



Evaluación de riesgos e impactos
derivados del cambio climático en
España (ERICC-2025)

VARIABLES CLIMÁTICAS
(VERSIÓN NO EDITADA)



Este capítulo forma parte de la siguiente publicación:

Título:

Evaluación de Riesgos e Impactos derivados del Cambio Climático en España (ERICC-2025)
Edición 2025

Asistencia técnica:

Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria (IH Cantabria)
Tecnalia Research and Innovation (Tecnalia)
Basque Centre for Climate Change (BC3)

Coordinación:

OECC: Patricia Klett Lasso de la Vega; Sara Rodríguez Rego; Francisco J. Heras Hernández; María Salazar Guerra; Vidal Labajos Sebastián
FB: Ana Lancho Lucini
IH Cantabria: Íñigo Losada Rodríguez, Laro González Canoura, Javier López Lara
Tecnalia: Efrén Feliu Torres, Beñat Abajo Alda, María Puig Fuentenebro
BC3: María José Sanz

Edición y maquetación:

Grupo Tangente

Con la colaboración de la Fundación Biodiversidad

Autor/Autores del capítulo:

Autores: Íñigo Losada Rodríguez, David Lucio Fernández



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Edita: © SUBSECRETARÍA Gabinete Técnico

NIPO (línea en castellano): 000-00-0000-000-0

ISBN: 000-00-0000-000-0

AVISO LEGAL: Los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados citando la fuente, y la fecha, en su caso, de la última actualización.

Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Losada, I.J., Feliu, E. y Sanz, M.J. et al. 2025. Evaluación de Riesgos e Impactos derivados del Cambio Climático en España (ERICC-2025). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid

CONTENIDO

Lista de acrónimos	3
Lista de símbolos.....	4
1 Introducción.....	4
2 Atmósfera: Observaciones climáticas recientes	7
3 Atmósfera: Proyecciones climáticas futuras.....	12
4 Océano: Observaciones climáticas recientes.....	18
5 Océano: Proyecciones climáticas futuras	22
6 Criosfera: Observaciones climáticas recientes	24
7 Criosfera: Proyecciones climáticas futuras.....	26
8 Resumen con las tendencias observadas y proyectadas en las principales variables climáticas directamente relacionadas con la evaluación sectorial de los efectos del cambio climático	30
9 Bibliografía	32

LISTA DE ACRÓNIMOS

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AMOC	Atlantic meridional overturning circulation (Circulación de vuelco meridional del Atlántico)
AR5	Fifth Assessment Report del IPCC (Quinto Informe de Evaluación)
CLIVAR-SPAIN	Red CLIVAR España (nodo nacional de CLIVAR)
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (Proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados, Fase 5)
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project, Fase 6 (Proyecto de intercomparación de modelos de clima acoplados, Fase 6)
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
FWI	Fire Weather Index (Índice Meteorológico de Incendios)
GCM	General Circulation Model (Modelo de Circulación General)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)
NSWS	Near-Surface Wind Speed (Velocidad del viento en superficie)

PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (incluye PNACC-1 y PNACC-2)
RCM	Regional Climate Model (Modelo Climático Regional)
RCP	Representative Concentration Pathway (Trayectoria Representativa de Concentración: RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)
SPEI	Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (Índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración)
SSP	Shared Socioeconomic Pathway (Trayectoria Socioeconómica Compartida: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)
SST	Sea Surface Temperature (Temperatura superficial del mar)
Rx1day	Máximo de precipitación diaria en 1 día (índice de extremos)
Rx5day	Máximo de precipitación acumulada en 5 días consecutivos (índice de extremos)

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	grados Celsius
%	porcentaje
mm	milímetros
cm	centímetros
m	metros
m/s	metros por segundo
km/h	kilómetros por hora
mm/año	milímetros por año
cm/año	centímetros por año
mm/día	milímetros por día

1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores retos contemporáneos para la sociedad y la naturaleza. Sus impactos, cada vez más visibles y medibles, están afectando múltiples sectores, desde la salud y el suministro de agua hasta la agricultura, la energía, la infraestructura o el turismo, y requieren la implementación de la adaptación con base en información técnica fiable, contextualizada y útil para la toma de decisiones.

En este contexto, el conocimiento de la evolución pasada y futura de las variables climáticas se convierte en una pieza clave para fundamentar los procesos de adaptación. Estas variables permiten caracterizar los cambios observados y futuros del sistema climático, identificar peligros, evaluar riesgos, diseñar medidas, y hacer seguimiento a su efectividad. Sin embargo, la variedad de fuentes disponibles, la complejidad inherente a los escenarios climáticos, las escalas temporales y espaciales implicadas y la propia incertidumbre de los modelos, pueden dificultar su uso para planificadores, técnicos, responsables sectoriales o decisores políticos que no cuentan con formación especializada en ciencias del clima y su aplicación a la adaptación.

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar el conocimiento necesario para entender el comportamiento de las variables climáticas que definen la peligrosidad como parte esencial del riesgo. Asimismo, incluye algunos fundamentos técnicos sobre datos climáticos y su aplicación en el ciclo completo de la adaptación, facilitando así una mejor comprensión a lectores no especializados que estén interesados.

Por tanto, como capítulo introductorio al resto de la evaluación de riesgos, este capítulo ofrece una caracterización general del clima en España, tanto de su evolución histórica como de su posible evolución futura. La información que aquí se presenta proviene fundamentalmente del (CLIVAR-España, 2024), elaborado por la red CLIVAR-España en colaboración con instituciones científicas nacionales, y constituye la fuente más actualizada, rigurosa y consensuada sobre el clima de España. Además, se han empleado otras fuentes, como (AEMET, 2017) (AEMET, 2024), que resume la tercera entrega de la generación de proyecciones regionalizadas para España, ambas publicaciones elaboradas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Junto con estas referencias sobre la base física del clima, resulta fundamental mencionar dos informes clave sobre impactos y riesgos derivados del cambio climático en España sobre los que se sustenta este análisis. El informe final del (Proyecto ECCE, 2005) constituyó el primer ejercicio sistemático de análisis sectorial de los efectos del cambio climático, sirviendo de referencia para el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC-1). Posteriormente, el informe (Sanz & Galán, 2021) actualizó y amplió esta aproximación en el marco del PNACC-2, incorporando el enfoque de riesgos climáticos en línea con el IPCC, e integrando de manera explícita la relación entre peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. Ambos documentos, aunque centrados en los impactos y en la adaptación sectorial, cuentan también con información específica relativa a la peligrosidad que puede ser de interés.

La caracterización climática es esencial para establecer la componente de peligrosidad climática. El concepto de peligro o peligrosidad hace referencia al potencial de que un fenómeno climático o proceso físico, como un evento extremo (inundaciones, olas de calor, tormentas, sequías) o una tendencia gradual (aumento del nivel del mar, desertificación), cause daños a personas, infraestructuras, ecosistemas o actividades socioeconómicas. Según el marco conceptual del IPCC, que es la base metodológica que sustenta el trabajo presentado en esta revisión, el peligro no se limita a describir la existencia del fenómeno, sino que incorpora tanto sus características físicas (magnitud, duración, intensidad) como su probabilidad de ocurrencia, de forma que constituye un elemento dinámico dentro de la evaluación del riesgo climático.

Obsérvese que, a lo largo de todo el informe de riesgos, se emplea de forma intencionada el término peligrosidad en lugar de amenaza. Aunque ambos conceptos pueden parecer intercambiables, la amenaza tiene un carácter más genérico o subjetivo, mientras que la peligrosidad está definida por las características cuantificables de un fenómeno físico. Utilizar «peligrosidad» permite alinear el análisis con los marcos del IPCC y el Marco de Sendai, facilitando una evaluación objetiva, comparable y orientada a la planificación.

La estructura de este capítulo distingue entre dos bloques. En el primero se analizan las tendencias climáticas observadas y, en el segundo, las proyecciones disponibles para cada uno de los tres grandes subsistemas del sistema climático terrestre con base en la literatura existente para España. Más concretamente, se hace uso de:

- Observaciones climáticas recientes, basadas en registros instrumentales y empíricos que permiten caracterizar la evolución del clima en España desde mediados del siglo XX.
- Proyecciones climáticas futuras, derivadas de modelos climáticos globales y regionalizaciones dinámicas y estadísticas¹, bajo distintas trayectorias socioeconómicas y escenarios de emisiones (SSP-RCP, por sus siglas en inglés) y horizontes temporales (2050 y 2100). Estas proyecciones corresponden, principalmente, a los resultados de las simulaciones de las iniciativas globales CMIP5 y CMIP6, así como a la iniciativa regional CORDEX.

Dentro de cada uno de estos bloques, la información se organiza en torno a los siguientes subsistemas:

- Atmósfera, que comprende variables como temperatura, precipitación, viento, humedad y fenómenos extremos.
- Océano, que incorpora temperatura, salinidad, nivel del mar, acidificación y circulación marina.
- Criosfera, que incluye nieve, hielo, glaciares y permafrost.

Para caracterizar la evolución del clima, se han seleccionado para cada subsistema un conjunto de variables e indicadores climáticos representativos. Estos permiten describir cuantitativamente la evolución observada y proyectada del clima, si bien no constituyen una lista completa, pues otras variables e indicadores pueden ser más apropiados en función del contexto sectorial o geográfico del análisis de riesgo.

Para cada subsistema se presenta además una síntesis estructurada mediante tablas que resumen las principales variables climáticas, las tendencias observadas o proyectadas, los valores cuantitativos disponibles, los niveles de incertidumbre y los sectores potencialmente afectados. Además, se aportan comentarios físicos breves y referencias a la regionalización de los fenómenos para facilitar su integración en análisis de riesgo sectoriales y planes de adaptación climática.

Como se verá, las tablas incluyen una asignación cualitativa sobre la incertidumbre asociada a la información presentada con el fin de orientar la interpretación de los resultados. Especialmente, en el contexto del análisis de riesgos climáticos y la toma de decisiones de las políticas de adaptación. Esta estimación del nivel de incertidumbre asociado a cada proyección o tendencia climática es específica de la peligrosidad, y se ha realizado a partir de los siguientes criterios:

- Valoraciones explícitas del informe:
Siempre que se disponga de una evaluación directa de la incertidumbre o de la confianza en los resultados (por ejemplo, indicando que una señal es robusta, débil o con alta dispersión), se ha respetado dicha categorización.

¹ Regionalizaciones generadas mediante modelos climáticos regionales (RCM) y métodos de regionalización estadística empírica (ESD)

- Consistencia intermodelo:

En los casos en que no se aporta una calificación directa, se ha considerado la coherencia de los resultados entre distintos modelos climáticos (globales y regionales). Una señal robusta y coherente entre modelos y escenarios justifica una baja incertidumbre, mientras que la divergencia entre modelos indica media o alta incertidumbre.

- Resolución y cobertura de datos:

Las variables con datos observacionales de alta calidad, cobertura temporal extensa y buena resolución espacial (por ejemplo, temperatura del aire o nivel del mar) presentan menor incertidumbre. Por el contrario, variables con escasa cobertura (como oxígeno disuelto, productividad marina o circulación oceánica profunda) se clasifican con incertidumbre alta.

- Complejidad del proceso físico:

Cuando la variable depende de procesos mal representados en los modelos climáticos (por ejemplo, retroalimentaciones biogeoquímicas, mezclas verticales oceánicas, cambios en la circulación atmosférica regional), se ha asignado un mayor nivel de incertidumbre.

Finalmente, aunque se han incluido también algunas conclusiones en relación con los sectores afectados por los cambios en el clima, la información detallada al respecto se encuentra en cada uno de los capítulos sectoriales incluidos en el informe de riesgos.

Acompañando a este capítulo se presentan dos Anexos. El primero de ellos, está dedicado a identificar de dónde provienen los datos climáticos necesarios y más comúnmente utilizados en adaptación, describiendo cómo se organiza la información y las técnicas habitualmente empleadas en materia de ciencia climática para su caracterización. Está orientado principalmente a aquellos lectores que quieran entender con mayor detalle la información que se presenta en el cuerpo del capítulo. En el segundo Anexo se presenta una selección no exhaustiva de fuentes científicas, portales de datos y herramientas útiles para ampliar o aplicar la información descrita.

2 ATMÓSFERA: OBSERVACIONES CLIMÁTICAS RECIENTES

Las observaciones instrumentales del clima en España (AEMET, 2024) muestran señales claras de calentamiento sostenido, aumento de extremos térmicos y una mayor variabilidad hidrológica. Se estima que el aumento de la **temperatura media** en España ha sido de 1,69 °C desde 1961 hasta 2024. Estudios detallados de series instrumentales (CLIVAR-España, 2024) estiman una tendencia de +0.21 °C por década desde 1961 hasta 2018, con diferencias estacionales: mayor en verano (+0.27 °C por década), seguida de primavera (+0.24 °C por década) y más moderada en otoño e invierno (+0.16 °C por década).

Una de las consecuencias más evidentes del cambio climático es el **incremento de días cálidos y la disminución de días fríos**. En el decenio comprendido entre 2015 y 2024 se registraron 209 récords de días cálidos y 7 récords de días fríos (mientras que el valor esperable teórico son 52 récords de cada tipo en ese período). En España peninsular, Ceuta, Melilla y Baleares, se estimó, para el periodo 1961-2018, un incremento de 0,20 °C por década para las **temperaturas máximas** y de 0,21 °C por década para las **mínimas**, observándose un aumento en ambas variables en los últimos años. Se observa que los aumentos de temperatura no se han producido de manera uniforme en todos los meses, sino que han sido específicos de determinados meses, en particular marzo y diciembre, así como junio y julio en menor medida, para la temperatura máxima; y agosto y octubre para la temperatura mínima.

Las **olas de calor** son más frecuentes, intensas y duraderas. Se ha observado un incremento en la frecuencia (+0,3 eventos/década), intensidad (+0,1 °C/década), duración (+0,9 días/década para la duración máxima

anual) y extensión espacial (+1,3 % de la Península Ibérica/ década) durante el periodo 1951-2019. Sin embargo, analizando periodos más recientes se observan aumentos en la frecuencia, alcanzando una tendencia de +1,0 a +2,6 eventos de olas de calor por década durante el periodo 1979-2017. Además, el inicio de la estación de las olas de calor se produce antes en el tiempo (4 días/década), lo que da lugar a una estación cálida más prolongada. En cuanto a los impactos espaciales, la región más afectada en términos de frecuencia es el centro de la Península Ibérica, mientras que el norte y sureste del Mediterráneo son las regiones más afectadas en términos de intensidad, y las regiones del sur y noreste de la Península sufren la mayor duración.

Merecen especial atención las islas Canarias debido a las particularidades de su ubicación y características geográficas y climáticas. Las Islas Canarias están experimentando temperaturas más elevadas especialmente en verano, lo que conlleva una mayor frecuencia de olas de calor.

El número de días de **helada** por año disminuyó para la Península Ibérica durante el periodo 1975-2018, dando lugar a un incremento del periodo libre de heladas debido a un retraso de las heladas otoñales (+0,4 a +1,06 días/año) y a la disminución de las heladas primaverales tempranas (-0,43 a -1,29 días/año). Esta reducción en el número de heladas fue más pronunciada en las estaciones de mayor altitud, así como el incremento del periodo libre de heladas.

Aunque la **precipitación anual** no muestra una tendencia clara, existe consenso en la confirmación de un descenso de las precipitaciones en marzo y junio y un ligero aumento en octubre (Martín, y otros, 2024). Al mismo tiempo, se observa que la intensidad de **eventos extremos de precipitación** ha aumentado, especialmente en el este peninsular, siendo la zona del Mediterráneo la más sensible a los extremos, en la que se observa un aumento de los eventos de precipitación torrencial extrema (≥ 200 mm/día), tanto en magnitud como en frecuencia. Las tendencias de las precipitaciones extremas no están claras para todo el territorio o período temporal, pero se ha comprobado un aumento de los eventos convectivos, lo que lleva a un aumento de los eventos de precipitaciones elevadas, especialmente a finales de otoño, probablemente relacionado con un mar Mediterráneo más cálido. En cuanto al **granizo**, se observa un incremento de eventos de granizo de gran tamaño, en los que puede estar influyendo también la alta temperatura del mar (Calvo-Sancho, y otros, 2024). En lo que respecta a los fenómenos de **nieve** en la Península Ibérica, se caracterizan por una elevada variabilidad interanual, lo que dificulta la identificación de tendencias a corto plazo. Sin embargo, los registros de nieve más largos muestran una disminución en la duración de la capa de nieve y su acumulación máxima (ver apartado sobre Criosfera).

La persistencia e intensidad de **sequías meteorológicas** también ha aumentado, medido mediante índices como el SPEI, afectando sobre todo al sureste peninsular y valle del Ebro. El siglo XXI registra la mayor frecuencia de sequías severas de los últimos 150 años. Aunque las cantidades de precipitación anual se han mantenido en torno a valores promedio, el incremento de las temperaturas ha provocado una mayor demanda evapotranspirativa de la atmósfera, lo que ha intensificado la duración y severidad de estos episodios.

Por otro lado, se ha observado una disminución de la **velocidad media del viento** superficial, con posibles implicaciones para la generación eólica y los patrones de evapotranspiración. La velocidad del viento superficial en España y Portugal ha disminuido hasta 2010, a un ritmo anual de aproximadamente $-0,15$ m*s⁻¹/década ($p < 0,05$), siendo seguido por un cese de la quietud o un periodo de fortalecimiento del viento débil y no significativo de $+0,04$ m*s⁻¹/ década.

Consideraciones físicas y regionales:

- Mayor calentamiento en verano y en zonas interiores, especialmente en la cuenca mediterránea.
- Aumento más acusado de las temperaturas mínimas nocturnas, lo que incrementa la frecuencia de noches cálidas con efectos en salud y ecosistemas.

- Adelanto y prolongación de la estación cálida, debido al inicio más temprano y final más tardío de las olas de calor.
- Eventos convectivos más frecuentes en la fachada mediterránea, favorecidos por un mar más cálido y condiciones atmosféricas inestables.
- Reducción de la velocidad del viento superficial, posiblemente asociada a cambios en los patrones de circulación atmosférica regional.
- Disminución de la cobertura nival y de su acumulación máxima en sistemas montañosos, especialmente Pirineos y Sistema Central, con consecuencias para los recursos hídricos.
- Sequías más persistentes e intensas, ligadas a la combinación de variables de mayor demanda evapotranspirativa, con especial impacto en el sureste del valle del Ebro,
- Mayor vulnerabilidad de la región mediterránea, que concentra múltiples riesgos: olas de calor, lluvias torrenciales, olas de calor marinas y eventos convectivos extremos.

Sectores potencialmente afectados

- Salud pública (olas de calor, noches cálidas).
- Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (sequías, lluvias intensas, heladas tardías, granizo).
- Forestal (olas de calor, sequías, incendios).
- Agua y recursos hídricos (sequías persistentes, reducción de nieve, mayor evapotranspiración).
- Costas y medio marino (eventos extremos, inundaciones)
- Energía renovable (viento superficial, más radiación solar, menor aportación hídrica).
- Infraestructuras (eventos extremos).
- Patrimonio cultural (eventos extremos térmicos, inundaciones).
- Patrimonio natural (olas de calor, sequías, pérdida de nieve).
- Urbanismo (isla de calor, estrés hídrico).
- Financiero y asegurador (eventos extremos)
- Turismo (olas de calor, reducción de nieve)

A continuación, en la Tabla 1, se presenta a modo de síntesis, las principales tendencias observadas de las variables climáticas relativas a la atmósfera identificadas en la evaluación sectorial.

Variable climática	Periodo observado	Indicador utilizado	Tendencia observada	Valor cuantitativo / región destacada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
Temperatura media anual	1961-2024	Promedio anual	Aumento sostenido	+1.69 °C desde 1961; +0.21 °C /década; Mayor en verano con 0.27 °C/década	Baja	Salud, energía, agricultura
Temperaturas máximas y mínimas	1961-2018	Promedio anual, máximo anual y mínimo anual	Aumento sostenido	+0.20 °C/década (máximas); +0.21 °C/década (mínimas)	Baja	Agricultura, salud, patrimonio natural
Días cálidos / fríos	2015-2024	Número de días	Aumento sostenido de días cálidos, descenso sostenido días fríos	209 récords de días cálidos vs 7 de días fríos (esperable 52 de cada uno)	Baja	Salud, urbanismo
Olas de calor	1951-2019 / 1979-2017	Frecuencia, intensidad, duración y extensión	Incremento fuerte	+0.3 eventos/década (1951-2019); +1.0-2.6 eventos/década (1979-2017); inicio 4 días antes/década	Baja	Salud, turismo, urbanismo
Días de helada	1975-2018	Eventos/año	Disminución sostenida	-0.43 a -1,29 días/año en primavera; retraso otoñal +0.4 a +1.06 días/año	Baja	Agricultura, financiero
Precipitación media anual	1951-2021	Promedio anual	Sin tendencia clara	Descenso en marzo y junio, ligero aumento en octubre; fuerte variabilidad	Alta	Agricultura, Agua, Energía
Precipitación extrema	1951-2021	Rx1day (máx. diaria) ≥200 mm/día	Aumento de intensidad	Aumento eventos torrenciales	Media	Infraestructura, agricultura, urbanismo
Granizo	1980-2020	Intensidad	Incremento de eventos extremos	Incremento de eventos de granizo de gran tamaño, asociados a un Mediterráneo cálido	Alta	Agricultura, infraestructura, financiero

Variable climática	Periodo observado	Indicador utilizado	Tendencia observada	Valor cuantitativo / región destacada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
Nieve	1960-2020	Duración y acumulación capa nival	Reducción	Disminución en duración y acumulación máxima (Pirineos, Sistema Central)	Media	Recursos hídricos, turismo, energía
Sequías meteorológicas	1980-2020	SPEI	Mayor intensidad y duración	Siglo XXI: mayor frecuencia en 150 años; Especialmente en sureste y valle del Ebro	Media	Agricultura, patrimonio natural, energía
Velocidad del viento en superficie	1961-2010	Velocidad media anual	Disminución generalizada	-0.15m/s por década (hasta 2010); repunte no significativo +0.04 m/s/década	Media	Energía eólica, transporte

Tabla 1: Resumen de la evolución histórica reciente variables climáticas principales de la atmósfera en España.

3 ATMÓSFERA: PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS

Las proyecciones climáticas bajo diferentes escenarios de emisiones sugieren una España más cálida, seca y con extremos intensificados hacia final de siglo XXI. El descenso de precipitación anual es probable en casi todo el territorio, más acusado en el sur y sureste, mientras que en el norte y noroeste la señal es más incierta. En paralelo, se proyecta un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, incluyendo olas de calor, precipitaciones intensas y periodos secos.

Las **temperaturas máximas, medias y mínimas** en la España peninsular muestran un claro aumento progresivo a lo largo del siglo XXI, siendo más acusado en verano y bajo el escenario más emisoro (RCP8.5). Tanto en máximas como en mínimas, el incremento es más intenso en verano y otoño que en invierno y primavera, y resulta especialmente marcado en las zonas del interior y del este peninsular, mientras que en el norte se proyectan aumentos más moderados. Para el periodo 2081–2100, las proyecciones indican que, en escala anual, los aumentos de temperatura oscilarían entre +4.2 °C y +6.4 °C en el escenario RCP8.5, entre +3.0 °C y +4.0 °C en el escenario RCP6.0, y entre +2.0 °C y +3.4 °C en el escenario RCP4.5. Los cambios más notables se esperan en verano, con incrementos medios superiores a +5 °C, y con una mayor incertidumbre asociada tanto a los modelos climáticos como a las técnicas de regionalización (AEMET, 2017).

Respecto a la duración de **las olas de calor**, existe concordancia entre todas las proyecciones y técnicas de regionalización en que las olas de calor serán más largas, siendo el incremento más acusado en el escenario más emisoro (RCP8.5) y a finales del siglo XXI. En promedio, la duración de la ola de calor más larga tendría entre 15 a 50 días más que su promedio en el periodo de referencia (1971-2000) en la España peninsular. La magnitud del cambio de este índice difiere de unas comunidades autónomas a otras, con cambios menores en Galicia, comunidades de la cornisa cantábrica y La Rioja y cambios mayores en Murcia, Baleares y sobre todo en Canarias (AEMET, 2017).

Para España peninsular, se observa una disminución del número anual de días de **helada** con una evolución muy similar entre los escenarios hasta 2050 y un descenso más pronunciado para el escenario de mayores emisiones (en torno a los 26 días en los métodos estadísticos y 40 días en la regionalización dinámica para el periodo 2081-2100 en RCP8.5). Por comunidades autónomas, prácticamente no se aprecian cambios en ambos archipiélagos, localizándose las variaciones menores en las comunidades del norte, Comunidad Valenciana y Región de Murcia, todas ellas zonas costeras y con pocos días de heladas; y las variaciones mayores en Castilla y León y Aragón.

En el caso de Canarias, se espera que las Islas Canarias experimenten aumentos significativos de temperatura (hasta +4,2°C a finales de siglo según el escenario RCP8.5) y una disminución sustancial de las precipitaciones (alrededor del 30%). Esto agudizará las condiciones de sequía, especialmente en altitudes más altas.

En el caso de las **precipitaciones**, para la España peninsular, la concordancia entre proyecciones es menor que para las temperaturas, por lo que las conclusiones son menos sólidas, pudiéndose apreciar ligeras disminuciones a lo largo de la segunda mitad del siglo. Analizando la magnitud del cambio de las precipitaciones, se espera una reducción de las precipitaciones medias en la España peninsular para los últimos veinte años del siglo XXI, con valores relativos a los del periodo de referencia (1961-1990) entre un -16 % y un -4 %. En la primavera esta reducción estaría entre el -24 % y el 0 % mientras que en el otoño la horquilla iría del -4 % al 4 %. En cuanto a las **precipitaciones extrema**, se estima que los sistemas aislados de precipitaciones que provocan fenómenos extremos serán mayores y más intensos a medida que aumente la temperatura. Para la Península Ibérica, se espera que los sistemas de precipitaciones más

grandes aumenten en número, intensidad y tamaño, mientras que los sistemas de tamaño intermedio disminuirían en número. Sin embargo, se observan claras diferencias en los métodos de regionalización. Este diferente comportamiento conduce a conclusiones más inciertas respecto a su evolución futura. En lo que respecta al **granizo**, se espera un aumento de su severidad, con un incremento del tamaño del granizo y más eventos de alto impacto (Calvo-Sancho, y otros, 2024) (Martín, y otros, 2024). Finalmente, en cuanto al fenómeno nival, en el Pirineo se observa que la **nieve** precipitada máxima aumentaría considerablemente, frente a una reducción de los valores medios, lo que pone de manifiesto un cambio en el patrón de precipitaciones hacia un modelo más extremo. Esto, asociado a un incremento de temperaturas, puede tener importantes implicaciones en las fusiones máximas (para más información sobre el manto nival, ver el apartado sobre Criosfera).

Junto con el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, se agravará la escasez de agua en zonas ya secas. Así, se proyecta una tendencia hacia climas más áridos sobre la Península Ibérica y el sur de Europa. Se constata una notable reducción de la **humedad relativa** en la Península Ibérica durante todas las estaciones y todos los escenarios climáticos, pero especialmente durante el verano, provocada principalmente por el aumento de las temperaturas y la mayor demanda evaporativa de la atmósfera. Una reducción proyectada de las precipitaciones en el sur de la Península Ibérica, combinada con un mayor aumento de la demanda de evaporación atmosférica, puede conducir a una disminución de la humedad del suelo y un aumento de las condiciones de **aridez**. También se prevé que los cambios en las condiciones de **sequía** aumenten tanto en frecuencia como en gravedad, siendo consistentes los resultados de estudios globales y regionales.

En lo que respecta al **viento**, existe una elevada incertidumbre sobre la evolución de la velocidad del viento superficial a final de siglo. En general, las proyecciones apuntan a cambios poco significativos en la velocidad media anual, con una ligera tendencia a la disminución a final de siglo, aunque con posibles aumentos locales en verano en regiones como el valle del Ebro, el Estrecho o Andalucía. En el caso del número de eventos con vientos de intensidades medias (>70 km/h) se refleja un decrecimiento progresivo hasta finales de siglo, mientras que para **vientos intensos** (>90 km/h) se da un incremento leve generalizado en casi toda la Península Ibérica en el futuro cercano y medio, principalmente en el norte excepto en la costa del Mar Cantábrico, siendo mayor en el primer periodo y perdiendo intensidad a lo largo del siglo (Grupo de Meteorología de Santander, 2018). Respecto a los ciclones y episodios de ciclogénesis explosiva, la mayoría de los estudios no proyectan cambios significativos en su frecuencia, aunque algunos resultados sugieren una ligera tendencia al aumento bajo escenarios de altas emisiones (RCP8.5) hacia finales del siglo XXI (Lopez-Marti, y otros, 2025).

El peligro de incendio se incrementa notablemente en el centro, este y sur peninsular, junto con el noroeste (Galicia y zonas colindantes del norte-centro peninsular), especialmente en la cuenca mediterránea. El cambio del régimen de lluvias (mayor irregularidad) y el aumento de las temperaturas, favorece las **condiciones propicias para que los incendios forestales** sean más virulentos y extensos, dada la mayor dificultad para extinguirlos con un mayor volumen de combustible expuesto a periodos de sequía cada vez más prolongados. Las proyecciones climáticas apuntan a un aumento de las condiciones de peligro de incendios, siendo más frecuentes (se prevé que la frecuencia de incendios inducidos por el calor aumente en un 14% a finales de siglo (2071-2100) en el escenario RCP 4.5, y en un 30% en el RCP 8.5 en la cuenca mediterránea), con eventos más extremos y temporadas de peligro más largas (se espera se extiendan hasta junio y, en menor medida, hasta septiembre). La región mediterránea tiene una alta sensibilidad a los incendios meteorológicos, y esta sensibilidad aumentará en un futuro próximo, especialmente en el escenario de altas emisiones (RCP 8.5). En conjunto, se espera un aumento del índice *Fire Weather Index* (FWI) en la Península Ibérica central y oriental, y también un alargamiento de la estación de incendios y de las condiciones medias de la FWI en las zonas atlánticas.

Consideraciones físicas y regionales

- Aumento de la subsidencia subtropical y bloqueo anticiclónico en verano, lo que intensifica la sequía estival y prolonga la estación cálida.
- Mayor calentamiento en zonas turísticas litorales, con especial impacto en Mediterráneo y archipiélagos.
- Diferencias entre modelos GCM y RCM en viento y precipitación, lo que incrementa la incertidumbre.
- Mayor incremento térmico en el interior y sureste peninsular respecto al norte y zonas atlánticas, reforzando los contrastes regionales.
- Mayor frecuencia y duración de olas de calor en Canarias y Mediterráneo.
- Mayor reducción de días de helada en áreas de montaña (Pirineos, Sistema Central).
- Tendencia hacia climas más áridos en el sur y sureste peninsular.
- Aumento proyectado del riesgo de incendio en la cuenca mediterránea y centro peninsular, con prolongación de la temporada de incendios.
- Mayor incertidumbre en precipitaciones extremas, con posibilidad de intensificación en el Mediterráneo, pero disparidad en otras regiones.
- Posibles aumentos locales de viento en verano en el valle del Ebro, Estrecho y Andalucía, frente a la tendencia general de estabilidad o ligera disminución en la media anual.

Sectores potencialmente afectados

- Agricultura, ganadería, pesca y alimentación (Sequias, lluvias intensas, heladas tardías, granizo, olas de calor)
- Salud pública (olas de calor, noches cálidas)
- Forestal (Olas de calor, sequías, incendios)
- Agua y recursos hídricos (sequias persistentes, reducción de nieve, mayor evapotranspiración, cambios en precipitación).
- Costas y medio marino (olas de calor marinas, eventos extremos)
- Turismo (índices bioclimáticos extremos).
- Patrimonio natural (olas de calor, sequias, incendios)
- Energía (variabilidad de viento superficial, mayor radiación solar, menor aportación hídrica para hidroeléctrica).
- Infraestructuras (eventos extremos, inundaciones)
- Patrimonio cultural (eventos extremos térmicos, inundaciones)
- Urbanismo (isla de calor urbana, estrés hídrico, lluvias torrenciales).
- Financiero y asegurador (Eventos extremos, mayor frecuencia de sequías e inundaciones).

A continuación, en la Tabla 2, se presenta a modo de síntesis, las principales proyecciones de las variables climáticas relativas a la atmósfera identificadas en la evaluación sectorial.

Variable climática	Escenario RCP	Horizonte temporal	Estadístico usado	Proyección esperada	Zona más afectada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
Temperatura (mínima, media y máxima)	RCP4.5 / RCP6.0 / RCP8.5	2100	Media anual	RCP4.5: entre +2.0 °C y +3.4 °C; RCP6.0: entre +3.0 °C y +4.0 °C; RCP8.5: entre 4.2 °C y +6.4 °C	Interior y este peninsular, Mediterráneo	Baja (señal robusta)	Salud, turismo, agricultura, energía
Olas de calor	RCP8.5	2100	Duración máxima	Incremento notable en la duración: entre +15 y +50 días respecto al periodo de referencia (1971–2000)	Toda España, especialmente interior y Canarias	Baja (señal robusta)	Salud, urbanismo, agricultura, turismo
Helada	RCP8.5	2100	Número de días de helada/año	Disminución generalizada; -26 días (métodos estadísticos) a -40 días (regionalización dinámica)	Interior peninsular (Castilla y León, Aragón); menores cambios en zonas costeras y archipiélago	Media (signo robusto, magnitud dependiente del método)	Agricultura, patrimonio natural, agua, financiero
Precipitación media	RCP8.5	2100	Total anual	-4% a -16% anual (-24% en primavera, -4% a +4% en otoño)	Sur y sureste, valle del Ebro	Alta (señal poco robusta)	Agricultura, recursos hídricos
Precipitación extrema	RCP8.5	2100	Episodios extremos	Aumento en frecuencia, intensidad y tamaño de los sistemas de precipitación más extremos	Mediterráneo oriental	Alta (dependencia método regionalización)	Infraestructura, medioambiente
Nieve				Ver apartado sobre Criosfera			
Granizo	RCP8.5	2100	Frecuencia e intensidad/diámetro	Aumento de severidad (tamaño) y de eventos de alto impacto	Zonas propensas a tormentas convectivas (interior y este peninsular, valle del Ebro, cuenca mediterránea)	Alta	Agricultura, financiero y asegurador

Variable climática	Escenario RCP	Horizonte temporal	Estadístico usado	Proyección esperada	Zona más afectada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
Humedad relativa	RCP4.5 y RCP8.5	2100	Promedio estacional	Notable reducción en todas las estaciones y escenarios, más acusada en verano por mayor demanda evaporativa	Península Ibérica, especialmente sur y zonas interiores	Media (proyecciones consistentes, aunque dependientes del balance temperatura-precipitación)	Agricultura, recursos hídricos, salud pública
Aridez	RCP8.5	2100	Índices de aridez y balance hídrico	Tendencia hacia climas más áridos; reducción de la humedad del suelo asociada a menor precipitación y mayor evaporación	Sur peninsular y cuencas mediterráneas	Alta (dependencia de proyecciones de precipitación)	Agricultura, recursos hídricos, ecosistemas terrestres
Sequías	RCP8.5	2100	Frecuencia e intensidad	Aumento tanto en frecuencia como en gravedad de las condiciones de sequía, consistente en estudios globales y regionales	Sur y sureste peninsular; cuencas del Ebro y Guadalquivir	Media-alta (señal consistente, pero magnitud variable según modelos)	Agricultura, recursos hídricos, energía hidroeléctrica
Viento medio	RCP8.5	2100	Velocidad media	Cambios poco significativos; ligera tendencia a la disminución, con posibles aumentos locales en verano	Valle del Ebro, Estrecho, Andalucía	Alta	Energía eólica, transporte, calidad del aire
Viento extremo	RCP8.5	2100	Frecuencia de eventos (>70 y >90 km/h) y ciclogénesis	Descenso progresivo de vientos >70 km/h; leve incremento de eventos >90 km/h en norte peninsular (excepto costa Cantábrica) en futuro cercano y medio, perdiendo intensidad hacia finales de siglo;	Norte peninsular (excepto costa Cantábrica); Atlántico noreste	Muy alta (gran dispersión entre modelos y métodos de regionalización)	Transporte, sector asegurador

Variable climática	Escenario RCP	Horizonte temporal	Estadístico usado	Proyección esperada	Zona más afectada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
				ciclogénesis sin cambios significativos o con ligera tendencia al aumento			
Condiciones meteorológicas de incendio (Ocurrencia conjunta de condiciones extremas de temperatura, viento, sequía y humedad relativa)	RCP4.5 y RCP8.5	2100	Fire Weather Index (FWI)	Incremento notable del peligro de incendios: frecuencia de incendios inducidos por calor +14 % en RCP4.5 y +30 % en RCP8.5 en la cuenca mediterránea; mayor virulencia y extensión de los incendios; alargamiento de la temporada de riesgo (desde junio y hasta septiembre); aumento del FWI en la Península Ibérica central y oriental y en zonas atlánticas	Centro, este y sur peninsular; Galicia y norte-centro; cuenca mediterránea (alta sensibilidad)	Media (señal consistente, magnitud variable según modelo/escenario)	Ecosistemas, gestión forestal

Tabla 2: Resumen de las proyecciones futuras de las variables climáticas principales de la atmósfera en España

4 OCÉANO: OBSERVACIONES CLIMÁTICAS RECIENTES

Las observaciones del océano en aguas españolas muestran señales inequívocas de calentamiento, aumento del nivel medio del mar, cambios en el oleaje y transformaciones químicas que reflejan el impacto del cambio climático en el medio marino.

La **temperatura superficial del mar (SST)** ha experimentado un incremento sostenido desde mediados del siglo XX. En 2024, la temperatura media alcanzó 20,0 °C, lo que supone una anomalía de +0,7 °C respecto al promedio 1991–2020, situándose como el segundo valor más alto de la serie iniciada en 1940. Este calentamiento ha favorecido la proliferación de olas de calor marinas en el Mediterráneo occidental y Canarias, caracterizadas por su persistencia, mayor extensión espacial y récords de intensidad, con efectos constatados sobre praderas de Posidonia oceánica, arrecifes, especies comerciales y actividades recreativas.

El **nivel medio del mar** presenta una tendencia positiva robusta. Los registros de altimetría satelital (1993–2023) indican un ascenso de +3 mm/año, en línea con las series de mareógrafos (como la de Alicante, con más de 100 años de datos). A esta tendencia de fondo se suma la **marea meteorológica**, generada por los vientos y campos de presión sobre la superficie del océano, que puede aportar oscilaciones adicionales de hasta ±40 cm en las costas españolas. La combinación de ambos factores ha incrementado la frecuencia de episodios de inundación costera en áreas urbanas bajas y en deltas como el del Ebro y el Guadalquivir. Además, la **subsistencia** (hundimiento en áreas como el noroeste peninsular, -0,7 mm/año, o Delta del Ebro de -1,5 mm/año a -3 mm/año) modula el nivel relativo del mar y condiciona la exposición local.

Respecto al **oleaje**, las boyas y reanálisis muestran una tendencia de ligero aumento de la altura significativa y del periodo pico en el Atlántico norte y Cantábrico, asociada a una intensificación de temporales invernales vinculados a borrascas profundas. En cambio, en el Golfo de Cádiz se han observado descensos en la altura de ola, mientras que en el Mediterráneo las tendencias son más heterogéneas: ligeros descensos en Costa Brava, aumentos del periodo medio en Baleares y cambios en la dirección predominante en el litoral oriental. Estas modificaciones del régimen de oleaje influyen en los procesos de transporte sedimentario, erosión e inundación costera, así como de la fiabilidad y operatividad portuaria.

La marea meteorológica y el oleaje, junto al ascenso sostenido del nivel medio del mar, se combinan para intensificar los riesgos de inundación y erosión costera. Estos episodios son especialmente relevantes en zonas bajas, deltas, marismas y áreas litorales urbanas. Un ejemplo destacado se produjo en 2014 en la costa cantábrica, donde la concurrencia de eventos extremos de oleaje y nivel del mar provocó pérdidas económicas estimadas en 25 millones de euros.

Las propiedades químicas del océano también muestran cambios claros. Se observa una tendencia de **acidificación oceánica**, con descensos de pH de entre -0,01 y -0,04 unidades por década, en mayor medida en el Mediterráneo, lo que afecta a la calcificación de moluscos, corales y organismos planctónicos. En paralelo, se detectan reducciones en el oxígeno disuelto en aguas intermedias y profundas, atribuibles a la mayor estratificación de la columna de agua y a la disminución de la ventilación oceánica. Este proceso se traduce en una menor disponibilidad de oxígeno en hábitats críticos, con implicaciones para especies comerciales y para la resiliencia de ecosistemas marinos.

La **estratificación térmica y salina** de la columna de agua se ha intensificado, lo que reduce la mezcla vertical y limita el aporte de nutrientes a la superficie. Este fenómeno ha sido más acusado en el Mediterráneo, donde además se observa un aumento sostenido de la salinidad, asociado a la evaporación neta positiva y al calentamiento regional. Todo ello genera condiciones que afectan tanto a la productividad primaria como a la estructura de las comunidades marinas.

Consideraciones físicas y regionales

- Mayor calentamiento superficial del agua del mar en Mediterráneo occidental y Canarias, con récords recientes de olas de calor marinas.
- Ascenso del nivel medio del mar (+3 mm/año desde 1993), modulados localmente por marea meteorológica y subsidencia.
- Ligeramente incremento de altura significativa y periodo pico en el Cantábrico; descenso en Golfo de Cádiz; señales mixtas en Mediterráneo.
- Mayor frecuencia de inundaciones costeras por la interacción de marea meteorológica, oleaje y aumento del nivel medio.
- Descenso progresivo del pH oceánico, especialmente en cuencas mediterráneas.
- Disminución del oxígeno disuelto en aguas intermedias y profundas, ligada a mayor estratificación.
- Aumento de la salinidad y estratificación en el Mediterráneo, con implicaciones en productividad y biodiversidad.

Sectores potencialmente afectados

- Costas e infraestructuras litorales (nivel del mar, oleaje extremo, inundación costera).
- Pesca y acuicultura (temperatura superficial, oxígeno disuelto, acidificación).
- Turismo (olas de calor marinas, inundación costera, erosión costera).
- Puertos (oleaje, nivel del mar, marea meteorológica).
- Biodiversidad y ecosistemas marinos (acidificación, pérdida de oxígeno, estrés térmico, salinidad).
- Financiero y asegurador (eventos extremos, inundación costera)

A continuación, en la Tabla 3, se presenta a modo de síntesis, las principales tendencias observadas de las variables climáticas relativas al océano identificadas en la evaluación sectorial.

Variable climática	Periodo observado	Indicador utilizado	Tendencia observada	Valor cuantitativo / región destacada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
Temperatura superficial del mar (SST)	1940–2024 (serie reanálisis)	Temperatura media anual	Aumento sostenido	20,0 °C en 2024 (+0,7 °C respecto 1991–2020); mayor en Mediterráneo occidental y Canarias	Baja	Pesca y acuicultura, turismo, biodiversidad/ecosistemas
Olas de calor marinas	Últimas décadas, intensificación reciente	Frecuencia, duración, extensión espacial	Aumento en persistencia, extensión e intensidad	Récords recientes en Mediterráneo occidental y Canarias	Baja	Biodiversidad/ecosistemas, turismo, pesca
Nivel medio del mar	1993–2023 (altimetría satelital); >100 años (mareógrafos)	Incremento anual	Ascenso sostenido	+3 mm/año	Baja	Costas e infraestructuras, puertos, financiero-asegurador
Marea meteorológica	1948–2024 (serie reanálisis)	Valor puntual	Variabilidad espacio-temporal	Hasta ±40 cm en costas españolas	Baja	Inundación costera, puertos, financiero-asegurador
Subsidencia	1990-2020	Promedio anual	Descenso de terreno	Variabilidad espacial; Hasta -0,7 mm/año (Noroeste); -0,3 a -0,6 mm/año Golfo de Cádiz; -1,5 a -3 mm/año Delta del Ebro	Media	Costas e infraestructuras
Oleaje	1948-2024 (serie de reanálisis)	Altura significativa, periodo pico, dirección predominante	Mixta, según región	Incremento ligero en Cantábrico y Atlántico norte; descenso en Golfo de Cádiz; heterogéneo en Mediterráneo (ej. aumento periodo medio en Baleares)	Baja	Puertos, costas, transporte sedimentario, infraestructuras

Variable climática	Periodo observado	Indicador utilizado	Tendencia observada	Valor cuantitativo / región destacada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
pH oceánico (acidificación)	1995-2024	Variación de pH	Descenso progresivo	-0,01 a -0,04 unidades/década (más acusado en Mediterráneo)	Media	Biodiversidad, pesca y acuicultura
Oxígeno disuelto	1990-2024	Variación concentración	Descenso	Reducción en cuencas mediterráneas y zonas estratificadas	Media	Pesca y acuicultura, biodiversidad
Estratificación térmica y salina	Últimas décadas	Diferencia temperatura superficie-fondo	Intensificación	Mediterráneo: aumento salinidad sostenido	Media	Productividad primaria, biodiversidad, pesca

Tabla 3: Resumen de la evolución histórica reciente variables climáticas principales al océano en España

5 OCEANO: PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS

Las proyecciones oceánicas para las aguas que rodean la Península Ibérica y los archipiélagos españoles indican transformaciones significativas a lo largo del siglo XXI, como consecuencia directa del aumento global de gases de efecto invernadero. Bajo escenarios de altas emisiones (como SSP5-8.5), se prevén cambios sustanciales en la temperatura superficial del mar, el nivel medio del mar, la acidez, la concentración de oxígeno disuelto y la circulación oceánica. Estos cambios repercutirán no solo en la dinámica física del océano, sino también en los ecosistemas marinos, la pesca, el turismo y las infraestructuras costeras.

Consideraciones físicas y regionales

- Nivel del mar: Se proyecta una subida media de entre 50 y 60 cm para 2100, siendo mayores en el Atlántico que en el Mediterráneo. Esta subida es el resultado de la expansión térmica del agua, el deshielo de glaciares y capas de hielo, y las variaciones regionales debidas a corrientes y redistribución de masas.
- Temperatura superficial del mar (SST): El mar Mediterráneo se calienta más rápidamente que el Atlántico. Para 2100, se prevé un aumento de hasta 3 °C en el Mediterráneo y de 2 °C en el Atlántico, con consecuencias sobre la biodiversidad y la intensidad de fenómenos extremos marinos.
- Acidificación: La disminución del pH oceánico puede alcanzar -0.3 a -0.4 unidades para 2100, lo que afecta especialmente a organismos calcificantes como moluscos, corales y plancton.
- Oxígeno disuelto: La pérdida de oxígeno afecta la productividad marina. Se estima una reducción del 2% al 4%, especialmente en el Atlántico y el Mar Cantábrico.
- Circulación oceánica (AMOC): La Circulación Meridional de Retorno del Atlántico (AMOC), que regula el clima europeo, podría debilitarse hasta un 39% hacia finales de siglo bajo el escenario SSP5-8.5, con elevada incertidumbre debido a la dispersión entre modelos (17%-55%). Este debilitamiento afectaría el régimen de lluvias en el oeste peninsular, al nivel del mar en el Atlántico y a la conectividad biológica marina.

Sectores afectados

- Zonas costeras e infraestructuras (Aumento del nivel medio del mar y modificación de los patrones de energía del oleaje)
- Pesca y acuicultura (Alteración de las condiciones fisicoquímicas del océano).
- Ecosistemas marinos (Olas de calor marinas, modificación de las propiedades fisicoquímicas del océano).

A continuación, en la Tabla 4, se presenta a modo de síntesis, las principales proyecciones las variables climáticas relativas al océano identificadas en la evaluación sectorial.

Variable oceánica	Indicador / Métrica	Proyección esperada 2100	Región más afectada	Incertidumbre	Comentarios / Consideraciones	Sectores afectados
Nivel medio del mar	Altura relativa	+60 cm Atlántico / +50 cm Mediterráneo	Costa atlántica, Baleares	Baja	Máximo en costa atlántica; se espera +20 cm para 2050	Costas, urbanismo, infraestructuras
Temperatura superficial del mar (SST)	Incremento medio anual	+2 °C (Atlántico) / +3 °C (Mediterráneo)	Mediterráneo occidental	Media	Mayor calentamiento estival; incremento de olas de calor marinas	Pesca, turismo, acuicultura
Acidificación	Descenso del pH	-0.3 a -0.4 unidades	Generalizado	Media	Afecta organismos calcificantes y cadenas tróficas	Ecosistemas, pesca, acuicultura
Oxígeno disuelto	Reducción concentración	-2% a -4%	Atlántico, Cantábrico	Alta	Puede afectar hábitats profundos y productividad primaria	Pesca, biodiversidad marina
Circulación AMOC	Reducción de intensidad	-39% (17%-55%)	Atlántico norte	Alta	Impacto en clima regional, subida del mar en costa atlántica	Corrientes, clima, conectividad biológica
Oleaje extremo	Altura significativa del oleaje	Ligero aumento proyectado (+5-10%)	Galicia, Cantábrico	Alta	Potencial aumento de impactos en costas expuestas	Infraestructuras, riesgos litorales

Tabla 4: Resumen de las proyecciones futuras de las variables oceánicas principales en España para 2100 (SSP-8.5)

6 CRIOSFERA: OBSERVACIONES CLIMÁTICAS RECIENTES

La criosfera ibérica, compuesta por glaciares, permafrost, nieve estacional y formaciones de hielo en cuevas, está experimentando una degradación acelerada como consecuencia del calentamiento global, lo cual tiene implicaciones directas en la disponibilidad de recursos hídricos, el turismo de montaña, la estabilidad geotécnica de alta montaña y la conservación de registros paleoclimáticos.

Desde 1980, los glaciares pirenaicos han perdido más del 60% de su superficie, y muchos de ellos están cerca de su desaparición. Este retroceso se debe al aumento sostenido de las temperaturas y a una reducción de la acumulación nival invernal. Asimismo, el permafrost de alta montaña, especialmente en el Pirineo central, está mostrando claros signos de degradación, mientras que en Sierra Nevada ya se considera funcionalmente inexistente.

La duración de la capa de nieve disminuye de forma significativa, con pérdidas de entre 1 y 2 días por década, afectando a ecosistemas de montaña, actividades recreativas y la gestión del agua. Las cuevas de hielo, valiosos archivos naturales de clima pasado pierden espesor a un ritmo de 30–40 cm por año. En conjunto, se estima que la altitud mínima para la persistencia de procesos fríos ha ascendido entre 100 y 150 metros desde 1990, restringiendo aún más la distribución espacial de estos procesos.

Consideraciones físicas y regionales

- La criosfera se encuentra confinada a las altas cotas del Pirineo, con fenómenos residuales en Picos de Europa y Sierra Nevada.
- El retroceso de glaciares y la fusión del permafrost modifican los balances hídricos estacionales, con menor aporte en verano.
- Existe alta incertidumbre en la monitorización de permafrost en regiones con poco instrumental y series cortas.

Sectores potencialmente afectados

- Recursos hídricos (Glaciares, permafrost).
- Turismo de montaña (Glaciares, permafrost, nieve).

A continuación, en la Tabla 5, se presenta a modo de síntesis, las principales tendencias observadas de las variables climáticas relativas a la criosfera identificadas en la evaluación sectorial.

Elemento	Indicador climático utilizado	Tendencia observada	Valor cuantitativo estimado	Periodo observado	Región más afectada	Nivel de incertidumbre	Sectores impactados
Glaciares (Pirineos)	Superficie y espesor glaciar	Disminución rápida	-60% desde 1980; <20 glaciares activos	1980–2020	Pirineo central	Baja–media	Recursos hídricos, turismo
Permafrost	Presencia y temperatura del suelo	Retroceso severo	Desaparición en Sierra Nevada; degradación activa en Pirineos	En curso	Sierra Nevada, Pirineos	Alta	Infraestructura, procesos geotécnicos
Capa de nieve	Duración y acumulación nival	Disminución sostenida	-1 a -2 días por década; -20% acumulación máxima	1970–2020	Todas las cordilleras	Media	Agua, turismo, ecosistemas
Cuevas de hielo	Espesor y volumen de hielo	Pérdida acelerada	-30 a -40 cm/año; >50% de pérdida desde 1980	1980–2020	Pirineos, Sistema Ibérico	Alta	Ciencia, conservación de registros climáticos
Altitud procesos fríos	Altitud mínima de nieve/suelo helado persistente	Ascenso progresivo	+100 a +150 m desde 1990	1990–2020	Pirineos	Media	Biodiversidad, evolución ecosistemas

Tabla 5: Resumen de la evolución histórica reciente de los elementos principales de la criosfera en la Península Ibérica.

7 CRIOSFERA: PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS

Las proyecciones climáticas coinciden en señalar que la criosfera en España continuará experimentando un marcado retroceso a lo largo del siglo XXI, condicionado por el aumento de las temperaturas y los cambios en el régimen de precipitaciones. Los glaciares, la nieve estacional, el permafrost de alta montaña y los procesos ligados a la altitud muestran una fuerte sensibilidad al calentamiento proyectado, con pérdidas aceleradas bajo los escenarios de mayores emisiones.

En los Pirineos, los modelos indican una disminución sustancial de la superficie y espesor de nieve. Para mediados de siglo (2041–2070), bajo el escenario RCP4.5, la duración de la **cobertura nival** podría reducirse entre un 25% y 40%, mientras que bajo el escenario RCP8.5 las pérdidas alcanzarían valores de 50% a 70% en altitudes medias (1.500–2.000 m). Hacia finales de siglo (2081–2100), la **temporada de nieve** se acortaría entre 1 y 2 meses respecto al periodo de referencia (1971–2000), siendo más acusado el descenso en primavera y otoño, con implicaciones directas en la disponibilidad de recursos hídricos.

En lo que respecta a los **glaciares pirenaicos**, su retroceso continuará de forma acelerada. Estudios recientes proyectan que bajo RCP8.5, prácticamente desaparecerán antes de 2050, con pérdidas superiores al 95% de la superficie actual. Bajo un escenario intermedio (RCP4.5), se mantendrían algunos pequeños glaciares relictos en las cotas más elevadas (>3.000 m), pero con una reducción drástica de su volumen y funcionalidad hidrológica.

El **permafrost** de alta montaña, restringido a enclaves del Pirineo central, también se encuentra en franco retroceso. Los modelos apuntan a su desaparición prácticamente completa antes de 2050 bajo RCP8.5, y solo a una conservación residual y discontinua en el escenario más optimista (RCP2.6).

Además, se proyecta un **desplazamiento progresivo del límite altitudinal de la nieve** hacia cotas más elevadas, superior a 300 m por siglo en escenarios de altas emisiones. Esto implicaría una mayor irregularidad en la ocurrencia de nevadas intensas, cada vez más aisladas y asociadas a fenómenos convectivos, así como la reducción de procesos fríos persistentes en baja y media montaña.

Consideraciones físicas y regionales

- El retroceso nival será más acusado en cotas medias (1.500–2.000 m), donde las pérdidas podrían superar el 70% bajo escenarios de altas emisiones.
- Los descensos serán más intensos en Pirineos y Sierra Nevada, mientras que en los sistemas montañosos del norte peninsular se espera un retroceso más moderado.
- Se anticipa un adelanto del inicio de la fusión nival y un desplazamiento de la acumulación máxima hacia los meses más tempranos del invierno.
- Los glaciares pirenaicos desaparecerán prácticamente bajo el escenario RCP8.5 antes de 2050, manteniéndose únicamente pequeños glaciares relictos en escenarios intermedios.
- El permafrost de alta montaña en el Pirineo central experimentará un retroceso acelerado, con una desaparición casi completa en la segunda mitad del siglo XXI.
- Los episodios de nieve tenderán a ser más irregulares interanualmente, con nevadas intensas, pero más aisladas, vinculadas a condiciones convectivas.
- El impacto en cuencas fluviales será diferenciado, siendo más crítico en las del Ebro y Mediterráneo por su alta dependencia de aportes nivosos.
- En conjunto, la vulnerabilidad de los sistemas de alta montaña se verá reforzada frente al cambio climático.

Sectores potencialmente afectados

- Agua y recursos hídricos (Glaciares, permafrost, nieve).
- Energía hidroeléctrica (Glaciares, nieve).
- Turismo (Glaciares, permafrost, nieve).
- Ecosistemas de alta montaña (Glaciares, permafrost, nieve, altitud procesos fríos).
- Agricultura (Glaciares, permafrost, nieve).

A continuación, en la Tabla 6, se presenta a modo de síntesis, las principales proyecciones las variables climáticas relativas a la criosfera identificadas en la evaluación sectorial.

VERSIÓN NO EDITADA

Elemento	Indicador climático utilizado	Escenario RCP	Horizonte temporal	Estadístico usado	Proyección esperada	Zona más afectada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
Glaciares (Pirineos)	Superficie y espesor glaciar	RCP4.5 / RCP8.5	2050 / 2100	Superficie y espesor	Retroceso acelerado. Bajo RCP8.5: pérdidas >95% de la superficie actual y desaparición práctica antes de 2050. Bajo RCP4.5: supervivencia de pequeños glaciares relictos >3.000 m hacia finales de siglo, con fuerte reducción de volumen y funcionalidad hidrológica	Pirineos	Media (tendencia robusta, magnitud y plazos dependen del escenario y modelo)	Agua y recursos hídricos, energía hidroeléctrica, ecosistemas de alta montaña, turismo
Permafrost	Extensión y continuidad del permafrost	RCP2.6 / RCP8.5	2050 / 2100	Extensión y persistencia	Retroceso acelerado. Bajo RCP8.5: desaparición casi completa antes de 2050. Bajo RCP2.6: conservación residual y discontinua en enclaves del Pirineo central hacia finales de siglo	Pirineo central	Alta	Ecosistemas de alta montaña, estabilidad del terreno, infraestructuras
Capa de nieve	Duración y acumulación nival	RCP4.5 / RCP8.5	2041-2070 / 2081-2100	Duración y acumulación nival	Reducción sustancial: -25 % a -40 % en RCP4.5 y -50 % a -70 % en RCP8.5 en altitudes medias (1.500–2.000 m) hacia mediados de siglo. Hacia finales de siglo, acortamiento de la temporada de nieve entre 1 y 2 meses respecto a 1971–2000, con pérdidas más	Pirineos, Sierra Nevada (retroceso más intenso); sistemas montañosos del norte peninsular (retroceso más moderado)	Media	Agua y recursos hídricos, energía hidroeléctrica, turismo, agricultura

Elemento	Indicador climático utilizado	Escenario RCP	Horizonte temporal	Estadístico usado	Proyección esperada	Zona más afectada	Nivel incertidumbre	Sectores impactados
					acusadas en primavera y otoño			
Altitud procesos fríos	Altitud mínima de nieve y suelo helado persistente	RCP4.5 / RCP8.5	2041-2100	Altitud mínima de nieve y acumulación máxima	Desplazamiento del límite altitudinal de la nieve hacia cotas más elevadas (>300 m/ siglo en RCP8.5). Acumulación máxima adelantada a meses más tempranos; fusión más rápida y concentrada, con picos de escorrentía más intensos en primavera y menor aporte estival	Cuencas del Mediterráneo y Ebro (Dependencia hidrológica de Pirineos y Sierra Nevada)	Media	Agua y recursos hídricos, agricultura, energía hidroeléctrica

Tabla 6: Resumen de las proyecciones futuras de las variables de la criosfera principales en España.

8 RESUMEN CON LAS TENDENCIAS OBSERVADAS Y PROYECTADAS EN LAS PRINCIPALES VARIABLES CLIMÁTICAS DIRECTAMENTE RELACIONADAS CON LA EVALUACION SECTORIAL DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El análisis conjunto de las observaciones instrumentales y de las proyecciones climáticas disponibles permite sintetizar las principales evidencias sobre la evolución reciente y futura del clima en España. La información recogida integra resultados de las redes de observación nacionales e internacionales, estudios de referencia (AEMET, CLIVAR-España, IPCC, entre otros) y las proyecciones regionalizadas aplicadas al ámbito peninsular e insular.

Las tendencias observadas confirman un proceso claro de calentamiento, acompañado de un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos y de una mayor variabilidad hidrológica. Estos cambios ya están teniendo repercusiones en sectores clave como la agricultura, los recursos hídricos, la energía o la salud pública.

Las proyecciones para el siglo XXI apuntan a una intensificación de estas tendencias bajo los diferentes escenarios de emisiones, con diferencias regionales y estacionales que, con la desigual la exposición y vulnerabilidad de los territorios, condicionarán la materialización de los riesgos. El conocimiento de estas tendencias resulta esencial para orientar las estrategias de adaptación sectorial y territorial, anticipando riesgos y oportunidades derivados del cambio climático.

El análisis presentado en este capítulo constituye una síntesis de las tendencias observadas y proyectadas de las variables climáticas para las que se dispone de información científico-técnica suficientemente contrastada y verificada, con una clara orientación hacia su aplicación sectorial en la Evaluación Nacional de los Riesgos e Impactos del Cambio Climático en España. Representa, por tanto, el conjunto de evidencia climática de mayor calidad y aceptación por parte de la comunidad científica. En este sentido, cabe señalar que determinados peligros, como la salinización de acuíferos y suelos —con incidencia en el sector marino-costero—, la intrusión salina —con incidencia en el sector agrícola— o la radiación solar —con incidencia en la producción de energía fotovoltaica—, no han sido objeto de análisis en este capítulo. Asimismo, conviene destacar que, para la mayoría de las variables climáticas, se ha procurado realizar una síntesis con la mayor resolución espacio-temporal posible, de manera que las conclusiones aquí presentadas contribuyan a la evaluación sectorial con la mayor base de evidencia científica disponible, pero con las limitaciones propias de la ciencia disponible.

Principales conclusiones derivadas de las tendencias observadas:

- Incremento sostenido de la temperatura media en España desde 1961, más acusado en verano y en el interior.
- Aumento de extremos térmicos: récords de días cálidos muy por encima de los días fríos, incremento de noches cálidas.
- Reducción del número de días de helada y alargamiento del periodo libre de heladas, sobre todo en zonas de montaña.
- Precipitación anual sin tendencia robusta, pero con señales de reducción en primavera y aumento en octubre.
- Mayor intensidad de precipitaciones extremas (≥ 200 mm/día), especialmente en la fachada mediterránea.
- Sequías más persistentes e intensas en el sureste y valle del Ebro, confirmadas por índices como el SPEI.
- Disminución de la velocidad media del viento superficial hasta 2010, seguida de una estabilización.

- Elevación del nivel medio del mar, con aumentos constatados en todas las costas españolas.
- Incremento de la temperatura superficial del mar, con olas de calor marinas más frecuentes y duraderas.
- Acidificación del océano y reducción del oxígeno disuelto, afectando a ecosistemas marinos.
- Retroceso de la criosfera: menor duración y espesor de la nieve, pérdida progresiva de glaciares pirenaicos y retroceso del permafrost de alta montaña.

Principales conclusiones derivadas de las proyecciones futuras de cambio climático:

- Aumento generalizado de la temperatura media, con +2 a +3 °C a mediados de siglo y hasta +5–6 °C a finales bajo SSP5-8.5.
- Mayor incremento en temperaturas máximas y mínimas estivales y otoñales, sobre todo en interiores y Mediterráneo.
- Olas de calor más frecuentes, intensas y largas, con adelanto de su inicio y extensión de la temporada cálida.
- Práctica desaparición de días de helada a finales de siglo en escenarios de altas emisiones, sobre todo en cotas bajas y medias.
- Precipitaciones medias en descenso moderado, especialmente en sur y sureste; mayor incertidumbre en el norte.
- Incremento de episodios de precipitación extrema y convectiva, sobre todo en el litoral mediterráneo.
- Sequías más graves y prolongadas, con mayor aridez en el sur y este peninsular.
- Velocidad del viento superficial con alta incertidumbre, tendencia a la estabilidad o ligera disminución, con posibles aumentos locales (valle del Ebro, Estrecho, Andalucía).
- Nivel del mar en ascenso continuo, +20 cm hacia 2050 y +50–60 cm a finales de siglo, mayor en Atlántico y Golfo de Cádiz.
- Mayor temperatura del mar y olas de calor marinas más largas, con +2 a +3 °C a final de siglo.
- Acidificación sostenida y menor oxígeno disuelto, con efectos sobre especies y hábitats marinos.
- Reducción del 50–70% de la cobertura nival en cotas medias (1.500–2.000 m) bajo RCP8.5 a mediados de siglo; desaparición de glaciares pirenaicos antes de 2050 bajo altas emisiones.
- Desaparición casi total del permafrost de alta montaña, salvo persistencia residual en escenarios optimistas.

9 BIBLIOGRAFÍA

- AEMET. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- AEMET. (2024). *Informe sobre el estado del clima de España 2024*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Calvo-Sancho, C., Montoro-Mendoza, A., Gonzalez-Aleman, J., Diaz-Fernandez, J., Bolgiani, P., Farran, J., . . . Martin, M. (2024). Granizo gigante en España, ¿Fue el cambio climático? *Repositorio AEMET*.
- CLIVAR-España. (2024). *Informe CLIVAR-SPAIN sobre el clima en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Grupo de Meteorología de Santander. (2018). *Proyecciones regionales de Cambio Climático para vientos extremos en España para el s.XXI: Caracterización de valores de retorno y frecuencia de configuraciones atmosféricas de peligro*.
- Lopez-Marti, F., Ginesta, M., Faranda, D., Rutgersson, A., Yiou, P., Wu, L., & Messori, G. (2025). Future changes in compound explosive cyclones and atmospheric rivers in the North Atlantic. 169-287.
- Martín, M., Calvo-Sancho, C., Taszarek, M., González-Alemán, J., Montoro-Mendoza, A., Diaz-Fernandez, J., . . . Martin, Y. (2024). Major Role of Marine Heatwave and Anthropogenic Climate Change on a Giant Hail Event in Spain. *Geophysical Research Letters*, e2023GL107632.
- Proyecto ECCE. (2005). *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Sanz, M., & Galán, E. (2021). *Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

VERSIÓN NO EDITADA

ANEXO I. EL USO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN EL
CICLO DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS

ANEXO II. FUENTES DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

(VERSIÓN NO EDITADA)

CONTENIDO

Anexo I. El uso de las variables climáticas en el ciclo de la evaluación de riesgos	3
1 Fuentes y clasificación de las variables climáticas.....	3
1.1 Clasificación por origen del dato	3
1.2 Clasificación por horizonte temporal	4
1.3 Clasificación por tipo de variable	4
1.4 Clasificación según naturaleza estadística: promedios vs. extremos	5
1.5 Interrelaciones.....	7
2 Escalas temporales y espaciales para la selección de la información climática.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Selección de horizontes y escalas temporales	8
2.3 Regionalización de las variables climáticas.....	11
3 Escenarios climáticos, trayectorias socioeconómicas y niveles de calentamiento	14
Anexo II. Fuentes de información climática	18

VERSIÓN NO EDITADA

ANEXO I. EL USO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN EL CICLO DE LA EVALUACIÓN DE RIESGOS

1 FUENTES Y CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

El primer paso para utilizar adecuadamente la información climática en los procesos de análisis de riesgo y adaptación es comprender la naturaleza de los datos disponibles, su origen, las escalas en las que se producen, su aplicabilidad y sus limitaciones. En esta sección se presenta una clasificación técnica de las variables climáticas, que servirá de marco de referencia para el resto del capítulo. Esta clasificación se basa en cuatro dimensiones clave: el origen del dato, el horizonte temporal, el tipo de variable y su naturaleza estadística (media o extremo).

1.1 Clasificación por origen del dato

Las variables climáticas utilizadas en análisis de adaptación pueden proceder de diferentes fuentes, que determinan su calidad, resolución y aplicabilidad:

- *Datos observados* (mediciones instrumentales): provienen de estaciones meteorológicas, satélites o sensores remotos. Son fundamentales para caracterizar el clima pasado y establecer líneas base. Ejemplo: series históricas de temperatura media diaria de AEMET.
- *Datos de reanálisis*: combinan observaciones con modelos numéricos para proporcionar una estimación coherente y espacialmente completa del estado de la atmósfera. Son útiles para zonas sin cobertura instrumental densa. Ejemplo: ERA5 del Centro Europeo de Predicción (ECMWF).
- *Modelos climáticos*: se utilizan para simular el comportamiento futuro del clima bajo distintos escenarios de emisiones. Pueden ser globales (GCM¹s) o regionales (RCMs²) y constituyen la base de las proyecciones climáticas. Ejemplo: simulaciones del proyecto EURO-CORDEX para Europa.
- *Hindcasts o predicciones retrospectivas*: simulaciones realizadas con modelos climáticos para periodos pasados con el fin de evaluar su capacidad predictiva. Son útiles, por ejemplo, para estimar la fiabilidad de predicciones estacionales o decadales.

Cada una de estas fuentes tiene ventajas y limitaciones que deben considerarse al seleccionar variables para análisis de riesgo o formular e implementar planes de adaptación. Por ejemplo,

- Los datos observados tienen alta fiabilidad y resolución temporal, pero su cobertura espacial puede ser limitada, especialmente en zonas rurales, de alta montaña o en países con baja densidad de estaciones. Además, pueden presentar discontinuidades por cambios en los instrumentos o en las series.
- Los reanálisis ofrecen una cobertura espacial continua y homogénea, así como series temporales largas y coherentes, pero no deben interpretarse como observaciones puras, ya que incorporan estimaciones modeladas en zonas sin datos.
- Las proyecciones de modelos climáticos permiten explorar futuros posibles y planificar a largo plazo, pero presentan incertidumbres asociadas a los modelos, los escenarios de emisión y la variabilidad interna del sistema. Su resolución espacial es generalmente baja en los modelos globales, aunque puede mejorarse mediante técnicas de regionalización.
- Los hindcasts son útiles para evaluar la calidad de las predicciones climáticas, pero dependen en gran medida del diseño del experimento y del modelo utilizado, y su aplicabilidad operativa es aún limitada en muchos sectores.

¹ Global Climate Model o General Circulation Model

² Regional Climate Model

En la Tabla 1 se recoge un resumen de pros y contras basado en cobertura espacial, resolución temporal de la información, su horizonte temporal, su utilidad para caracterizar extremos y promedios y las limitaciones principales.

En general, una combinación estratégica de fuentes —por ejemplo, observaciones para validar reanálisis o calibrar modelos, y modelos regionalizados para explorar futuros plausibles— permite obtener un marco más robusto y aplicable a los distintos niveles de decisión.

1.2 Clasificación por horizonte temporal

Según el periodo temporal que cubren y el propósito del análisis, las variables pueden clasificarse en:

- *Nowcast*: información casi en tiempo real (minutos a horas), usada sobre todo en meteorología operativa o gestión de emergencias.
- *Meteorología de corto plazo*: predicciones de 1 a 7 días. Útiles para acciones inmediatas, pero no relevantes para planificación adaptativa.
- *Predicción estacional*: anticipa condiciones probables en los próximos 3–6 meses. Se usa, por ejemplo, en agricultura o planificación hídrica.
- *Predicción decadal*: anticipa variabilidad climática interna (más allá del tiempo meteorológico, pero antes de las señales claras del cambio climático). Relevante para infraestructuras sensibles a la variabilidad.
- *Proyecciones de largo plazo*: suelen cubrir horizontes de 2030, 2050 o 2100. Son esenciales para la planificación estratégica de adaptación.
- *Información retrospectiva*: observaciones y reconstrucciones del pasado que permiten caracterizar tendencias y establecer líneas base.

Es necesario destacar que estos horizontes temporales son los propios de la ciencia del clima, pero no tienen que coincidir necesariamente con lo que en análisis de riesgo o adaptación se considera corto, medio y largo plazo. Esta cuestión se abordará más adelante en el capítulo.

1.3 Clasificación por tipo de variable

Las variables climáticas no siempre se utilizan en su forma original o directa. Entendemos por variables directas (o básicas) aquellas que son medidas u obtenidas directamente del sistema climático, ya sea a través de observaciones (como estaciones meteorológicas o satélites) o de modelos (como salidas de temperatura o precipitación). Entre las más comunes se encuentran la temperatura del aire, la precipitación, la presión atmosférica, la humedad relativa o la velocidad del viento.

A partir de estas, se pueden generar variables derivadas, que se calculan mediante transformaciones físicas o estadísticas. Por ejemplo, la evapotranspiración potencial, la humedad del suelo estimada o el índice de calor se obtienen combinando varias variables básicas con fórmulas empíricas o modelos simplificados.

En una capa adicional de complejidad, se construyen indicadores compuestos, que combinan múltiples variables (básicas y derivadas) para sintetizar fenómenos complejos o facilitar su interpretación. Un ejemplo es el índice estandarizado de precipitación (SPI), que permite evaluar situaciones de sequía en distintas escalas temporales.

Finalmente, existen las llamadas variables sectoriales, que traducen la información climática a parámetros relevantes para sectores específicos. Por ejemplo, los grados-día en agricultura permiten estimar el desarrollo de los cultivos, mientras que la energía eólica disponible es clave en el sector energético para evaluar la viabilidad de instalaciones.

Esta clasificación permite interpretar las variables climáticas no solo desde su origen físico, sino también en función de su relevancia para el análisis de impactos, riesgos o decisiones sectoriales.

En la sección 6 se desarrollará esta tipología en mayor profundidad, incorporando ejemplos concretos por tipo de variable y sector de aplicación, así como recomendaciones para su selección en distintos contextos de análisis.

1.4 Clasificación según naturaleza estadística: promedios vs. extremos

Las variables climáticas pueden describir comportamientos medios o eventos extremos:

- Variables de estado o *promedio*: reflejan condiciones centrales del clima en un periodo determinado. Ejemplo: temperatura media mensual, precipitación acumulada anual.
- Variables de *extremos*: reflejan valores anómalos o extremos de la distribución. Se definen comúnmente mediante percentiles (por ejemplo, temperatura > P90³) o umbrales físicos. Ejemplos: máximos de precipitación diaria, rachas máximas de viento, olas de calor o frío, sequías prolongadas.

La adaptación al cambio climático requiere integrar ambas naturalezas: los cambios en las medias pueden afectar progresivamente a sistemas ecológicos o económicos, mientras que los eventos extremos son responsables de los impactos más severos, especialmente cuando superan umbrales críticos de tolerancia.

³ Percentil 90 de temperatura: es el valor de la temperatura por debajo de la cual se encuentran el 90% de las observaciones de temperatura de esa serie temporal.

Tabla 1: Fuentes y clasificación de las variables climáticas. Clasificación por origen del dato.

Fuente	Cobertura espacial	Resolución temporal	Horizonte temporal	Utilidad para extremos	Calidad para promedios y climatologías	Limitaciones principales
Datos observados	Local (puntual), dispersa, variable por región	Alta (horaria, diaria)	Retrospectiva (histórica)	Muy alta: capturan eventos reales con alta resolución	Muy alta: datos empíricos ideales para establecer climatologías locales	Cobertura desigual, posibles discontinuidades por cambios en estaciones de observación o instrumentos
Reanálisis	Global o regional, continua y homogénea	Alta (horaria, diaria)	Retrospectiva (décadas recientes)	Buena: interpolan zonas sin datos, pero tienden a suavizar extremos	Alta: útiles para caracterizar patrones espaciales y temporales	Menor precisión que observaciones, especialmente donde faltan datos primarios
Modelos climáticos (GCM/RCM)	Global o regional, regular según resolución espacial	Media a baja (diaria, mensual)	Futuro (proyecciones a 2030–2100)	Media-alta: permiten estimar cambios en frecuencia o intensidad	Alta: especialmente útiles para identificar tendencias futuras	Alta incertidumbre; resolución limitada (especialmente en GCM); requieren corrección de sesgos sistemáticos.
Hindcasts	Similar a modelos climáticos (según configuración)	Variable	Retrospectiva (evaluación de modelos)	Buena: si están calibrados y validados, permiten estimar extremos estacionales o decadales a partir de series largas, especialmente en contextos de variabilidad natural.	Buena: permiten caracterizar patrones climáticos estacionales o decadales y evaluar la habilidad predictiva del sistema	Requieren calibración y validación rigurosa; la calidad depende del modelo, del número de años y del tipo de variable considerada.

1.5 Interrelaciones

Las diferentes dimensiones recogidas en la clasificación anterior no son excluyentes, sino complementarias. Por ejemplo, una misma variable como la temperatura puede:

- Ser una variable básica si se toma como dato directo.
- Ser derivada si se usa para calcular días de crecimiento agrícola.
- Ser observada o proyectada.
- Aplicarse a escalas diarias (meteorología) o medias decenales (cambio climático).
- Analizarse como media mensual o como evento extremo (ola de calor).

Por ello, es esencial que cualquier selección de variables climáticas para análisis de riesgo o planificación adaptativa esté acompañada de una descripción clara de: su origen (observación, modelo, reanálisis...); su horizonte temporal y escala espacial; el tipo de valor que representa (promedio, umbral, percentil...) y su propósito (qué impacto o proceso busca representar o anticipar).

Contar con una clasificación estructurada permite como la propuesta permite elegir las variables más adecuadas para cada fase del ciclo de la adaptación. Además, sirve para entender mejor los límites de aplicabilidad de cada fuente de información y comunicar de forma transparente la base científica sobre la que se apoya el análisis de riesgo o la definición de medidas de adaptación que se pretende implementar.

2 ESCALAS TEMPORALES Y ESPACIALES PARA LA SELECCIÓN DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA

2.1 Introducción

El valor de la información climática en los procesos de adaptación no reside únicamente en la precisión física de las variables o en la calidad de sus fuentes, sino en su adecuación a las decisiones que deben fundamentar. Esta adecuación depende, de manera crítica, de tres dimensiones interrelacionadas: el sistema que se desea adaptar, el horizonte temporal de planificación, y la resolución espacial a la que se requiere la información climática.

Cada sistema, sea una infraestructura, un ecosistema, una cadena de suministro o una política pública, responde a impactos climáticos de manera distinta y opera bajo escalas temporales y espaciales propias. Una carretera en una zona de montaña, una planta potabilizadora o una zona agrícola de regadío requieren información climática distinta no solo en tipo de variable, sino también en resolución y horizonte.

El horizonte temporal de planificación, corto, medio o largo plazo, condiciona la elección de las fuentes de datos climáticos. Por ello, las decisiones de adaptación deben apoyarse en información climática coherente con el marco temporal de planificación. Medidas operativas, como la gestión de recursos hídricos, requieren información subestacional o intraanual, la gestión de un cultivo de ciclo anual podrá beneficiarse de predicciones estacionales o incluso subestacionales. Mientras que decisiones estructurales o estratégicas, como la localización de nuevas infraestructuras o planes de ordenamiento territorial, con vidas útiles de más de 50 años deben considerar escenarios climáticos y trayectorias de calentamiento a varias décadas vista y, por tanto, variables climáticas proyectadas.

En cuanto a la resolución espacial de la información climática, la compatibilidad entre las escalas de las variables climáticas y las escalas de los elementos expuestos —como sistemas urbanos, agrícolas o ecosistemas naturales específicos— resulta esencial para una evaluación eficaz del riesgo

Aunque los planes regionales o nacionales pueden elaborarse con datos climáticos de menor resolución espacial debido a restricciones de tiempo, recursos o disponibilidad, la implementación de proyectos o

medidas de adaptación a nivel local requiere información más precisa y detallada para poder ser efectivamente contextualizada y aplicada.

Esta elección de escala tiene un efecto directo sobre la calidad y precisión de los análisis de riesgo. Utilizar una resolución espacial o temporal inadecuada puede introducir incertidumbres significativas en la caracterización de la peligrosidad climática, en la identificación de sectores expuestos o vulnerables, y en la estimación de los impactos y riesgos asociados.

Por ejemplo, una resolución espacial excesivamente grosera puede ser incapaz de representar adecuadamente procesos atmosféricos de escala local, como la formación de depresiones aisladas en niveles altos (DANAs) o galernas, suavizando la intensidad de estos fenómenos y conduciendo, en consecuencia, a una subestimación de sus efectos reales sobre el territorio y los sistemas afectados. Por lo tanto, la disponibilidad y calidad de las bases de datos climáticas, su resolución y su adecuación a las necesidades del análisis representan un componente crítico del proceso. En este sentido, resulta necesario la regionalización o "downscaling" de las proyecciones globales y la integración de datos observados y de reanálisis para transferir a la escala local los posibles efectos del cambio climático.

No obstante, en muchos casos, aunque el tipo de análisis requeriría información climática de alta resolución, ésta puede no estar disponible, requerir demasiado tiempo para su generación, o suponer costes que limitan su uso, especialmente en contextos con baja capacidad técnica o financiera. Por ello, es importante evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de información climática, considerando los recursos disponibles, las herramientas accesibles y los plazos del proceso de planificación.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que la incertidumbre asociada a la información climática tiende a aumentar con la distancia temporal (horizontes más lejanos implican mayor incertidumbre), y también cuando se utilizan datos de baja resolución espacial en contextos que requieren mayor nivel de detalle. En cambio, una mayor resolución espacial, cuando es técnicamente robusta, tiende a reducir la incertidumbre, al permitir representar con mayor fidelidad las condiciones locales y los fenómenos extremos relevantes para la toma de decisiones. Esta realidad exige un uso cuidadoso y transparente de los datos climáticos, así como una adecuada comunicación de sus limitaciones y márgenes de error.

Comprender la relación entre escalas climáticas y escalas de decisión es, por tanto, un requisito imprescindible para desarrollar análisis de riesgo climático rigurosos y diseñar estrategias de adaptación que sean realistas, eficaces y sostenibles.

2.2 Selección de horizontes y escalas temporales

La selección de los horizontes temporales y de las escalas de análisis es una decisión crítica en cualquier evaluación de riesgos climáticos y en el diseño de estrategias y medidas de adaptación. Esta elección determina no solo el tipo de información climática que debe utilizarse, sino también la manera en que se interpretan los impactos y se definen las acciones necesarias en los distintos niveles de planificación. Los horizontes temporales deben estar alineados con el ciclo de vida de los sistemas o activos expuestos, la naturaleza del impacto que se analiza y el tipo de medida de adaptación que se pretende implementar.

En general, en el marco de las proyecciones climáticas se distinguen tres horizontes de análisis ampliamente aceptados (Figura 1):

- *Corto plazo*, correspondiente a un horizonte inferior a 10 años. Este marco resulta adecuado para medidas operativas o de gestión que requieren una respuesta inmediata o a escala anual/estacional. Las decisiones que se adoptan en este horizonte suelen estar orientadas a la mejora de la gestión adaptativa, la planificación sectorial o la implementación de sistemas de alerta temprana. Aquí, la variabilidad interanual e intraestacional del clima es especialmente

relevante, y la información más útil suele proceder de observaciones recientes, predicciones climáticas estacionales y escenarios de baja incertidumbre.

- *Medio plazo*, correspondiente a un horizonte de mitad de siglo (p.e. 2040–2060). Este intervalo resulta especialmente adecuado para la planificación de infraestructuras con una vida útil prolongada, decisiones de inversión a escala territorial y el diseño de políticas públicas de adaptación estructural. En este horizonte temporal, adquieren relevancia las proyecciones climáticas regionales o locales, formuladas a partir de distintos escenarios de emisiones o niveles de calentamiento global. La necesidad de incorporar la incertidumbre climática en los análisis se intensifica, por lo que se recomienda trabajar con múltiples modelos climáticos y contrastar los resultados bajo diferentes escenarios climáticos.
- *Largo plazo*, correspondiente a un horizonte de final de siglo (p.e. 2081–2100). Este horizonte es fundamental para alinear las estrategias de adaptación con los compromisos climáticos de mitigación y los objetivos de desarrollo sostenible. Las decisiones adoptadas con esta perspectiva suelen tener implicaciones estructurales sobre el modelo territorial, la ordenación del espacio y el diseño de infraestructuras resilientes al cambio climático extremo. Aunque la incertidumbre de las proyecciones climáticas aumenta, su utilidad estratégica es incuestionable, especialmente en contextos que demandan robustez frente a futuros inciertos.

En el contexto del análisis de riesgos climáticos, los horizontes temporales deben considerarse siempre en conjunto con la escala de las decisiones que se deben adoptar. Las intervenciones a nivel local requieren una desagregación temporal más precisa y detallada, mientras que las estrategias nacionales o macroregionales pueden operar con horizontes y agregaciones más amplias. Asimismo, la selección del horizonte debe estar alineada con el tipo de variable climática relevante considerada, ya que no todos los fenómenos muestran igual sensibilidad a distintas escalas temporales. Por ejemplo, los procesos de elevación del nivel del mar requieren horizontes largos, mientras que variables climáticas sectoriales como la sequía agrícola puede necesitar escalas estacionales o interanuales. Así mismo, es necesario vincular la selección de horizontes con el ciclo de planificación de las propias políticas de adaptación, de forma que se facilite su revisión periódica y su capacidad de ajuste.

En este aspecto, es necesario destacar que, por ejemplo, la Taxonomía Europea y la Directiva sobre Reporte de Sostenibilidad Corporativa (CSRD) recomiendan horizontes temporales para la evaluación de riesgos de la empresa que no van generalmente más allá de mitad de siglo, con una recomendación explícita de analizar los horizontes temporales de planificación operativa y financiera, es decir, normalmente inferior a 5 años.

Otro aspecto de especial relevancia, tanto con la del propio horizonte temporal, es la elección del periodo de referencia frente al cual se comparan los futuros proyectados. Este periodo actúa como línea base para estimar la magnitud del cambio climático, y por tanto condiciona directamente cómo se cuantifican los riesgos. Normalmente, el periodo de referencia se selecciona de acuerdo con la disponibilidad de datos observados de calidad, la estabilidad climática relativa y la coherencia con estándares internacionales. Un periodo comúnmente utilizado es 1985–2014, aunque también es habitual emplear 1971–2000 o 1995–2014, dependiendo del tipo de variable, la región y la coherencia con las bases de datos climáticas empleadas.

El modo en que se representa el cambio con respecto a ese periodo base puede adoptar dos enfoques:

- *Cambio absoluto*, que expresa la diferencia directa entre el valor futuro proyectado y el valor promedio del periodo de referencia (por ejemplo, +2 °C de aumento de temperatura media).
- *Cambio relativo*, que calcula el incremento como proporción del valor de referencia (por ejemplo, un 15 % más de días con olas de calor o un 30 % menos de escorrentía).

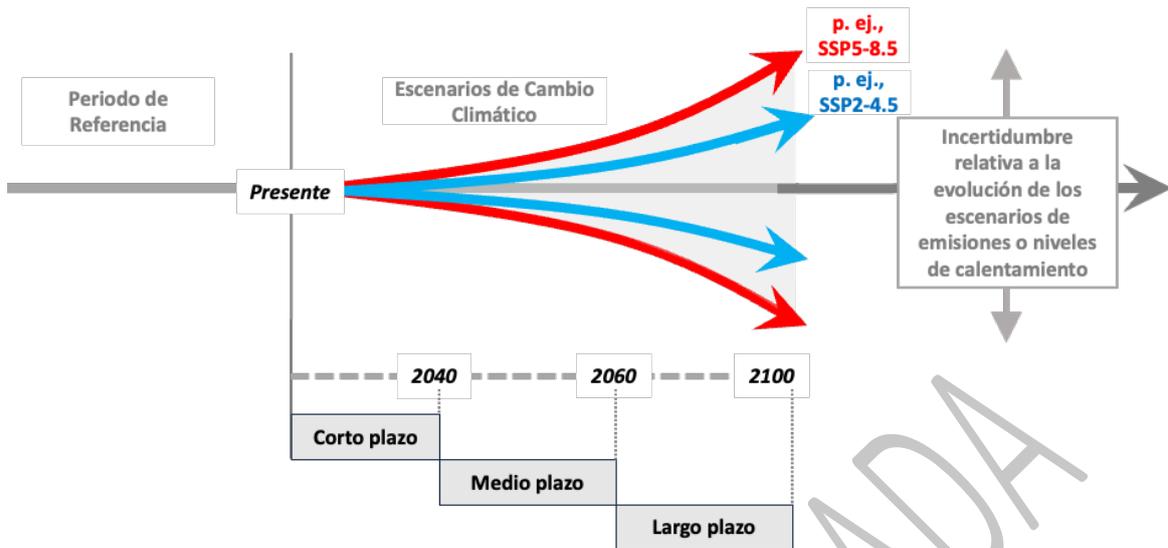


Figura 1: Esquema conceptual para la definición de las escalas de temporales.

La elección entre representar los riesgos climáticos en términos absolutos o relativos depende del tipo de variable, el sector analizado y el tipo de impacto que se desea modelar. Los cambios absolutos son más intuitivos para variables como la temperatura, mientras que los relativos son más útiles en contextos donde importa la proporción de cambio respecto a condiciones base, como en la disponibilidad de agua o el rendimiento agrícola.

Es importante destacar que un mismo escenario climático puede conducir a diferentes interpretaciones del riesgo según el periodo de referencia y la forma en que se exprese el cambio. Por ello, debe explicitarse con claridad el periodo y el método de comparación adoptado, especialmente cuando los resultados se comunican a actores sectoriales o tomadores de decisión.

Cuadro 1. Selección de horizontes temporales y líneas base en la evaluación del riesgo climático

La elección del horizonte temporal condiciona el tipo de información climática, la interpretación de los impactos y el diseño de medidas de adaptación. Se distinguen tres marcos principales: corto plazo (menos de 10 años), útil para gestión adaptativa y alertas tempranas; medio plazo (2040–2060), adecuado para planificación de infraestructuras y políticas públicas; y largo plazo (2081–2100), necesario para estrategias estructurales y alineación con compromisos climáticos.

Esta elección debe adaptarse al contexto sectorial y territorial: decisiones locales requieren mayor precisión temporal y espacial que estrategias nacionales, especialmente cuando se busca capturar la variabilidad climática específica de un entorno concreto.

También es clave definir el periodo de referencia frente al cual se mide el cambio, habitualmente 1985–2014, 1971–2000 o 1995–2014. Este periodo actúa como línea base para estimar la magnitud del cambio climático y debe seleccionarse considerando la disponibilidad de datos y su coherencia con las fuentes utilizadas. El cambio respecto a este periodo puede expresarse como una diferencia directa en valores, como ocurre con el aumento medio de temperatura, o como una variación proporcional sobre el valor inicial, lo cual resulta útil en variables como la escorrentía o la frecuencia de olas de calor.

2.3 Regionalización de las variables climáticas

La regionalización climática, o downscaling, es un proceso metodológico fundamental para convertir las proyecciones generadas por modelos climáticos globales (GCMs) —que operan con resoluciones espaciales relativamente groseras (del orden de 100 a 250 km)— en información climática útil para la toma de decisiones. La mayoría de los impactos del cambio climático, y por lo tanto la implementación de medidas de adaptación, se manifiestan en escalas mucho más pequeñas que aquellas representadas por los GCMs. Por ello, es necesario recurrir a técnicas que permitan reducir la escala de los datos climáticos globales y adaptarlos a las características físicas y climáticas de regiones concretas.

Esta necesidad es particularmente evidente en territorios con elevada complejidad climática, como la península ibérica, donde confluyen factores como la orografía, la influencia marina, la continentalidad y los patrones atmosféricos regionales. La interacción entre estos elementos genera una variabilidad espacial significativa que no puede ser adecuadamente representada por modelos de baja resolución. En consecuencia, resulta imprescindible disponer de herramientas que permitan trasladar estas proyecciones climáticas globales a contextos regionales y locales, modelando la coherencia física del sistema y aumentando la relevancia operativa de la información.

Así pues, la regionalización tiene como principal propósito mejorar la aplicabilidad de las proyecciones climáticas, dotándolas de la resolución espacial y el detalle necesario para evaluar riesgos y diseñar estrategias y medidas de adaptación adaptadas a cada sector. Por eso, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático incluye la generación de proyecciones regionalizadas para España (iniciativa Escenarios-PNACC), utilizando los modelos climáticos empleados en los sucesivos informes de evaluación del IPCC. La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) es la institución responsable de la coordinación y el desarrollo de este componente del Plan Nacional de Adaptación, en estrecha coordinación con los grupos de investigación españoles más activos en este campo y con la Oficina Española de Cambio Climático (OECC). Asimismo, los escenarios climáticos regionalizados (Escenarios-PNACC) se ponen a disposición a través de herramientas adecuadas y versátiles, como el Visor de Escenarios de Cambio Climático de AdapteCCA⁴.

Las técnicas de regionalización pueden agruparse en cuatro grandes enfoques: dinámico, estadístico, híbrido y, más recientemente, basado en inteligencia artificial. Cada uno presenta ventajas, limitaciones y requisitos específicos que deben considerarse en función de la variable climática a modelar, la escala geográfica, el volumen de datos disponible y el objetivo del análisis.

a) Técnicas de regionalización dinámica

La regionalización dinámica utiliza modelos climáticos regionales (RCMs) que resuelven explícitamente las ecuaciones físicas del clima en un dominio geográfico acotado. Estos RCMs se ejecutan con condiciones de contorno proporcionadas por un GCM, permitiendo simular procesos atmosféricos, oceánicos y de superficie a resoluciones que oscilan entre 10 y 50 km (aunque algunos experimentos alcanzan ya los 3 km en configuraciones de alta resolución).

Esta técnica es la que mejor conserva la coherencia física entre variables, permitiendo una representación detallada de fenómenos como los gradientes de precipitación en áreas montañosas, las brisas marinas o la interacción entre sistemas frontales y accidentes geográficos. Por ello, ha sido adoptada como enfoque de referencia en programas internacionales como EURO-CORDEX y MED-CORDEX, que generan conjuntos de simulaciones regionalizadas para Europa y la región mediterránea a partir de múltiples GCMs y RCMs. En

⁴ <https://escenarios.adaptecca.es/>

España, esta técnica se ha aplicado para obtener las proyecciones regionales de variables marinas (oleaje, marea meteorológica, temperatura superficial del agua del mar, nivel medio del mar) utilizando modelos como ROMS o WW3, alimentados por RCMs atmosféricos regionales.

Su principal limitación radica en los elevados costes computacionales y la necesidad de contar con datos de entrada de calidad, tanto para condiciones iniciales como para validación. No obstante, su valor para estudios donde se requiere máxima fidelidad física y espacial compensa, en muchos casos, estas limitaciones.

b) Técnicas de regionalización estadística

Las técnicas estadísticas (empirical-statistical downscaling, ESD) buscan establecer relaciones empíricas entre variables climáticas a gran escala (predictor) y variables locales o regionales (predictando). Se basan en el supuesto de que existen patrones recurrentes entre la circulación atmosférica de gran escala y las condiciones climáticas regionales, que pueden ser explotados para proyectar el clima futuro.

Los métodos estadísticos de regionalización incluyen diferentes enfoques. Algunos se centran en relaciones funcionales, como las regresiones lineales o no lineales, que permiten vincular variables como la presión a nivel del mar o los geopotenciales con temperaturas o precipitaciones locales. Otros adoptan un enfoque basado en similitud, como los métodos de análogos, que identifican situaciones atmosféricas históricas comparables a las condiciones proyectadas para inferir posibles respuestas locales. También se emplean emuladores climáticos, diseñados para generar series sintéticas que preservan determinadas propiedades estadísticas de las observaciones, y técnicas de ajuste como el quantile mapping, ampliamente utilizadas para corregir sesgos sistemáticos entre las distribuciones modeladas y las observadas, especialmente en el caso de variables con alta variabilidad como la precipitación.

La regionalización estadística tiene como principales ventajas su bajo coste computacional, su capacidad de alcanzar escalas espaciales reducidas (hasta la escala local de las estaciones meteorológicas), y su flexibilidad para trabajar con múltiples escenarios y modelos climáticos. Por ello, resulta especialmente adecuada para estudios comparativos, exploración de incertidumbres o elaboración de productos climáticos ajustados a sectores específicos. No obstante, su precisión y validez dependen de la calidad, extensión y representatividad de las series observadas, así como de la estabilidad temporal de las relaciones utilizadas para inferir el cambio. En escenarios futuros muy alejados de las condiciones actuales, la fiabilidad de estas relaciones puede verse comprometida.

c) Métodos híbridos

Los métodos híbridos combinan las ventajas de los enfoques dinámico y estadístico para mejorar la calidad de las proyecciones regionales. Este enfoque mixto permite, por ejemplo, utilizar RCMs para generar campos físicos coherentes, que luego son corregidos o refinados mediante técnicas estadísticas para adaptarse mejor a las observaciones locales o mejorar la estimación de los extremos.

Otras estrategias híbridas aplican interpolaciones estadísticas sobre las salidas dinámicas, o integran procesos de corrección del sesgo a partir de datos históricos. Esto permite optimizar la resolución efectiva de los productos regionales, conservar la coherencia física general del sistema climático, y al mismo tiempo aumentar la precisión en zonas complejas o mal representadas por los modelos.

d) Técnicas basadas en inteligencia artificial

El uso de inteligencia artificial (IA) en la regionalización climática representa una innovación metodológica que ha cobrado relevancia en la última década, consolidándose como una herramienta emergente en el desarrollo de información climática de alta resolución. Mediante el empleo de algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, como las redes neuronales artificiales, las máquinas de soporte vectorial o las redes convolucionales, es posible identificar patrones complejos entre variables predictoras a gran escala y las variables de interés a nivel regional, superando muchas de las limitaciones de los enfoques lineales tradicionales.

Estos modelos destacan por su capacidad para generalizar comportamientos a partir de grandes volúmenes de datos, lo que les permite captar relaciones no lineales y detectar interacciones entre múltiples variables climáticas no modeladas mediante los métodos clásicos. En este contexto, resulta especialmente útil para la mejora de la estimación de eventos extremos y para la corrección de los sesgos sistemáticos de modelos climáticos.

Su utilidad radica en la notable adaptabilidad a diferentes escalas y condiciones climáticas, la capacidad de mejora continua a medida que se incorporan nuevos datos, y la eficiencia computacional que pueden ofrecer una vez que los modelos están entrenados. No obstante, su implementación también implica desafíos metodológicos relevantes, entre los que se encuentran la necesidad de disponer de bases de datos amplias y de alta calidad para el entrenamiento, la dificultad para interpretar los procesos físicos de los modelos y la obligatoriedad de aplicar procesos rigurosos de validación cruzada para garantizar su fiabilidad y consistencia frente a los enfoques tradicionales.

Cuadro 2. Regionalización climática

La regionalización climática, o *downscaling*, es el proceso mediante el cual se adaptan las proyecciones de modelos globales a escalas regionales y locales, con el fin de hacerlas operativas y relevantes para la toma de decisiones. Esto resulta especialmente importante en regiones de alta complejidad climática, como la península ibérica, donde factores geográficos y atmosféricos generan una notable variabilidad espacial que los modelos globales no capturan con precisión.

El propósito principal de la regionalización es mejorar la resolución espacio-temporal y el realismo físico de las proyecciones climáticas, permitiendo simular fenómenos no resueltos por los GCMs y alimentar modelos sectoriales con información más ajustada a las condiciones locales. La elección de la técnica debe considerar el objetivo del análisis, la variable climática de interés, la escala deseada y la disponibilidad de datos. Una regionalización bien implementada garantiza mayor pertinencia de la información climática y fortalece la base técnica para diseñar medidas de adaptación eficaces y ajustadas al contexto local.

Existen distintos enfoques metodológicos. La regionalización dinámica, basada en modelos climáticos regionales, ofrece una representación físicamente coherente del sistema climático en dominios acotados, aunque con un alto coste computacional. La regionalización estadística establece relaciones empíricas entre condiciones a gran escala y variables locales, con alta flexibilidad y eficiencia computacional, pero dependiente de datos observados de calidad. Los métodos híbridos combinan ambas aproximaciones para maximizar sus fortalezas, mientras que las técnicas basadas en inteligencia artificial emplean algoritmos de aprendizaje automático para detectar patrones complejos, mejorar la estimación de extremos y corregir sesgos.

3 ESCENARIOS CLIMÁTICOS, TRAYECTORIAS SOCIOECONÓMICAS Y NIVELES DE CALENTAMIENTO

El análisis del riesgo climático y la planificación de medidas de adaptación requieren una representación estructurada de los posibles futuros del sistema climático. Esta representación se construye a partir de herramientas que permiten caracterizar la evolución esperada del clima, considerando tanto los factores propiamente físicos que lo condicionan como los procesos sociales y económicos que influyen en su transformación. Entre estas herramientas se encuentran los escenarios climáticos, las trayectorias socioeconómicas y los niveles de calentamiento (Tabla 2), que en conjunto configuran el marco metodológico sobre el que se desarrollan las proyecciones climáticas y los análisis de riesgos sectoriales.

Los escenarios climáticos se definen a través de condiciones futuras del sistema climático bajo diferentes supuestos de emisiones de gases de efecto invernadero. A través de su implementación en modelos climáticos globales y regionales, estos escenarios permiten simular la evolución de variables climáticas relevantes como la temperatura, la precipitación o el aumento del nivel medio del mar, proporcionando así una base cuantitativa para evaluar riesgos y diseñar estrategias de adaptación. Su construcción se apoya en trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero conocidas como RCP (Representative Concentration Pathways), que representan distintos niveles de forzamiento radiativo a final de siglo. Estos niveles, expresados en vatios por metro cuadrado, permiten discriminar entre escenarios que contemplan una mitigación ambiciosa, trayectorias intermedias o un incremento continuo de emisiones sin medidas correctivas.

No obstante, los RCP, al centrarse exclusivamente en la componente física del sistema climático, no explican las dinámicas socioeconómicas que conducen a esos niveles de emisiones. Por ello, en el Sexto Informe del IPCC se incorporaron las trayectorias socioeconómicas compartidas, o SSP (Shared Socioeconomic Pathways), que describen posibles condiciones socio-climáticas futuras caracterizadas por diferentes niveles de crecimiento económico, desarrollo tecnológico o gobernanza. La combinación de los RCP con los SSP da lugar a escenarios integrados que permiten analizar no solo el comportamiento del clima, sino también la evolución de la exposición y la vulnerabilidad, elementos clave en el análisis del riesgo. Así, se pueden comparar futuros climáticos físicamente similares, pero con implicaciones muy distintas para los sistemas humanos y naturales, dependiendo del contexto socioeconómico en que se produzcan.

En paralelo al uso de escenarios, se ha desarrollado un enfoque basado en niveles de calentamiento, que parte de los incrementos en la temperatura media global respecto al periodo preindustrial. Esta forma de caracterizar el cambio climático —centrada en umbrales como +1,5 °C, +2 °C o +3 °C— permite evaluar directamente los impactos asociados a diferentes grados de calentamiento, independientemente de las trayectorias de emisiones específicas que los originan. Esta aproximación se alinea con los compromisos internacionales establecidos en el Acuerdo de París, facilita la comparación entre modelos y regiones, y simplifica la comunicación de los riesgos, al asociarlos a metas climáticas concretas.

Tabla 2: Síntesis de los escenarios climáticos, trayectorias socioeconómicas y niveles de calentamiento

SSP	DESCRIPCIÓN BREVE	DESCRIPCIÓN GENERAL
SSP1-1.9	Más optimista: 1,5 °C en 2050	Escenario más optimista del IPCC. Las emisiones globales de CO ₂ se reducen a cero en torno a 2050. Las sociedades cambian a prácticas más sostenibles, pasando del crecimiento económico al bienestar general. Los fenómenos meteorológicos extremos son más frecuentes y continúan procesos más lentos como el aumento del nivel del mar, pero el mundo ha esquivado los peores impactos del cambio climático. <u>Único que cumple con el objetivo del Acuerdo de París</u> de mantener el calentamiento global en torno a 1,5 °C por encima de las temperaturas preindustriales. Se alcanzan los 1,5 °C, pero la temperatura media luego desciende y se estabiliza en torno a los 1,4 °C a finales de siglo.
SSP1-2.6	Siguiente mejor: 1,8 °C en 2100	En el siguiente mejor escenario, las emisiones globales de CO ₂ se reducen drásticamente, pero no tan rápidamente, alcanzando el cero emisiones después de 2050. Cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad equivalentes a SSP1-1.9. Las temperaturas se estabilizan en torno a 1,8 °C por encima de las preindustriales a finales de siglo.
SSP2-4.5	Intermedio: 2,7 °C en 2100	Escenario "intermedio". Las emisiones de CO ₂ rondan los <u>niveles actuales</u> antes de empezar a descender a mediados de siglo, pero no llegan a cero antes de 2100. Los factores socioeconómicos siguen sus tendencias históricas, sin cambios notables. El progreso hacia la sostenibilidad es lento, y el desarrollo y la renta crecen de forma desigual. En este escenario, las temperaturas aumentan 2,7 °C a finales de siglo.
SSP3-7.0	Peligroso: 3,6 °C en 2100	Las emisiones y las temperaturas aumentan constantemente y las emisiones de CO ₂ se duplican aproximadamente con respecto a los niveles actuales para el año 2100. Los países se vuelven más competitivos entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y asegurando su propio suministro de alimentos. A finales de siglo, la temperatura media habrá aumentado 3,6 °C.
SSP5-8.5	A evitar a cualquier precio: 4,4 °C en 2100	Es un futuro que hay que evitar a toda costa. Los niveles actuales de emisiones de CO ₂ se duplican aproximadamente en 2050 y continúan creciendo a ese ritmo varias décadas después. La economía mundial crece rápidamente, pero este crecimiento se alimenta de la explotación de los combustibles fósiles y de estilos de vida que consumen mucha energía. En 2100, la temperatura media del planeta es de 4,4 °C más sobre los valores preindustriales.

Ambos enfoques presentan ventajas complementarias. Los niveles de calentamiento permiten una evaluación más directa de los umbrales de impacto, ayudan a orientar políticas climáticas basadas en límites físicos del sistema y resultan especialmente útiles en contextos donde la claridad comunicativa es prioritaria. Por su parte, los escenarios integrados permiten planificar medidas de adaptación asociadas a horizontes temporales definidos, diseñar infraestructuras resilientes, y analizar las interacciones entre cambio climático, desarrollo socioeconómico, transición energética y otras dimensiones de política pública. Esta capacidad resulta particularmente importante para análisis que deben vincularse a calendarios normativos o de inversión, como los relacionados con las contribuciones nacionalmente determinadas (NDC), la estrategia climática a largo plazo de la UE o los planes nacionales de adaptación.

Sin embargo, el uso de niveles de calentamiento implica también ciertas limitaciones. La más relevante desde una perspectiva operativa es su ambigüedad temporal: un mismo incremento de temperatura puede alcanzarse en momentos temporales distintos, dependiendo de la trayectoria de emisiones seguida. Esta indeterminación puede dificultar la planificación de políticas y acciones que requieren una clara referencia temporal. Además, al no incorporar el contexto socioeconómico asociado, se pierde la capacidad de explorar cómo evolucionan la exposición y la vulnerabilidad, lo cual es fundamental para una evaluación de riesgos robusta. Por otro lado, aunque muchos modelos climáticos permiten identificar resultados vinculados a determinados niveles de calentamiento mediante técnicas de postproceso, esta operación no siempre es aplicable de forma consistente en todas las regiones y variables, lo que puede limitar la comparabilidad y la coherencia de los análisis.

En la Tabla 3, se muestra una comparación entre los aspectos más reseñables de ambas metodologías:

Tabla 3: Comparación entre la metodología basada en Niveles de calentamiento y la basada en Escenarios de emisiones.

Criterio	Niveles de calentamiento	Escenarios de emisiones
Definición	Umbrales de incremento de temperatura media global respecto al periodo preindustrial	Futuros climáticos plausibles vinculados al desarrollo social, económico y productivo
Relación con la escala temporal	No asociadas a fechas fijas; un mismo nivel puede alcanzarse en distintos momentos	Asociadas a horizontes temporales concretos (2030, 2050, 2100, etc.)
Relación con la exposición y vulnerabilidad	Implícita o ausente; requiere suposiciones externas si se necesita estimar exposición o vulnerabilidad	Explícita, permite modelar cómo cambian con el tiempo
Aplicación	Análisis de umbrales de impacto físico, comunicación de riesgos, evaluación de límites climáticos	Modelos integrados de evaluación, NDC, estrategias nacionales y europeas de adaptación
	Evaluación del cumplimiento del Acuerdo de París, análisis de impactos físicos agregados	Evaluación de impactos integrados, planificación sectorial, planeamiento de

		políticas sostenibles de mitigación y adaptación
Ventajas	Claridad comunicativa, comparabilidad entre regiones, enfoque centrado en los límites biofísicos del sistema	Escenarios socioeconómicamente plausibles y compatibles con decisiones de política pública
Limitaciones	Ambigüedad temporal, falta de contexto socio-económico y tecnológico, menor aplicabilidad para planificación de la adaptación	Complejidad metodológica, dependencia de múltiples supuestos

En la práctica, se ha consolidado una estrategia metodológica híbrida que combina ambos enfoques. Los niveles de calentamiento se utilizan para identificar umbrales críticos de riesgo climático y evaluar la suficiencia de las políticas de mitigación, mientras que los escenarios SSP-RCP permiten contextualizar estos riesgos en trayectorias socioeconómicas plausibles y definir horizontes temporales para llevar a cabo la adaptación. Este enfoque integrado es coherente con los marcos de evaluación utilizados por el IPCC y por diversas instituciones europeas, y permite superar las limitaciones inherentes a cada uno de los enfoques si se usan de forma aislada. En la Tabla 4, se recoge, a modo resumen, las ventajas e inconvenientes de cada aproximación en función de diferentes criterios vinculados a los objetivos marcados en este proyecto.

Tabla 4: Ventajas e inconvenientes de la metodología basada en Niveles de calentamiento y la basada en Escenarios de emisiones.

Criterio	Niveles de calentamiento	Escenarios de emisiones
Evaluación de umbrales físicos de riesgo	Alta utilidad	Menor claridad
Planificación con fechas objetivo	Ambiguo	Muy útil
Evaluación de soluciones robustas bajo incertidumbre, especialmente a largo plazo	Adecuado	Depende del escenario
Diseño de infraestructuras resilientes	Requiere estimar horizontes temporales	Compatible con diseño para toda la vida útil
Inclusión de factores sociales y económicos	Limitado	Completo
Comunicación a tomadores de decisiones y público general	Más intuitivo	Más técnico

ANEXO II. FUENTES DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

La planificación y análisis del riesgo climático requieren el uso de fuentes fiables de información y herramientas técnicas contrastadas. A continuación, se describen algunos recursos clave, disponibles en acceso abierto, que resultan especialmente útiles para técnicos, planificadores e investigadores que trabajan en el ámbito de la adaptación al cambio climático.

a) **AdapteCCa Visor de Escenarios de Cambio Climático**

El visor de escenarios de AdapteCCa, desarrollado en el marco de la Plataforma Española de Adaptación al Cambio Climático, ofrece acceso a proyecciones climáticas regionalizadas para España. Integra resultados de modelos globales y regionales (EURO-CORDEX, entre otros) y permite consultar variables climáticas clave bajo diferentes escenarios de emisiones. Destaca por su orientación a la adaptación sectorial y territorial, facilitando la exploración interactiva de mapas, series temporales y comparaciones espaciales. Incluye herramientas de descarga y visualización que permiten a administraciones, investigadores y sectores socioeconómicos disponer de información armonizada para la planificación de medidas de adaptación.

b) **IPCC Data Distribution Centre**

El Data Distribution Centre del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático proporciona acceso a conjuntos de datos, escenarios climáticos y socioeconómicos utilizados en los informes del IPCC. Facilita información estandarizada para análisis de riesgo, así como herramientas para la interpretación de escenarios y el uso de variables en contextos regionales y sectoriales. Es una referencia obligada para asegurar la coherencia con las metodologías y resultados del IPCC

c) **Copernicus Climate Data Store**

El Copernicus Climate Data Store, desarrollado por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus, ofrece acceso a un amplio repositorio de datos climáticos, incluyendo observaciones, reanálisis, proyecciones regionalizadas y productos derivados. Destaca por su interfaz amigable, la posibilidad de descarga masiva y la existencia de notebooks preconfigurados que permiten aplicar modelos de análisis directamente desde la plataforma. Incluye datos del conjunto ERA5, así como los productos de CORDEX para Europa.

d) **Climate4Impact**

Esta plataforma facilita el acceso y procesamiento a partir de conjunto de modelos globales, regionales y de alta resolución. Está orientada a usuarios sectoriales que necesitan traducir los datos climáticos en impactos tangibles sobre agricultura, agua, energía u otros sectores sensibles al clima. Ofrece herramientas para análisis estadístico, representación geográfica e integración con software especializado.