimas consideraciones, a los datos registrados y a las imágenes de radar relativas a la tormenta de carácter supercelular que afectó a la zona estudiada, se puede concluir que se dispone de numerosas evidencias compatibles y consistentes con los datos aportados como para afirmar que en diferentes puntos situados en el entorno de la comarca del Bajo Aragón (Teruel), entre las 16:00 y las 17:00, hora local, de la tarde del día 6 de julio de 2023 se pudieron producir rachas de viento muy fuertes que pudieron ser superiores a 90 km/h, y puntualmente superiores a 120 km/h, así como otros fenómenos severos como granizo de diámetro superior a 2 cm e incluso algún tornado.



NOMBRE	INDICATIVO	RACHA	HRACHA
ALCAÑIZ (TERUEL)	9573X	95.0	15:10
HIJAR (TERUEL)	9546B	71.6	14:40
ANDORRA (TERUEL)	9550C	66.6	18:50
CALANDA (TERUEL)	9569A	70.9	15:00

Tabla1: Valores de rachas máximas de viento (km/h) registrados en las EMA de AEMET situadas en las proximidades de Andorra (Teruel) el día 6 de julio de 2023.



# NOTICIAS

SECCIÓN COORDINADA POR MANUEL PALOMARES CALDERÓN

## Relevo en la cúpula de AEMET

Fuentes: Boletín Oficial del Estado y *Tiempo y Clima*

**El Consejo de Ministros del 27 de diciembre pasado ha nombrado a María José Rallo del Olmo presidenta de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), puesto en el que sustituye a Miguel Ángel López González que lo ejercía desde agosto de 2013**

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid y licenciada en Economía por la UNED, tiene además un máster en Análisis y Gestión de Políticas Públicas por la Universidad Carlos III y ha cursado el Programa de Liderazgo para la Gestión Pública del IESE.

Pertenece al Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del Estado, habiendo desempeñado toda su carrera profesional en el actual Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Desempeñó el cargo de Secretaria General de Transportes y Movilidad. Previamente había ocupado, entre otros, los puestos de Jefa del Gabinete Técnico de la Secretaria General de Transporte, Subdirectora General de Estudios y Proyectos de la Dirección General de Carreteras y vocal asesora del Gabinete del Secretario de Estado de Infraestructuras y Planificación.

Desde la Asociación Meteorológica Española queremos agradecer a Miguel Ángel López González su colaboración en diferentes ocasiones y expresarle nuestros mejores deseos para el futuro. En cuanto a la nueva presidenta, es obvio que tendrá que lidiar con carencias y problemas crecientes para que la AEMET pueda cumplir debidamente con sus funciones, entre otros la reducción constante del personal que se inició ya bastantes años antes del mandato de Miguel Ángel López sin una disminución paralela en las responsabilidades y tareas a cubrir y mantener. Queremos desear a María José Rallo todo el éxito posible y para ello puede contar con la cooperación de la AME.

### La dirección de AEMET, memoria histórica

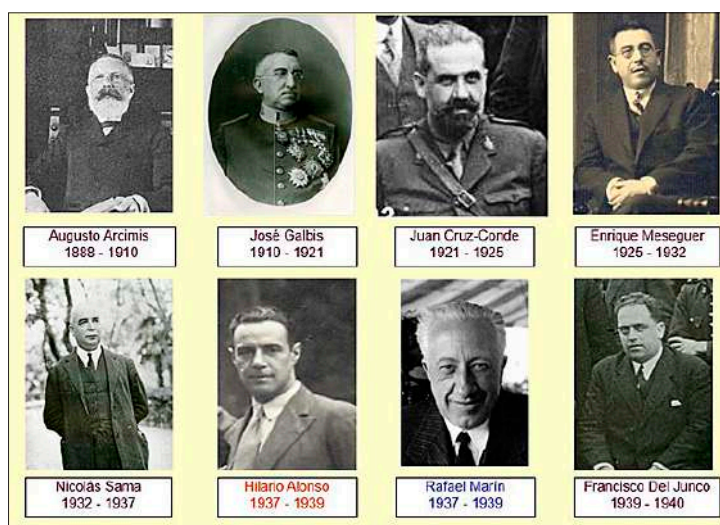
María José Rallo es la vigésimo sexta persona que ocupa el puesto desde que en 1887 se creó el organismo con el nombre de Instituto Central Meteorológico. Aunque sujeto a numerosos cambios de dependencia ministerial y de denominación, la trazabilidad de su personal y máximos responsables, de sus instalaciones y de su misión y actividades confirman que en estos 136 años siempre ha sido la misma institución. El edificio del Parque de El Retiro de Madrid donde el primer director, Augusto Arcimis, se instaló en 1888 con escasísimo personal, pertenece todavía a la Agencia y está siendo actualmente objeto de una ambiciosa rehabilitación.

Los máximos responsables de AEMET han dirigido la institución bajo las denominaciones de "director", "jefe", "director general" y, desde 2008, "presidente". El mandato más largo fue el de Luis de Azcárraga, casi treinta años, seguido por Augusto Arcimis, 23 años, José Galbis, 12 años, Manuel Bautista, 11 años, y por el ahora saliente, Miguel Ángel López, con más de diez años. El más corto fue el de Arturo Pardo en 1975, de apenas siete meses y ha habido varios mandatos inferiores a dos años. Dos mujeres han ocupado anteriormente a María José Rallo la cúspide de la Agencia: María Jesús Prieto Laffargue en 1995 - 1996 y Milagros Couchoud en 2001 - 2004.

A excepción de Arcimis que accedió al puesto por oposición libre en 1888, los directores o presidentes han sido siempre nombrados



**María José Rallo del Olmo**  
(Foto Revista de Obras Públicas)



**Los ocho primeros directores del Servicio Meteorológico oficial en España. Siempre hubo un solo Servicio excepto en 1937 - 39 cuando cada bando de la Guerra Civil tuvo el suyo, con su respectivo director.**



**Seis directores / presidentes de AEMET reunidos en 2013. De izq. a dcha., Ricardo García Herrera, Francisco Cadarso, Milagros Couchoud, Manuel Bautista, Eduardo Coca y Miguel Ángel López. (foto Librería Desnivel)**

por designación gubernamental. Solamente en cinco ocasiones se nombró a un funcionario de la Agencia y en unas pocas ocasiones a personas con cierta relación o dedicación previa a la meteorología, experiencia que la mayoría de los 26 nombrados no poseían cuando fueron designados.

## Entra en vigor el nuevo acuerdo de EUMETNET

Proporciona la base para la cooperación entre los SMHN europeos durante los próximos 10 años

Fuente: EUMETNET y *Tiempo y Clima*

En 1995, los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos nacionales (SMHN) de Europa occidental decidieron crear un mecanismo para organizar el trabajo conjunto en algunos programas beneficiosos para todos en lugar de que cada uno los abordara por su cuenta. Después de un acuerdo informal a finales de 1995, la entonces llamada “Conferencia de EUMETNET”, los directores de los Servicios decidieron crear una entidad legal y hacer la transición a esa nueva estructura. Tras muchas discusiones hubo que esperar hasta el año 2009 para el establecimiento de un consorcio bajo la figura legal en la legislación belga de una agrupación de interés económico (*GIE – Groupement d'Intérêt Economique*), cuyo Acuerdo se firmó en Bruselas el 17 de septiembre de 2009 por los 21 miembros fundadores, entre ellos AEMET. Después se han producido otras adhesiones y actualmente EUMETNET tiene 33

miembros que son los SMHN de otros tantos países europeos.

En los primeros años de EUMETNET se fueron afianzando varias condiciones de contorno para la forma concreta de colaboración en EUMETNET y para diseñar los programas. Las principales de ellas son las siguientes

- Cada programa se gestiona por uno de los miembros o por un pequeño consorcio de miembros en nombre de los demás.

- Los programas pueden ser obligatorios, donde todos los miembros participan y financian el programa a razón del Producto Interior Bruto de sus países respectivos o bien opcionales donde solo participan los miembros que lo desean.

Actualmente los programas obligatorios son:

- ✓ Coordinación de la observación.
- ✓ E-ABO, equipos de observación atmos-

férica a bordo de aeronaves comerciales.

- ✓ E-ASAP, sondeos desde embarcaciones en el Atlántico y el Mediterráneo.

- ✓ Programa de Coordinación de los programas de predicción.

- ✓ EUMETRep, representación e influencia ante la Unión Europea.

- ✓ EUMETFreq, protección de las radiofrecuencias usadas en meteorología.

- ✓ Secretaría de EUMETNET, una pequeña oficina en Bruselas para la coordinación de los programas y en general de EUMETNET, donde trabajan cinco personas

Entre los programas opcionales la participación de los miembros varía. El de más éxito es Meteolarm una “ventanilla única” para el acceso a avisos meteorológicos en el que participan todos los miembros de EUMETNET aunque el programa sigue teniendo carácter voluntario.

El presupuesto de EUMETNET en 2023

## La Organización Meteorológica Mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords

Fuente: Noticias de la OMM, 12 de enero de 2024 y *Tiempo y Clima*.

Por su interés incluimos una vez más en *Tiempo y Clima* un extracto amplio de esta noticia, que se ha convertido en un clásico cada año y que difundió la Organización Meteorológica Mundial el pasado 12 de enero:

La temperatura media anual del planeta se quedó a las puertas de superar en 1.5 grados Celsius (°C) los niveles preindustriales, una cifra relevante, porque el Acuerdo de París sobre el cambio climático pretende limitar el aumento de la temperatura a largo plazo (promediado a lo largo de decenios y no de un año concreto como 2023) a no más de 1.5 °C por encima de los valores de la era preindustrial.

La OMM ha tomado los valores recogidos por seis importantes conjuntos de datos internacionales utilizados para vigilar las temperaturas mundiales y, tras consolidarlos, ha confirmado que en 2023 la temperatura media anual del planeta estuvo  $1.45 \pm 0.12$  °C por encima de los niveles preindustriales (1850-1900). Las temperaturas mundiales registradas en cada uno de los meses entre junio y diciembre marcaron nuevos récords mensuales, y julio y agosto fueron los dos meses más calurosos de los que se tiene constancia.

“El cambio climático es el mayor reto al que se enfrenta la humanidad. Nadie escapa a sus consecuencias, y afecta especialmente a los más vulnerables”, afirmó la profesora Celeste Saulo, Secretaria General de la OMM. “No podemos permitirnos esperar más. Aunque ya se están tomando medidas, tenemos que hacer más y tenemos que hacerlo rápidamente. Debemos reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero y acelerar

la transición hacia fuentes de energía renovables”, declaró.

“Es evidente que el paso de un episodio de La Niña —y su efecto de enfriamiento— a un episodio de El Niño —y su efecto de calentamiento— que se produjo a mediados de 2023 ha influido en el aumento de la temperatura del año pasado. Los efectos de El Niño en las temperaturas mundiales suelen ser más intensos después de que el episodio haya alcanzado su apogeo, por lo que 2024 podría ser aún más caluroso”, explicó.

“Aunque El Niño es un fenómeno de origen natural que se produce cíclicamente, el cambio climático a más largo plazo se está intensificando y ello se debe inequívocamente a la actividad humana. La crisis climática agrava la crisis de desigualdades. Afecta a todos los aspectos del desarrollo sostenible y socava los esfuerzos para hacer frente a la pobreza, el hambre, los problemas de salud, los desplazamientos de población y la degradación del medioambiente”, dijo la profesora Saulo (Argentina), nueva Secretaria General de la OMM desde el 1 de enero de 2024.

Desde los años ochenta, cada nuevo decenio ha sido más caluroso que el anterior. Los últimos nueve años han sido los más cálidos de los que se tiene constancia. Hasta la fecha, 2016 (marcado por un intenso episodio de El Niño) y 2020 eran los años más cálidos jamás registrados, al superar los niveles de la era preindustrial en  $1.29 \pm 0.12$  °C y  $1.27 \pm 0.12$  °C, respectivamente.

Tomando los valores de los seis conjuntos de datos, se ha determinado que la media decenal del período 2014-2023 estuvo  $1.20 \pm$



fue de 7 419 873 €, de los cuales 558 015 € fueron aportados por AEMET desde España.

EUMETNET desarrolla otras actividades complementarias aparte de sus programas. Tiene un acuerdo con el programa Copernicus de la Unión Europea a través de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). También participa activamente en RODEO, un proyecto de colaboración en el que participan once SMHN y el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (ECMWF), cuyo objetivo principal es desarrollar una interfaz de usuario e interfaces de programación de aplicaciones (API) para acceder a conjuntos de datos meteorológicos designados como conjuntos de datos de alto valor (HVD).

Aparte de lo citado, EUMETNET no se inmiscuye en las tareas que ya realizan el ECMWF o EUMETSAT, el organismo de los satélites meteorológicos europeos.

El Acuerdo de EUMETNET que estaba previsto para diez años se renovó en 2019, pero como las agrupaciones de interés económico van a desaparecer de la legislación belga se ha hecho necesario utilizar otra estructura legal. La modificación del Acuerdo

EUMETNET implica que EUMETNET deja de ser una agrupación de interés económico para convertirse en una sociedad colectiva (SNC – *Société en Nom Collectif*), también bajo legislación belga. La enmienda al Acuerdo se firmó en la reunión de la Asamblea de EUMETNET que tuvo lugar el pasado diciembre en la sede del ECMWF en Reading, Reino Unido y ha entrado en vigor el 1 de enero de 2024.

Este cambio de estatus legal se ha hecho coincidir con la renovación técnica que cada cinco o seis años se realiza en los programas de EUMETNET, actualizando su contenido y alcance, renovando los miembros que gestionan cada programa en nombre de los demás, aprobando nuevos programas y cancelando otros, acordando los techos de gasto etc., etc.

Los programas de mayor coste que se gestionan y financian conjuntamente a través de EUMETNET son los dedicados a observación como *E-ABO*, y *E-ASAP*, antes mencionados, y *E-SURFMAR*, observaciones marinas desde barcos de observación voluntaria y boyas fijas o a la deriva. Son también los más costosos. Otros programas se

dedican a coordinar y desarrollar la red de redes europeos y a otros tipos de observaciones. El programa de coordinación de la observación realiza tareas comunes como los estudios sobre sensibilización de la predicción a las observaciones con el objeto de optimizar el llamado Sistema Compuesto de Observación Europeo (EUCOS).

Podría deducirse que la función principal de EUMETNET es mantener una estructura adecuada de observación en Europa y así es en buena parte. Hay que tener en cuenta que la coordinación es más efectiva y cercana que si los programas fueran dirigidos desde la Organización Meteorológica Mundial que de todas formas no tiene la capacidad de ocuparse directamente de ellos y debe delegarlos en los países miembros, pero sin la autoridad para imponer su ejecución de la que si goza EUMETNET.

Sin embargo, existen programas que han alcanzado gran éxito en áreas diferentes a la observación como por ejemplo Meteocalarm. Quizá en futuros números de *Tiempo y Clima* podamos detallar más profundamente para nuestros lectores la información sobre ese y otros programas de EUMETNET.

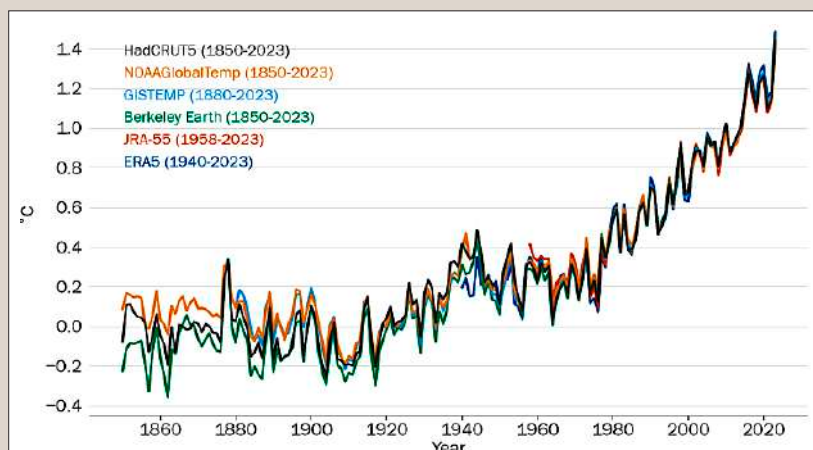
0.12 °C por encima del promedio del período comprendido entre 1850 y 1900, teniendo en cuenta un margen de incertidumbre.

## Diferencias en temperatura media global comparadas con la media de 1850 - 1900

“La actividad humana está abrasando la Tierra. En el año 2023 vimos un mero anticipo del futuro catastrófico que nos espera si no actuamos ahora. Debemos responder al aumento sin precedentes de la temperatura con medidas innovadoras”, ha afirmado el Secretario General de las Naciones Unidas, António Guterres. “Todavía podemos evitar las peores consecuencias de la catástrofe climática. Pero solo si actuamos de inmediato con la ambición necesaria para limitar el aumento de la temperatura mundial a 1.5 °C y lograr la justicia climática”, declaró en un comunicado.

La vigilancia a largo plazo de las temperaturas mundiales es solo uno de los indicadores del clima y de su evolución. Existen otros indicadores clave, como las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, el contenido calorífico de los océanos y la acidificación de sus aguas, el nivel del mar, la extensión del hielo marino y el balance de masas de los glaciares.

En la versión provisional del informe de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2023, publicada el 30 de noviembre, se constata que se han batido récords en todos los ámbitos. Las temperaturas de la superficie del mar fueron excepcionalmente altas durante gran parte del año, y se produjeron perniciosas olas de calor marinas de intensidad severa. En la Antártida, la extensión



Diferencia de la temperatura media anual mundial con la media del período 1850-1900

del hielo marino fue la más baja jamás registrada, tanto para el mínimo de finales de verano (en febrero), como para el máximo de finales de invierno (en septiembre).

Estos cambios a largo plazo en nuestro clima se manifiestan a diario en las condiciones meteorológicas. En 2023, el calor extremo afectó a la salud de las personas y contribuyó a alimentar devastadores incendios forestales. Lluvias intensas, crecidas, inundaciones y ciclones tropicales que se intensificaron rápidamente dejaron un rastro de destrucción y muerte, además de cuantiosas pérdidas económicas.

La OMM publicará en marzo de 2024 la versión definitiva de su informe sobre el estado del clima mundial en 2023. En ella se facilitará información pormenorizada sobre las repercusiones socioeconómicas en la seguridad alimentaria, los desplazamientos de población y la salud.

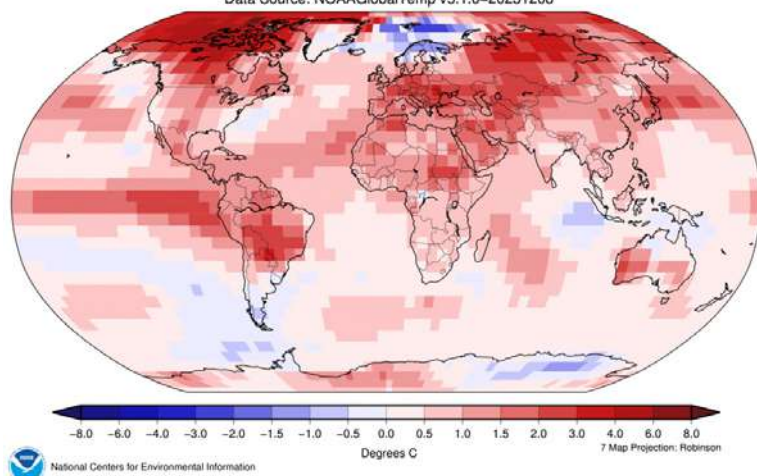
## Descripción del otoño boreal a escala global

### TEMPERATURA

La temperatura global de la superficie entre septiembre y noviembre de 2023 fue 1.41°C superior a la media del siglo XX que fue de 14.0 °C. Se trata del periodo septiembre-noviembre más cálido de los 174 años de registros, y un salto sustancial de +0.39 °C por encima del récord anterior de 2015. Los últimos diez periodos septiembre-noviembre han sido los diez más cálidos de los que se tiene constancia. La desviación de la temperatura global en superficie de septiembre-noviembre de 2023 con respecto a la media también marca la mayor anomalía de temperatura estacional positiva registrada.

Se han registrado importantes anomalías positivas en la gran mayoría de países de todo el mundo destacando Canadá, Rusia, Brasil, países del golfo Pérsico, oeste de Australia y amplias extensiones de Europa oriental. Por el contrario, se han registrado anomalías negativas en la península escandinava y sur de Argentina y Chile. Hay que tener en cuenta que los diferentes países reportan anomalías de temperatura con respecto a diferentes periodos de referencia.

Land & Ocean Temperature Departure  
from Average Sep 2023–Nov 2023  
(with respect to a 1991–2020 base period)  
Data Source: NOAA GlobalTemp v5.1.0–20231208

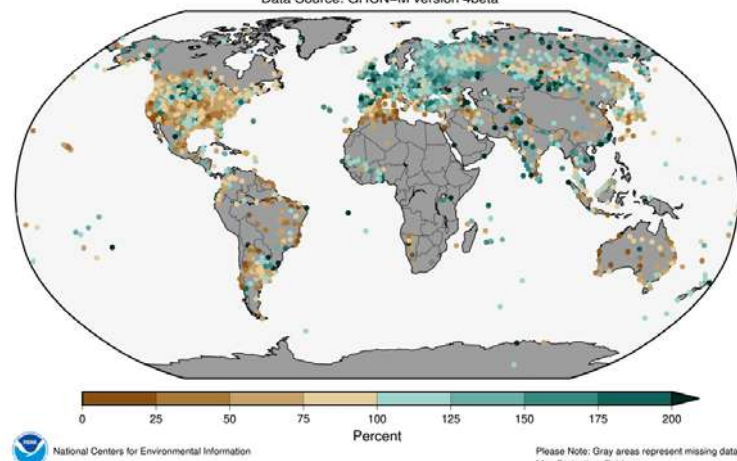


Anomalías de temperatura (°C) del trimestre septiembre - noviembre  
de 2023 respecto de la normal de 1991-2020.  
Fuente: NCEI/NOAA.

### PRECIPITACIÓN

Como es habitual, las anomalías de precipitación durante el trimestre variaron significativamente de unos lugares a otros, resultando difícil una vez más distinguir patrones claros en la distribución de la precipitación a escala regional.

Land-Only Percent of Normal Precipitation Sep 2023–Nov 2023  
(with respect to a 1961–1990 base period)  
Data Source: GHCN-M version 4beta



Tanto por ciento de la precipitación del trimestre septiembre -  
noviembre 2023 respecto de la normal de 1961-90.  
Fuente: NCEI/NOAA.

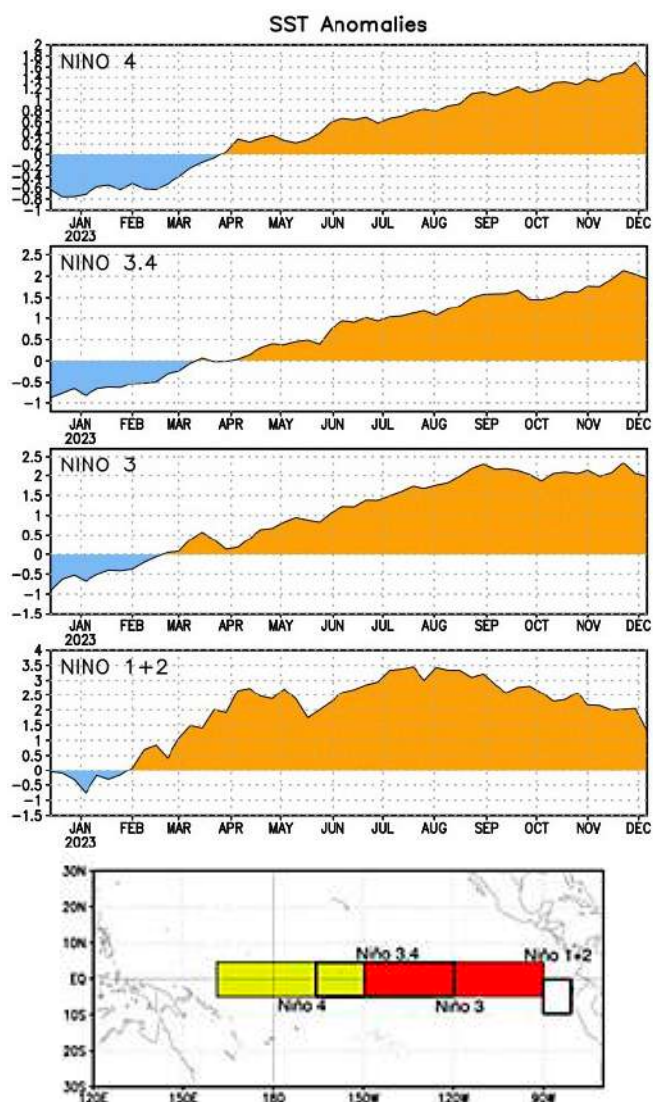
Precipitaciones estacionales superiores al promedio se registraron (entre otros lugares desigualmente repartidos) en el trimestre septiembre-noviembre en amplias extensiones del continente europeo, India y Mongolia. Por el contrario, condiciones más secas que el promedio se registraron en el este de la península ibérica, Argelia y Estados Unidos.

### EL NIÑO

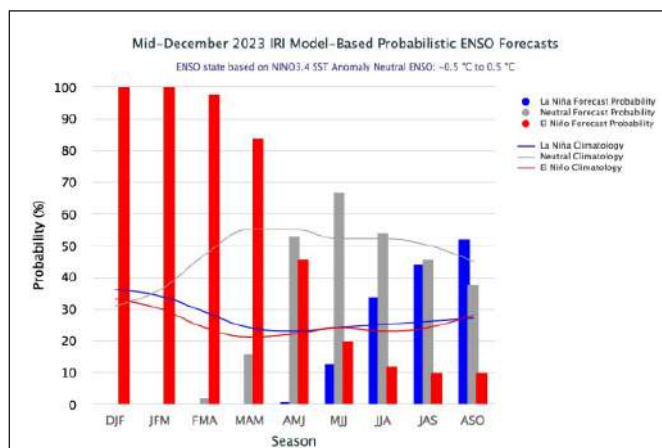
A lo largo del otoño boreal han predominado las condiciones El Niño. En el trimestre comprendido entre septiembre y noviembre de 2023 las observaciones semanales de las SST (temperaturas de la superficie del agua del mar) estuvieron por encima del promedio en todas las regiones El Niño.

Los modelos de predicción indican que las condiciones El Niño continuarán durante el invierno si bien a largo plazo se observan señales de debilitamiento (primavera-verano de 2024).





Series temporales semanales de las anomalías en la temperatura (°C) de la superficie del océano en las regiones de El Niño respecto de los promedios semanales del período 1971-2000 y gráfico con las regiones de El Niño. Fuente: NOAA.



Probabilidad estimada de que se den condiciones de ENSO neutral (gris), El Niño (rojo) y La Niña (azul) durante los próximos trimestres. Se espera que durante el invierno continúen las condiciones El Niño.

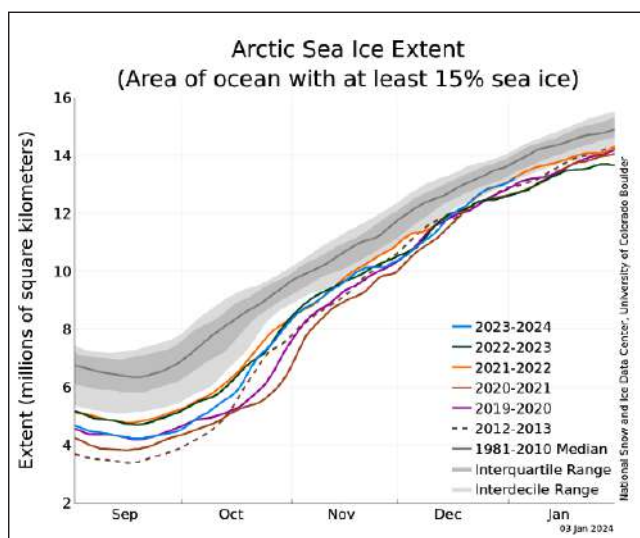
Fuente: IRI/CPC

## EXTENSIÓN DEL HIELO MARINO EN EL OCEANO GLACIAL ÁRTICO

Según el Centro Nacional de Datos de Hielo y Nieve (NSIDC) en el océano Glacial Ártico la extensión del hielo marino medida a partir de los instrumentos de microondas a bordo de los satélites NOAA para diciembre de 2023 fue de 12.0 millones de kilómetros cuadrados, siendo la novena extensión más baja desde que se dispone de registros de satélite. La extensión del hielo marino aumentó una media de 87 400 kilómetros cuadrados al día, notablemente más rápido que la media de 1981 a 2010 de 64 100 kilómetros cuadrados al día. Tras un retraso en el inicio de la congelación en la bahía de Hudson, el hielo marino se formó rápidamente de oeste a este a lo largo de la bahía, dejando sólo una pequeña zona de océano abierto cerca de las islas Belcher. En el sector Atlántico la extensión del hielo marino se mantuvo por debajo de la media, como viene siendo habitual en la última década.



Extensión de hielo marino en el océano Glacial Ártico a principios de enero de 2024. La línea magenta representa la mediana correspondiente al periodo de referencia 1981-2010



Extensión diaria del hielo marino del océano Glacial Ártico desde septiembre a 3 de enero de 2024 (línea cyan), junto con los datos de extensión de hielo diario correspondientes a los cinco años anteriores. La mediana diaria del periodo 1981-2010 se muestra como línea gris oscura. Las bandas grises alrededor de la mediana indican los rangos intercuartílico e interdecílico diarios. Fuente: NSIDC

## Descripción del otoño de 2023 en España

### TEMPERATURA

El otoño de 2023 (periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 30 de noviembre de 2023) ha tenido carácter extremadamente cálido, con una temperatura media en la España peninsular de 16.3 °C, valor que queda 1.9 °C por encima de la media de esta estación (periodo de referencia 1991-2020). Ha sido el segundo otoño más cálido desde el comienzo de la serie en 1961, por detrás del otoño de 2022. De los diez otoños más cálidos de la serie, siete pertenecen al siglo XXI.

El otoño tuvo carácter muy cálido en el cuadrante suroeste peninsular y extremadamente cálido en el resto de la España peninsular. En Baleares fue muy cálido, mientras que en Canarias tuvo carácter muy cálido o extremadamente cálido. Se observaron anomalías térmicas cercanas a +3 °C en la mayor parte de Cantabria, País Vasco, noreste de Castilla y León y en el interior del valle del Ebro. En el resto de la mitad norte peninsular, así como en la Comunitat Valenciana, Región de Murcia y centro y este de Castilla-La Mancha, las anomalías se situaron alrededor de +2 °C, mientras que en Extremadura, Andalucía y oeste de Castilla-La Mancha tomaron valores en torno a +1 °C. En Baleares las anomalías térmicas se situaron entre +1 °C y +2 °C, mientras que en Canarias estuvieron alrededor de +2 °C.

Tanto las temperaturas máximas dia-

rias como las mínimas quedaron en promedio 1.9 °C por encima del valor normal, resultando una oscilación térmica diaria igual a la normal del trimestre. El otoño comenzó con un mes de septiembre muy cálido, con una temperatura media en la España peninsular que se situó 1.1 °C por encima de la media del mes. Octubre fue muy cálido, con una temperatura media 2.6 °C por encima de la normal, resultando el segundo mes de octubre más cálido desde el comienzo de la serie en 1961. Noviembre fue también muy cálido, con una temperatura media 2.0 °C por encima de la media, siendo el segundo mes de noviembre más cálido de la serie.

**Septiembre** fue un mes muy cálido o extremadamente cálido en el norte y este de la España peninsular, mientras que resultó normal o frío en el suroeste. En Baleares fue cálido o muy cálido, y en Canarias tuvo un carácter cálido en zonas bajas y normal o frío en las zonas de mayor altitud. Las anomalías térmicas tomaron valores cercanos a +3 °C en el Cantábrico oriental, en zonas de Los Pirineos y en el interior de Cataluña, en torno a +2 °C en el Cantábrico occidental, noreste de Castilla y León, La Rioja, centro y sur de Navarra, Aragón y este de Cataluña, y en torno a +1 °C en el sur de Galicia, oeste y sur de Castilla y León, este de Castilla-La Mancha, Comunitat Valenciana, Región de Murcia y Andalucía oriental. En Madrid, Extremadura, oeste de Castilla-La Mancha y Andalucía

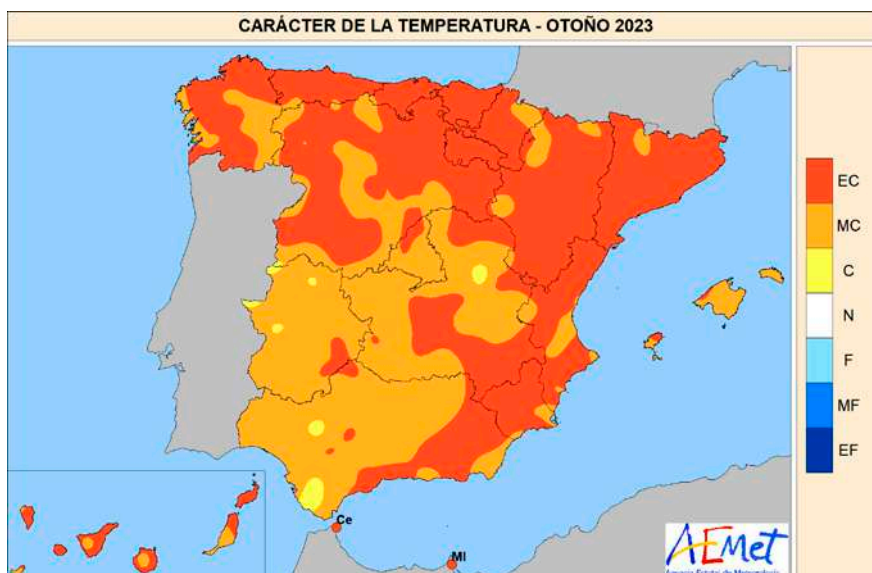
occidental las anomalías se situaron alrededor de 0 °C. En Baleares tomaron valores en torno a +1 °C, mientras que en Canarias se situaron entre 0 °C y +1 °C en zonas bajas y alrededor de -1 °C en las zonas de mayor altitud.

**Octubre** resultó extremadamente cálido en el Cantábrico y en el cuadrante noreste de la Península, y muy cálido en el resto de la España peninsular. En Baleares fue muy cálido o extremadamente cálido, mientras que en Canarias resultó extremadamente cálido en la mayoría de las zonas. Las anomalías térmicas tomaron valores cercanos a +3 °C en la mayor parte de Asturias, Cantabria, País Vasco, Navarra, La Rioja, Aragón, Cataluña, centro y este de Castilla y León, y en zonas de Galicia, Extremadura y Castilla-La Mancha. En el resto de la España peninsular se situaron alrededor de +2 °C, salvo en algunas regiones costeras del sureste, donde se situaron en torno a +1 °C. En Baleares tomaron valores en torno a +2 °C, mientras que en Canarias se situaron en general entre +3 °C y +4 °C.

**Noviembre** resultó extremadamente cálido en amplias zonas del tercio este peninsular y del norte de Castilla y León, y fue cálido o muy cálido en el resto de la España peninsular. En Baleares fue muy cálido en la mayoría de las zonas, mientras que en Canarias resultó muy cálido o extremadamente cálido. Las anomalías térmicas tomaron valores cercanos a +3 °C en amplias zonas del valle del Ebro, Comunitat Valenciana, Región de Murcia y sureste de Castilla-La Mancha. Se observaron anomalías en torno a +2 °C en la mayor parte de Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, Navarra, Cataluña, Castilla y León, Madrid y Castilla-La Mancha, mientras que se situaron alrededor de +1 °C en Los Pirineos en amplias zonas de Extremadura y de Andalucía. En Baleares tomaron valores comprendidos entre +1 °C y +2 °C, mientras que en Canarias se situaron mayoritariamente entre +2 °C y +3 °C.

### EPISODIOS MÁS DESTACADOS

En el otoño destacó el prolongado episodio cálido que se extendió entre el 25 de septiembre y el 18 de octubre, con temperaturas tanto máximas como mínimas muy por encima de las habituales para la época del año, el cual afectó tanto



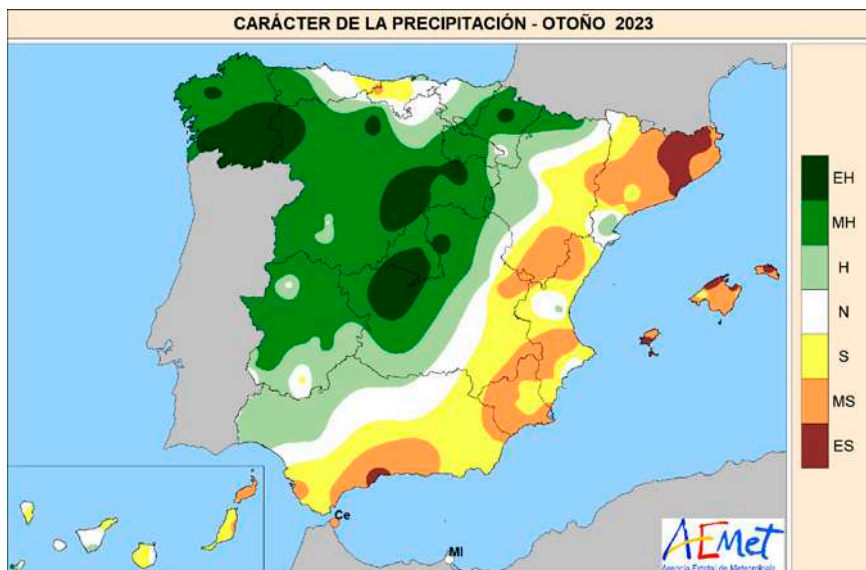
Carácter térmico: otoño 2023



a la península ibérica como a los archipiélagos balear y canario, siendo especialmente intenso en Canarias. Según los datos actualmente disponibles, hubo una ola de calor en Canarias entre los días 2 y 17 de octubre, que resultó excepcional por su duración y por lo tardío de las fechas en las que se produjo. Otros episodios cálidos destacados, aunque menos intensos, fueron los de los días 6 a 10 de septiembre, 11 a 20 de noviembre, y 28 a 30 de noviembre, en los que las temperaturas tomaron valores por encima de los normales en la mayoría de las regiones.

En treinta y una estaciones principales la temperatura media del otoño fue la más alta de las respectivas series de otoño; en veintiséis la media de las máximas fue la más alta desde que se tienen registros, y también en veintiséis la media de las mínimas superó al anterior valor más alto de la serie. Las temperaturas más altas del otoño en observatorios principales correspondieron a: Tenerife Sur/aeropuerto, 39.4 °C el 3 de octubre; Córdoba/aeropuerto, 37.7 °C el 29 de septiembre; Sevilla/aeropuerto, 37.4 °C el 6 de octubre, y Badajoz/aeropuerto, con 37.2 °C el 30 de septiembre. En tres estaciones principales se registró la temperatura máxima absoluta de las respectivas series de otoño, y en seis se observó la temperatura mínima más alta de otoño (la noche más cálida) desde que se tienen registros.

En cuanto a bajas temperaturas, los episodios fríos fueron escasos y de poca intensidad. En septiembre hubo un episodio frío, con temperaturas por debajo de las habituales para la época del año, especialmente las máximas, durante los días 2 y 3, y otro entre el 21 y el 23, con temperaturas máximas y mínimas por debajo de las normales. En octubre se observó un breve episodio frío durante los días 20 a 22, en el que las temperaturas estuvieron algo por debajo de las normales. Durante los días 24 a 26 de noviembre las mínimas se situaron por debajo de los valores normales, alcanzándose los valores más bajos del otoño en muchas regiones, si bien las máximas estuvieron por encima de la media. Destacaron entre estaciones principales: -6.2 °C de Molina de Aragón medidos el 26 de noviembre; -4.7 °C de Salamanca/aeropuerto el 24 de noviembre; -4.5 °C de Teruel también el 24 de noviembre, y los 3.7 °C registrados en Puerto de Navacerrada el 7 de noviembre.



Carácter pluviométrico: otoño 2023

## PRECIPITACIÓN

El otoño ha sido en su conjunto húmedo en cuanto a precipitaciones, con un valor de precipitación media sobre España peninsular de 243.6 mm, valor que representa el 121 % del valor normal del trimestre en el periodo de referencia 1991-2020. Se ha tratado del decimoséptimo otoño más húmedo desde el comienzo de la serie en 1961, y el quinto del siglo XXI. Por el contrario, en Baleares ha sido el tercer otoño más seco desde el comienzo de la serie, detrás de 1983 y 1981.

El otoño ha tenido carácter entre normal y húmedo en gran parte de la Península, diferenciado por zonas geográficas. Ha sido entre seco y muy seco en el tercio oriental de la Península y en la mitad oriental de Asturias y Cantabria; extremadamente húmedo en gran parte de Galicia, puntos de Castilla y León, de Madrid, de Navarra, y norte de Castilla-La Mancha; seco en el Levante peninsular, mitad oriental de Aragón, Castilla-La Mancha y Andalucía, y extremadamente seco en puntos de Cataluña y en zonas de Málaga. En el archipiélago balear, ha tenido carácter entre muy seco y extremadamente seco, y en el archipiélago canario ha sido entre normal y seco, llegando a tener carácter muy seco en la isla de Lanzarote.

El otoño comenzó con un mes de septiembre muy húmedo en cuanto a precipitaciones, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 67.4 mm, que representa el 151 % del valor normal del mes (periodo de referencia: 1991-2020). Se trató del octavo mes de septiembre más húmedo desde el comienzo de la serie en 1961, y el más

húmedo del siglo XXI. Octubre mantuvo carácter muy húmedo, con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 105.1 mm, que es el 135 % del valor normal del mes. Finalmente, noviembre tuvo carácter normal con un valor de precipitación media sobre la España peninsular de 71.1 mm, que representa el 91 % del valor normal del mes.

**Septiembre** fue entre normal y húmedo en casi toda la Península, llegando a extremadamente húmedo en el centro de la Península y grandes áreas de La Rioja y de Navarra; muy húmedo en las dos Castillas, La Rioja, Navarra y gran parte de la Comunitat Valenciana, de Aragón, de Galicia y de Extremadura. Por el contrario, y seco en Cataluña, parte de Cantabria y de Asturias, el archipiélago balear y gran parte de Canarias.

**Octubre** fue entre húmedo y muy húmedo en casi toda la Península, llegando a extremadamente húmedo en el sur de Galicia y oeste de León y de Zamora; seco en gran parte de la cornisa cantábrica, todo el levante peninsular, sureste de Andalucía y en ambos archipiélagos.

**Noviembre** fue entre normal y húmedo en la mitad oeste de la Península, llegando a tener carácter muy húmedo en el sur de Galicia y oeste de León y en los Pirineos navarro y aragonés; seco en la mitad este de la Península, Andalucía y ambos archipiélagos, llegando a ser extremadamente seco en el sureste de Andalucía y en la isla de Ibiza.

## EPISODIOS MÁS DESTACADOS

En septiembre, las mayores precipitaciones diarias registradas en los observatorios principales correspondieron a: Tortosa, 106 mm el día 2; Toledo, 90.4



## Descripción del otoño 2023 en España

→ mm el día 3, que es el valor más alto de su serie desde 1982; Valencia/aeropuerto, 86 mm el día 2; Puerto de Navacerrada, 79 mm el día 3; Colmenar Viejo 77.4 mm el día 3; Valencia, 73.5 mm el día 2; Ávila 71.2 mm el día 3, y Madrid/Retiro, 66.5 mm el día 2. En cuanto a la precipitación total del mes, destacan: 212 mm del Puerto de Navacerrada; 210 mm de Colmenar Viejo, que es el valor más alto de su serie desde 1951; 187 mm de Tortosa; 169 mm de Santiago de Compostela; 166 mm de Madrid/Retiro, y los 163 mm de Valencia/aeropuerto.

En octubre, las mayores precipitaciones diarias registradas se dieron en los últimos días del mes y estuvieron en su mayoría asociadas al paso de la borrasca Aline. Estas correspondieron a: Vigo/aeropuerto 112.8 mm el día 25; Madrid/

Retiro, 107.8 mm, valor más alto de su serie desde 1920, y Madrid/Cuatro Vientos, 91.2 mm el día 19, valor más alto de su serie desde 1945; Puerto de Navacerrada, 88.8 mm el día 29; Guadalajara, 86.4 mm; Getafe 78.1 mm y, Madrid/aeropuerto con 73.8 mm, valor más altos de su serie desde 1951; Pontevedra con 73.6, todos ellos registrados el día 19. En cuanto a la precipitación total del mes, entre las estaciones principales destacan: 596.3 mm de Vigo/aeropuerto; 493.8 mm de Pontevedra; 352.4 mm de Santiago de Compostela; 291 mm del Puerto de Navacerrada; 227 mm de Lugo/aeropuerto; 219.6 mm de A Coruña; 212.3 mm de A Coruña/aeropuerto; 200.6 mm de Ponferrada, que es el más alto de su serie desde 1951 y los 180.7 mm de Madrid/Retiro.

Finalmente, en noviembre las mayo-

res precipitaciones diarias registradas correspondieron a los observatorios principales de: Cáceres, 63.2 mm el día 30; Vigo/aeropuerto 63.2 mm el día 10; Santiago de Compostela/aeropuerto, 56.6 mm el día 1; Hondarribia/Malkarroat 54.5 mm el día 1; Guadalajara, 53.8 mm el día 30, valor más alto de su serie desde 2011; Getafe, 52.4 mm, valor más alto de su serie desde 1951; Madrid/Cuatro Vientos, 52.1 mm, valor más alto de su serie desde 1945, y Madrid/aeropuerto, 59.9 mm, todos del día 30. En cuanto a la precipitación total del mes, destacan: 449.5 mm de Vigo/aeropuerto; 381.9 mm de Hondarribia/Malkarroat; 332.1 mm de Santiago de Compostela/aeropuerto; 322.2 mm de Donostia/San Sebastián/Igueldo; 215.4 mm de A Coruña, y los 206.6 mm de Santander.

## Fenómenos meteorológicos singulares en SINOBAS durante el otoño meteorológico

Durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2023 se incluyeron en el sistema SINOBAS un total de 18 reportes. Es un número sensiblemente más bajo que el del año anterior, aunque esto puede obedecer al hecho de que la página web de SINOBAS no estuvo operativa para el público en general para adaptar su código a estándares más modernos de seguridad. Finalmente, gracias al gran trabajo realizado por nuestro compañero Salvador Ponce, la web vuelve a estar operativa desde el 14 de diciembre de 2023.

De los dieciocho reportes, uno fue eliminado y la mayoría fue validado con fiabilidad alta. Por fenómenos, se distribuyeron de la siguiente manera:

- Granizada singular: 7
- Precipitación súbita torrencial: 4
- Reventón/ Frente de racha: 1
- Tolvanera: 1
- Tornado/ Tromba marina: 3
- Vórtice de racha: 1

En cuanto a la distribución territorial, ocho reportes se refirieron a fenómenos acaecidos en la Comunitat Valenciana, tres en Euskadi, otros tres en Cataluña, y uno en Navarra, Aragón, Baleares y



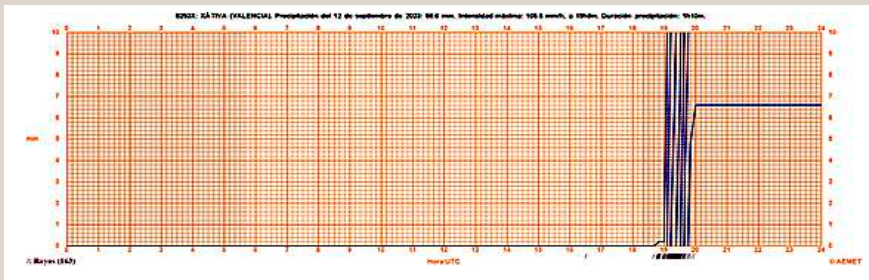
Andalucía. Por lo tanto, una vez más, la vertiente mediterránea ha sido el área geográfica desde donde más reportes se han emitido.

Entre los fenómenos singulares más destacados a lo largo de la estación otoñal, cabe señalar los siguientes:

Reventón/ frente de racha en la provincia de Castellón el 12 de septiembre. Ese día, una tormenta muy activa que se formó alrededor de las 14 horas en la comarca valenciana de la Plana de Utiel-Requena, tuvo un recorrido de aproxi-

madamente 100 km en línea recta en dirección este-nordeste hasta salir al mar por el Grau de Burriana sobre las 17:50 horas, por tanto, a una velocidad media ligeramente inferior a 30 km/h. La célula de tormenta salió al mar por la zona del Grau de Burriana con la reflectividad y velocidad más alta en su recorrido por la provincia de Castellón. Las intensas convergencias de viento y humedad en el litoral de la comarca de la Plana Baixa favorecieron los ascensos en un ambiente previo muy inestable y reactivaron la





Gráfica del pluviógrafo de la estación meteorológica de AEMET en Xàtiva (Valencia) del 23 de septiembre, en la que se observa el carácter torrencial de la precipitación.

Imagen de la capa de granizo acumulada en la localidad de Corella (Navarra), en la madrugada del 10 de septiembre. Imagen obtenida de la cuenta en X de la Policía Foral de Navarra.

Operarios de limpieza retiran ramas arrancadas de cuajo por las fuertes rachas de viento en la provincia de Castellón el 12 de septiembre.



convección al acercarse a la costa. Los índices de inestabilidad marcaban valores muy elevados, a lo que se unió la intensa convergencia del flujo de humedad en la zona litoral y prelitoral, lo que aumentó la inestabilidad potencial en niveles bajos. En la zona de Burriana se notificaron daños generalizados afectando a gran parte de la población. También se notificaron daños por los efectos de las fuertes rachas de viento en localidades vecinas como Nules, la Vilavella o les Alqueríes, aunque menos generalizados que en Burriana. Según notificó el Consorcio Provincial de Bomberos de Castellón, tuvieron que realizar 75 actuaciones relacionadas con la tormenta. Además del viento, se registró granizo e intensas precipitaciones de corta duración. Algunos testigos relatan también que el viento procedía de varias direcciones y que incluso pudieron existir fuerzas ascendentes que provocaron el arrancamiento de alguna estructura. Es frecuente en este tipo de convección organizada que las corrientes descendentes asociadas provoquen vientos fuertes en superficie.

Se baraja como hipótesis más probable para justificar los daños generalizados la posibilidad de que se hubiese producido un reventón húmedo (*microburst* en la literatura inglesa). Los reventones se originan en una corriente descendente dentro de la nube y uno de los mecanismos que los generan es la carga de hidrometeoros dentro de la estructura convectiva, es decir, el peso del agua líquida o sólida que se acumula en el aire, que muchas veces es un factor crucial en el inicio de la corriente descendente, y que es coherente con la situación antes descrita, con las intensidades muy fuertes de precipitación observadas en la zona, y con los datos radar al paso de la tormenta por la zona, con la intensificación de la misma. Por una parte, la gran convergencia de humedad en la zona, por otra la lluvia de intensidad muy fuerte (en este tipo de reventones, un factor que contribuye a las descendencias intensas se debe al arrastre del agua que cae en la nube convectiva y siempre con altas intensidades de precipitación) justifican la idea de la génesis de reventones y rachas muy fuer-

tes de viento no tornádicas en superficie. Estaciones no oficiales de las redes de AVAMET e Inforatge situadas en la zona, registraron 132 km/h en la playa de Burriana, 119 en Nules, 116 en la partida de Forns de la Vilavella, (a 3 km al noroeste de la población) y más de 100 en otras estaciones de Burriana o Les Alqueríes.

Otro reporte para destacar fue el de la precipitación súbita torrencial en el litoral sur de Valencia durante la madrugada del 14 de septiembre de 2023 entre las localidades de Albalat de la Ribera, Algemesí, Sueca y Cullera. La situación, de unas tres horas de duración, dio lugar a la activación de un aviso observado de nivel rojo por parte de AEMET en la zona de avisos Litoral Sur de Valencia, al superarse el umbral establecido de más de 90 l/m<sup>2</sup> en una hora. Las precipitaciones fueron muy intensas y continuadas entre las 02 y las 05 UTC, con datos diezminutales que llegaron a superar puntualmente los 30 l/m<sup>2</sup> y acumulados rondando los 150 l/m<sup>2</sup> en tres horas en alguna estación. El episodio tuvo un carácter extremadamente local, con regiones muy próximas a la zona afectada en las que apenas hubo precipitaciones.

También fueron destacables las granizadas singulares registradas en Euskadi durante el 10 de septiembre, con piedras de gran tamaño que, según los vídeos publicados en las redes sociales pudieron superar los 5 centímetros de diámetro, y especialmente la granizada singular que se produjo en la localidad navarra de Corella durante la madrugada del 10 de septiembre. En este caso, además del carácter singular del fenómeno por la gran cantidad de granizo acumulado en el suelo, llama la atención la hora a la que se produjo. Si bien no es desconocido que granice de madrugada, no es habitual que lo haga con tanta intensidad. Según la información publicada por el Diario de Navarra, la granizada afectó también a localidades próximas como Fitero y Cintruénigo, y causó grandes daños en los cultivos de vid, almendro, olivo o cardo rojo.

Desde el equipo SINOBAS de AEMET os deseamos un feliz 2024 y os animamos a la inclusión de reportes en nuestra página web. Recordad que ya está operativa de nuevo. También podéis seguir nuestra cuenta en la red social X (antigua Twitter), donde contamos con más de 51 200 seguidores. ¡Ánimate a hacer ciencia ciudadana con nosotros!

## “Reafirmando mi locura” Enric Navarrete Bachs

*Nota autobiográfica: La fotografía desde siempre me ha encantado, algo que creo que en parte viene de mi padre, que en casa tenía y tiene cajones y cajones de diapositivas de las vacaciones, sobre todo, por el Pirineo. Empecé primero con diapositivas y, a partir de 2004, di el salto a digital. Hará unos 9 o 10 años empecé a centrarme en la fotografía meteorológica, primero de paisaje, para participar en los medios de comunicación, y después, cada vez más, en busca de ese fenómeno más concreto y fascinante, para poder capturarlos de la mejor forma posible. Ahora, gracias a buenos amigos muy aficionados a la meteofotografía, disfruto también con ellos, en salidas conjuntas con el objetivo de captar fenómenos particulares y aprender de ellos.*

**Foto 1- Doble arcoiris primaveral**  
Santa Coloma de Farners, Girona, Catalunya, 23/4/22.

Empezamos con un clásico de la meteo, un doble arcoiris, potentísimo, con la franja de Alexander muy bien definida y destacada. Ese día iba con mi pareja de camino a pasar un fin de semana con unos amigos, y casi al llegar al destino, ya al atardecer, después de un día de tormentas, se fue limpiando el cielo de nubes, dejando paso a los últimos rayos de sol, para que nos proporcionara ese espectacular doble arcoiris, que nunca defrauda.

Estos dos últimos años ha habido de todo, meses desesperantes, sin nada a fotografiar, meteorológicamente hablando, donde parecía que los fenómenos severos y extremos, los que nos gusta fotografiar, por su fuerza y su belleza, nos hubieran abandonado. Pero a la vez, como si del Yin y el Yang se tratará, hemos tenido jornadas que ni en los mejores sueños hubiéramos pensado ver, y menos fotografiar. Terminando el 2021, viví uno de esos sueños, de los que no quisieras nunca despertar.

Rayos y mangas marinas frente a ti, en el lugar adecuado, con la luz perfecta, que han centralizado mi caza fotográfica de estos últimos 24 meses.

También me gustaría destacar, que por primera vez, he programado y realizado una escapada de varios días, con un buen amigo, dedicada solo al seguimiento y a la caza de las tormentas. Todo salió a pedir de boca, como estaba previsto, y cómo nos indicaban para esos días las previsiones y los modelos meteorológicos. Experiencia que repetiremos seguro, en cuan-



2



**Foto 2- Mammatus sobre la ciudad**  
Parets del Vallès, Barcelona, Catalunya, 6/9/21.

Típica tarde de tormentas de setiembre en Catalunya. Al salir del trabajo en seguida busqué un punto elevado de la población para poder hacer el seguimiento de esa tarde. Y no tardaron mucho en formarse esos *mammatus* espectaculares encima de mí que al paso del atardecer aún fueron mejorando en colores, aunque las *mammatus* colgantes del cúmulo fueron de mayor intensidad y tamaño al inicio. disfruté con infinidad de fotografías.

**Foto 3- Cb de fantasía**

Monasterio El Pueyo, Barbastro, Huesca, 28/7/22.

Ese día me desplazé hasta Barbastro, para seguir las tormentas previstas en esa zona. Hubo un primer núcleo con un Cb enorme, limpio, que dejó una granizada tremenda en la zona de Almacelles, con tamaños de hasta 6 centímetros. Y más tarde, se gestó una segunda tormenta que se situó hacia el norte, en el Prepirineo aragonés. Inicialmente parecía que no fuera a dar mucho juego, con unas nubes simples pero poco a poco, se fue gestando un señor *cumulonimbus*, con una silueta estilizada y muy bella.





to las condiciones lo permitan de nuevo. Con todo esto, he conseguido reafirmarme, en que esta locura de perseguir las tormentas, y en especial la de buscar la foto diferente, en lugar, en situación, en composición, y con el rayo como elemento destacado, sea mi pasión. Y hace que cada día me guste más y no la quiera abandonar.

Sin más, os presento mis doce capturas, focalizadas mayoritariamente con el rayo, ese impacto bestial de energía y luz, que da vida a mi fotografía.

#### Foto 5- Iluminando la llanura

Monasterio de Luna, Huesca, Aragón, 12/9/22.

Fue la primera vez que destiné un par de días de vacaciones, exclusivamente para ir a la caza fotográfica de fenómenos meteorológicos. Tanto se nos acercó esa tormenta, que nos engulló literalmente, con rachas de agua y viento muy importantes que zarandeaban el coche donde nos tuvimos que refugiar. Cuando la tormenta se fue alejando, salimos de nuevo, y los rayos que soltaban en ese momento eran espectaculares, cruzando el cielo de punta a punta, por encima de nuestras cabezas.



#### Foto 7- Potente impacto

El Masnou, Barcelona, Catalunya, 30/9/22.

Esa tarde estaba en el trabajo mirando cómo iban evolucionando las tormentas, y en cuanto terminé la jornada laboral, me fui con el coche rápidamente a la costa del norte de Barcelona. Me situé al límite de lo que me marcaba el radar de precipitación, para no mojarme, y fue perfecto. Esa tormenta fue circulando muy lentamente frente a mí, pasando a pocos kilómetros mar adentro, dejándome disfrutar sin lluvia. Solo tenía que encuadrar y esperar a que los rayos fueran cayendo.



#### Foto 4- Monstruo acercandose

Tenerife, 28 de julio de 2021.

Los modelos meteorológicos lo tenían claro. En la zona de Huesca había previsión de tormentas severas y allí nos fuimos. Llegamos un par de horas antes de lo que indicaban los mapas, y eso nos permitió escoger bien la ubicación final. El Mirador del Monasterio de Luna, situado al oeste de la provincia, es un punto elevado en un mar de llanura de tierras, y nos permitió ver con todo detalle, de tú a tú, como se iba acercando un "monstruo" muy estético, con lluvia y mucho viento hacia nosotros.



#### Foto 6- Ramificaciones nocturnas

Barberà del Vallès, Barcelona, Catalunya, 17/8/22.

Tarde de agosto con mucho seguimiento meteorológico. Recuerdo que empecé a media tarde, cerca de casa, y pronto busqué otro sitio más elevado con mejores vistas, ya que iban creciendo diferentes núcleos de tormentas en todas direcciones. Ya al anochecer, después de llover un poco, empezaron a verse en el cielo este tipo de rayos con múltiples ramificaciones, los conocidos como *Anvil Crawler*, dejando capturas como esta.



#### Foto 8- Nudos eléctricos

Santa Coloma de Gramenet, Barcelona, Catalunya, 30/8/22.

Después de una tarde de constante seguimiento de tormentas, me desplazé a Barcelona a media noche, como casi siempre corriendo. Me situé en un punto elevado para tener vistas de la ciudad con la tormenta que iba rozando la costa. Al fondo los rayos que iba soltando, todos de nube a nube, eran puro espectáculo por su estilismo y belleza.

## Foto 10- Dos mejor que una

Santa Coloma de Gramenet, Barcelona, Catalunya, 4/11/21.

Recordaré cada instante de esa noche durante mucho tiempo. Primeros de noviembre, ya quedaban pocas oportunidades para la caza de tormentas, cerca del mar. Empecé muy mal esa tarde eligiendo una ubicación errónea, y cuando me di cuenta que un núcleo de tormenta había empezado a soltar rayos en Barcelona, me fui sin pensar hacia allí. El estrés de adónde voy conduciendo es horroroso, pero acerté. Aparco el coche, planto la cámara y a la tercera foto, veo dos mangas en mi encuadre. Alucinante.



## Foto 11- Soñando con el encuadre

Santa Coloma de Gramenet, Barcelona, Catalunya, 4/11/21.

Estaba alucinando, solo con mi cámara, y frente a mí un encuadre de ensueño. Puse el zoom de 200mm, con las torres de la incineradora de Sant Adrià en el centro, la manga marina a su izquierda que solo la veía con los destellos de los rayos, y dejé un espacio vacío en el encuadre, a la derecha de las torres, para que cayera un rayo allí... y ¡zas!, el rayo cayó. Cuando lo vi en la pantallita, los gritos de emoción fueron totales. Mi sueño se había hecho realidad. Lo había conseguido. Tenía mi foto



## Foto 9- Manga marina en el aeropuerto

Esplugues de Llobregat, Barcelona, Catalunya, 16/9/22.

Los que vivimos cerca de la costa catalana somos muy afortunados en esta época del año, porque el mar aún caliente del final de verano, nos da mucha energía a las situaciones de cualquier frente frío, generando en muchas ocasiones fenómenos severos, bellos de fotografiar. Ese día, teníamos esperanzas de que nos apareciera una manga marina, como así fue. Llegó ya de noche, a oscuras, que solo la iluminación artificial del aeropuerto y de la ciudad, la hacía visible. Y fueron unos 5 minutos muy mágicos.







# LAS FOTOS DEL OTOÑO

## SEPTIEMBRE

Título: "Solitaria"

Autor: Carlos Castillejo Balsera

Cámara: Canon EOS 6D

Lugar: El Masnou (Barcelona)

Fecha: 22 de septiembre de 2023

Comentario: La noche del 22 de septiembre se formó este perfecto núcleo de tormenta delante de la costa del Maresme, que constituyó un sensacional espectáculo de energía del que pudimos disfrutar durante más de dos horas, mientras se iba desplazando lentamente mar adentro.



## OCTUBRE

Título: "Aurora y fotógrafo en Stokkness"

Autor: Roberto Porto Mata

Cámara: Nikon Z5

Lugar: Stokkness (Islandia)

Fecha: 14 de octubre 2023

Comentario: Los primeros días del viaje a Islandia de este año fueron poco propicios para la fotografía de auroras debido a la presencia de nubes, lluvia, viento y actividad solar baja. Pero el viernes 13 de octubre las previsiones eran de cielo despejado y un índice de actividad geomagnética Kp de 4. Además, esa noche estábamos en un sitio impresionante, la playa de Stokkness, cuya montaña amanecía cubierta de un manto blanco de nieve. Las previsiones se cumplieron, y pudimos fotografiar esta bonita aurora roja y verde.



## NOVIEMBRE

Título: "Stratus fluctus"

Autora: Nany Lavado Fernández

Cámara: Nikon

Lugar: Málaga

Fecha: 14 de noviembre de 2023

Comentario: Me vais a perdonar con esto del taró, pero es que no hemos tenido otras cosas. Con esta estampa nocturna apetecía coger una tabla y surfear esas "olas". Lo que está claro es que este fenómeno, cuando hace su aparición sobre las costas y la ciudad de Málaga, es algo que hay que aprovechar, porque las imágenes que nos regala nunca defraudan.



## 22 de octubre de 2023: Borrasca Bernard

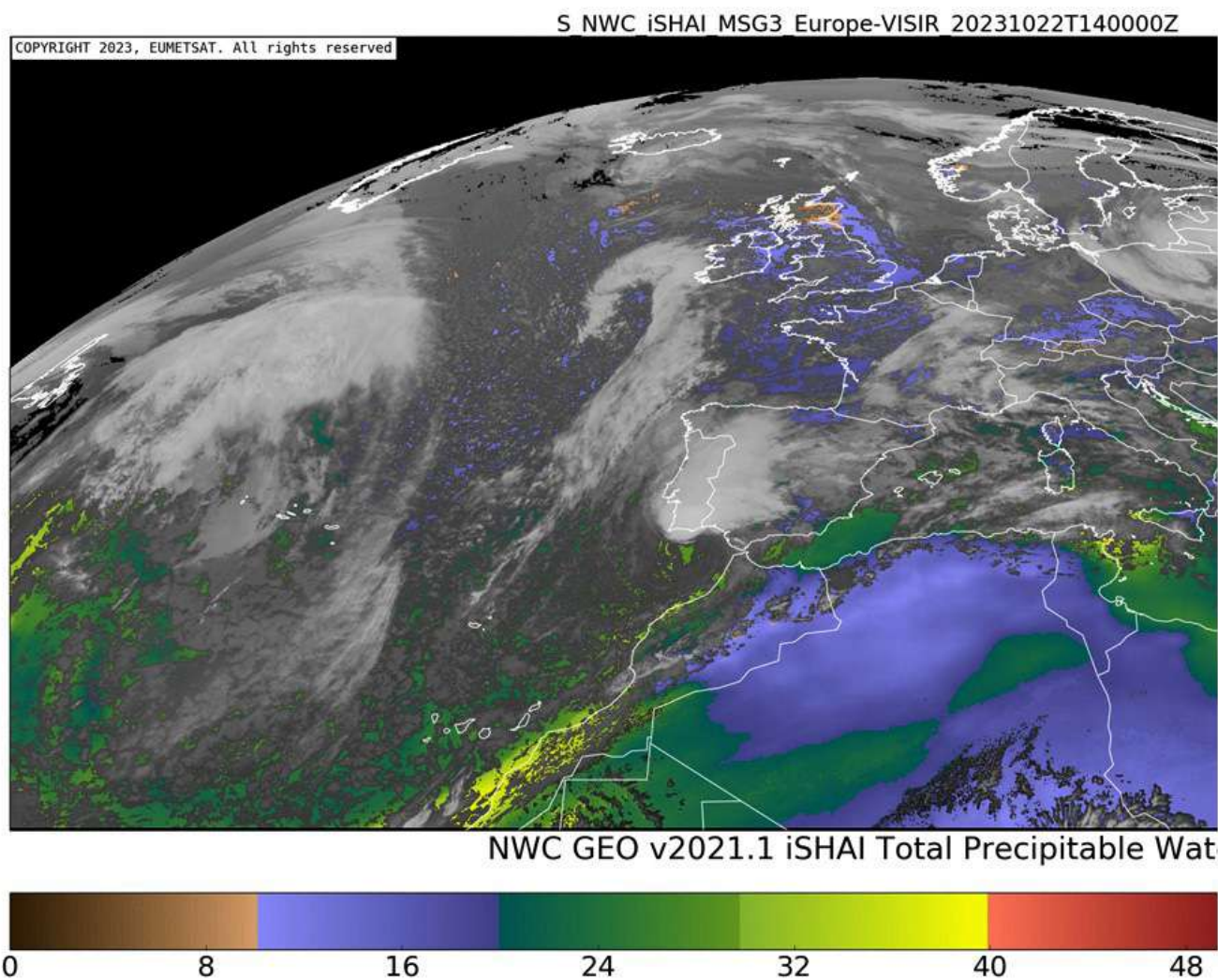


Figura 1.- Imagen de las 14:00 UTC del día 22 de octubre de 2023 procedente de METEOSAT y tratada por SAFNWC. Los colores representan el contenido de agua precipitable total en columna en los emplazamientos sin nubes. Los tonos grises representan nubes cuyos toques son más altos cuanto más intenso es el blanco.

Una profunda vaguada de aire polar invadía el Atlántico oriental y provocaba la formación de células de convección somera, que quedaban marcadas en la figura 1 por un moteado de colores (aire claro) y grises (nubes). La vaguada de aire frío tiene un eje Canarias-Islandia en los niveles troposféricos superiores. Las bandas paralelas de cirros curvándose anticiclónicamente en el eje El Cairo-Burdeos delataban un eje de la dorsal en altura y dan cuenta de la presencia de varios chorros paralelos.

En la parte ascendente de esta va-

guada (al este del eje) se observan dos borrascas de ondas cortas: una al suroeste de Irlanda y la otra en el golfo de Cádiz, esta última fue nombrada como Bernard.

Bernard presentaba a esas horas (figura 1) un aspecto brillante continuo, de frente cálido, con los máximos brillos en el centro de rotación en superficie y los cirros curvándose hacia el este por el centro de la península ibérica. Desde el sur, desde las islas Canarias, Bernard es alimentado por una masa con valores significativos de agua precipitable.

En la figura 2 se aprecia la estructura

de Bernard: al sur del centro de rotación los frentes fríos, como líneas delgadas paralelas, que delimitan las células abiertas; al norte la nubosidad propia del "cabecón" del frente cálido, con los cirros marcando la circulación anticiclónica sobre la península ibérica. También podemos observar la "pluma" de polvo que se eleva desde África por el mar de Alborán.

Las imágenes de Bernard, sobre todo su escala, hicieron pensar a muchos que se trataba de una estructura tropical. En las imágenes del radar (figura 3) se observaban desarrollos convectivos



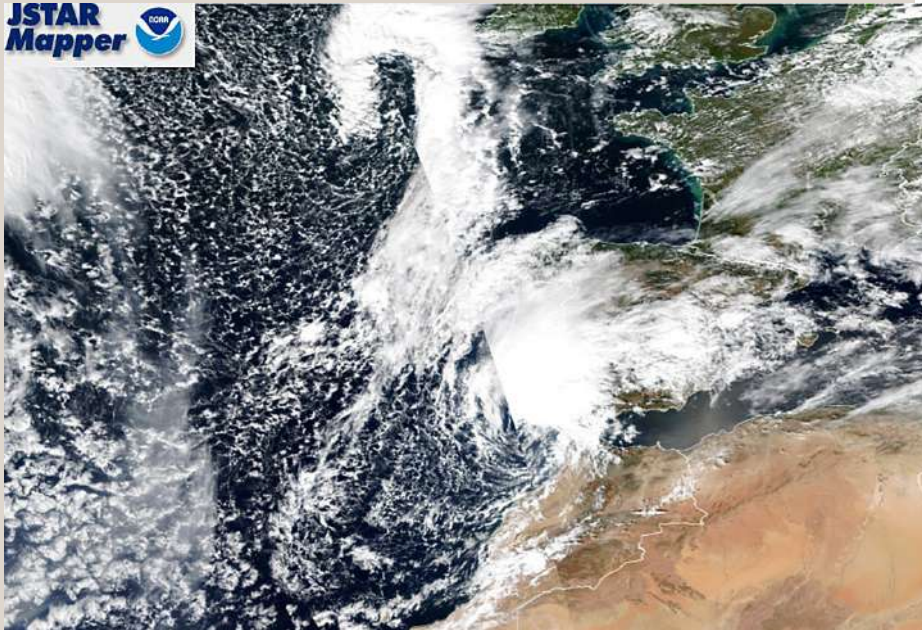


Figura 2. Imagen del satélite polar TERRA de NOAA del 22 de octubre de 2023 en color verdadero. La hora es en torno a las 11 UTC. Se trata de la composición de dos pasadas consecutivas del satélite.

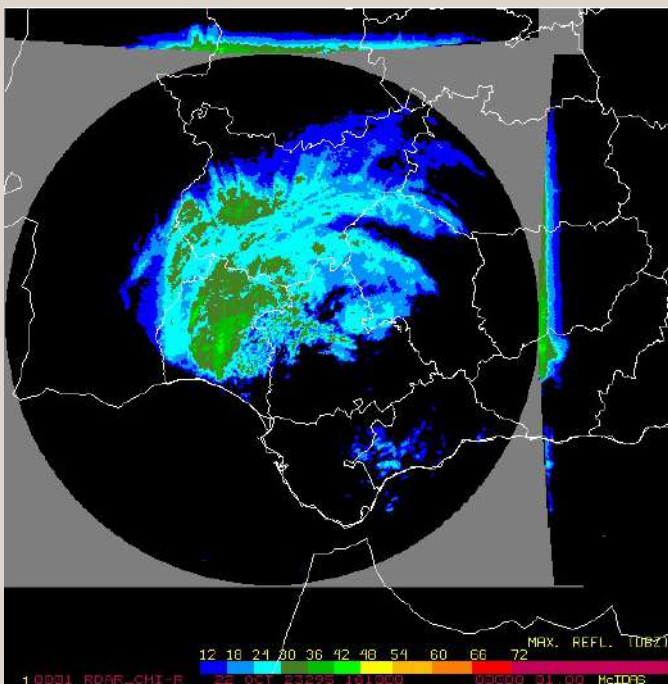


Figura 3. Imagen del producto Echotop del radar de Sevilla de la AEMET el día 22 de octubre de 2023 a las 13:10 UTC.

con toques muy elevados (de unos 13 km) de los que partían bandas de precipitación estratiforme hacia el norte. La estructura puede ser interpretada como un sistema convectivo de mesoescala (SCM). La distribución de ascensos y descensos (figura 4) y la forma de la precipitación (figura 3) se ajustan muy bien al modelo conceptual de SCM. Los ciclones tropicales provienen con frecuencia de SCM y se organizan en torno al centro de vorticalidad, donde se desarrollan torres convectivas de ecos muy elevados y con anomalías cálidas en los niveles medios troposféricos.

Aunque los patrones radar de precipitación y las imágenes de satélite no muestran simetría respecto al centro de rotación, como sí ocurre en los sistemas tropicales, no cabe duda de la importancia de la liberación del calor latente en el desarrollo del sistema meteorológico, que podría haber sufrido una transición tropical antes de penetrar en la península ibérica y una transición extratropical mientras la atravesaba.

No se detectaron muchos rayos y casi todos estaban concentrados en torno a las torres convectivas calientes del centro de rotación. Tampoco eran muy elevados los valores de CAPE ni de inestabilidad potencial (figura 4)

Bernard se deslizó corriente abajo, atravesando la península ibérica, desde el golfo de Cádiz hasta Bilbao. A media noche ya había atravesado la provincia de Madrid y continuaba perfectamente organizada como SCM.

Agradecimiento a J. María Sánchez-Laulhé por sus aportaciones.

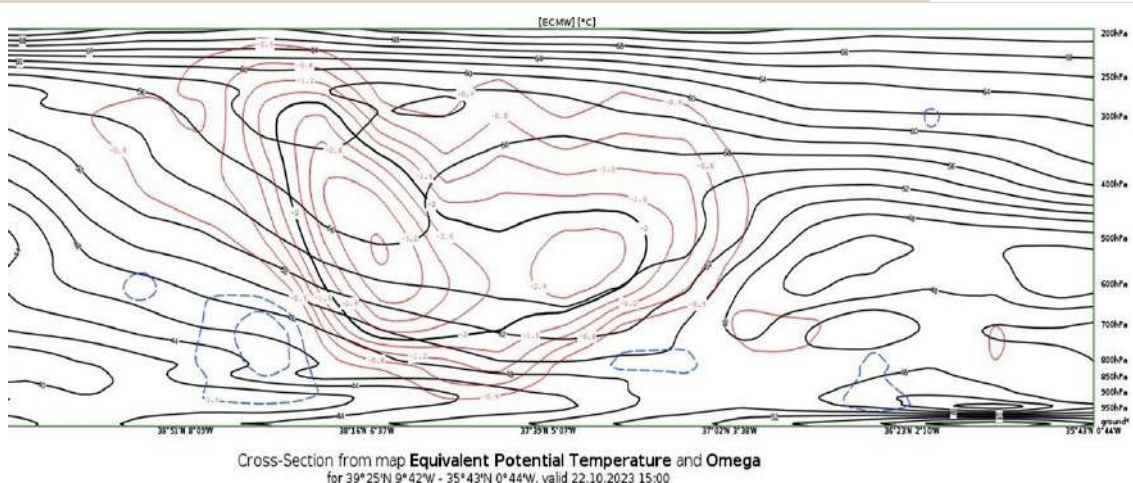


Figura 4. Corte vertical de los campos temperatura potencial equivalente (líneas negras) y de la velocidad vertical omega (líneas rojas los valores negativos o ascensos y líneas azules los valores positivos o descensos) previstos para las 15 UTC (H+03) por el modelo ECMWF, pasada 12 UTC del 22 de octubre de 2023. El corte vertical va desde Lisboa a la izquierda hasta Argel a la derecha.



# Resumen agro-fenológico del otoño de 2023 en España

JUAN ANTONIO DE CARA GARCÍA

El campo manifestó los efectos de una primavera seca seguida de un verano caluroso y un otoño cálido y lluvioso con un “cierto ambiente primaveral” (figuras 1 y 2). El periodo septiembre-noviembre tuvo un carácter muy cálido en el suroeste peninsular y Baleares y extremadamente cálido en el resto de Península y Canarias. Las lluvias fueron abundantes en el noroeste y centro peninsulares y escasas en el este y en las islas (figura 3).



**Figura 1. Pastizal ruderal-viario terofítico (en el que solo perduran las semillas en la época desfavorable y permanecen “agostados” en verano) mesomediterráneo, de suelo arenoso silíceo subnitrófilo con floración de “jaramagos” (ésta floración es característica y abundante en primavera y principios de verano). Casa de Campo de Madrid el día 26 de noviembre (Foto de Teresa Gallego Abaroa, AEMET).**

Entre el día del Pilar (12 de octubre) y mediados de noviembre atravesaron la Península varias borrascas que afectaron sobre todo a la mitad norte, por lo que la sequía meteorológica y la situación de los embalses mejoraron en gran medida en regiones como Castilla y León o Galicia, pero la falta de agua embalsada y su disponibilidad agraria siguió presentando un importante déficit en amplias zonas especialmente en Cataluña y Andalucía. El mínimo de agua embalsada en la Península se registró a mediados de octubre.

La vendimia en general fue muy temprana y la berrea de los

ciervos, la ronca de los gamos y el inicio del celo de las cabras montesas sucedieron en fechas normales.

## Agrometeorología

En verano, se registraron muchas noches tropicales y se produjeron cuatro olas de calor siendo especialmente intensa la última (del 18 al 25 de agosto que afectó a 35 provincias). A primeros de septiembre se produjo una situación de DANA (días 2-4) que ocasionó precipitaciones en diversas zonas de la Península y Baleares y a finales del mes se registró un ca-





Figura 2. Castaño de indias con hojas marchitas, verdes y flores. Parque del Olivar de Fuenlabrada (Madrid), 16 de octubre de 2023. (Foto de Carlos Fernández de Cara).

racterístico veranillo de San Miguel que duró hasta mediados de octubre; este mes fue en general muy húmedo (seco o muy seco en Cataluña, litoral mediterráneo andaluz, Mallorca-Menorca y algunas zonas de Canarias) y cálido (especialmente en el tercio norte peninsular) aunque fue normal o frío en el cuadrante suroeste peninsular y en Canarias. Octubre fue muy lluvioso en general pero muy seco en las provincias peninsu-

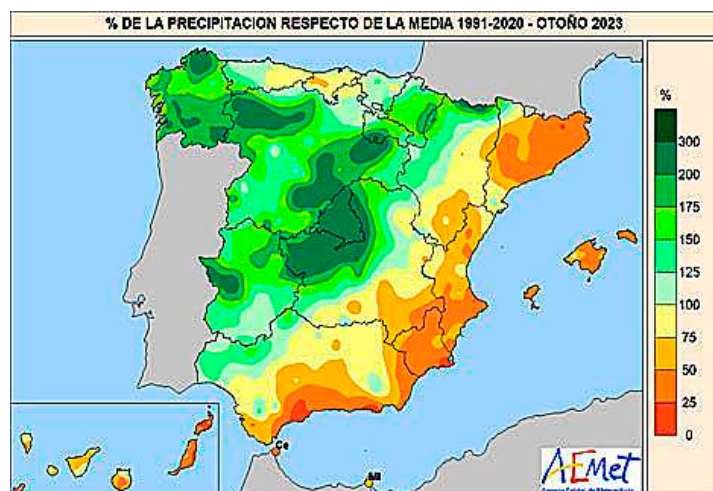


Figura 3. Porcentaje de la precipitación acumulada en el otoño de 2023 (1 de septiembre a 30 de noviembre) respecto a la media del periodo 1991-2020 (fuente AEMET).

lares de clara influencia mediterránea y los dos archipiélagos; térmicamente fue muy cálido en conjunto (especialmente en la mitad norte peninsular y en Canarias). Noviembre presentó unas lluvias muy desigualmente repartidas, fue muy húmedo en gran parte del territorio (especialmente en Castellón y norte de Valencia) a la vez que muy seco en gran parte del este y mitad sur peninsulares así como en las islas; en cuanto a las temperaturas fue un mes muy cálido (especialmente en el Levante y el valle del Ebro).

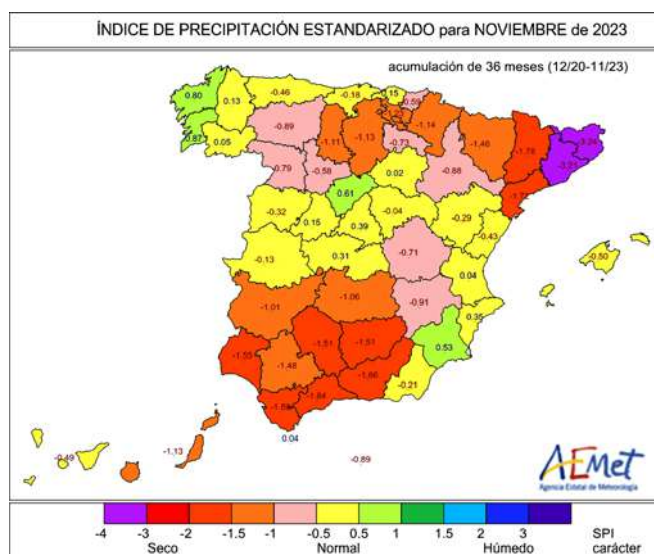


Figura 4. Índice de precipitación estandarizado (SPI) por provincias a 36 meses, calculado para el final de noviembre. Valores inferiores a -1 indican sequía meteorológica (fuente AEMET).

Los valores del índice de precipitación estandarizado calculados por provincias para el final de noviembre con un horizonte de 36 meses muestran que las provincias que presentaban sequía meteorológica eran: todas las andaluzas (salvo Almería), Badajoz, Ciudad Real, Palencia, Burgos, Álava, Navarra, Huesca, toda Cataluña (especialmente Barcelona y Girona) y las islas Canarias orientales (figura 4).

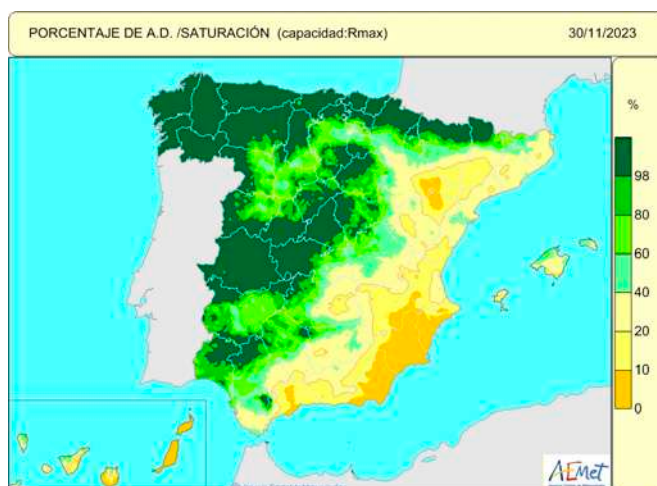


Figura 5. Porcentaje de agua disponible para las plantas respecto a la capacidad máxima de retención del suelo el día 30 de noviembre (fuente: AEMET).

Al finalizar el mes de noviembre los suelos estaban saturados o cerca de la saturación respecto a su capacidad máxima de retención de agua (en función de su profundidad y textura) en amplias zonas del norte, centro y suroeste peninsulares mientras que, por el contrario, estaban secos o casi secos en zonas del Valle del Ebro, sureste peninsular e islas de Lanzarote y Fuerteventura (figura 5).

Al finalizar noviembre el estado de la humedad de los suelos respecto al normal del periodo 1991-2020, considerando la capacidad de retención máxima de agua, los suelos tenían una humedad por encima del 200 % en zonas del centro peninsular (Segovia, Toledo) y en general por encima de lo normal en el centro y suroeste de la Península; por el contrario presentaba valores por debajo de los normales de la serie en las provincias de influencia mediterránea y en Canarias, especialmente en el sureste peninsular y en Lanzarote-Fuerteventura donde los valores estaban por debajo del 20 % respecto a la normal (figura 6).

La vendimia fue en general adelantada (por las altas temperaturas primaverales que iniciaron el ciclo pronto y por el riesgo de daños por sequía de verano) unos 7-15 días en Canarias, La Mancha, Madrid, Ribera de Duero, etc.; en Navarra y La Rioja fue de una precocidad histórica. La cosecha de uva para vino fue escasa pero de buena calidad. A finales de la primera decena de octubre la recolección en las viñas estaba acabando en el valle del Duero y Galicia a la vez que en la Rioja Alavesa se encontraba en su momento más intenso.

A primeros de octubre comenzó la recogida del arroz de grano redondo en Sevilla, la cosecha fue pequeña debido a que la situación climática hizo que se cultivase muy poca superficie respecto a la normal, no obstante en muchos cultivos se hizo uso del riego. A primeros de noviembre los días sin lluvia (aunque en muchas zonas con frecuentes nieblas matutinas) facilitaron la sementera de cereales y leguminosas. A mediados de este mes comenzó la recogida de naranja navelina en Andalucía

(la variedad y región más tempranas de esta especie en España). La cosecha de castaña fue de calidad y cantidad variable según las distintas zonas, aunque en general mala y en muchos lugares afectada por hongos patógenos.

La abundancia de lluvias en junio favoreció una gran producción de bellota en las encinas. En octubre comenzó la maduración de las bellotas pero además muchos ejemplares presentaron floración otoñal masculina y femenina (cosa relativamente frecuente en los alcornoques pero muy rara en las encinas). La misma situación de presencia simultánea de frutos y flores se produjo también en algunos piruétanos (peral silvestre -*Pyrus bourgaeana*-).

Los hábitats afectados por la sequía de verano no eran favorables para la fauna en general aunque ello fue muy variable según las distintas zonas geográficas e incluso distintos biotopos en una misma comarca. Así por

ejemplo sucedía con la codorniz y por lo tanto con su caza en media veda entre mediados de agosto y mediados de septiembre; su abundancia era muy variable pero mayor en las zonas más altas o frías además las polladas de codorniz y perdiz fueron adelantadas. En general, la primavera calurosa había adelantado los ciclos de vegetación y fauna pero la sequía hizo que la productividad fuese escasa no obstante en algunos lugares hubo situaciones favorables, por ejemplo tormentas tempranas moderadas, que favorecieron localmente a pastos y fauna.

Algunos ejemplares de grullas llegaron a España a mediados de septiembre y más aún a mediados de octubre pero el grueso de las llegadas este año se ha retrasado debido al buen tiempo en sus zonas del centro y este de Europa y a las borrascas que afectaban a España entre mediados de septiembre y mediados de octubre. Las primeras bandadas de grullas llegaron a Badajoz con el veranillo de San Martín (11 de noviembre) y a primeros de la tercera decena del mes el paso se intensificó por el centro peninsular.

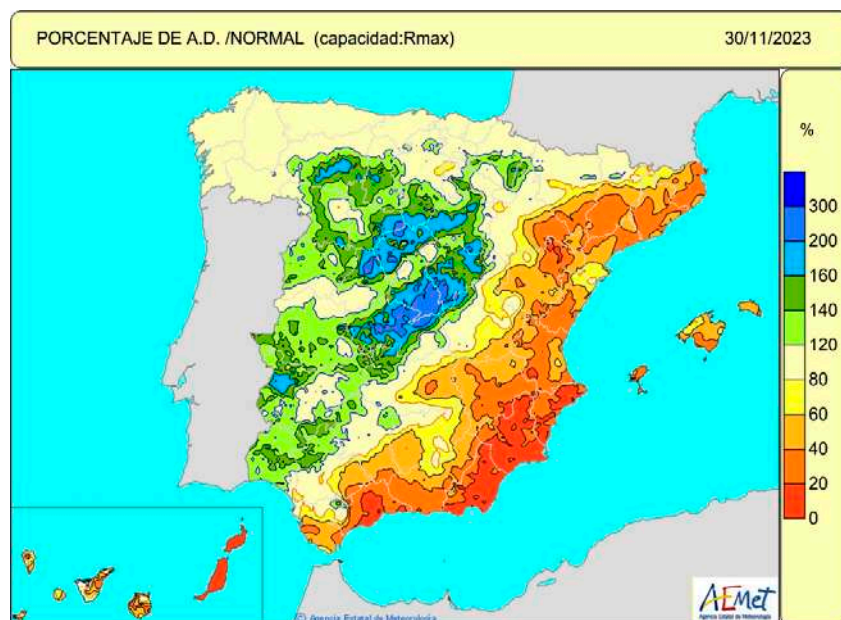


Figura 6. Porcentaje del agua disponible en el suelo respecto a la normal para la época (periodo 1991-2020) el día 30 de noviembre de 2023.

## Características agrarias y fenología

Las lluvias de principios de septiembre fueron beneficiosas para el campo en muchos lugares (por ejemplo, mejoraron la humedad edáfica en las viñas) pero en otros causaron daños al inundar el terreno unos días antes del inicio previsto para la recolección de la uva originando retrasos en la vendimia (por ejemplo, en Toledo y Madrid donde cayeron dos semanas antes).

El calor y la sequía de la primavera y verano dañaron en algunas zonas a cultivos de maíz y girasol; las aceitunas y las almendras en general fueron de poco calibre y en algunas zonas, para disminuir los daños por sequía, se recolectaron antes de las fechas normales, por ejemplo en Albacete, pero en otras la recolección se retrasó en espera de mejorar la cosecha aprovechando las lluvias de octubre, por ejemplo en Ciudad Real o la comarca turolense del Matarraña; la cosecha de aceituna en el conjunto del territorio fue escasa pero de buena calidad.



# METEOROLOGÍA DE LAS ISLAS CANARIAS

## Episodio de mar de fondo del sur en Canarias (del 9 al 16 agosto de 2023)

IRENE PEÑATE (AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA-AEMET) Y EDUARDO PORTILLO (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS-ITC)

Este caso de estudio está enmarcado en situaciones adversas de oleaje debidas a mar de fondo que afecta a las islas Canarias procedentes del Atlántico Sur

El último evento causó impacto en las costas sureñas de las islas entre los días 11 y 16 de agosto de 2023, incidiendo principalmente en Tenerife, El Hierro y Gran Canaria; Fuerteventura y La Gomera se vieron afectadas de manera menos acusada y La Palma en menor medida. Este episodio coexistió con una situación adversa que motivó la emisión de un aviso costero por viento generalizado del norte o nordeste (fuerza 7).

### 1.- Efectos socioeconómicos

Este tipo de oleaje suele producir incidentes como los reportados en el episodio analizado, entre los que destacan: pérdidas de vidas humanas por ahogamiento, personas en riesgo debido al estado de la mar, así como complicaciones respecto al tráfico marítimo. Además, si estos episodios significativos coinciden con mareas vivas, el problema se intensifica y agudiza aún más, ya que entonces implica afecciones a determinadas infraestructuras costeras. La figura 1 recoge las zonas de afección en comparación con otro episodio de

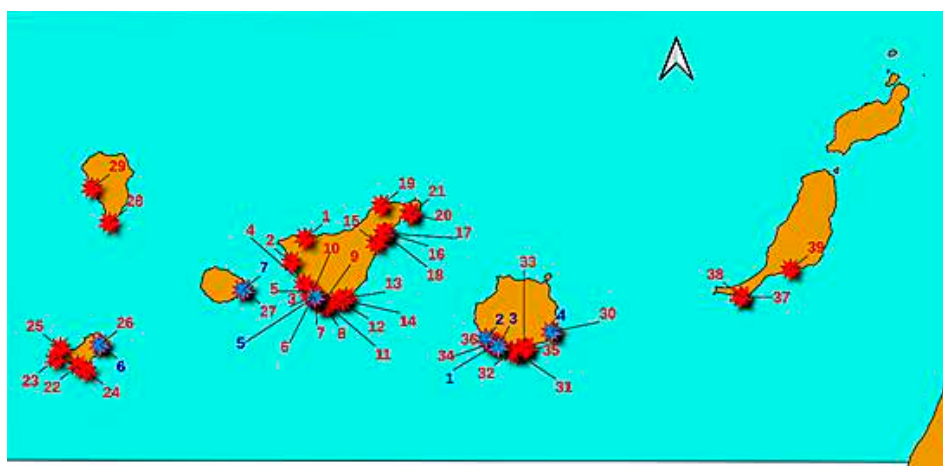


Figura 1. Zonas de afección de mar de fondo en Canarias. Comparación de eventos entre junio y agosto de 2023. Orlando Javier Pazos Machín (Aemet)

menor impacto que tuvo lugar en junio de 2023.

### 2.- Caracterización

Este mar de fondo tiene su origen en borrascas que se localizan en la zona del Atlántico Sur próxima a la Patagonia (entre 50-60° S) y que se dirigen hacia la zona ecuatorial, de forma que el fetch generador del mar de fondo apunte varios días hacia el estrecho pasillo inter-

hemisférico sur-norte, que configuran las costas de África y Sudamérica, por el que el mar de fondo alcanza las islas Canarias. Generalmente, los episodios más significativos tienen lugar a finales de primavera y verano (otoño e invierno austral). A pesar de ser un fenómeno poco frecuente, suele acontecer un evento considerable al año o cada dos afectando a las costas del sur, siendo prácticamente inofensivo en alta mar.

El oleaje del episodio ya se pudo detectar el día 2 de agosto tanto por la dirección de propagación de la borrasca generadora del mismo como por su potencia. Se realiza un seguimiento de su propagación durante 6 o 7 días antes de la incidencia de la situación adversa que comienza a manifestarse el viernes día 11 de agosto en las costas del sur de las islas más occidentales.

En la tabla 1 se muestra un resumen de los parámetros del oleaje para el periodo del 10 al 16 de agosto correspondientes a la boya Tenerife Sur de Puertos del Estado (<https://www.puertos.es/es-es>).

Las alturas de oleaje en esta boya suelen ser inferiores a los valores de la tabla en aguas profundas, donde se suelen ob-

Fecha	H (UTC)	Dm (°)	Dp (°)	Tm (s)	Tp (s)	Hx (m)	Hs (m)
10/08/2023	02	99	177	4.22	18.75	1.38	0.94
11/08/2023	00	131	214	5.31	16.41	1.97	1.41
12/08/2023	00	148	180	5.94	18.36	2.53	1.64
13/08/2023	00	167	200	7.66	16.99	<b>3.31</b>	<b>2.46</b>
14/08/2023	07	133	191	5.31	<b>18.75</b>	2.66	1.64
	08	151	203	5.47	<b>18.75</b>	2.06	1.29
	09	157	211	5.78	<b>18.75</b>	2.16	1.29
	16	118	197	5	<b>18.75</b>	2.41	1.78
15/08/2023	00	128	214	5.31	17.97	2.56	1.64
16/08/2023	00	122	186	5.47	15.43	2.72	1.88

Tabla 1. Parámetros del oleaje en la boya Tenerife Sur de Puertos del Estado para el periodo del 10 al 16 de agosto considerando para cada día: Tp ( periodo de pico del oleaje máximo en s), H (hora UTC), Dm (dirección media de procedencia del oleaje en °), Dp (dirección de pico del oleaje en °), Tm (periodo medio del oleaje en s), Tp (periodo de pico del oleaje en s) y Hs (altura significativa del oleaje en m), Hx (altura máxima del oleaje en m)

servar alturas significativas del orden de  $H_s \leq 1$  m. En la situación de estudio, en el día 13 se registró un periodo de pico máximo de unos 17 s y alturas significativas ( $H_s$ ) y máximas ( $H_x$ ) inusuales, de unos 3 m. El día 14 se observaron los periodos de pico más altos del episodio con valores máximos próximos a los 19 s, sin embargo, la altura significativa fue inferior a 2 m. El análisis de este episodio no muestra, al igual que para otros eventos estudiados, correlación entre los periodos más largos y las mayores alturas.

Además, este tipo de oleaje desarrolla fenómenos muy acusados de asomeramiento<sup>1</sup> que conllevan peralte<sup>2</sup> o aumento de la pendiente de las olas importantes en aguas someras. Esta es una característica del mar de fondo de largo recorrido y es más fácil observarla en pulsos procedentes del hemisferio sur. En algunas ocasiones se han observado en Canarias situaciones de mar de fondo generados en el Atlántico Norte aunque dichas situaciones no han sido objeto de nuestro estudio. Como ejemplo, se muestra en la fotografía de la figura 2 el oleaje con procedencia sur impactando en la playa de la Tejita, zona del Médano en el sur de Tenerife el día 13 de agosto.

Otro fenómeno a considerar es el de agrupamiento que, se manifiesta con un número de olas seguidas en las series que se estima por su observación entre 8 y 20. En ocasiones pueden existir hasta unos 20 minutos de calma total para seguidamente aparecer una nueva serie con un número anómalo de olas agrupadas. Esto revela la importancia y significancia de este oleaje que afecta a zonas costeras del sur de Canarias siendo, sin embargo, inofensivo e indetectable en aguas profundas. Además, estas zonas se encuentran al abrigo de los temporales y oleajes más frecuentes procedentes del Atlántico Norte. Sobre todo queremos destacar el elemento sorpresa y de peligrosidad en su ocurrencia. Esto es debido tanto al relativamente largo periodo de tiempo transcurrido entre series (que no hace presagiar el verdadero estado de la mar al usuario), como al elevado número de olas en cada serie. Se subraya la adversidad asociada a dichos eventos significativos, dados los daños principalmente

humanos que acontecen siempre con su ocurrencia.

Para el análisis del evento descrito en este artículo se realizó un estudio comparativo con otras situaciones de mar de fondo del sur afectando a Canarias desde el año 2014. Como resultado se concluyó la similitud en cuanto a parámetros de oleaje e incidencias con la acontecida en agosto de 2014 aunque la potencia de la de agosto de 2023 fue mayor.

### 3.- Comportamiento de los modelos:

En el análisis a partir de modelos numéricos se emplean salidas procedentes del modelo AEWAM (AEMET Wave Model) extraídas de AEWAM CY47R1-4km versión 1.2 de noviembre 2022. Se realiza un estudio comparativo respecto a salidas numéricas del modelo americano NUOPC (National Unified Operational Prediction Capability) ENSEMBLE desarrollado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el NWS (National Weather Service).

El modelo AEWAM reprodujo satisfactoriamente y con un periodo de predicción muy satisfactorio la llegada de este mar de fondo a las costas sur de las Islas, como lo muestran tanto las salidas de mar de fondo total como las componentes primaria, secundaria y terciaria. También reproduce correctamente las alturas significativas relativas a dicho oleaje.

La pasada del modelo de oleaje AEWAM del día 9 para el día 11 de agosto

mostraba mar de fondo total de dirección sur con periodos de pico entre 16 y 18 s en general para las costas del sureste de las Islas, a excepción de Lanzarote y Fuerteventura. La pasada del día 11 lo confirma (ver figura 3).

El análisis de salida de flujo de energía refleja la situación y da una idea de la intensidad con la que llega dicho oleaje a las islas incidiendo y causando más impacto entre los días 12 y 14 de agosto, como se esperaba. La figura 4 muestra la predicción para las 9 UTC del día 12 de la pasada del modelo del día 12 de agosto a las 00 UTC por unidad de longitud de cresta del mar combinado con valores de 44-48 kW/m al sur de las islas sobre una latitud de 25° N aumentando a 48-50 kW/m al sur de Tenerife.

Los días 15 y 16 de agosto coinciden con coeficiente de marea alto. Como consecuencia, existió un efecto de amplificación de los efectos, que provocó inundación de avenidas, como la de Arinaga en Gran Canaria, que ya había sufrido pequeñas invasiones por reboso del oleaje desde el día 12, o en carreteras en Tenerife.

Para la predicción de esta situación se considera esencial el estudio comparativo a partir de un informe de antecedentes de los distintos episodios significativos de este tipo de oleaje acontecidos en los últimos nueve años en las islas. Los incidentes resultantes de los mismos han sido correlacionados con los eventos de oleaje que los produjeron y se han clasificado según su adversidad (trabajo de



Figura 2. Oleaje con mar de fondo del sur. La Tejita (sur de Tenerife), 13 de agosto de 2023. Fotografía de Jairo Díaz Dévora.

<sup>1</sup> El asomeramiento (*shoaling* en inglés) es un proceso de amplificación o crecimiento de la altura de las olas que se desencadena cuando se propagan hacia aguas poco profundas. En él disminuye la celeridad de la onda y su longitud, al tiempo que la altura aumenta.

<sup>2</sup> El peralte (*steepness* en inglés) es un parámetro adimensional definido como la relación entre la altura de ola y su longitud de onda ( $H/L$ ). Físicamente proporciona información sobre la estabilidad de la onda.



### Periodo medio (color) y dirección media (vectores) del mar de fondo total

Elaborado el viernes 11-08-2023 00:00 | Previsto para el viernes 11-08-2023 15:00 (H+15)

Versión: CY46R1 | Límite 20 millas : — | Áreas de predicción (blanco) | Boyas (costeras ● / aguas profundas ●)

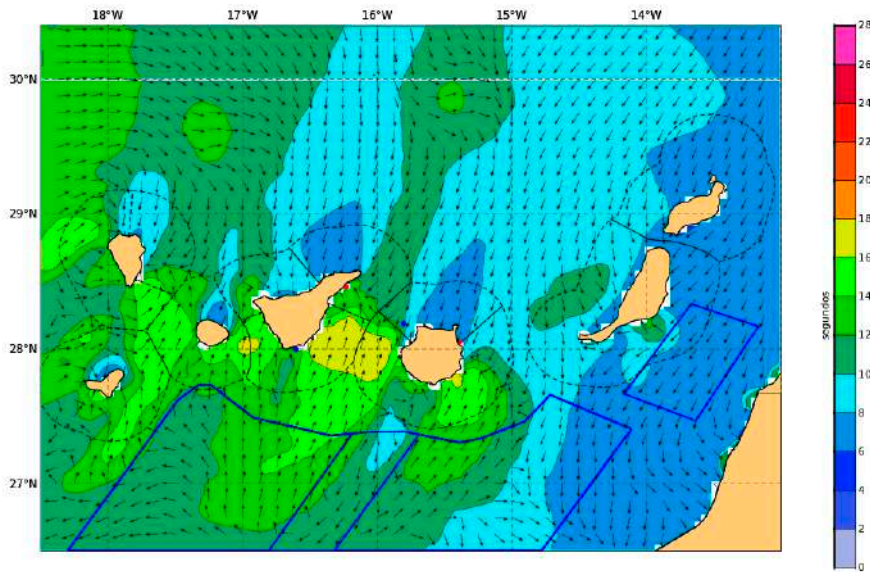


Figura 3. Mar de fondo total, pasada del modelo de oleaje AEWAM del día 11 de agosto de 2023 a las 00 UTC para el mismo día a las 15 UTC.

### Flujo de energía por unidad de longitud de cresta (color) del mar combinado

Elaborado el sábado 12-08-2023 00:00 | Previsto para el sábado 12-08-2023 09:00 (H+9)

Versión: CY47R1 | Áreas de predicción (blanco)

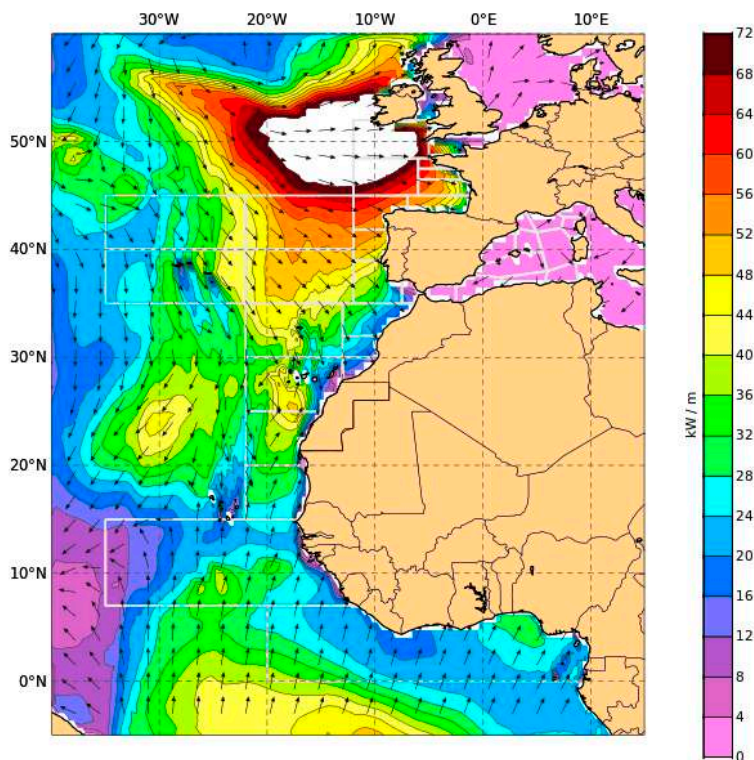


Figura 4. Flujo de energía por unidad de longitud de cresta del mar combinado previsto para las 9 UTC del día 12; pasada del modelo de oleaje AEWAM del día 12 a las 00 UTC

colaboración entre ITC y Aemet).

## Conclusiones

Se analiza y predice con un grado de acierto satisfactorio una situación ad-

versa de oleaje que afecta a costas sureñas de las islas Canarias provocadas por mar de fondo procedente del Atlántico Sur con diferentes máximos de potencia, duración de varios días, distintos picos

de fuerza y coeficientes de mareas variables. Para ello se emplea un estudio comparativo respecto a otras situaciones, en particular la acontecida en agosto de 2014, que dio lugar a un impacto similar. Por otro lado, para el análisis de la situación se consideran salidas numéricas de otros modelos de oleaje, como el modelo americano.

Desde el día 9 de agosto el modelo de oleaje ECWAM detecta la dirección sur, los periodos de pico y la energía asociados a la situación. Se concluye que está asociado a mayor potencia y, por tanto, a mayor adversidad que la contribución del originado por mar de viento de dirección norte.

El seguimiento de las borrascas precursoras de dicho oleaje, generadas en el hemisferio sur, entre 50° - 60° S permite una alerta temprana de estos eventos significativos.

Se propone analizar las reactivaciones de este tipo de oleaje en aguas someras, en función de la batimetría, y delimitando su dirección de incidencia, a partir de salidas de modelos numéricos que incorporen su potencia y resalten aquellas áreas afectadas por periodos de pico largos (entre 16 y 22 s). De este modo, se incorporarían mejoras en la detección de los fenómenos costeros adversos relacionados con mar de fondo procedente del Atlántico Sur que afectan a las Islas, estimando el grado de intensidad o energía con que incide y, por tanto, la medida de su adversidad, incorporando un umbral de alerta específico en su predicción. También sería de interés realizar un estudio más profundo tomando como referencia el espectro frecuencial del oleaje asociado al registro de boyas en el entorno de Canarias durante cierto intervalo de tiempo. Como limitación habría que tener en cuenta la escasez de boyas direccionales incorporadas a la red de observación del área de estudio.

## Agradecimientos

A David Quintero Plaza (Aemet) por su aportación en cuestiones de análisis y estudio de situaciones, a Ernesto Barrera Rodríguez (Aemet), Francisco J. Bello Millán (Aemet) y Germán A. Rodríguez Rodríguez (ULPGC, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria) en relación a conceptos y a Orlando Javier Pazos Machín (Aemet) por las suyas de edición y corrección.

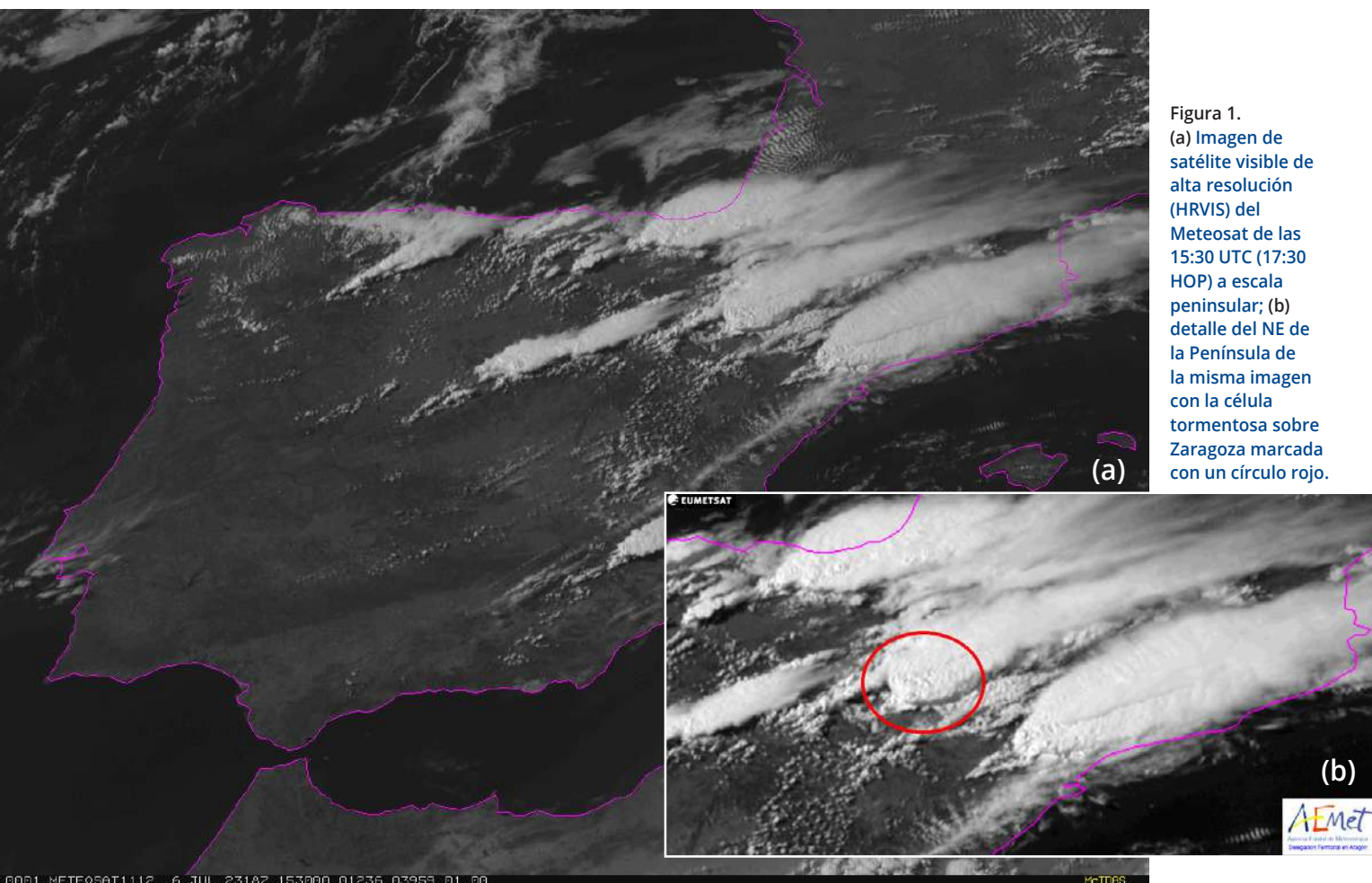


Figura 1.  
(a) Imagen de satélite visible de alta resolución (HRVIS) del Meteosat de las 15:30 UTC (17:30 HOP) a escala peninsular; (b) detalle del NE de la Península de la misma imagen con la célula tormentosa sobre Zaragoza marcada con un círculo rojo.

## Las inundaciones del 6 de julio de 2023 en la ciudad de Zaragoza

RAFAEL REQUENA

**D**urante la tarde del 6 de julio de 2023 una serie de tormentas afectaron a Zaragoza capital y a otras localidades de Aragón (ver artículo sobre las tormentas en el Bajo Aragón en este número de la revista). Una tromba de agua torrencial anegó varias zonas de la ciudad dejando a numerosas personas atrapadas en sus vehículos, lo que obligó a la intervención de bomberos

y de equipos de buceadores. La estación meteorológica automática (EMA) de Zaragoza, Valdespartera (9434P), de AEMET ubicada en el barrio de Valdespartera, al sur del casco urbano registró una precipitación de 54.2 l/m<sup>2</sup> en un periodo máximo de 50 minutos, 53.8 l/m<sup>2</sup> de los cuales se recogieron en un máximo de 40 minutos. Se alcanzó una Intensidad máxima de precipitación de 117.6 mm/h a las 16:20

UTC (18:20 hora oficial peninsular; HOP), dejando constancia del carácter torrencial de esta precipitación.

En la tabla se muestra el comportamiento de diferentes variables meteorológicas observadas en dicha estación:

La inundación fue causada por una tormenta convectiva, probablemente una supercélula, con yunque alargado con forma de U con vértice en su flanco sudoeste (a barlovento del flujo de aire en niveles altos) que se puede observar en la imagen visible del Meteosat de las 15:30 UTC (17:30 HOP) en la figura 1.

Previamente, a las 15:15 UTC, poco antes de empezar a llover en Zaragoza, el radar de AEMET registraba en la tormenta señales de muy alta reflectividad, mayores de 60 db, en color naranja en la figura 2, mientras se registraban numerosos rayos que se presentan en color magenta en dicha figura.

Fecha/hora UTC	T (°C)	HR (%)	PREC (mm)	Imáx (mm h <sup>-1</sup> )
06/07/2023 15:40	27.3	52	0.0	0
06/07/2023 15:50	19.0	83	15.6	93.6
06/07/2023 16:00	19.1	90	11.6	69.6
06/07/2023 16:10	17.9	90	7.0	42
06/07/2023 16:20	17.2	90	19.6	117.6
06/07/2023 16:30	17.3	91	0.4	2.4
06/07/2023 16:40	17.6	91	0.0	0

Tabla 1 Valores diezminutales de temperatura, humedad relativa, precipitación en 10 minutos e intensidad de precipitación registrados en la EMA de Valdespartera de AEMET.



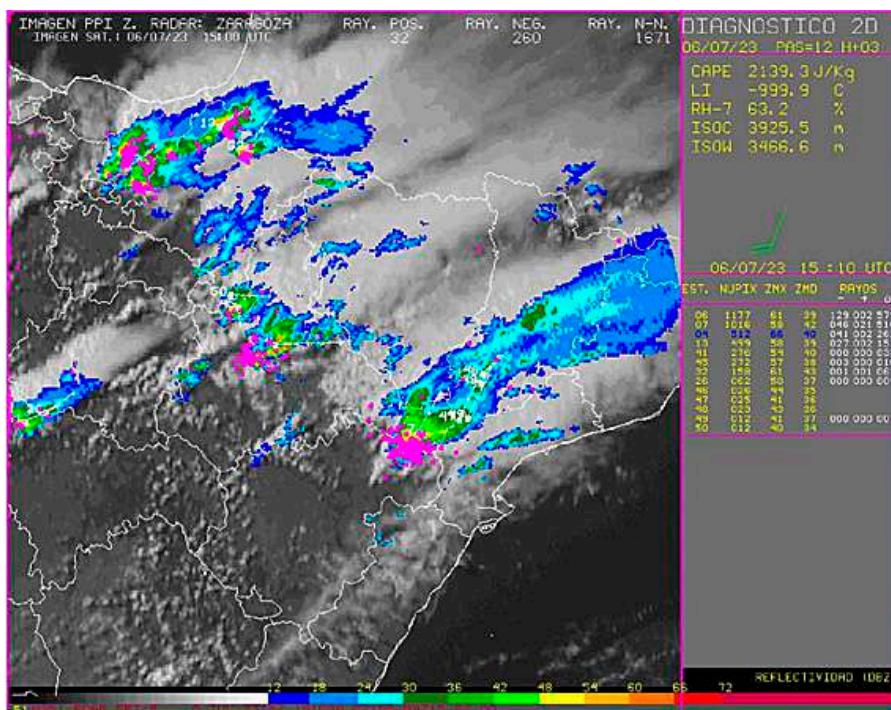


Figura 2. Imagen de reflectividad radar de las 15:15 UTC (17:15 HOP) superpuesta sobre imagen visible del satélite Meteosat y, sobre ellas, en magenta, las descargas eléctricas. A pesar de la alta reflectividad de la imagen sobre Zaragoza (>60 db) todavía a esa hora no había empezado la precipitación intensa que quedó registrada después en la estación de Valdespartera.

Figura 3. Precipitación diezminutal registrada durante el episodio. En rojo los registros de carácter torrencial.

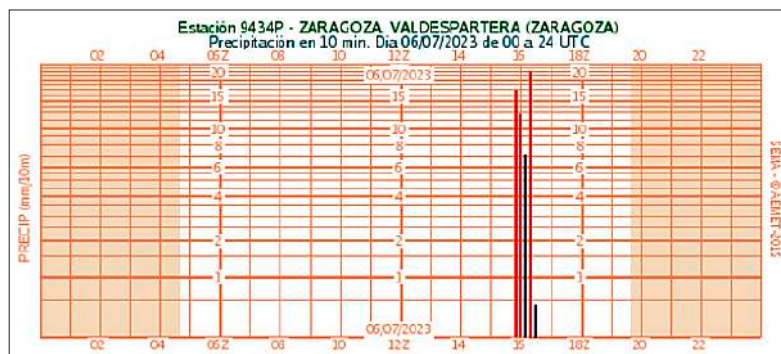
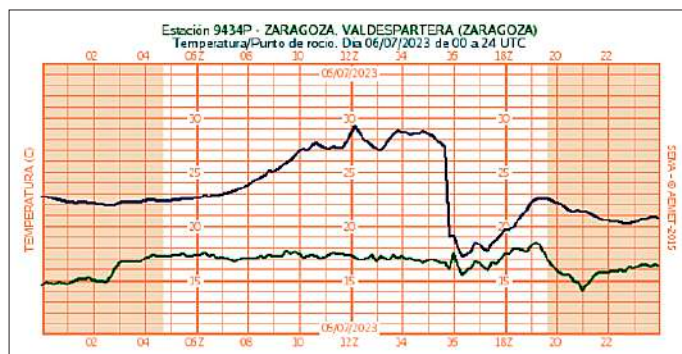


Figura 5. La humedad relativa del aire en superficie aumenta casi un 40 % al comienzo de la precipitación.

En las gráficas de la EMA de Valdespartera se observa durante el evento:

- el carácter torrencial de la precipitación durante la mayor parte del episodio (figura 3);
- una disminución de temperatura de unos 8 °C en diez minutos debida a la corriente fría descendente que arrastraba la precipitación (figura 4);
- que la corriente descendente tenía una humedad relativa del 90 % al alcanzar la superficie, lo que hizo aumentar la humedad relativa junto al suelo en un 40 % (figura 5);
- el impacto de la masa de aire frío contra el suelo originó un aumento del viento con rachas fuertes, alcanzando el valor de 92 km/h a las 15:50 UTC (figura 6).

Figura 6. Racha de viento de 91.8 Km/h de dirección 340° a las 15:50 UTC (17:30 hora local o HL).



# El índice SPI y la ecología de la sequía

RAMIRO ROMERO FRESNEDA Y JUAN ANTONIO DE CARA GARCÍA. AEMET

El agua es un elemento imprescindible para la vida y, por tanto, la precipitación es un factor climático fundamental en los ecosistemas de un territorio: agrarios, forestales y acuático-terrestres. Los largos periodos sin precipitación son la causa de los diferentes tipos de sequía y ello origina diversos problemas en la ecología de campos y montes, en la producción agroforestal y en la actividad del mundo rural.

## Definición de sequía y sus tipos

La sequía es un fenómeno climático caracterizado por una deficiencia prolongada de lluvias, lo que lleva a una escasez de agua en comparación con la cantidad normal esperada en una región específica. Según el documento "Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros" (OMM, 2006) la sequía se diferencia de otros fenómenos naturales extremos porque no existe una definición precisa ni universalmente aceptada. Por ello, el concepto de sequía puede enfocarse desde distintas perspectivas disciplinares y ha dado lugar a lo largo de la historia a diferentes definiciones de sequía que en general han estado relacionadas con los sectores que pueden verse afectados, ya que en ocasiones su impacto puede ser devastador. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define varios tipos de sequía según sus efectos y manifestaciones:

**Sequía meteorológica:** se produce cuando hay un déficit de precipitación en comparación con el promedio histórico para una región específica durante un período determinado. Este tipo de sequía da origen a las restantes y normalmente suele afectar a zonas de gran extensión.

Los siguientes tipos de sequías, las sequías agrícola, hidrológica y socioeconómica, sin embargo, se caracterizan en mayor medida por sus facetas humanas o sociales y su definición refleja la interacción entre las características naturales de las sequías meteorológicas y las actividades humanas que dependen de la precipitación para proporcionar un abastecimiento de agua que permita cubrir las demandas de la sociedad y del medio ambiente.

**Sequía agrícola:** se define habitualmente en términos de disponibilidad de agua en los suelos para el sostenimiento de los cultivos y para el crecimiento de las especies forrajeras. Ocurre cuando la escasez de agua afecta a los suelos y las reservas de agua subterránea, lo que impacta negativamente en la agricultura. Este tipo de sequía puede causar pérdida de cultivos, disminución de la producción agrícola y escasez de alimentos.

**Sequía hidrológica:** se produce cuando la disminución de las precipitaciones conduce a una disminución de los niveles de agua en ríos, embalses, lagos y aguas subterráneas. Es un concepto todavía más independiente del déficit de precipitación ya que suele definirse como la disminución en las disponibilidades de aguas superficiales y subterráneas en un sistema de gestión durante un plazo temporal dado, respecto a los valores medios, que puede impedir cubrir las demandas de agua al cien por cien. Esta sequía afecta el suministro de agua para usos domésticos, agrícolas e industriales, generando problemas en el abastecimiento de agua potable y en la gestión de recursos hídricos.

**Sequía socioeconómica:** se diferencia notablemente de los demás tipos de sequía porque refleja la relación entre la oferta y la demanda de mercancías básicas, como lo son el agua, la energía hidroeléctrica o los piensos para suplementación del ganado, que dependen de las precipitaciones. La oferta varía anualmente en función de la precipitación o de la disponibilidad de agua. La demanda fluctúa también y suele tender al alza debido, entre otros factores, al aumento de la población o al desarrollo.

La OMM también señala que la sequía puede clasificarse según su duración, desde sequías a corto plazo (por ejem-

plo, sequías estacionales) hasta sequías prolongadas que pueden abarcar varios años.

Estos diferentes tipos de sequía pueden tener impactos significativos en la agricultura, la seguridad alimentaria, los recursos hídricos, la salud humana y los ecosistemas. La monitorización, la gestión y la planificación son fundamentales para mitigar los impactos adversos de la sequía en las comunidades afectadas.

## Los índices para evaluar la sequía

Hay que evaluar la intensidad de la sequía en general y su riesgo desde distintos puntos de vista (meteorológico, agrario, hidrológico y socioeconómico). Se estudia el déficit pluviométrico respecto al normal y se analizan los valores de diferentes índices de sequía, los más conocidos y frecuentemente utilizados (desde el punto de vista climático) son: el índice de severidad de la sequía de Palmer (PDSI), el porcentaje de precipitación normal (PPN), el índice de riesgo de sequía (IRS), el índice de precipitación estandarizada (SPI), el índice de suministro de agua superficial (ISAS/SWSI), el indicador de la humedad de cultivo (CMI) y el potencial agro-hidrológico (AHP).

Para evaluar el estado del campo en términos de sequía agraria (en tiempo casi real), se estudian los índices de vegetación obtenidos por el análisis multitemporal de imágenes de satélite basado en el cálculo de parámetros por operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El índice de vegetación más utilizado es el NDVI (índice de vegetación normalizado) que se puede mejorar con los índices: EVI, SAVI, ARVI, GCI y SIPI. El NDVI da una idea de la actividad vegetativa (metabólica), del vigor de las plantas, e indirectamente del estrés hídrico o presión fisiológica por sequía.

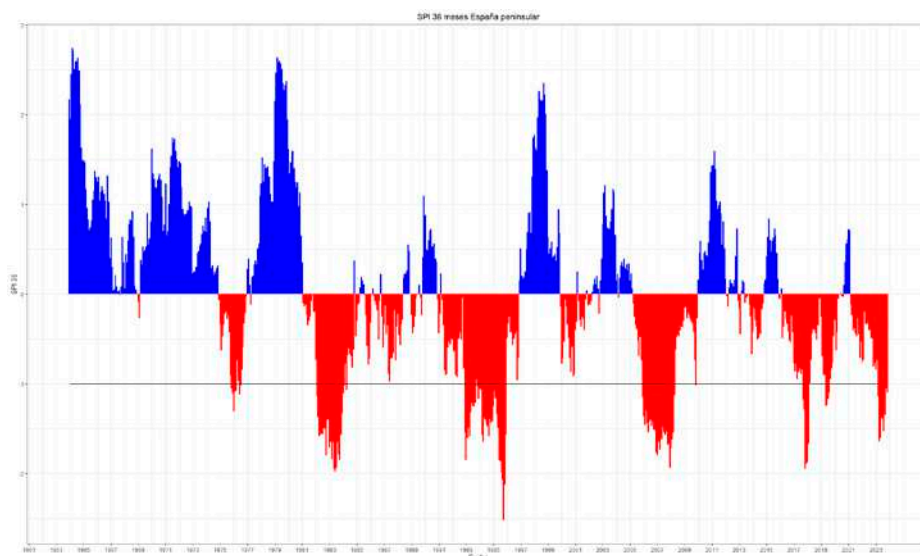


El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) proporciona una estimación de la cantidad y estado de la vegetación en áreas extensas por su “grado de verdor” (biomasa fotosintéticamente activa). Además se ha estudiado la variación de dicho índice con los años de sequía. La anomalía del NDVI se puede usar como identificador de sequía. El NDWI (índice diferencial de agua normalizado) se usa para localizar superficies de agua y terrenos húmedos o saturados (suelo-vegetación) y en general la presencia de agua, lo que es útil para prevenir y controlar el estrés hídrico. El NDDI (índice de sequía diferenciada normalizada) presenta valores más altos cuanto más severa o extrema sea la sequía. El MSI (índice de estrés hídrico) se utiliza para el análisis del estrés en la *canopy* (el dosel) y una aproximación a la predicción de la productividad. El SAVI (índice de vegetación ajustado el suelo) se utiliza para corregir el NDVI por la influencia del brillo del suelo en áreas donde la cobertura vegetativa es baja. Con los índices de vegetación se identifican fácilmente áreas de suelo desnudo, superficies acuosas y vegetación activa (con distinta intensidad) pero la interpretación del estado del campo a partir de los índices de vegetación es objeto de polémica entre seguros agrarios y usuarios agrícolas, ganaderos y forestales.

## Índice de sequía estandarizado (SPI)

Las precipitaciones en España se caracterizan por presentar una distribución irregular tanto espacial como temporal, por lo que conviene analizar los períodos en los que a lo largo del año el déficit de precipitaciones acumuladas pueda haber provocado períodos de sequía meteorológica. Como vimos anteriormente, la definición del concepto de sequía es complejo, dado que existen distintas definiciones según el sector al que pueda afectar (agrícola, hidrológica, económica, etc.). Nos referimos en este apartado a la sequía meteorológica, que estudia exclusivamente el comportamiento de la precipitación sin tener en cuenta otros factores.

El índice SPI se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipi-



**Figura 1. Sequías históricas en la España peninsular a partir del SPI acumulado a 36 meses.**

**Tabla 1. Eventos y períodos de sequía**

	Periodo de sequia
<b>Eventos de larga duración e intensidad</b>	<b>Sequía 1982-1984</b>
	<b>Sequía 1991-1996</b>
	<b>Sequía 2005-2009</b>
	<b>Sequía 2017-2020</b>
<b>Eventos de menor duración</b>	<b>Sequía 1975-1976</b>
	<b>Sequía 1987-1988</b>
	<b>Sequía 2000-2001</b>
	<b>Sequía 2023</b>

tación caída a lo largo del período 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. De este modo se define una escala de valores que se agrupa en tramos relacionados con el carácter de la precipitación.

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 período 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. A través del uso del índice SPI es posible cuantificar y comparar las intensidades de los déficits de precipitación entre zonas con climas muy diferentes y tiene la propiedad de que puede integrarse sobre un amplio rango de escalas temporales, lo que hace que pueda ser utilizado como indicador de diferentes tipos de sequía, tanto aquellas que son de corta duración y que producen efectos principalmente sobre los sectores agrícola, forestal y pecuario, como para caracterizar sequías

climáticas de larga duración conducentes a sequías hidrológicas.

Debido principalmente a su situación geográfica, España presenta una elevada variabilidad interanual de la precipitación, lo que hace que se produzcan numerosos episodios de sequía meteorológica y que éstos tengan una severidad destacada pudiéndose ver afectadas grandes regiones del territorio. Para sequías persistentes y de larga duración es conveniente usar el cálculo del SPI con una acumulación de 36 meses, con lo que si observamos la gráfica de los valores de este índice para la España peninsular durante el periodo que comprende desde el año 1961 hasta el 2023, se aprecian los siguientes eventos que pueden reconocerse en la imagen 1 y se clasifican como se indica en la tabla 1.

## La falta de agua en los ecosistemas agrícolas y forestales

En la península ibérica y Baleares, los períodos de sequía a lo largo de la historia son propios del clima, especialmente en las zonas caracterizadas por el am-

## El índice SPI y la ecología de la sequía

biente mediterráneo, que precisamente se define por tener un periodo de déficit de precipitaciones en relación a la evapotranspiración potencial al menos durante el verano. Por ello, en el campo español es clásico el término de “la pertinaz sequía”; además, la variabilidad interanual de la intensidad y duración de este fenómeno es muy grande, solamente en el litoral galaico-cantábrico y en las montañas de la región biogeográfica eurosiberiana la sequía es algo muy poco frecuente a lo largo de las décadas. No obstante, en lugares como los Ancares, Degaña, Roncesvalles o Salient de Gállego, en términos promedio de datos de treintenos no se detecta sequía, pero sí en años concretos. La precipitación ibérica (sobre todo de clima mediterráneo) es muy irregular en datos interanuales e intraanuales, de forma que también son frecuentes los chubascos torrenciales, sobre todo en otoño, o ligados a tormentas estivales. Otra característica del ambiente mediterráneo desde la prehistoria es el fuego (por causas naturales o antrópicas) y en gran medida la deforestación y el sobrepastoreo. Todo ello, unido a la complejidad topográfica y en muchos casos terrenos pedregosos o al menos con suelos muy pobres, hace que la gestión agroforestal del agua sea compleja y problemática.

En el campo la falta prolongada de precipitaciones implica la disminución o pérdida de caudal de ríos y arroyos, la desaparición de manantiales, charcas y balsas, el descenso del nivel freático y la pérdida de humedad edáfica.

La sequía agrícola, siempre es un problema, mayor o menor (en función de la intensidad y duración, así como de los distintos requerimientos de cada especie) que sobre todo afecta a los cultivos de secano y a la ganadería extensiva o semiestabulada (cuyos costes de producción se encarecen por necesitar suplementación de piensos y a veces transporte de agua en cisternas). En los cultivos es necesario que el agua edáfica esté disponible en el momento adecuado, cuando por su estado fenológico puede ser un factor limitante (floración, cuajado, crecimiento, y maduración).

La precipitación debe caer en el momento oportuno de forma que moje el suelo antes de que la planta necesite el agua y no caer en las fechas en las que

dificulta las labores agrícolas y la entrada de maquinaria en los campos embarrados y encharcados: los periodos de siembra y recolección. La lluvia (y mucho más el granizo) es inoportuna durante la floración pues puede romper flores, producir un lavado de polen o impedir el vuelo de los insectos polinizadores. En muchas ocasiones, si se entra en la primavera tras un largo periodo sin precipitaciones (invierno, u otoño-invierno) se dejan de sembrar cultivos de primavera-verano ante la falta de tempero del suelo que dificultará el previsible desarrollo y crecimiento del cultivo (máxime ante la perspectiva del verano) y además esos suelos endurecidos complican y encarecen las labores.

Si la sequía llega a ser hidrológica y el nivel de los embalses disminuye de forma importante, los cultivos de regadío también son afectados pues muchas veces se decreta la reducción parcial o total del riego. En el medio natural, los animales silvestres (la caza y la fauna protegida) sufren una merma poblacional o realizan pequeños desplazamientos o fugas buscando mejores pagos ante la falta de pasto y bebederos.

En el caso de la vegetación, la sequía fisiológica (*physiological dryness*) consiste en un desequilibrio hídrico (estrés hídrico, una tensión fisiológica) entre la pérdida de agua por transpiración (mayor cuanto más seco está el aire que la rodea) y la ganancia de agua edáfica por absorción radicular. La sequía fisiológica se debe a un tiempo prolongado de suelo seco al nivel de las raíces, fenómeno que se ve agravado por el aire cálido-seco. En zonas de montaña o en latitudes altas el suelo helado también puede ser causa de sequía fisiológica al permanecer el agua en forma sólida no utilizable por las raíces. Las situaciones de déficit hídrico continuado provocan modificaciones en los parámetros relativos a la función en ecosistemas forestales (producción y flujos de agua y nutrientes) así como cambios en la estructura poblacional por selección por debilitamiento de árboles vulnerables a ataques de patógenos y plagas.

En el sistema suelo-planta-aire el agua fluye del suelo al aire atmosférico directamente por evaporación o a través de la planta por absorción radicular, ascenso de savia por el xilema y transpiración

por los estomas de las hojas. La absorción de agua por las raíces se detiene al alcanzarse el punto de marchitamiento (o de marchitez permanente) en el que se llega a un nivel de humedad edáfica mínimo a partir del cual la planta no puede extraer agua (aunque algo haya) y no se recupera de la pérdida hídrica que se produce por transpiración. Las plantas pierden humedad también por respiración, incluso con humedad relativa del aire del 100 %. En casos de sequía extrema los árboles pueden sufrir daños estructurales incluso en las especies más resistentes.

En ambientes áridos o mediterráneos con un periodo de sequía pronunciado, con escasez de lluvias y temperaturas altas en verano, en la vegetación natural dominan plantas con ciertas adaptaciones morfológicas: estomas hundidos, más abundantes en el envés que en el haz, pilosidad foliar, recubrimientos con cutículas duras por revestimientos con ceras (vegetación esclerófila); además las plantas tienen la capacidad de cerrar los estomas en los momentos del día de mayor demanda de transpiración. Otra estrategia frente a la sequía es la producción durante la noche de aceites aromáticos que se liberan durante el día para embadurnarse y así “refrescarse al dificultar la pérdida de agua” (romeros, jaras, lavandas, orégano, tomillos, albahaca, palmito, laurel, así como los pinos piñonero, carrasco y resinero).

Los efectos de la sequía son más perjudiciales en masas arboladas densas que en las fragmentadas debido a la competencia por el agua entre ejemplares. Las especies más tolerantes a la sequía muestran menor descenso de transpiración foliar y decrecimiento de biomasa; de forma que la sequía produce menos daños en formaciones de dehesa que en montes densos.

No obstante, el campo ibérico-balear tiene una gran capacidad de respuesta a la sequía debido a que esta es parte importante de la historia de clima en ambientes mediterráneos y submediterráneos. Es frecuente que una primavera tardía “verde” suceda a una primavera temprana seca y agostada; otras veces tras un periodo fuerte de sequía de primavera-verano-otoño, el pasto y la vegetación leñosa se recuperan con fuerza tras las primeras lluvias otoñales. En



otoño brota y crece el pasto y florecen las especies vegetales serotinales (de floración otoñal), las cuales son plantas de día corto (cuya floración se estimula por las noches cada vez más largas) o neutras. Es el caso por ejemplo del avellano (*Corylus avellana*), el madroño (*Arbutus unedo*), algunos matorrales de tojos, brezos y tomillos, y muchas especies herbáceas.

Es frecuente y sorprendente la capacidad de recuperación de la vegetación mediterránea tras largos periodos de sequía. Tras un evento extremo de sequía se observa en algunos *quercus* (como la encina, *Quercus ilex*) que en el siguiente periodo vegetativo los árboles más afectados con daños muestran (respecto a los más sanos) una gran capacidad de rebrote y un retraso de fenofases primaverales; disminuye la reproducción sexual (menos pies florecen) en favor del crecimiento y la reproducción vegetativa (R. Benavides, A. Lázaro, F. Valladares, 2011). Parece ser que en especies arbustivas, la estrategia dominante tras los eventos de sequía intensa es una mayor inversión de energía en reproducción con un adelanto de las fases para favorecer la floración y maduración de frutos en previsión de un empeoramiento de las condiciones ambientales climáticas (Matesanz *et al.*, 2009).

En España las especies arbóreas más adaptadas a la sequía son las de clima mediterráneo con verano muy cálido y seco: acebuche y olivo, palmito, algarrobo, coscoja, encina, almendro, pinos carrasco y piñonero (en menor medida alcornoque y pino resinero); en general en gran parte del paisaje ibérico-balear dominan las especies xerófilas, adaptadas a lugares secos por ser más o menos resistentes a la sequía, a largos periodos sin precipitación.

En los años con buena disponibilidad de humedad, corto periodo de vegetación agostada y abundancia de insectos, algunas especies de aves realizan más puestas de huevos. La golondrina común suele poner dos puestas, pero si hay sequía acusada pone una y si, por el contrario, el campo está en buenas condiciones pueden poner tres y en este caso la fecha de partida al final del verano se retrasará por no haber completado el ciclo de reproducción y cría. Si el verano es muy seco y hay escasez de

agua y alimento las aves pueden hacer fugas de tempero a biotopos más altos o umbríos o a comarcas próximas con temperie más adecuada.

El conejo de monte puede alcanzar un celo viable con parideras adecuadas en las cuatro estaciones del año en número variable según la distribución y abundancia de lluvias de la que depende la disponibilidad de pasto, siempre que las temperaturas no sean muy bajas. La época más favorable para la preñez y partos es la primavera pero en las distintas regiones y años puede haber parideras en invierno y a finales de junio.

Los años con lluvias prolongadas en verano originan una explosión de las poblaciones de conejo, cordorniz, topillos, etc. que producen daños en la agricultura, además se favorece la *tularemia* de las liebres y conejos (enfermedad infecciosa bacteriana). En otoño, si las lluvias son tempranas y sostenidas, se produce la otoñada por el rebrote de pastos herbáceos vivaces y el verdeo de siembras de cereales, maíz o soja (que se suele sembrar como forraje para el ganado en época de escasez). Si las primeras lluvias de otoño no son seguidas de otras el campo se pudre y la crisis de pastos es mayor; la otoñada de pastos no existe en todos los lugares ni es todos los años igual.

Tras las primeras lluvias de otoño "*al lomo mojado*" se produce la berrea de los ciervos, a finales de agosto por el norte o mediados de septiembre (o primeros de octubre) por el sur peninsular; una berrea tardía en un lugar es consecuencia de poco pasto y de lluvias otoñales tardías.

Los árboles caducifolios cambian de color en otoño reabsorbiendo clorofila y otras sustancias antes de la caída de las hojas al percibir la señal ambiental de la bajada de temperaturas y el acortamiento del periodo de luz diario. A veces, si el verano y el comienzo del otoño son más cálido-secos de lo normal, el cambio de color se adelanta de fecha por estrés debido a la falta de agua edáfica. En este caso en el campo se observa que los ejemplares que no tienen escasez de agua por estar situados próximos a un arroyo o en una topografía y geología favorables a la retención de humedad retrasan el cambio de color debido a las altas temperaturas, pero si se encuentran en un suelo seco adelantan

las fechas de cambio de color debido al estrés hídrico.

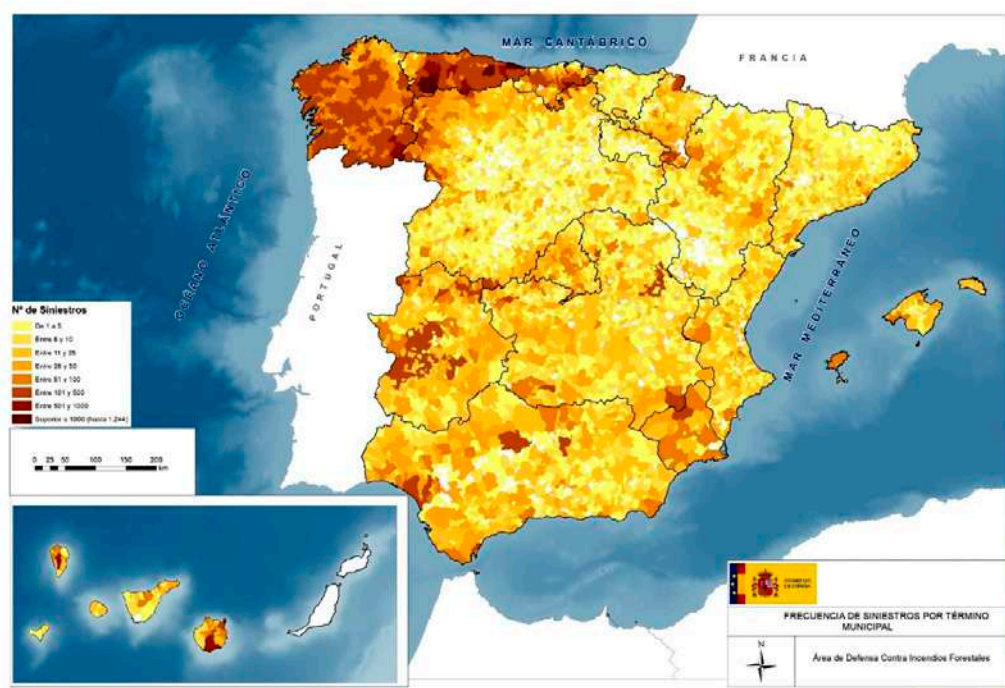
## La sequía y las enfermedades de la seca y la grafiosis

En las especies forestales la escasez de agua edáfica afectando a árboles y arbustos se detecta en primer lugar por la pérdida de turgencia de las hojas, si la situación persiste se llega a la coloración amarillenta, parda o rojiza de las mismas y en ocasiones más extremas se alcanza el puntisecado de los extremos de las ramas de la copa, incluso se puede marchitar el conjunto del árbol y hasta morir.

El fenómeno de la seca consiste en un decaimiento del arbolado, una pérdida de vigor, sobre todo de encinas y alcornoques, pero también de castaños, robles, quejigos, almendros, olivos y pinos. Es un problema importante de sanidad forestal en el sur de España debido a la combinación de la acción de un agente patógeno, un hongo (*Phytophthora cinnamomi*, *Hypoxylon mediterraneum* = *Biscogniauxia mediterranea*, etc.) que provoca la pudrición de las raíces impidiendo la absorción de agua, agravada en tiempos de sequías extremas; a veces con la implicación además de plagas de insectos defoliadores como: la lagarta peluda (*Limantria dispar*) o la palomilla verde (*Tortrix viridana*); el resultado final es el chancro o seca. Cuando no hay sequía, los árboles responden al patógeno con reducción de producción de biomasa (y los árboles se recuperan tras el primer ciclo de infección) pero cuando hay importante déficit hídrico los árboles pueden llegar a morir. El fenómeno destructor de la seca se debe a una combinación de factores genéticos, climáticos y selvícolas.

En el caso de los olmos, la mayor parte de los ejemplares provienen de clones introducidos en tiempos de la cultura romana y la falta de variabilidad genética los ha hecho muy sensibles a la enfermedad de la grafiosis que ha provocado la práctica desaparición de las olmedas. La grafiosis es una enfermedad de los olmos que resulta de la interacción de cuatro componentes: el olmo (*Ulmus sp.*), un hongo (*Ceratocystis ulmi*), un escarabajo vector (*Scolytus sp.*) y el ambiente. La sequía y la disminución

## El índice SPI y la ecología de la sequía



**Figura 2. Número de siniestros de incendio forestal por municipio en el periodo 2006 - 2015 desde el rango de 1 - 5 hasta el de > 1000 (1244). Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.**

de la capa freática debilitan a los olmos, los predisponen a la enfermedad de la grafiosis, además la población de escolítidos se dispara.

La sequía en general debilita al arbolado forestal o agrícola y lo hace más sensible a plagas y enfermedades. Los hongos necrotróficos (por ejemplo, el chancro del castaño, *Cryphonectria parasitica*) y los vasculares (por ejemplo, la grafiosis de los olmos, *Ceratocystis novo-ulmi*) atacan los sistemas de almacenamiento y transporte de nutrientes y agua de los árboles en sequía intensa acelerando su muerte.

### Sequía y riesgo de incendios forestales

Los incendios forestales han sido un factor ambiental natural sobre el paisaje vegetal ibérico sobre todo mediterráneo; además el fuego ha sido un agente antrópico en la gestión histórica del territorio para crear claros y ver al enemigo en las guerras y como herramienta para hacer rozas enriqueciendo la tierra y creando espacios agropecuarios. El bosque y el monte son un recurso renovable que produce bienes en forma de madera, leña, frutos, caza, resina, corcho, etc. pero también crea paisaje, microclima, regulación hidrológica, etc. por lo que se trata de conservar el monte y prevenir el incendio evitando daños

económicos y ecológicos.

El inicio y evolución del incendio depende de ciertos factores: temperaturas altas, humedad relativa baja, suelos secos, viento moderado o fuerte, topografías abruptas de barrancos y fuertes pendientes, cobertura arbórea y de matorral, presencia de especies altamente inflamables, las tormentas secas con rayos, etc. El riesgo de incendio es mucho mayor en tiempo de olas de calor, especialmente en regiones y comarcas con fuerte insolación y clima no demasiado seco, condiciones que favorecen la producción de leña y madera, especialmente en los años con inviernos lluviosos; también los largos periodos de sequía son favorables a los incendios. No obstante, la causa principal de los incendios son los pirómanos además de los accidentes debidos a trabajos forestales y agrícolas y a los descuidos de una cada vez mayor población urbana que sale al campo de vacaciones o fin de semana, sobre todo en verano, muchas veces con desconocimiento del comportamiento adecuado en la naturaleza.

El riesgo de incendio y el fuego en sí mismo se relacionan no sólo con las condiciones meteorológicas y climáticas, sino también con la composición y estructura del monte a la vez que con su gestión y la historia de sus usos.

El abandono del campo y la actividad agraria comenzó hacia 1860, aunque hubo un repunte poblacional entre 1933-1940. Desde los años cincuenta la despoblación rural aumenta a la vez que "el campo se va llenando de monte" y la biomasa forestal se acumula por falta de pastoreo y más aún, desde los años 60 por dejar de leñar y carbonerar (desapareciendo los gabarreros, carboneros y piconeros) debido a la aparición en los pueblos del gas butano (origen de los denominados "montes butaneros"). Por otra parte entre 1939 y 1984 hubo una intensa actividad repobladora, realizada casi exclusivamente con especies de

coníferas (y en menor medida chopos, eucaliptus y aún menos otras frondosas), con objetivos de protección y restauración hidrológico-forestal y seguidamente de producción industrial. El ICONA se creó en 1971 y transfirió sus competencias a las Comunidades Autónomas en 1982, éstas interrumpieron la repoblación masiva de coníferas según las nuevas ideas y la presión ecologista. En 1992, con motivo de la reforma de la Política Agraria Común (PAC) se estableció un régimen de ayudas por el Programa de Forestación de Tierras Agrarias (FTA) que aún hoy se considera importante para la restauración, conservación y mejora de ecosistemas relacionados con la agricultura y la silvicultura.

La falta de gestión del bosque es un problema importante: la escasez de tratamientos de la espesura o control de biomasa por clareos y claras en el monte arbolado denso, la abundancia y envejecimiento de los terrenos de regeneración por brotes (montes bajos) muchos de ellos fosilizados, la abundancia de matorral y orla espinosa de sotobosque, el desprestigio e impopularidad de las infraestructuras protectoras (cortafuegos, fajas auxiliares, pistas forestales y vías de saca).

El cambio climático en general tiende a una mayor frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos como las sequías y olas de calor de forma que



muchos autores lo relacionan con los llamados incendios de sexta generación. Los megaincendios de sexta generación modifican la dinámica atmosférica en su entorno de forma que originan vientos de tal intensidad que los hacen muy difíciles de apagar llegando a quedar fuera de la capacidad de extinción. Estos parecen tener relación con largas y recurrentes sequías, pero quizás más que relacionarlos con el cambio climático hay que considerarlos como respuesta a un cambio global que incluye clima y cambios de usos del suelo. En cualquier caso la sequía meteorológica es uno de los factores determinantes de los incendios por el mayor riesgo de iniciarse y por la mayor dificultad de apagarlos.

Los incendios forestales suceden en todo el territorio nacional y se producen todos los años originando grandes daños ambientales y económicos sobre todo

con un carácter estacional que coincide con las épocas secas. Muy pocos son debidos a causas naturales, por el contrario se deben a distintos tipos de negligencias de ciudadanos urbanos y de campesinos rurales, además de a los pirómanos. Los años 1978, 1985, 1989 y 1994 fueron muy malos en cuanto a superficie forestal quemada mientras que los años 1995, 2000 y 2005 fueron los peores en cuanto a número de incendios.

En el mapa adjunto (figura 2) se observa que la mayor frecuencia de incendios se localiza en Galicia, León, Asturias, Cantabria y el Baztán, en gran medida relacionados con la práctica de las quemas “teóricamente controladas” de pastos y matorrales; también en zonas de Extremadura (en dehesa y monte), de Murcia (donde el rayo tiene cierta importancia) así como en otras del valle del Guadalquivir, seguramente relacio-

nadas con quemas de restos agrícolas (rastros, podas, etc.). Por el contrario hay que destacar las grandes masas forestales en las que el fuego es poco frecuente como es el caso de las provincias de Burgos, La Rioja, Segovia, Guadalupe, Cuenca, Teruel, Huesca, Lleida o Girona, zonas en las que el monte está bien cuidado y es considerado fuente de riqueza y valores sociales y ambientales.

En cuanto a la superficie afectada arbolada y desarbolada (figura 3) entre 1961 y 2023 se observan grandes áreas quemadas (> 50 000 ha con algunos años de entre 150 000 – 200 000 ha) aproximadamente entre 1973 y 1995, época en la que coinciden el abandono del entorno rural, la abundancia de repoblación efectuada y al final el paulatino comienzo de la segunda residencia vacacional (incendios de segunda generación de los años 80) a la vez que la gestión del monte por las Comunidades Autónomas. En cualquier caso, todos los años la superficie forestal quemada no arbolada (fracción de cabida cubierta < 5 %) es superior o muy superior a la arbolada.

En el mismo periodo 1961 - 2023, en cuanto al número de incendios (imagen 3) tiende a aumentar hasta el año 2000 y a disminuir después con un periodo especialmente malo entre 1989 - 2012 (incendios de tercera - quinta generación). Desde 2016 se considera que hay incendios de sexta generación pero ni en número de incendios ni en superficie total nacional afectada estos últimos años han sido los peores aunque sí han sido ecológicamente y socioeconómicamente devastadores los daños producidos.

## Referencias

- Benavides, R.; Lázaro, A.; Valladares, F. 2011. “Efecto de la sequía en el estado y fenología de masas de *Quercus ilex* en dehesas del suroeste de Madrid”. Comunicación en la 50 Reunión de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos. Toledo.
- Romero, Ramiro et al. 2020. Comportamiento de las precipitaciones en España y periodos de sequía (periodo 1961-2018), Nota Técnica 32 de AEMET.
- OMM-Nº. 1006, 2006. Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros
- OMM-Nº. 1173, 2016. Handbook of Drought Indicators and Indices. WMO/GWP Integrated Drought Management Programme (IDMP).

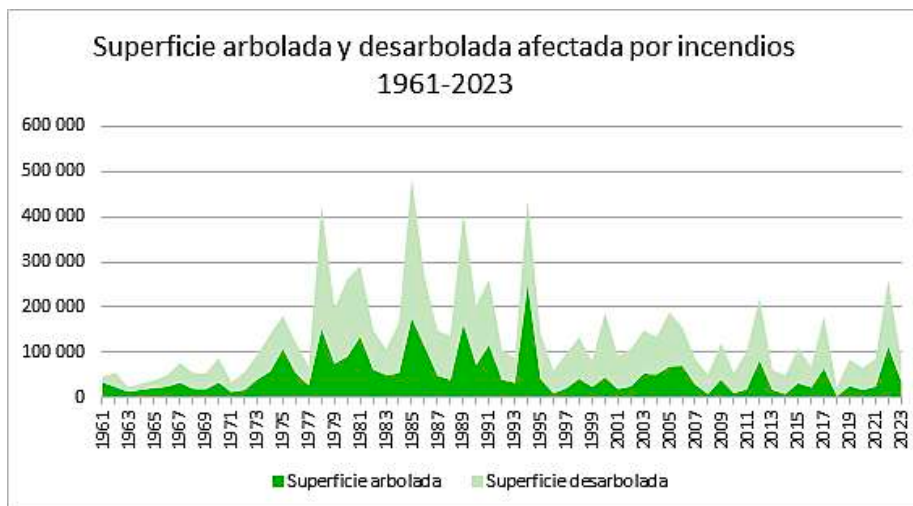


Figura 3. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

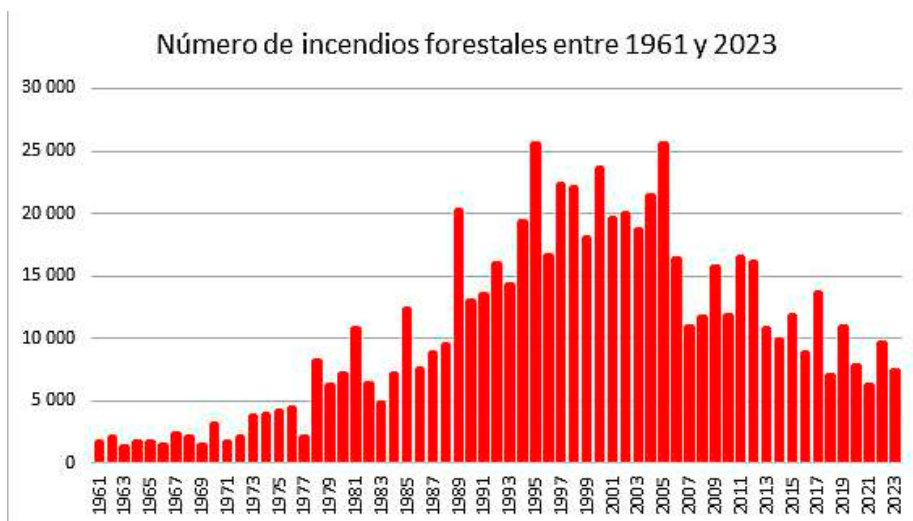


Figura 4. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

# Recuperando la memoria de Lise Meitner, la científica que descubrió la fisión nuclear (Viena 1878 – Cambridge 1968)

MARÍA ASUNCIÓN PASTOR, CARMEN RUS

Considerada la madre de la bomba atómica y la única científica que no quiso colaborar en el proyecto Manhattan, luchó por el uso pacífico de la energía atómica. Aun siendo una de las figuras más importantes de la física moderna, le fue injustamente negado el premio Nobel de Química de 1944, otorgado exclusivamente a Otto Hahn. Fue nominada 19 veces al Premio Nobel de Química entre 1924 y 1948, y 29 veces al Premio Nobel de Física entre 1937 y 1965

Lise Meitner nació en Viena el 7 de noviembre de 1878 en el seno de una familia judía. Gracias a que en 1867, el emperador Francisco José I concedió a los judíos igualdad cívica, Philipp Meitner, el padre de Lise, cursó estudios jurídicos y ejerció como abogado. Motivó intelectualmente a sus ocho hijos y los animó a que siguieran sus pasos.

Como apunta Rita Levi-Montalcini en el libro *Las pioneras*, Lise Meitner fue educada en la fe protestante, como era habitual entonces en los ambientes de la alta burguesía. No fue una persona religiosa y no estudió historia judía. Como muchos judíos asimilados, solo se sentía leal a su país.

En 1897 el gobierno austríaco permitió que las mujeres pudieran cursar carreras de letras y ciencias. Se debió a que el gobierno cambió de parecer porque necesitaba prestar atención médica a las mujeres musulmanas de las zonas de Bosnia y Herzegovina.

Solo cuatro mujeres jóvenes aprobaron la "Prueba de Madurez" en 1901, entre ellas, Lise Meitner. Comenzó entonces sus estudios universitarios de física y matemáticas. Las clases del físico Ludwig Boltzmann le abrieron un mundo que la fascinó. Al no discriminar a las mujeres y aceptar su integración en sus clases, Boltzmann creó una comunidad científica a la que Lise se unió. Quedó entusiasmada e impactada por la pasión del profesor:

su deseo de interpretar los fenómenos naturales y de predecir fenómenos que nuestros sentidos no detectaban.

Lise sobresalió rápidamente. En 1905, en sus prácticas de la universidad explicó un experimento realizado por Lord

sostenía que, por norma general, las mujeres no debían acceder a la universidad, consideraba oportuno permitírsele a aquellas que tuvieran un talento extraordinario, y no tardó en reconocerlo a Lise. Le permitieron también tra-

bajar en un laboratorio donde conoció a Otto Hahn cuando él solicitó colaborar con ella, comenzando así una amistad que duraría aproximadamente 30 años. Solamente había un problema: el laboratorio no podía aceptar más mujeres y Lise tuvo que trabajar en el sótano del antiguo carpintero y utilizar los servicios del restaurante que había enfrente del instituto. Es más, incluso le estaba vetado subir al laboratorio de Otto en el primer piso.

En 1908 Hahn y Meitner publicaron varios trabajos sobre el actinio. Eran una pareja en la que los conocimientos químicos de Hahn se complementaban con los físicos de Lise posibilitando

la preparación de muestras, su medición e interpretación de los resultados. Ya ese mismo año publicaron tres artículos importantes a los que siguieron otros seis en 1909.

Al no recibir ninguna compensación económica, su trabajo era financiado por su padre, lo que tenía como consecuencia que viviera en una habitación de una residencia de señoras sin cuarto de baño. Aunque echaba de menos Viena, en Berlín sintió que avanzaba. Como



Retrato de juventud de Lise Meitner. Wikipedia

Rayleigh que el británico no conseguía entender, y predijo otros fenómenos. La ampliación de este trabajo le supuso el grado de doctora en 1906, siendo la segunda mujer en doctorarse en la universidad de Viena, tras Elise Rici. Puesto que, a pesar de sus éxitos, una científica no tenía mucho futuro en Viena, decidió mudarse a Berlín y seguir sus estudios de radioactividad.

En Berlín, pidió permiso a Max Planck para asistir a sus clases. Si bien Planck



podemos comprobar, una vez más se demuestra que, a principios del siglo XX, el apoyo familiar resultaba fundamental para que una mujer diera sus primeros pasos en su desarrollo intelectual.

En 1912 se construyó el Kaiser Wilhelm Institut de física, precedente de los actuales Institutos Max Planck. Recibieron una oferta desigual: ofrecieron a Hahn un puesto de joven científico y a Lise le concedieron una colaboración gratuita. El año 1913 fue un buen año para Lise: Max Planck la nombró la primera ayudante de científico en Prusia y consiguió su primer sueldo, eso sí, muy por debajo del de Otto. Consiguieron juntos también su primera sección de radioactividad, el laboratorio Hahn-Meitner.

El 28 de julio de 1914 se declaró la Primera Guerra Mundial. Lise Meitner simultaneó su trabajo en el hospital Lichterfelde como técnica de rayos X y el mantenimiento del laboratorio en el que ya estaba sola porque no disponía de personal, prosiguiendo sus investigaciones sobre el uranio. En 1917 consiguió la creación del Laboratorio Meitner y perfeccionó la técnica de preparación de muestras de Otto Hahn. En 1918 enviaron conjuntamente un artículo sobre el descubrimiento de un nuevo radioelemento, el protactinio, de símbolo Pa y número atómico 91, que se desintegraba en actinio; artículo en el que figuraba Hahn como investigador principal. Esta situación fue admitida por Meitner como agradecimiento hacia Hahn y como manera de compensar la pérdida de años de investigación por su estancia en el frente durante la guerra.

Gracias a una invitación de Planck en 1912, Einstein conoció a Meitner, a la que denominaba cariñosamente "nuestra Marie Curie". En 1919 fue la primera mujer que obtuvo la plaza de profesora de universidad, y la Asociación de Química alemana condecoró a Hahn con la medalla Emil Fischer. El tribunal le ofreció una copia de la medalla a Lise Meitner, pero sin un reconocimiento explícito de su contribución. La respuesta de Lise fue no acudir a la ceremonia.

1932 y 1933 fueron años muy importantes para la Física. El descubrimiento del neutrón por James Chadwick permitió comprender las partículas del interior del átomo. Por su parte, gracias al desarrollo



**Séptimo Congreso Solvay (Bruselas, 1933), siendo el tema principal la Estructura del núcleo químico: Solo tres mujeres participaron, Marie Curie, Irène Joliot-Curie y Lise Meitner. Imagen: Wikimedia Commons**

de nuevas técnicas, Meitner en esta época detectó por primera vez un positrón (la antipartícula del electrón, que posee la misma masa, pero carga opuesta) y avanzó en la comprensión del espectro beta y gamma y las partículas alpha de largo alcance.

Pero ese mismo año de 1933, el Nationalsozialistische Deutsche Arbeiterpartei, abreviado como NSDAP, alcanzó la mayoría parlamentaria y Hitler fue nombrado canciller del Reich. Los periódicos informaron de que Einstein, que se encontraba en California en ese momento, era considerado persona non grata por el Gobierno. Tras haber sido víctima de un brote antisemita en 1920, Einstein no subestimó el peligro y decidió no volver a Alemania. Lise, al contrario, regresó de Bruselas.

Comenzó la persecución de los judíos. A pesar de no ser aria, Lise pudo continuar su trabajo en el laboratorio, aunque se le privó del título de profesora debido a que era austriaca. Observaba como, poco a poco, se iba marginando a sus colegas científicos debido a su origen étnico (Fritz Haber – premio Nobel de Química de 1918 – fue expulsado de su laboratorio). Sus colegas arios se indignaban en privado, pero no reaccionaban públicamente. Tanto Planck, como Heisenberg y Hahn no estaban cómodos con la situación, pero confiaban en que los nazis pronto se volverían más responsables.

Meitner recibió en esta época una oferta de trabajo de Niels Bohr en Copenhague, pero Planck la convenció para que no dejara Berlín ya que su laboratorio la necesitaba.

Toda esta incertidumbre no impidió que Lise siguiera con su trabajo. Con el descubrimiento del neutrón se empezó a especular en la comunidad científica acerca de la posibilidad de crear elementos más pesados que el uranio. Lise convenció a Otto para emprender esa línea de investigación. En aquellos momentos había cuatro grupos muy potentes trabajando en Europa: uno en Gran Bretaña, liderado por Ernest Rutherford; otro en Francia, liderado por Irène Joliot-Curie, otro en Italia, dirigido por Enrico Fermi y el de Berlín encabezado por Meitner y Hahn. La física nuclear acababa de iniciarse y se necesitaba mucha gente con talento para entender fenómenos tan sorprendentes como que al colisionar dos protones se desprendieran tres protones, un antineutrino y varios mesones pi (en otras palabras, de la colisión de dos partículas idénticas, el resultado es algo tan poco intuitivo e incomprensible como tres partículas idénticas a las originales y unas cuantas más).

En 1938 se produjo la anexión de Austria por Alemania (*Anschluss*) y Lise perdió su nacionalidad austriaca. Mentzel, nuevo jefe del consejo de investigación, exigió a Hahn, entonces director del ins-

## Recuperando la memoria de Lise Meitner, la científica que descubrió la fisión nuclear (Viena 1878 – Cambridge 1968)

tituto, que expulsara a Lise de su trabajo, requerimiento que ejecutó el mismo día. Durante semanas Lise no supo qué hacer. Sus amigos desde el extranjero entendieron que tenía problemas y tanto Paul Scherrer como Niels Bohr trataron de que saliera del país con una invitación formal a colaborar.

La alarma saltó cuando decidió aceptar la invitación y el Gobierno alemán le quitó el pasaporte y le prohibió viajar. Sus colegas de Berlín reaccionaron. Hahn, von Laue, Planck y Carl Bosch hicieron lo posible por sacarla del país. En 1939 salió clandestinamente en un tren hacia Holanda. Sin dinero, sola y asustada estuvo esperando meses a que alguna universidad le ofreciera trabajo. Finalmente, se trasladó al instituto de Manne Siegbahn ubicado en Suecia. Allí, lejos de encontrar hospitalidad se encontró con un profesor que le puso todos los obstáculos posibles a su investigación. Además de tener el sueldo más bajo del instituto, no se le permitía tener estudiantes (de hecho, se sugería a los estudiantes no hablar con ella) y por supuesto le proporcionaron muy pocos recursos para construir un nuevo laboratorio experimental. Pese a todo, como pudo Lise reemprendió sus investigaciones.

Hahn contrató a un nuevo ayudante, Fritz Strassmann, para continuar el trabajo iniciado por Lise. A pesar de la distancia, la correspondencia entre Lise y Hahn seguía siendo muy regular, reuniéndose varias veces fuera de Alemania para discutir sobre resultados y decidir nuevos experimentos. Strassmann valoró siempre a Lise como la líder intelectual del grupo y comprobó de primera mano que Otto sin ella se sentía perdido. Como curiosidad, recibió el título de Justo entre las Naciones en 1985.

En 1939 Hahn publicó los resultados de su experimento que consistía en el bombardeo de uranio (número atómico 92) con neutrones, y del que se obtenía

bario (número atómico 56). La explicación que justificaba que un isótopo radiactivo de bario se formara en el bombardeo de uranio con neutrones era que el núcleo del uranio se rompía en dos. Este descubrimiento allanó de manera extraordinaria el camino para lograr de forma práctica la liberación de la energía atómica. El descubrimiento de Otto Hahn sirvió de base para que posteriormente se construyera la bomba atómica, proyecto en el que Meitner se negó a participar, con la esperanza de que el proyecto resultara imposible. Meitner no volvió a trabajar sobre la fisión

El nombre de Lise Meitner brillaba por su ausencia, hecho que Hahn justificaba por razones de seguridad al ser una disidente judía. Ahora bien, fueron Meitner

en cadena. Posteriormente, Enrico Fermi demostró que algunos núcleos de uranio originaban la fisión, mientras que otros originaban determinados cambios que llevaban a la producción del elemento número 93 de la tabla periódica, el neptunio.

En consecuencia, Lise y su sobrino Otto Frisch (residente en Copenhague) fueron pues los primeros en articular y justificar la primera fisión nuclear (la ruptura de un átomo pesado en otros menos pesados y más estables) con la ley del incremento de la masa de Einstein. La publicación en *Naturwissenschaften* puso en el disparadero a todos los científicos americanos. A pesar de que a Lise le molestó su exclusión en la publicación experimental, mantuvo su relación con Otto y contestó muy amablemente a

todas sus dudas, que ya no eran meramente académicas porque en 1939 Hahn pasó, en secreto, a formar parte de una sección militar. Ese mismo año Alemania se lanzó a la conquista de Europa y en 1940 ya había ocupado Francia, Holanda, Dinamarca, Bélgica y Noruega.

En 1942 se le ofreció participar en un grupo internacional de investigación (Proyecto Manhattan) para conseguir una bomba atómica y terminar con el régimen nazi. A pesar de que le hubiera supuesto una oportunidad para trasladarse desde Suecia a EE. UU., abandonar ese laboratorio que no la quería y trabajar mano a mano con los grandes cerebros de la época, no aceptó. Sus razones eran bien claras: no quería que sus descubrimientos fueran utilizados con fines bélicos. Einstein también rehusó la oferta.

A finales de 1944 se le concedió el premio Nobel de química a Otto Hahn. Nadie comprendió por qué habiendo sido nominados los dos juntos en 1939 ahora se le concedía únicamente a él. La única explicación fue la afiliación al comité del Nobel de Siegbahn, el director de su laboratorio, que una vez más hizo científicamente la vida imposible a Lise,



Lise Meitner y Otto Hahn. Imagen: Wikimedia Commons

y su sobrino Otto Robert Frisch quienes explicaron el fenómeno. Se atribuye a Otto Frisch la introducción del término fisión nuclear, apareciendo por vez primera en un trabajo publicado en la revista *Naturwissenschaften*. El uranio-235 se divide en dos y emite dos o tres neutrones nuevos, estableciéndose así una reacción



## Solo cuatro mujeres jóvenes aprobaron la “Prueba de Madurez” en 1901, entre ellas, Lise Meitner. Comenzó entonces sus estudios universitarios de física y matemáticas. Las clases del físico Ludwig Boltzmann le abrieron un mundo que la fascinó

aunque nunca se supo si por celos profesionales o prejuicios machistas. Era una época complicada para que Hahn viajara a Suecia y se solicitó que se pospusiera la entrega del premio.

En 1945 los aliados entraron en Berlín y detuvieron a todos los miembros del proyecto Uranio. Se les trasladó a una granja en Godmanchester, cerca de Cambridge (Gran Bretaña) en la que los británicos trataron de conocer el punto en el que se encontraba el desarrollo de la bomba atómica en Alemania. En sus conversaciones se grabaron, por un lado, sus intentos de autojustificación al considerar que no les quedaba otra opción que trabajar para el Tercer Reich, y, por otro lado, el convencimiento de Hahn de que él era el único inventor de la fisión y que la hubiera descubierto antes si no llega a ser porque Meitner entorpecía sus experimentos: solo cuando ella se fue, consiguió realizar el experimento que produjo la primera fisión.

Al mismo tiempo, al terminar la guerra en EE. UU., se produjo una corriente de reconocimiento a la labor de Lise en la fisión. Se la consideró “la madre de la bomba atómica”, título que nunca fue de su agrado, y la prensa sensacionalista comenzó a inventar historias sobre ella. Esta valoración de la figura de Meitner irritó extraordinariamente a Otto Hahn y consolidó su convicción de que le correspondía la paternidad de la fisión, prescindiendo incluso de Fritz Strassmann.

En 1946 Meitner viajó a EE. UU. para visitar a su familia, siendo recibida con todos los honores. Nombrada la mujer del año, el premio se lo entregó el presidente Truman. Se desató tal entusiasmo que le llegó una propuesta desde Hollywood para aparecer en una película, propuesta que rechazó por “no tener sentido nada de lo que ahí se contaba”.

En 1947 Otto Hahn recogió el Nobel y no mencionó en absoluto los treinta años de colaboración que pasó junto a Lise. Supuso un duro golpe para ella, y distanció a los dos científicos para siempre. Lise



Lise Meitner (1912)

fue entonces plenamente consciente de que jamás podría volver a Alemania, que se sentía incapaz de reconocer el país que una vez fue su hogar. Al terminar la guerra, tampoco sus antiguos compañeros trataron de hablar con ella o sugerirla que volviera, pese a conocer su precaria situación en Suecia.

Lise Meitner, a pesar de no recibir el Nobel, recibió otros muchos reconocimientos a su carrera: el premio de la ciudad de Viena a la ciencia en 1947, la medalla Max Planck en 1949, el premio Otto Hahn en 1955, la medalla Wilhelm Exner en 1960, la medalla Dorothea Schlözer de Gotinga en 1962 y muchos galardones más. Así como Einstein rechazó todos los premios que le concedió Alemania, ella los aceptó pensando que era importante para la reinserción del país en una rutina normalizada. En 1966 Hahn, Meitner y Strassmann recibieron el reputado premio Enrico Fermi. A pesar de que Otto Hahn intentó por todos los medios que Meitner no recibiera tal reconocimiento, Strassmann no lo permitió. En su honor también se llamó meitnerio (Mt) al elemento químico 109.

En 1960 abandonó Estocolmo y se

trasladó a Cambridge (Reino Unido) para estar cerca de su familia, falleciendo allí el 27 de octubre de 1968. Conforme a sus deseos, fue enterrada en Bramley (Hampshire) junto a su hermano Walter, fallecido en 1964. Su sobrino Otto Frisch fue quien compuso la inscripción de su lápida, «Lise Meitner: una física que nunca perdió su humanidad».

## Referencias

- [https://es.wikipedia.org/wiki/Lise\\_Meitner](https://es.wikipedia.org/wiki/Lise_Meitner)
- <https://elpais.com/especiales/2018/mujeres-de-la-ciencia/lise-meitner.html>
- <https://mujeresconciencia.com/2015/03/04/lise-meitner-la-cientifica-que-descubrio-la-fision-nuclear/>
- [http://publicaciones.sne.es/Lise\\_Meitner/pdf/Meitner.pdf](http://publicaciones.sne.es/Lise_Meitner/pdf/Meitner.pdf)
- Ruth Lewin Sime: *Lise Meitner: A Life in Physics*, 1997. University of California Press.
- Frank Wilczek: *The lightness of being*, 2008. Penguin Book.
- Rita Levi-Montalcini, Giussepina Tripodi: *Las pioneras*, 2011. Editorial Cátedra, 114 páginas.
- José Manuel Lechado: *Científicas, Una historia muchas injusticias*, 2018. Editorial Síntesis
- Peter Watson: *Historia Secreta de la Bomba Atómica*. 2020. Editorial Crítica.

# Recuperando la memoria del matemático francés Laurent Schwartz (1915-2002)



Laurent Moïse Schwartz fue un matemático conocido especialmente por sus trabajos sobre la teoría de las distribuciones por la que se convirtió en el primer francés en recibir la medalla Fields en 1950. Honesto y riguroso intelectual en el que se producía una simbiosis estrecha entre investigación y enseñanza; será recordado por su coherencia, decencia, calidez y generosidad en el compromiso. Pocos matemáticos ganaron un puesto en el imaginario colectivo francés y Laurent Schwartz es uno de ellos

MARÍA ASUNCIÓN PASTOR SAAVEDRA

Laurent Schwartz nació el 5 de marzo de 1915 en París en una familia acomodada de tradición judía no practicante, procedente de Alsacia. Su padre, Anselme Schwartz (1872-1957), fue el primer cirujano judío en los hospitales de París. Su madre, Claire Debré (1888-1972), hija de un rabino, inculcó a sus hijos un gran amor a la naturaleza. Fue sobrino de Robert Debré, famoso pediatra cofundador de Unicef y de Jacques Debré, profesor de matemáticas. También fue sobrino nieto de Jacques Hadamard (1885-1963), uno de los mejores matemáticos y académicos de esa época.

A los 11 años enfermó de poliomielitis, quedándole una cierta debilidad el resto de su vida. Durante su recuperación de la polio, sus padres adquirieron una casa de campo en Autouillet (Departamento de Yvelines). Le llamaba su *Jardín del Edén* particular, era su refugio para estudiar y trabajar y donde desarrolló su amor a la naturaleza.

En el Liceo Janson de Sully destacó en latín, griego y matemáticas. Su familia creyó que se dedicaría a las humanidades. Su profesor de 5<sup>ème</sup> comentaría a sus padres: "Desconfíen, dirán que vuestro hijo está dotado para las lenguas cuando no se interesa más que en el aspecto científico y matemático de las lenguas: tiene que hacerse matemático". Gracias a los consejos de este profesor y de su tío Jacques Debré se inclinó por las matemáticas. Bachiller en 1932 estudia matemáticas superiores y matemáticas especiales en el Liceo Louis-le-Grand. Es admitido en 1934 en la Escuela Normal Superior (ENS). Paralelamente siguió cursos en la universidad de París, licenciándose en matemáticas y físicas.

A tenor de lo visto hasta ahora, no debe-

ría sorprendernos que Schwartz comenzase su autobiografía por: "Las matemáticas han llenado mi vida". Sin embargo, se sabe que tuvo, por lo menos, otras dos grandes pasiones: la lucha política –fundamentalmente por causas humanitarias– y las mariposas. Fue, en efecto, un entomólogo aficionado muy renombrado, al igual que Nabokov. Legó al Museo Nacional de Historia Natural una de las más importantes colecciones de Europa, que había reunido en el transcurso de más de treinta viajes en los trópicos, de los cuales dos *Sphingidae* que descubrió, el *Xylophanes schwartzi* (descrito por J. Haxaire en 1992) y el *Clanis schwartzi* (descrito por J.-M. Cadiou en 1993) llevan su nombre. También hizo legados a los museos de Lyon, Toulouse y Cochabamba (Bolivia).

En junio de 1937, concluyó de manera brillante sus estudios en la ENS, graduándose con el número dos, tras Gustave Choquet (conocido por la creación de la teoría de Choquet, la integral de Choquet y la teoría de las capacidades). Entre octubre de 1937 y agosto de 1939 Schwartz hizo el servicio militar en artillería antiaérea con destino en Laon, puesto poco solicitado cerca de la frontera belga. Allí, en 1938 se casó con la también matemática Marie-Hélène Lévy, hija del famoso matemático Paul Lévy, profesor en la Escuela Politécnica (EP). Tuvieron dos hijos: Marc-André (fallecido a los 28 años) y Claudine, matemática como sus padres y su marido.

El comienzo de la Segunda Guerra Mundial prolongó su servicio activo durante otro año. En agosto de 1940, tras la derrota francesa, fue desmovilizado y se trasladó con su mujer a Toulouse, en la Francia bajo el régimen de Vichy, donde vivían sus padres. Obtuvo un puesto

en la recién creada Caisse Nationale des Sciences, que era un instituto de investigación. Desde 1942 y hasta el final de la guerra, su salario procedía de una *Ayuda a la Investigación Científica* de la empresa Michelin. Según sus palabras, Toulouse era entonces un desierto científico.

Henri Cartan (1904-2008), de visita en Toulouse, animó al matrimonio a trasladarse a Clermont-Ferrand donde se había establecido la Facultad de Ciencias de Estrasburgo tras la ocupación alemana. El cambio se revelaría muy beneficioso.

La situación de la ciencia francesa no pasaba por su mejor momento. La Primera Guerra Mundial había diezmando una generación de prometedores científicos. Schwartz cita que, en 1924, en un seminario de Hadamard, ningún matemático francés conocía la completitud del espacio  $L^2$ , resultado obtenido por Fischer y Riesz en 1907. En el mismo sentido se manifestaba Jean Dieudonné, quien escribió que la matemática francesa desconocía la teoría espectral de Hilbert-Riesz, la representación de grupos o la teoría de Lie.

Esta percepción de la paralización de la matemática francesa motivó en 1935 la creación del grupo "Nicolas Bourbaki", fundado por André Weil (hermano de Simone Weil), Henri Cartan, Claude Chevalley, Jean Dieudonné, Jean Delsarte, René de Possel, Jean Leray y Szelem Mandelbrojt; grupo nacido para la redacción de textos que sustituyeran a los utilizados en las universidades francesas, aunque fue mucho más lejos pues actualizó y renovó la matemática. En 1942 Schwartz se uniría al grupo al que perteneció hasta la retirada obligatoria a los 50 años. Aunque consciente de errores cometidos por los bourbakistas, siempre reconoció la pro-



funda influencia del grupo Bourbaki por la claridad de su lenguaje, el rigor en la redacción y la utilización sistemática de las estructuras matemáticas.

Schwartz venía trabajando desde hacía algún tiempo sobre un problema clásico de aproximación de funciones. El curso impartido por Dieudonné le hizo conocer una serie de nuevas y potentes herramientas, lo que le permitió comenzar a obtener unos interesantes resultados. Dieudonné se mostró entusiasmado y le propuso continuar con estos trabajos, como tema de tesis doctoral. En 1942, por el peligro que corría Schwartz por ser judío tras la ocupación alemana de la Francia de Vichy, su director de tesis, Georges Valiron, le presionó para que defendiese su tesis doctoral, titulada *Sommes de Fonctions Exponentielles Réelles*, en la Universidad Louis Pasteur - Strasbourg (en Clermont-Ferrand). Pagó los gastos de la publicación de su tesis en la Librería Hermann, siendo nombrado doctor el 9 de enero de 1943.

Su precaria situación personal y el embarazo de su mujer a mediados de 1942 le obligaron a abandonar la actividad matemática oficial en 1943. Fichados por la policía, cambiaron su identidad y huyeron a la zona ocupada por los italianos, creyendo que la persecución contra los judíos sería menos terrible. Describió la angustia y el absurdo de ser detenido y deportado en las redadas de la brigada antijudía con las siguientes palabras:

*"...nunca me sentí verdaderamente judío...El poder ser deportado como judío por el mero hecho de estar circuncidado, me parecía verdaderamente absurdo..."*

Fue profesor de la Universidad de Grenoble (1944 -1945). Más tarde es nombrado profesor ayudante en Nancy (1945-1952) para pasar posteriormente a la facultad de ciencias de París (1953-1959) donde fue nombrado profesor titular. A continuación, pasa a ser profesor en París VII y en la EP (1959-1969). Por último, es adscrito a tiempo completo en la EP de 1969 a 1980.

Retornemos a la teoría de las distribuciones. Tras varios años de reflexión, inspirado por la lectura de un artículo de Choquet y Deny, Schwartz tiene, en una noche de 1944, la iluminación: ve de repente la noción de "función generalizada" que denominará "distribución", que responde a toda una serie de cuestiones y permite, en particular, dar un sentido a los cálculos de Paul Dirac. Se vuelca entonces en el trabajo de redacción y construye una teoría completa, coherente con to-

das las herramientas de análisis funcional necesarias para definir correctamente las extensiones de las operaciones naturales sobre las funciones: derivación, producto tensorial, convolución, transformación de Fourier, etc.

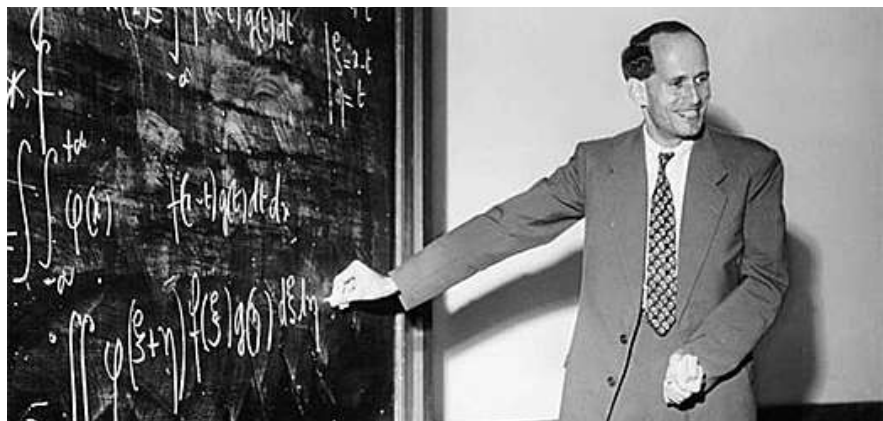
A decir verdad, los físicos en una gran mayoría siguieron haciendo los cálculos de Dirac-Heaviside sin interesarse demasiado por su justificación matemática. En cambio, la "física matemática" (en particular la teoría cuántica de campos la ha comprendido bien y adoptado las distribuciones). Por otra parte, Schwartz escribió un manual "Métodos matemáticos para las ciencias físicas" que ha sido traducido al inglés, español, japonés y ruso. Conviene subrayar que la gran sencillez de la obra de Schwartz hace que con frecuencia los usuarios no se percaten de su extraordinaria amplitud y presencia

Ahora bien, donde más utilizadas son las distribuciones son sobre todo en matemáticas puras y aplicadas. Han desem-

placiones a las ecuaciones diferenciales estocásticas.

Por otra parte, su talento y amor por la enseñanza (a todos los niveles) era fuera de serie, coincidiendo todos los testimonios: subyugaba literalmente a sus estudiantes. El poeta y matemático Jacques Roubaud ha esbozado un magnífico retrato del Schwartz-enseñante en su obra "Mathématique". Sus frutos como profesor pueden advertirse, en parte, en la relación de sus doctorandos, entre los que destacan, siguiendo el orden cronológico, Leopoldo Nachbin, las medallas Fields Alexander Grothendieck y Jacques-Louis Lions, André Martineau, Bernard Maurey, Bernard Beauzamy y Gilles Pisier.

Sus compromisos políticos y humanitarios constituyen una faceta clave de su personalidad. En su juventud - hasta 1947 - militó en un partido trotskista. Esta militancia le ocasionará graves dificultades, durante más de cuarenta años, para la obtención del visado de entrada en Estados Unidos,



peñado un papel crucial en el desarrollo de las ecuaciones en derivadas parciales. Desde 1969, Schwartz coorganizaba (al principio con Charles Goulaouic y luego con otros) un gran seminario sobre ecuaciones en derivadas parciales que ganó rápidamente un prestigio y que ha continuado celebrándose cada año hasta el momento presente en la EP.

Hacia 1964, Schwartz se vuelca en la teoría de las medidas de Radon que desarrolla sobre los espacios topológicos generales, después más gradualmente se inclina hacia la teoría de las probabilidades sobre los espacios de dimensión infinita (por ejemplo, los espacios de funciones o de distribuciones). Su interés en los últimos años se decantó hacia las probabilidades, en particular desintegración de medias, procesos de Markov, semi-martingalas con valores en una variedad diferencial o analítica y sus

incluso en 1950 para ir a recoger la medalla Fields. En 1954 participó activamente en apoyo de la descolonización francesa de Vietnam y en 1956 en la descolonización de Túnez y Marruecos.

Por otro lado, en esa época se involucró intensamente en el conflicto argelino, sobre todo contra el uso sistemático de la tortura por las fuerzas francesas. Vivió la tortura y muerte de su alumno Maurice Audin, que obtuvo el título de doctor después de su asesinato en una sesión de tortura, pues la lectura, examen y aprobación de su tesis doctoral se hizo poco después de su muerte. Escribió un famoso artículo en *L'Express* contra la práctica de la tortura por el gobierno. Su implicación le costó el secuestro de su hijo Marc-André, quien, además, sufrió una ignominiosa campaña de descrédito. Marc-André se suicidaría en 1971.

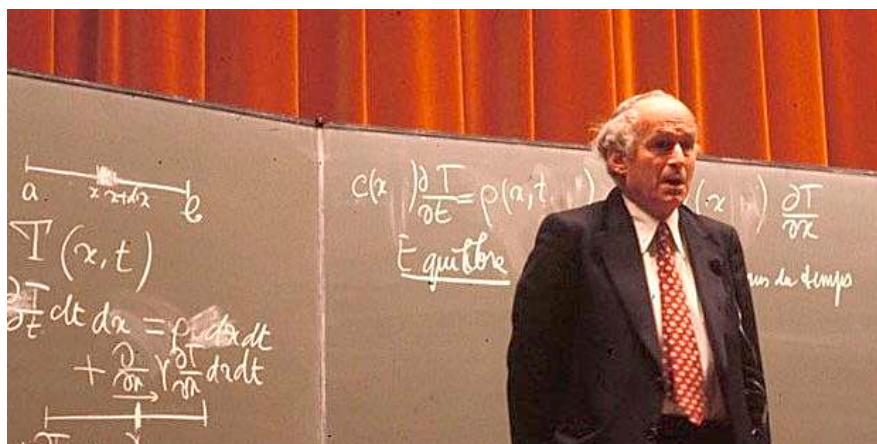
## Recuperando la memoria del matemático francés Laurent Schwartz (1915-2002)

En 1960, firmó con Jean-Paul Sartre, Simone de Beauvoir y otros 118 intelectuales franceses un manifiesto (manifiesto de los 121) a favor del derecho moral de la juventud francesa a negarse a participar en la guerra de Argelia. Schwartz fue cesado como profesor en la EP por el ministro de Defensa y pasó el curso 1962-63 en Nueva York. Finalmente, se alcanzó un acuerdo con dicho Ministerio para su readmisión en el curso 1963-64. Al parecer ninguno de sus colegas aceptó ocupar su puesto.

Junto con Henri Cartan y Michel Broué fue uno de los principales promotores y animadores del Comité de Matemáticos, que ha desarrollado una incesante labor en defensa de los matemáticos perseguidos en cualquier lugar del mundo y bajo cualquier sistema político. Sus campañas a favor de matemáticos chilenos, rusos, checos, uruguayos, marroquíes, etc., alcanzaron una gran repercusión y obtuvieron resultados concretos importantes. Además, fue uno de los más destacados activistas contra la guerra de Vietnam (1955-1975), siendo miembro del Tribunal Russell, creado para oír y examinar la evidencia de crímenes de guerra contra la población civil en Vietnam. Presidió el International Bureau for Afganistan, fundado en 1979, a raíz de la invasión soviética de Afganistán, promoviendo actividades contra la intervención soviética.

Schwartz fue uno de los integrantes del pequeño grupo que denunciaron al genocida Saloth Sar, conocido como Pol Pot, dictador camboyano y líder de los Jemeres Rojos desde 1960 hasta su muerte en 1998. También fue miembro del Comité por la Liberación de Bangladesh.

En 2006, cuatro años después de la muerte de Schwartz, se constituyó un tribunal internacional para juzgar a los líderes supervivientes del régimen genocida de Pol Pot. Sigue vigente su testimonio de que la moralidad en política es algo esencial.



Pero sus combates no acaban ahí, luchó denodadamente por la reforma de la universidad. En primer lugar, estaba a favor de la selección en la universidad, incluso cuando los movimientos estudiantiles iban en la dirección contraria. En la EP, invirtió una energía considerable para modernizar y diversificar la enseñanza ofreciendo diferentes opciones a los alumnos,

suscitando de esta forma más vocaciones científicas que anteriormente. A comienzos de los años 80, fundó con otros la asociación Calidad de la Ciencia Francesa (QSF, siglas en francés) para luchar contra la utilización creciente de criterios no científicos en el reclutamiento de enseñantes, que provocaba un gran número de reclutamientos locales de calidad discutible.

Hacia 1981, tras la elección del presidente Mitterrand, Schwartz fue encargado de elaborar un informe sobre la universidad francesa (en el marco de la Comisión del Balance). Las numerosas recomendaciones del informe han dado lugar, entre otras, a la creación y puesta en marcha inmediata de un Comité Nacio-

nal de Evaluación (CNE) de las universidades. Schwartz se convirtió en 1985 en el primer presidente del CNE cuya creación había recomendado.

Fue Miembro de la Academia de Ciencias de París desde 1975, estando en pose-

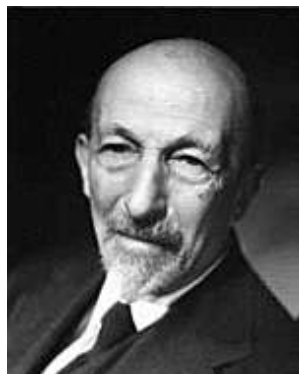
sión de numerosos premios y distinciones, tanto nacionales como internacionales.

Si hubiera que definir con una sola palabra a Laurent Schwartz, esta sería "rigor matemático de un gran matemático, buscando siempre la mayor generalidad posible para sus resultados, y perfeccionando sus redacciones sin cesar."

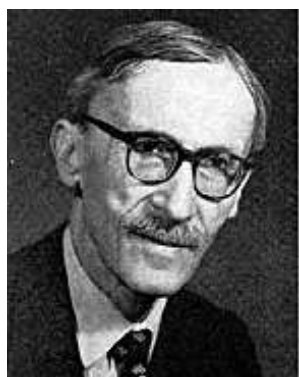
Laurent Schwartz murió el 4 de julio de 2002 en París y está enterrado en el cementerio de Autouillet. Nada mejor para terminar que las palabras que escribió Michel Broué tras su fallecimiento: "Ha muerto un hombre luminoso, en todos los sentidos del término. El que haya fallecido a los 87 años no disminuye en nada nuestra inmensa tristeza."

## Referencias

- M. López Pellicer, 2016. Laurent Schwartz (1915-2002). Resumen de su vida y obra matemática. Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp) Vol. 109, N°. 1-2, pp 51-60
- F. Bombal, 2003. Laurent Schwartz, el matemático que quería cambiar el mundo, La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española, Vol 6.1, 177-201
- J.O'Connor y E. F. Robertson, 2017. Laurent Moise Schwartz, MacTutor History of Mathematics archive, 2017. <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Schwartz.html>
- [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Laurent Schwartz](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Laurent_Schwartz)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Laurent Schwartz](https://es.wikipedia.org/wiki/Laurent_Schwartz)
- <https://datos.bne.es>
- <https://www.academie-sciences.fr>
- J. Chandrasekharab, 1998. The Autobiography of Laurent Schwartz, Notices of the American Mathematical Society, Vol. 45, N. 9, 1141-1147.
- G. Pisier, 2004. Discours prononcé en séance publique le 13 janvier en hommage à Laurent Schwartz (5 mars 1915 - 4 juillet 2002)
- <https://www.college-de-france.fr>



Jacques Hadamard



Paul Lévy



## La Cumbre del Clima de Dubái sienta las bases de un futuro sin combustibles fósiles

**L**a Cumbre del Clima de Dubái (COP28) concluyó el pasado 13 de diciembre, con una decisión histórica que sienta las bases de un futuro sin combustibles fósiles. Los resultados alcanzados en distintos ámbitos de la acción climática, reflejados en el llamado Consenso de Emiratos Árabes Unidos (*AUE Consensus*), permiten asegurar que Dubái ha acabado con un resultado en línea con la ciencia y que mantiene vivo el objetivo de limitar el incremento de la temperatura media global a 1.5 °C.

Ha sido una Cumbre en la que la Unión Europea, liderada por España como presidencia de turno del Consejo de la UE, ha jugado un papel clave a la hora de defender mayor ambición, liderar iniciativas fundamentales para el resultado de la COP, y construir alianzas con los países más progresistas en materia de acción climática, clave para conseguir el resultado adoptado.

La COP28 pone fin al primer balance de la evolución de los esfuerzos por cumplir el Acuerdo de París y avanza en la agenda de la vulnerabilidad al poner en marcha el fondo para hacer frente a las pérdidas y daños con una primera capitalización por valor de 792 millones de USD.

Además, pone en el centro de la agenda política la necesidad de reforzar la resiliencia humana y establece objetivos claros alrededor de bienes globales como el agua, la salud, la alimentación, la protección de la biodiversidad, las infraestructuras o la lucha contra la pobreza y la protección de los bienes culturales.

Se reconoce también, la necesidad de que todos los países mejoren su capacidad de hacer frente al cambio climático, desde la puesta en marcha de servicios climáticos y de alerta temprana a la importancia de la planificación, puesta en marcha de medidas de adaptación y seguimiento y monitoreo del progreso como elementos clave en los que es necesario avanzar de aquí a 2030.

### La ciencia como guía para la toma de decisiones

Los países reconocen en Dubái la importancia del Grupo Intergubernamental

de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). En este sentido, las decisiones de la COP28 consolidan la hoja de ruta que establece el propio IPCC a la hora de poner al mundo en una senda coherente con el objetivo 1.5 °C: la neutralidad climática a mediados de siglo y la necesidad de reducir las emisiones globales en un 43 % en 2030 y en un 60 % en 2035 (respecto a los niveles de 2019).

### La descarbonización del sector energético en el centro de la acción climática

La COP de Dubái ha puesto, por primera vez, al sector energético en el centro de la atención política como principal sector responsable del cambio climático.

Sus resultados reconocen que, para conseguir mantener el calentamiento global por debajo de 1.5 °C, es necesario abandonar, en esta década, los combustibles fósiles en los sistemas energéticos; un proceso que debe llevarse a cabo de forma justa, ordenada y equitativa como elemento fundamental para que el mundo pueda alcanzar unas emisiones netas cero en 2050, de acuerdo con la ciencia. Este acuerdo pone en negro sobre blanco el principio del fin de la era de los combustibles fósiles.

Este objetivo se ve acompañado por un compromiso global para triplicar las energías renovables y duplicar la eficiencia energética de aquí a 2030, iniciativa liderada desde un primer momento por la UE y que ha sido uno de los principales resultados alcanzados en Dubái.

Además, los países se han comprometido a acelerar los esfuerzos para eliminar el carbón y a desplegar todo tipo de tecnologías, desde las renovables, pero también la nuclear y las tecnologías de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (estas especialmente para aquellos sectores en los que no hay alternativas para la reducción de las emisiones) o el hidrógeno bajo en carbono.

Además, se señala la urgencia de hacer frente a las emisiones de gases como el metano, de reducir las emisiones del transporte por carretera o de eliminar los subsidios a los combustibles fósiles que

no permitan combatir la pobreza energética ni realizar una transición justa como otros de los ámbitos clave en los que es necesario actuar.

En respuesta a las demandas de los países productores de petróleo, que por primera vez han aceptado una referencia expresa a la necesidad de poner fin a los combustibles fósiles, el texto acordado reconoce el papel de los combustibles de transición, como puede ser el gas, a la hora de facilitar una transición a la vez que asegurar la seguridad energética.

### El fondo y los arreglos financieros para hacer frente a las pérdidas y daños se ponen en marcha

En un ejercicio inédito en las cumbres del Clima, durante el plenario de apertura de la COP de Dubái en el día de la reunión, se aprobó la decisión en la que se establecen los detalles de funcionamiento del fondo y los arreglos financieros para responder a las pérdidas y daños que se establecieron en la Cumbre de Sharm El-Sheikh en 2022. Hasta ahora, la toma de decisiones no se producía hasta el plenario de cierre los últimos días de las COP.

Este resultado temprano en la COP permitió inyectar un espíritu constructivo desde los primeros días de la Cumbre al poner en marcha una de las principales prioridades de los países más vulnerables. El hecho de que muchos países fueran preparados a Dubái para hacer anuncios financieros para su capitalización demostró desde un principio la voluntad de acuerdo y facilitó las discusiones en las dos semanas de trabajo.

Hasta la fecha se han movilizado 792 millones de USD para la operacionalización de estos arreglos financieros incluido en el fondo. La Unión Europea ha comprometido alrededor de 410 millones de €, entre los que se encuentran el compromiso de España de aportar 20 millones de €.

Además de los arreglos financieros y el fondo para pérdidas y daños, la Red de Santiago, establecida en la COP25 de Madrid en 2019 para catalizar asistencia técnica en materia de pérdidas y daños ➔



Además, los países se comprometen a acabar con la deforestación y la degradación de los bosques de aquí a 2030. Para ello, se reconoce la necesidad de un mayor apoyo e inversiones y se hace mención específica al papel de los pagos por resultados en actividades relacionadas con la reducción de las emisiones por deforestación y degradación de los bosques.

**Se avanza en la reforma del sistema financiero y en el debate sobre la alineación de los flujos financieros con el Acuerdo de París y, por primera vez, se apunta a fuentes financieras innovadoras**

Se continúa avanzando en la ampliación del debate sobre cómo movilizar financiación a gran escala para hacer frente al cambio climático y como alinear todos los flujos financieros, públicos y privados, con el Acuerdo de París con un claro llamamiento a la reforma de la arquitectura financiera multilateral, entre ella la de los Bancos Multilaterales de Desarrollo.

Como en cumbres anteriores, las decisiones de la COP28 ponen especial énfasis en la necesidad de mejorar las condiciones de acceso a la financiación, así como de aumentar financiación, nueva y adicional, especialmente concesional e instrumentos que no generen deuda en los países en desarrollo.

**La financiación para la adaptación cobra protagonismo**

La necesidad de aumentar la financiación para la adaptación ha cobrado protagonismo en Dubái.

Desde que el Glasgow en 2021 los países desarrollados se comprometieran a duplicar la financiación para la adaptación en 2025 respecto a los niveles de 2019 (lo que supone pasar de 20 000 millones USD a 40 000), los distintos informes no han hecho sino apuntar a unas crecientes necesidades de adaptación.

Por eso, en Dubái ha habido una fuerte presión para conseguir una mayor transparencia a la hora de que los países desarrollados comuniquen el avance hacia este objetivo y se ha reconocido que es necesario aumentar la financiación para la adaptación más allá del objetivo ya existente de duplicarla.

➔ a los países en desarrollo que son especialmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático, echa a andar tras haberse elegido un consorcio entre UNDRR (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*) y UNOPS (*United Nations Office for Project Services*) para que sea el anfitrión de su secretariado durante los próximos 5 años.

**La agenda de la adaptación cobra impulso político y consigue mayor visibilidad**

Las decisiones adoptadas en la COP pueden considerarse como unas de las más relevantes de la historia ya que definen mejor el objetivo de adaptación del Acuerdo de París de manera que ahora se cuenta con una guía mucho más clara sobre lo que se busca en materia de adaptación lo que va a permitir medir mejor y conocer los avances conseguidos.

Esta guía, que centra la agenda de la adaptación en la mejora del bienestar colectivo, deja claro que se busca lograr “el bienestar colectivo de todos, la protección de los modos de sustento y la economía, y la conservación y regeneración de la naturaleza para las generaciones presentes y futuras”. Para facilitar la comprensión de qué supone este objetivo en la práctica, por primera vez se concretan un conjunto de objetivos a 2030 que dan un sentido más concreto y detallado al objetivo global de adaptación y que van a permitir poder evaluar mejoras en materia de adaptación.

Los objetivos de naturaleza temática abordan aspectos relacionados con el agua; la alimentación y la agricultura; los impactos sobre la salud humana; los ecosistemas y la biodiversidad; los asentamientos humanos y las infraestructuras; los medios de vida y la erradicación de la pobreza; y el patrimonio cultural material e inmaterial, incluyendo los conocimientos tradicionales, locales e indígenas.

Los objetivos de naturaleza más operativa se asocian a las cuatro grandes dimensiones del ciclo de la adaptación: las evaluaciones de impactos, vulnerabilidad y riesgo; los planes nacionales y estrategias de adaptación; la implementación de políticas, planes y estrategias; y el seguimiento, evaluación y aprendizaje.

En términos de próximos pasos, se pone en marcha un programa de trabajo de dos años para desarrollar indicadores para poder medir avances en el cumplimiento de los objetivos anteriores.

**Se refuerzan los vínculos entre la acción climática y la protección de la biodiversidad**

Los textos acordados vuelven a reforzar los vínculos entre la crisis climática y la pérdida de biodiversidad, insistiendo en la importancia de asegurar la integridad de todos los ecosistemas, con menciones específicas a los bosques, océanos, montañas (que por primera vez contarán con un diálogo específico en junio de 2024) y la criosfera.



## Se pone de manifiesto el papel clave de las tecnologías en la lucha contra el cambio climático

El Consenso de Dubái da un importante impulso al debate sobre el papel de las distintas tecnologías como herramientas clave en la transición energética al reconocer la necesidad de un mayor desarrollo de tecnologías tanto de cero emisiones como de bajas emisiones, desde las tecnologías renovables, la nuclear, las tecnologías de captura y almacenamiento o el hidrógeno bajo en emisiones.

Este papel clave del desarrollo tecnológico queda reflejado también en los textos de negociación que subrayan la necesidad de superar barreras y reforzar la cooperación, así como la necesidad de reforzar la I+D+i, con una mención especial a la inteligencia artificial sobre la que ya se está trabajando en el contexto del Mecanismo Tecnológico de la Convención del Clima.

Además, se pone en marcha un programa de implementación tecnológica, que deberá verse apoyado por las entidades operativas del mecanismo financiero de la Convención, como puede ser el fondo Verde para el Clima o el fondo para el

Medio Ambiente Mundial, para reforzar el apoyo para la puesta en marcha de las prioridades en materia tecnológica identificadas por los propios países en desarrollo. A lo largo de este año se tendrán que definir los detalles concretos de este programa.

## No es posible cerrar la negociación sobre el funcionamiento de los mecanismos de mercado

Pese a los esfuerzos de los países para tratar de llegar a un acuerdo sobre las normas técnicas de funcionamiento de los enfoques cooperativos establecidos en el artículo 6 del Acuerdo de París (mecanismos de mercado y no de mercado), no ha sido posible encontrar una solución de consenso. La UE y otros países, sobre todo latinoamericanos, han preferido no adoptar unas normas del artículo 6 al considerar que no hubieran garantizado un mecanismo robusto y transparente.

## Conclusiones y próximos pasos

Pese a haber tenido lugar en un contexto geopolítico muy complejo marcado por los conflictos en Ucrania y Gaza y de gran incertidumbre, la COP28 de Dubái ha conseguido cumplir las expectativas y

dar unas señales claras que generan certidumbre y confianza entre los países, los inversores y los ciudadanos sobre la senda de reducción de emisiones necesaria para alcanzar la neutralidad climática a mediados de siglo. La puesta en marcha del fondo sobre pérdidas y daños el primer día de la Cumbre ha sido clave para generar un ambiente de negociación positivo que ha facilitado los debates entre los países.

Una de las grandes incógnitas hasta última hora ha sido qué país iba a presidir y albergar la próxima Cumbre del Clima en 2024. Finalmente se acordó que la COP29 tendrá lugar en Bakú, capital de Azerbaiyán en noviembre de 2024. Una COP que tendrá un marcado carácter financiero en la que, entre otras cuestiones, se tendrá que acordar el nuevo objetivo colectivo de financiación climática internacional. Tras Bakú, la COP30 tendrá lugar en Belem (Brasil) en 2025 a la que los países deben llegar preparados con nuevas contribuciones determinadas a nivel nacional que abarquen toda la economía, cubran todos los gases de efecto invernadero y se ajusten plenamente al límite de temperatura de 1.5 °C.

VERA ESTEFANÍA GONZÁLEZ

OFICINA ESPAÑOLA DE CAMBIO CLIMÁTICO

## PRÓXIMAS CITAS

### ENERO – OCTUBRE 2024

**28 ENERO – 1 FEBRERO, Baltimore, EE. UU.**

- 104ª Reunión de la American Meteorological Society

- <https://annual.ametsoc.org/index.cfm/2024/>

**13 – 15 MARZO, Cádiz, ESPAÑA**

- XXXVI Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española (AME) y 22º Encuentro Hispano-Luso de Meteorología

- <https://jornadas.ame-web.org/>

**14 – 19 ABRIL, Viena, AUSTRIA**

- European Geophysical Union General Assembly (EGU 2024)

- <https://www.egu24.eu/>

**6 – 10 MAYO, Long Beach, EE.UU.**

- 36ª Conferencia sobre Huracanes y Meteorología Tropical de la Sociedad

Meteorológica Americana

- <https://ametsoc.org/index.cfm/ams/meetings-events/ams-meetings/36th-conference-on-hurricanes-and-tropical-meteorology/>

**27 – 31 MAYO, La Habana, CUBA**

- Convención Meteorología 2024 y XII Congreso Cubano de Meteorología organizado por la Sociedad Meteorológica de Cuba (SometCuba). Incluye diversas subconferencias y simposios, principalmente de ámbito nacional cubano, aunque asistentes de otros países son bienvenidos

**12 – 14 JUNIO, Myrtle Beach, EE.UU.**

- 51st Conference on Broadcast Meteorology/Seventh Conference on Weather Warnings and Communication (Sociedad Meteorológica Americana)

- <https://ametsoc.org/index.cfm/ams/meetings-events/ams-meetings/51st-conference-on-broadcast-meteorology-seventh-conference-on-weather-warnings-and-communication/>

**2 – 6 SEPTIEMBRE, Barcelona, ESPAÑA**

- Reunión anual de la Sociedad Meteorológica Europea (EMS)

- [EMS Annual Meetings: European Meteorological Society \(emetsoc.org\)](https://www.emetsoc.org/)

**30 SEPTIEMBRE – 4 OCTUBRE, Würzburg, ALEMANIA**

- Conferencia anual de satélites meteorológicos de EUMETSAT

- <https://www.eumetsat.int/eumetsat-meteorological-satellite-conference-2024>

## Cómo funciona el mundo (How the work really works)

VACLAV SMIL, 2023

EDITORIAL: DEBATE, 368 PÁGINAS, PRECIO: 20.80 €, ISBN-10: 841861935X, ISBN-13: 978-8418619359

Vaclav Smil (1943), científico checo-canadiense, nació en Pilsen durante la Segunda Guerra Mundial durante la ocupación alemana (1939-1945) en el entonces denominado Protectorado de Bohemia y Moravia (actualmente República Checa). Completó sus estudios universitarios en la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Carolina de Praga (Chequia actualmente y Checoslovaquia hasta 1992) y en la Universidad Estatal de Pensilvania (EE. UU.). Tras la invasión soviética de Checoslovaquia, en 1968, emigró a Estados Unidos en 1969 y en 1972 se trasladó e instaló definitivamente en Canadá. Smil ha realizado investigaciones interdisciplinarias en los campos de la energía, los cambios ambientales y poblacionales, la producción de alimentos, la historia de la innovación técnica, la evaluación de riesgos y las políticas públicas. Ha publicado 47 libros y más de 500 artículos sobre estos temas. Actualmente es profesor emérito distinguido de la Universidad de Manitoba (Canadá).

Aunque los libros de Smil, incluido el que aquí reseñamos, han sido ampliamente publicados como favoritos de Bill Gates no comparten totalmente la visión tecno-optimista de éste último en temas como por ejemplo el problema del cambio climático. Los tecno-optimistas bien pueden ser caracterizados por su convicción en el desarrollo y la aplicación de tecnologías innovadoras (p. ej., desarrollo de energías renovables, captura y almacenamiento de carbono, almacenamiento de energía, etc.) como soluciones efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En cambio, los libros de Vaclav Smil suelen tender a proporcionar un enfoque más equilibrado y a menudo se le considera un realista más que un tecno-optimista. Si bien Smil reconoce la importancia de la tecnología en abordar los desafíos globales, incluyendo el cambio climático, también enfatiza la necesidad de considerar las limitaciones y desafíos asociados con la implementación de nuevas tecnologías a gran escala. Smil ha sido crítico con respecto a algunas expectativas exageradas sobre la rapidez con la que las tecnologías pueden transformar sistemas complejos, como el sistema energético a nivel mundial. Smil ha abordado ampliamente la complejidad de los desafíos ambientales y energéticos y ha destacado la necesidad de una

transición cuidadosa y realista hacia fuentes de energía más sostenibles. Aunque reconoce el potencial de la tecnología, también subraya la importancia de considerar los aspectos económicos, sociales y políticos en cualquier solución sostenible. Su enfoque se caracteriza por un análisis exhaustivo y una consideración cuidadosa de los desafíos y oportunidades asociados con la tecnología y la sostenibilidad.

En los siete capítulos que contiene este libro, repletos de datos muy esclarecedores, Smil desgana cómo entender los problemas relacionados con la energía, con la producción de alimentos, con los materiales esenciales de

energía. Nos explica cómo diferentes procesos geológicos, biológicos y hasta los relacionados con nuestra civilización se entienden mejor cuando se explican en términos de energía y de su conversión entre sus diferentes tipos. Las conversiones de energía están en la base de la vida misma y de la evolución. Defiende las ventajas de la energía eléctrica y la necesidad de electrificar muchos procesos productivos entre otras razones como un camino para la descarbonización de nuestra sociedad tan necesaria para poder afrontar el problema del cambio climático.

En el capítulo dedicado a la producción de alimentos, Smil relaciona –aportando gran cantidad de datos y ejemplos– su fuerte crecimiento con el incremento de la energía dedicada en todo el proceso de producción y en última instancia con el uso de combustibles fósiles. Se plantea el autor si podríamos mantener ese nivel de producción de alimentos sin recurrir a los fertilizantes y demás agroquímicos y sin depender tanto de los combustibles fósiles. La respuesta que da es positiva, pero sería a costa de que un porcentaje grande de la población, que ahora vive en un entorno urbano, se desplazase al campo y se encargase de las tareas ligadas a la producción de alimentos, revirtiendo el flujo de población desde el campo a las ciudades que ha predominado en el último siglo. Hay un insuficiente conocimiento generalizado del balance energético y de las sustancias críticas que intervienen en la producción de alimentos y que hace muy difícil mantener la máxima tradicional de que la producción de patatas proviene predominantemente de la energía solar por la más realista de que proviene, al menos en parte, del petróleo. También del carbón utilizado en la producción del acero que interviene en la mecanización y transporte de la producción de alimentos, del gas natural que intervienen en la producción de fertilizantes, de la electricidad, en parte generada por combustibles fósiles, que interviene en el procesamiento de las cosechas, cuidado del ganado, preparación y almacenamiento de los alimentos, etc.

Quizás el capítulo que me ha parecido más interesante, por menos conocido, es el relacionado con los materiales esenciales de nuestro



nuestro mundo, con la globalización, con los riesgos que nos afectan, con el medio ambiente y con nuestro futuro.

Aunque el tema de la energía y su relación con la evolución del hombre y de la sociedad ya había sido exhaustivamente tratado en un libro anterior (*Energía y civilización. Una historia*), aquí comienza este capítulo inicial insistiendo en el hecho de que los procesos –tanto naturales como generados por el hombre– pueden ser definidos y entendidos como una secuencia de conversiones entre distintos tipos de



mundo, lo que el autor denomina los cuatro pilares de la civilización moderna: amoníaco, plásticos, acero y cemento. Posiblemente sin el uso del amoníaco sintético utilizado en la fabricación a gran escala de fertilizantes no sería posible alimentar a la mitad de la población humana. El proceso conocido como Haber-Bosch, por el nombre de los químicos alemanes que lo desarrollaron, es un método industrial para la síntesis de amoníaco y representa uno de los avances tecnológicos más importantes del siglo XX. Sin embargo, el proceso es muy intensivo en uso de energía y además emite como subproducto anhídrido carbónico siendo una de las principales fuentes industriales de las emisiones de este gas. Las investigaciones en modificaciones genéticas que permitan la capacidad de fijación del nitrógeno atmosférico en plantas no leguminosas y mejora de la eficiencia energética con enfoques más sostenibles son esenciales para reducir la huella de CO<sub>2</sub> en la producción de fertilizantes.

Los plásticos constituyen la siguiente categoría de materiales esenciales en nuestra civilización. Su maleabilidad, ligereza, resistencia y bajo precio han sido primordiales para sustituir otros materiales utilizados tradicionalmente. Los plásticos comunes, como el polietileno, el polipropileno, el PVC, el PET y muchos otros, se producen a partir de compuestos químicos derivados del petróleo o del gas natural. El proceso implica la polimerización de monómeros para formar cadenas largas de polímeros, que luego se pueden moldear en una variedad de productos. Los desechos plásticos constituyen sin embargo un grave problema de contaminación en tierra y sobre todo en los océanos. El avance en la reducción en su uso, su reciclaje y su biodegradación son esenciales para paliar nuestra dependencia de ellos.

Los distintos tipos de aceros constituyen otro pilar fundamental de nuestra sociedad, sobre todo para la construcción de edificios y obras públicas. El proceso de su fabricación es muy intensivo en energía, demandando hasta el 6 % del suministro mundial de energía, siendo mayormente basada en la combustión de carbón y gas natural lo que convierte el proceso en uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero (con un 7-9 % de las emisiones directas procedentes de los combustibles fósiles). Los minerales de hierro, base de los aceros, tienen como principal ventaja su ubicuidad (el hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre) y su facilidad de reciclado.

El cemento es el componente esencial del hormigón que a su vez es el principal material de las principales megaestructuras humanas

construidas sobre todo desde la segunda mitad del siglo XX. Por ejemplo, la presa de las Tres Gargantas construida sobre el río Yangtzé en China requirió casi 28 millones de metros cúbicos de hormigón reforzado con 256 500 toneladas de acero. La producción de cemento ha crecido en los últimos años de una forma espectacular: en solo dos años (2018 y 2019) China ha producido tanto cemento como EE. UU. durante todo el siglo XX. Sin embargo, el actual hormigón, y por lo tanto las estructuras hechas con él, tiene una vida relativamente corta (del orden de decenas de años y raramente sobrepasando el siglo) lo que va a implicar que durante el siglo XXI vamos a asistir a su deterioro, renovación y desmontaje a medida que éstas necesiten ser demolidas o abandonadas. Además, la fabricación de cemento es una de las fuentes más importantes de emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial: aproximadamente el 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> provienen de la producción de cemento. Este proceso implica la liberación de CO<sub>2</sub> tanto durante la descarbonatación de la piedra caliza como en el calentamiento de los hornos mediante la quema de combustibles fósiles.

## La globalización es quizás la característica más sobresaliente de la actual economía

Las modernas economías están muy ligadas según Smil al flujo masivo de materiales como los cuatro arriba mencionados. Incluso los nuevos materiales requeridos para hacer la transición energética (basada en células solares, turbinas eólicas, coches eléctricos o baterías) todavía tienen una gran dependencia de los combustibles fósiles y requieren una gran cantidad de materiales que en algunos casos son escasos o de difícil extracción. Smil se muestra muy escéptico respecto al plazo de 2050 para alcanzar las emisiones netas cero de gases de efecto invernadero desde el punto de vista de nuestra dependencia de ciertos materiales y las perspectivas tecnológicas de su posible sustitución por otros materiales y/o procesos de fabricación.

La globalización es quizás la característica más sobresaliente de la actual economía, siendo una imagen muy visual de esta globalización tanto el enorme tráfico de contenedores (que circulan por todo el mundo moviendo productos elaborados desde los países esencialmente productores, fundamentalmente en Asia, a los países esencialmente consumidores, principalmente en Europa y Norteamérica) como el tráfico de grandes barcos petroleros (moviéndose

entre los escasos países productores de petróleo y el resto del mundo). Una consecuencia de esta globalización es la gran interdependencia de las economías, culturas, tecnologías, flujos de inversión, información y poblaciones. Este capítulo hace un repaso histórico de la globalización inevitablemente ligada al transporte (y consiguiente movimiento de personas y mercancías), a los modos de producción y consumo y a las tecnologías de la información.

El capítulo dedicado a los riesgos pasa revista a los diferentes peligros que en el pasado y actualmente han afectado a la sociedad como las hambrunas, pandemias, guerras, etc. Discute la distinta aceptación y/o tolerancia con ciertos riesgos llamando la atención sobre los riesgos asumidos de forma voluntaria o involuntaria y las falsas apreciaciones de los peligros reales o imaginarios. Por ejemplo, el miedo a un poco probable accidente nuclear y la tolerancia respecto a una exposición frecuente y muchas veces innecesaria a los rayos X. Smil proporciona muchos ejemplos de diferentes peligros, tanto naturales como causados por el hombre, y la muy diferente apreciación de ellos, de sus probabilidades y sus impactos.

Respecto a los riesgos medioambientales, con el problema del actual cambio climático situado en primer lugar, mucho se ha escrito y debatido pero lo que sigue estando en duda es la determinación colectiva para abordar eficazmente al menos algunos de los desafíos críticos, ya que existe una batería de soluciones, ajustes y adaptaciones para atacar estos riesgos. Los países ricos tienen mucho margen para reducir su uso medio de energía per cápita y aun así conservar una calidad de vida cómoda. Menciona el autor algunas soluciones técnicas simples para atajar el problema del cambio climático que tendrían efectos acumulativos significativos. Entre otros muchos ejemplos cita la obligatoriedad de instalar ventanas con triple capa de vidrio, la reducción de los desperdicios en la cadena alimentaria o cambiar los hábitos en el consumo mundial de carne. Estos dos últimos ejemplos reducirían las emisiones de carbono sin degradar la calidad del suministro de alimentos. Sorprendentemente, Smil sostiene que este tipo de medidas simples están ausentes, u ocupan un lugar bajo, en los típicos considerandos de las próximas "revoluciones" bajas en carbono que dependen con unas expectativas exageradas de un almacenamiento de electricidad a



→ gran escala, aún no disponible, o de la promesa de una captura masiva e irreal de carbono y su almacenamiento permanente bajo tierra.

En el último capítulo dedicado a recapitular sobre lo que el futuro nos depara, comienza Smil analizando las dos posturas contrapuestas de los apocalípticos y los tecno-optimistas. Dentro de las posiciones apocalípticas o catastrofistas pasa revista a las pasadas predicciones fallidas que ahora parece haber olvidado todo el mundo: los vuelos intercontinentales supersónicos liderados por el desarrollo del Concorde, la ubicua y generalizada energía de origen nuclear, el colapso informático del año 2000, el agotamiento de ciertos minerales y recursos críticos, etc. Análogamente, los tecno-

optimistas tampoco tienen una larga lista de éxitos, siendo un ejemplo bastante ilustrativo la energía basada en la fusión que desde hace décadas siempre se encuentra en el mismo horizonte temporal para su implementación. Los límites físicos ligados a la inercia de los sistemas (incluido el climático), la escala y la masa de los mismos representan con frecuencia barreras infranqueables para resolver ciertos problemas ambientales ya que, si bien han podido tener éxito a escala de laboratorio o de pequeños experimentos de campo, quedan absolutamente excluidos de representar soluciones factibles y realistas. La pasada pandemia de COVID-19 ha significado una cura de humildad global sobre nuestra capacidad para predecir y anticiparnos

a los hechos, si bien una vez enfrentados al peligro los esfuerzos científicos coordinados fueron capaces de acelerar los pasos para encontrar una solución en forma de vacunas, recortando sustancialmente los tiempos necesarios para su desarrollo.

El autor no se declara ni optimista ni pesimista sobre nuestro futuro, simplemente se declara un científico y como tal se ciñe a los datos, a las leyes de la naturaleza (de la física, en particular) y a los experimentos. Y nos recuerda, para finalizar este libro tan iluminador que, como siempre, el futuro no está escrito ni predeterminado, sino que depende fundamentalmente de nuestras acciones.

ERNESTO RODRÍGUEZ CAMINO

## Towards the “Perfect” Weather Warning: Bridging Disciplinary Gaps through Partnership and Communication

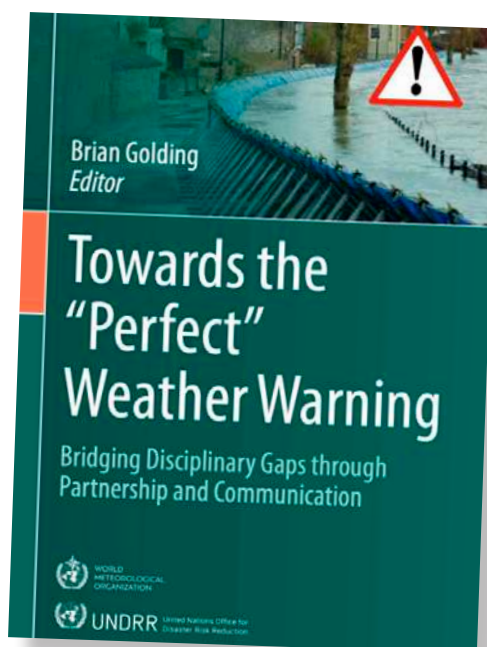
(Hacia una alerta meteorológica “perfecta”: cerrando las brechas interdisciplinarias mediante colaboración y comunicación)

BRIAN GOLDING, EDITOR, 2022

EDITORIAL: SPRINGER, 280 PÁGINAS, PRECIO: 41.75 €, ISBN-10: 3030989917, ISBN-13: 978-3030989910.

Este libro trata sobre la contribución de los avisos y alertas tempranas a la reducción de los daños y padecimientos causados por los fenómenos adversos específicos (p.ej., incendios forestales, aludes, inundaciones, deslizamiento de tierras, etc.) de origen natural. El tema principal del libro es la relación entre los productores y los receptores de las alertas, y entre los muchos expertos que contribuyen a crear una alerta. El antecedente de este libro es el proyecto de 10 años de duración sobre el Tiempo de Alto Impacto (HIWeather) desarrollado en el marco del Programa Mundial de Investigación Meteorológica de la Organización Meteorológica Mundial. Los trabajos de HIWeather están descritos en su página web (<http://hiweather.net>) y una versión digital de este mismo libro se encuentra disponible libremente en <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-98989-7>.

La redacción de este libro ha sido una colaboración de casi 50 expertos que han sido capaces de conseguir una narración coherente a lo largo de todo el proceso de generación de alertas que integra diferentes áreas de conocimiento. El proyecto HIWeather tenía como objetivo aumentar la capacidad de generar alertas tempranas para salvar vidas y reducir



daños en todo el mundo según venía marcado por el Acuerdo de Sendai de 2015. Este libro tiene el mismo objetivo y, en consecuencia, está dirigido a los servicios de emergencias, a los servicios meteorológicos y a los gobiernos de todos los países, y en especial de aquellos con sistemas de alerta poco desarrollados.

Este libro se centra en la producción y el uso

de las alertas. Desde el principio se distingue en él entre una predicción –que produce información sobre el estado futuro del tiempo o algún otro aspecto del medio ambiente sin considerar su uso– y un aviso o una alerta que proporciona información sobre una amenaza para dar paso a una respuesta. La respuesta será diferente según el alcance de la predicción, el nivel de confianza, la gravedad de la amenaza, la vulnerabilidad de los amenazados y otros factores. Normalmente quien toma decisiones es un usuario de una alerta, aunque también el receptor de una alerta puede a su vez ser un productor de una alerta para otra persona o colectivo. La producción de alertas se puede entender como una cadena de valor cuyo objetivo es proporcionar la información que permita tomar las mejores decisiones, tanto por parte de los individuos como de quienes tienen la responsabilidad de proteger a otros. En una cadena de alertas perfecta, la alerta recibida por el usuario final debería contener información precisa y exacta que satisfaga perfectamente su necesidad, aportada por cada uno de los muchos actores de la cadena. En las cadenas de alerta reales, la información, y por tanto el valor, puede perderse y ganarse en cada eslabón de la cadena. El término “valle de la muerte”



se acuñó como una metáfora del fracaso en traducir la investigación en mejoras operativas en la previsión del tiempo. En la figura que se muestra se usa, de una manera más general, para representar el fracaso en la transmisión de la información experta generada por las organizaciones que intervienen en la producción de alertas para conseguir las respuestas deseadas. Este fracaso es frecuentemente debido a una comunicación inadecuada a lo largo de la cadena de valor de la alerta. La altura de cada montaña puede interpretarse como la madurez de los conocimientos disponibles para su uso en alertas meteorológicas. El éxito en la comunicación de un contribuyente de la cadena con el siguiente se representa cruzando los valles con puentes, cuya altura puede representar el éxito de la comunicación entre esos contribuyentes para evitar la pérdida de información. Sin un puente, no hay comunicación y la experiencia de un contribuyente a la alerta se pierde por completo. Esta representación del proceso de alerta es quizás una excesiva simplificación de la realidad ya que las alertas reales se crean a partir de una compleja red de interacciones que tienen lugar entre una amplia variedad de personas involucradas en las actividades principales mostradas en la figura. Al mismo tiempo, en algunos casos, podrán combinarse distintas actividades en una sola persona. También hay profesionales cuya experiencia radica en ser uno de estos puentes. Sin embargo, el concepto y el correspondiente esquema son útiles y destacan la muy amplia gama de disciplinas involucradas y la necesidad de que esas disciplinas se comuniquen entre sí de manera efectiva.

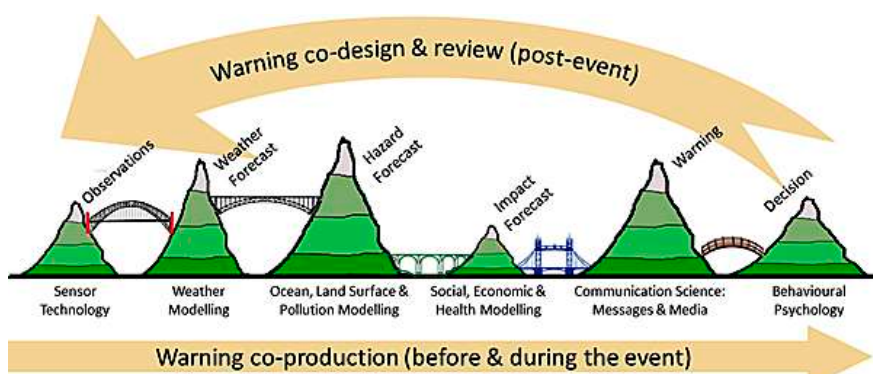
Este libro representa el proceso de generación de avisos y alertas como un camino que atraviesa cinco puentes que unen las observaciones con los pronósticos meteorológicos, los pronósticos de situaciones adversas, los pronósticos de impacto socioeconómico, los mensajes de alerta y la decisión de protección. Estos cinco puentes cruzan divisiones entre organizaciones y áreas de conocimiento relevantes. Cada puente representa la comunicación, traducción e interpretación de la información a medida que pasa de un área de conocimiento a otra y, en última instancia, llega hasta quien toma las decisiones. Sin asociaciones efectivas entre las disciplinas y/u organizaciones involucradas en cada etapa del proceso de alerta, la información se pierde y se distorsiona. Para que todo el sistema funcione eficazmente se requiere también una coordinación de quienes participan dentro de una estructura de políticas que incluye al gobierno, a las empresas privadas y a la sociedad civil. A medida que se exploran las alianzas sobre las

cuales se construye cada puente, se observa la experiencia y las habilidades que aporta cada socio, los desafíos de la comunicación entre ellos y las estructuras y los métodos de trabajo que permiten construir alianzas efectivas.

El libro está organizado en tantos capítulos como puentes hay en el proceso de generación de alertas, más un capítulo introductorio y otro que sintetiza todos los aspectos cubiertos por el libro. Por otra parte, el libro está ordenado de forma inversa al proceso temporal en el que intervienen los diferentes actores, es decir, se recorre el camino y se atraviesan los puentes desde derecha a izquierda del esquema. Los diversos capítulos muestran variedad de ejemplos y aplicaciones que están actualmente operativos y que podrían replicarse con las necesarias adaptaciones para que tengan en cuenta las condiciones locales.

Para comenzar, se exploran los desafíos que existen para alcanzar un nivel de concienciación respecto al riesgo de desastres por parte de las personas u organizaciones que re-

que producen alertas en los sectores público y privado, las fuentes de información a las que recurren para comprender la naturaleza del fenómeno adverso, sus impactos y las implicaciones para aquellos expuestos y el proceso de elaboración de esas alertas. Se presenta la amplia gama de expertos que conectan datos de fenómenos adversos con datos de impacto para crear herramientas que permitan evaluar los impactos de los fenómenos adversos previstos en las personas, los edificios, las infraestructuras y los negocios. También se analizan los diversos modos en que los resultados proporcionados por estas herramientas se convierten en alertas y cómo las relaciones entre las instituciones involucradas pueden facilitarlas. El éxito de una alerta debe tener en cuenta que las personas afectadas lo escuchen, lo comprendan y lo utilicen para tomar medidas que protejan vidas, propiedades e infraestructuras. La información sobre el impacto es un ingrediente que contribuye al éxito de una alerta, si bien los datos sobre impactos



Concepto de valles de la muerte en la cadena de valor de las alertas (fuente: UK Met Office)

ciben una alerta, de forma que ésta les empuje a actuar para reducir los potenciales impactos, siempre de forma consistente con las capacidades del productor de la alerta y teniendo en cuenta la rentabilidad (en el sentido coste-beneficio) de las actuaciones. Es importante mostrar cómo responde la gente a los avisos y alertas y cómo su naturaleza y la forma de su emisión afectan a su respuesta. Hay que destacar que los mensajes de alerta deben adaptarse a los diferentes grupos de receptores, alcanzándose un resultado más efectivo cuando existe una coordinación y colaboración entre el emisor y el receptor de las alertas, que incluye entre otros elementos el co-diseño de los sistemas de alerta y la incorporación de alguna comunicación de su grado de incertidumbre.

Siguiendo con la secuencia de puentes, el siguiente corresponde al que conecta a los comunicadores con los científicos, es decir a los difusores con los productores de alertas. Se parte analizando la variedad de actores

con frecuencia están muy distribuidos y son de difícil acceso. Además, los métodos de análisis pueden llegar a ser muy especializados. Por lo tanto, es importante identificar qué impactos son relevantes, quién tiene acceso a los datos y quién tiene las habilidades de análisis necesarias. Para evitar problemas con datos confidenciales o de propiedad privada, tanto los predictores meteorológicos como los de impactos deben estar preparados para poner sus datos a disposición de los especialistas en impactos de una forma tal que permita su comparación con los datos del impacto y el desarrollo de modelos y herramientas. Como los datos de impacto generalmente no se pueden compartir, es esencial que los socios comprendan mutuamente lo que el análisis intenta lograr, por qué se necesita una herramienta y cómo se va a utilizar.

El puente entre un fenómeno adverso y su impacto está en el centro de los esfuerzos actuales para mejorar la efectividad de las alertas



→ mediante la incorporación de información sobre el impacto en el proceso de alerta. Al mismo tiempo, presenta algunos de los desafíos más difíciles y exigentes tanto en cuanto a la metodología como al lenguaje. En este capítulo se recuerda que son los impactos relevantes los que deben comunicarse a quien toma las decisiones. Los datos son fundamentales para toda previsión de impacto. La obtención de información histórica sobre impactos relevantes casi siempre presenta dificultades, especialmente cuando los datos son confidenciales. Por lo general, los datos de alta calidad solo están disponibles mediante acuerdos con los propietarios de los datos. Son necesarios datos cartográficos para determinar la exposición, datos socioeconómicos para determinar la vulnerabilidad y datos sanitarios, económicos y de servicios para determinar los impactos mismos. Los datos deben ser precisos y coherentes, lo que exige que se recopilen, procesen y actualicen según estándares definidos. Además, hay que tener en cuenta que los impactos relevantes difieren según sean los usuarios finales. Mientras que el público está interesado en los impactos en los individuos, el gobierno, las empresas y las organizaciones humanitarias pueden estar más interesados en los impactos agregados. Los métodos y los datos deben seleccionarse según su aplicación. También hay que considerar las limitaciones del predictor de fenómenos adversos, que puede tener acceso a grandes volúmenes de predicciones de modelos, pero que no puede relacionarlos fácilmente con los tiempos y ubicaciones de los afectados, y frecuentemente tiene un conocimiento limitado de la precisión del modelo en situaciones peligrosas. Los pronósticos de fenómenos adversos deben ser probabilísticos y procesarse cuidadosamente para eliminar sesgos antes de su uso en modelos de impacto. Para muchas aplicaciones, es posible que además los modelos deban ser específicos para cada localización geográfica. Los fenómenos adversos producen impactos tangibles e intangibles, que van en cascada desde impactos directos hasta varios niveles de impactos indirectos. Pueden clasificarse en impactos humanos, financieros y de servicios, pudiéndose para estos últimos hacer una traducción en términos de valor económico. Al comparar los impactos económicos, puede resultar útil normalizarlos según los ingresos de los hogares, el volumen de negocios de las empresas o el PIB del país.

Hay un capítulo dedicado a conectar las situaciones meteorológicas con fenómenos adversos específicos (p.ej., incendios forestales, aludes, inundaciones, etc.) que vienen parcialmente determinados por ellas. Para lograr una efectiva

conexión es necesario combinar una aplicación efectiva de la experiencia y conocimiento de cada disciplina, incluyendo colaboración entre instituciones que eliminen barreras institucionales y construyan objetivos compartidos. Las observaciones de fenómenos adversos específicos son fundamentales para comprender su importancia y sus causas, aunque no estén ampliamente disponibles ni sean de fácil acceso. Es muy importante relacionar los modelos de fenómenos adversos específicos con los modelos meteorológicos comprendiendo el diferente papel de las variables relevantes en cada modelo, incluyendo las opciones de estándares de datos, resolución temporal y espacial, frecuencia de actualización, duración del pronóstico, representación de la incertidumbre y medidas de calidad. Los predictores meteorológicos y los predictores de fenómenos adversos específicos utilizan las predicciones numéricas de maneras diferentes. Mientras que los meteorólogos tienen en cuenta los errores de los modelos tanto en lo que respecta a la ubicación y el momento previstos del tiempo de alto impacto, prestando especial atención a los patrones de gran escala (a medio alcance) o a la convección (a corto alcance) y aplicando su experiencia para interpretar el pronóstico, los modelos de predicción de fenómenos adversos específicos a menudo son menos capaces de adaptarse a errores de posición o sincronización. La predicción por conjuntos ofrece un medio para transferir la incertidumbre en los pronósticos meteorológicos a incertidumbres en los pronósticos de fenómenos adversos. Sin embargo, si bien los conjuntos son buenos para capturar la incertidumbre, aún pueden estar sesgados. Por lo tanto, es importante corregir los errores sistemáticos en los resultados del modelo mediante un postproceso estadístico antes de su ingesta. En los modelos de fenómenos adversos. Los compromisos que se alcancen para las diferentes opciones deberán estar impulsados por los requisitos del usuario siempre que sea posible. Los modelos integrados serán cada vez más la base de la predicción de fenómenos adversos específicos en el futuro. Naturalmente, las predicciones de fenómenos adversos deberían verificarse comparándolos con las observaciones utilizando métodos que reflejen el uso de las predicciones en las alertas. Las predicciones de fenómenos adversos se utilizarán junto con las predicciones meteorológicas y deberán ser coherentes con ellas.

El capítulo dedicado a la predicción del tiempo comienza recordando que la predicción requiere como punto de partida el conocimiento del estado atmosférico en el momento a partir del cual se hace la predicción. Los modelos de predicción numérica del tiempo (PNT) y los

modelos de predicción inmediata (*nowcasting*, en inglés) proporcionan la base para los pronósticos meteorológicos de fenómenos adversos. Los modelos de PNT incluyen cada vez una descripción cada vez más detallada de los procesos, una mayor resolución y una mejor asimilación de datos. Además, la mayor frecuencia de la asimilación y la predicción de probabilidad por conjuntos están impulsando mejoras en la precisión de los pronósticos. Tanto la última generación de modelos de PNT a escala kilométrica como el desarrollo de nuevas capacidades de observación a esa escala constituyen el ingrediente fundamental tanto para el seguimiento como para la predicción de las condiciones meteorológicas adversas y para su verificación. Se sabe que las actuales capacidades de observación son inadecuadas para la nueva generación de modelos de alta resolución, por lo que se necesitan nuevas fuentes de datos, incluidos nuevos instrumentos, nuevas plataformas de observación y la extracción de información meteorológica a partir de datos obtenidos para fines no meteorológicos. Por ejemplo, se ha demostrado que las redes de telefonía móvil constituyen una fuente potencial de datos de precipitación de alta resolución. Las señales de comunicación por microondas entre torres de telefonía móvil sufren pequeños retrasos relacionados con la atenuación por precipitación. Se ha demostrado que una red de torres de telefonía móvil puede proporcionar una imagen precisa y detallada de la distribución espacial y la cantidad de precipitación. Sin embargo, el acceso a estos datos sigue siendo un problema ya que se consideran propiedad de los operadores de telecomunicaciones. En particular, siguen existiendo lagunas en nuestra capacidad para observar la dinámica preconvectiva y la termodinámica de la troposfera inferior, así como las zonas urbanas y las áreas de topografía compleja.

En definitiva, este libro constituye una muy valiosa aportación para el diseño de los sistemas operativos de avisos y alertas de fenómenos adversos y potencialmente peligrosos que tienen una base meteorológica (aunque no solamente). Con frecuencia los diferentes puentes o pasos que permiten sortear los denominados “valles de la muerte” entre distintas instituciones o comunidades de expertos, tal y como se describen en este libro, no están claramente definidos en muchos protocolos de actuación, produciéndose pérdida o malinterpretación de la información en los últimos eslabones de la cadena que son en definitiva los responsables últimos de la toma de decisiones.

ERNESTO RODRÍGUEZ CAMINO





## HAN COLABORADO TAMBIÉN...

Han colaborado también: Fernando Aguado Encabo, César Zancajo Rodríguez, África Barreto Velasco, Alberto Lunas Arias, José Antonio Quirantes Calvo, David Esteban Liljedahl, Imanol Zuaznabar García, Carlos Castillejo Balsera, Roberto Porto Mata, Nany Lavado Fernández, Teresa Gallego Abaroa, Carlos Fernández de Cara, Consorcio Provincial de Bomberos de Castellón y Policía Foral de Navarra.



**Título: "Cortinas"**

**Autor: David Esteban Liljedahl**

Durante la tarde del 13 de septiembre de 2023 se formaron varios núcleos convectivos en la isla de Mallorca, a causa de las convergencias entre el viento sinóptico y las brisas diurnas. En su mayoría solo dejaron cortinas de lluvia en forma de virgas, en algunos casos muy llamativas, como las que se ven en esta fotografía tomada desde Santa Eugenia.

# POR DELANTE DEL TIEMPO

www.aemet.es



Mucho más que  
una predicción...