

IMPACTOS Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA

2020



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

IMPACTOS Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA

2020



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

Autora/es: M. J. Sanz^{1,5} y E. Galán¹.

Autores de capítulos específicos: M.J. Sanz (cap. 1, 3, 10); M. Neumann^{1,5}; Elena López-Gunn⁶ (cap. 2); J. Curiel-Yuste^{1,5} (cap. 3); E. Galán (cap.4); I. Rubio^{1,2}; M. Valle^{2,3}; D. Salgueiro-Otero²; R. Ruiz-Díaz²; M. Norte-Navarro⁴; E. Ojea² (cap. 5); E. Sainz de Murieta¹ (cap. 6); M. Olazabal¹ y M. Ruíz de Gopegui¹ (cap. 7); A. Chiabai¹ y S. García de Jalón¹ (cap. 8); M. González-Equino¹ (cap. 9). Capítulos 11 y 12 (todos los autores).

¹Basque Centre for Climate Change, Leioa ; ²Future Oceans Lab, CIM-UVigo, Universidade de Vigo, Vigo; ³National Center for Ecological Analysis and Synthesis (NCEAS), University of California Santa Barbara, USA; ⁴Centro Tecnológico del Mar (CETMAR), Vigo; ⁵Fundación Ikerbasque, Bilbao; ⁶ICATALIST.

Coordinación: Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Fecha: octubre 2020



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Edita

©: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD)

Madrid 2020.

www.miteco.es

Plaza de San Juan de la Cruz, 10. 28071 Madrid.

ESPAÑA

NIPO (en papel): 665-20-004-2

NIPO (en línea): 665-20-005-8

Depósito Legal: M-19798-2020

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

Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Sanz, M.J. y Galán, E. (editoras), 2020. Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

Las opiniones que se expresan en este informe son responsabilidad de los autores y no necesariamente del MITERD o su personal.

Índice

RESUMEN EJECUTIVO	1
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO 1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA	19
CAPÍTULO 2. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS	27
CAPÍTULO 3. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES	54
CAPÍTULO 4. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA AGRICULTURA Y LA GANADERÍA	75
CAPÍTULO 5. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MEDIO MARINO	91
CAPÍTULO 6. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS	111
CAPÍTULO 7. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ÁREAS URBANAS	125
CAPÍTULO 8. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO RELACIONADOS CON LA SALUD	143
CAPÍTULO 9. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ENERGÍA	159
CAPÍTULO 10. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN OTROS SECTORES: TRANSPORTE Y TURISMO	163
CAPÍTULO 11. RIESGOS PARA LOS SECTORES E INTERRELACIONES	173
CONCLUSIONES	184
ANEXO I. GLOSARIO	192
ANEXO II. MARCO NORMATIVO DE LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CONTEXTO MULTILATERAL, EUROPEO, NACIONAL, AUTONÓMICO Y LOCAL	200
ANEXO III. TABLA DE ATRIBUCIÓN DE RIESGOS POR SECTOR Y RELACIÓN CON OTROS SECTORES	203

IMPACTOS Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA

Resumen Ejecutivo

CLIMATE CHANGES IMPACTS AND RISKS IN SPAIN

Executive Summary



Introducción

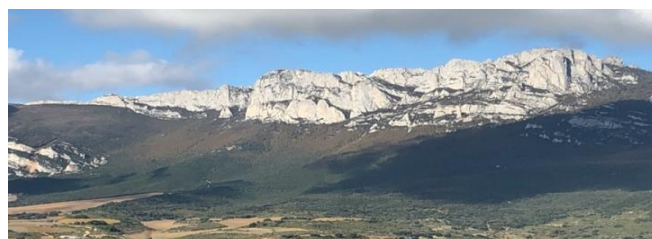
En el año 2005 la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) publicó el Informe “Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático”¹. Los resultados de este Informe proporcionaron las bases para el desarrollo del primer Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC-1), adoptado por el Consejo de Ministros en el año 2006. En el año 2020 ve la luz el segundo PNACC (PNACC-2), para el periodo 2021-2030, que forma parte del Marco Estratégico de Energía y Clima de España, el cual aglutina un conjunto de instrumentos, entre los que destacan el proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética, la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Moderna, Competitiva y Climáticamente neutra en 2050, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 y la Estrategia de Transición Justa.

El PNACC-2 tiene por objetivo dar respuesta a las crecientes necesidades de adaptación al cambio climático en España, así como a nuestros compromisos internacionales en este campo (la Agenda 2030, el Acuerdo de París y la normativa europea), sentando las bases para promover un desarrollo más resiliente al cambio climático a lo largo de la próxima década. Así, pretende dar un impulso a la adaptación, ampliando las temáticas abordadas hasta la fecha, los actores implicados y la ambición de sus objetivos, siempre desde la convicción de que impulsar la adaptación no supone renunciar a mitigar el cambio climático. La elaboración del PNACC-2 tuvo como punto de partida la evaluación en profundidad del trabajo realizado desde 2006 con el primer Plan, y ha contado con el apoyo del proyecto LIFE SHARA², cuyo objetivo general es mejorar la gobernanza de la adaptación al cambio climático y aumentar la resiliencia en España y Portugal.

El presente Informe tiene como principal objetivo llevar a cabo un análisis y síntesis de los principales impactos del cambio climático en un total de 10 ámbitos de trabajo, o sectores y sistemas naturales, considerados prioritarios tanto en el PNACC-1 como en el PNACC-2 (recursos hídricos, ecosistemas terrestres, agricultura y ganadería, medio marino, costas, áreas urbanas, salud, energía, transporte y turismo) en base a la información disponible. Además,

presenta una propuesta inicial de los riesgos derivados de estos impactos y una valoración preliminar de la urgencia para ser abordados. La mayoría de la documentación analizada en el Informe está recogida en la Plataforma AdapteCCa³, y en algunos casos, los autores han complementado con otros artículos científicos.

Este Informe puede servir además para orientar el trabajo de las futuras publicaciones sobre la evolución de los impactos y riesgos derivados del cambio climático, que se elaborarían con una periodicidad al menos quinquenal tal y como recoge el proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética. Esta información, junto con la relacionada con las políticas y medidas destinadas a aumentar la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad frente al cambio climático en España, será clave para cumplir con los objetivos de información asumidos en la normativa internacional y europea.



Autora: M.J. Sanz



Escenarios

En los últimos escenarios de cambio climático elaborados para España por AEMET se proyectan aumentos en la escala anual de las temperaturas máximas de entre 2°C y 6,4 °C, más acusados en verano, y con incrementos mayores en el interior y menores en el norte y noroeste peninsular. Una tendencia similar se espera para las temperaturas mínimas, aunque menos acusada que para las máximas, y una disminución del número anual de días de helada. Con un incremento de los días cálidos y de las olas de calor más largas.



¹ Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático, 840 pp, MIMAM 2005.

² "Sensibilización y Conocimiento para la Adaptación al Cambio Climático". <https://www.lifeshara.es/>

³ <https://adaptecca.es/>

Las precipitaciones también tenderán a reducirse en las últimas décadas del siglo. Todo ello, podría ir acompañado por cambios en la velocidad del viento generalizados y el incremento de los fenómenos extremos.

Impactos

Las evidencias de los impactos del cambio climático y la identificación de potenciales riesgos se pueden encontrar en todos los sectores considerados.



Recursos hídricos

En cuanto al impacto del cambio climático en los **recursos hídricos** se espera un aumento generalizado en la intensidad y magnitud de las sequías meteorológicas e hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, debido principalmente al aumento de la evapotranspiración y, secundariamente, a la reducción de las precipitaciones. Estos cambios se traducen en proyecciones de escorrentía y recarga subterránea decrecientes, y por tanto una reducción de la aportación hídrica a los ríos.

Ya se ha observado una reducción del caudal de los principales ríos de la península ibérica durante la segunda mitad del siglo XX, con una tendencia a la baja de los caudales anuales más pronunciada en primavera e invierno, que se puede atribuir a varias causas, incluyendo los cambios en el patrón de lluvias estacionales además de a otros factores no climáticos de gran importancia y que deben tenerse en cuenta para explicar mejor las tendencias temporales y espaciales.

El incremento de las temperaturas, la posible disminución de la precipitación anual, el cambio en la estacionalidad, cambio de régimen nival o la intensidad de las precipitaciones, así como el aumento del nivel del mar pueden producir alteraciones en los procesos del ciclo hidrológico en su fase subterránea (salinización, concentración de contaminantes) y superficial (inundaciones por eventos extremos o deshielo rápido, etc.).

El aumento de la intermitencia de los flujos de agua o los cambios estacionales pueden impactar muy negativamente en algunos hábitats acuáticos de agua dulce (humedales, manantiales, etc.) y sus especies.

En general, incluso en los escenarios de bajas emisiones, se prevén considerables repercusiones en el ciclo hidrológico, cuya consecuencia será la disminución de la disponibilidad de agua y su calidad.

Los recursos hídricos están íntimamente relacionados con todos los sectores económicos, especialmente aquellos que son más críticos para nuestra economía. Por lo tanto, los cambios en su disponibilidad y calidad podrían generar vulnerabilidad a nivel sistémico con posibilidades de efectos de cascada.



Autora: M.J. Sanz. Alcoy

Es importante resaltar la vulnerabilidad del sistema por el actual uso de los recursos hídricos que está altamente regulado y con un uso muy intensivo en ciertas áreas. Esta elevada vulnerabilidad debería ser considerada para adoptar un enfoque sistémico en las respuestas de adaptación.



Desertificación y suelos

Las proyecciones sobre cambio climático en España apuntan, entre otras cosas, hacia una creciente aridez y un aumento de las temperaturas. Aun cuando no se produjeran incrementos cuantitativamente importantes de las pérdidas de suelo, el incremento previsto de la aridez apunta a un aumento del riesgo de **desertificación**. Además, España es uno de los tres países de la Unión Europea con mayor riesgo de incendios, riesgo que puede verse incrementado.



Autora: M.J. Sanz. Almería

En lo que respecta a los **suelos**, la disminución de la precipitación media o el aumento de fenómenos extremos (como sequías, inundaciones o incendios, entre otros) pueden provocar un incremento peligroso

de la erosión sobre todo en aquellos suelos sujetos a alta intensidad de manejo.

Se espera una disminución de la materia orgánica en los suelos ya pobres en carbono orgánico, en particular en suelos mediterráneos. La actividad, composición y estructura de las comunidades bióticas pueden verse afectadas en general de forma negativa, modificándose de manera sustancial su capacidad de proveer los nutrientes y los servicios que permiten la recuperación de las comunidades vegetales que soportan.

Los ciclos del nitrógeno y carbono pueden verse alterados. Se ha visto que la presencia de costras biológicas en los suelos semiáridos y áridos los hacen más resilientes, aunque el incremento de temperatura puede inducir a la reducción de las mismas.



Ecosistemas terrestres

El funcionamiento de los **ecosistemas terrestres** y sus componentes se verá afectado de diversas formas.

En las especies forestales se han observado ya cambios fenológicos, como el aumento o desplazamiento del periodo de permanencia de la hoja en especies caducifolias, y cambios en los periodos de floración y fructificación de muchas especies. Estas alteraciones pueden llevar a cambios de comportamiento en las especies migratorias, muchas aves migratorias ya están adelantado su llegada a la Península, o en especies locales, determinados insectos están adelantando la emergencia de los adultos.

Algunas especies forestales se están viendo afectadas negativamente, con incrementos en la defoliación y aumento de las tasas de mortalidad. Estos fenómenos en muchos casos están también condicionados por la gestión de estos ecosistemas, que puede aumentar o disminuir su vulnerabilidad.



Autora: M.J. Sanz. Ataque de Banda Roja en pinares. Guipúzcoa

Se han observado cambios de distribución de algunas especies, como la ascensión altitudinal del haya en el

Montseny o el piorno serrano y el enebro en la Sierra de Guadarrama.

Asimismo, se han visto alteradas las interacciones bióticas, como la distribución e intensidad de las plagas y enfermedades en las especies de coníferas (la procesionaria del pino, las plantas hemiparásitas, o las infecciones por hongos). Algunos de estos incrementos de mortandad en pinares se han relacionado con el incremento de las sequías.

Es muy probable que la resiliencia de nuestros bosques pueda verse reducida en el futuro si se producen sequías recurrentes. Ya se han identificado complejos fenómenos de decaimiento, en los que el cambio climático puede estar jugando un papel junto con otros factores (por ejemplo, el abandono de la gestión o la entrada de patógenos exóticos). Tal es el caso del decaimiento observado en los encinares peninsulares.



Autora: M.J. Sanz. Encinar afectado por la sequía. Castellón

Los ecosistemas de montaña y las poblaciones situadas en los límites meridionales de distribución y cotas altitudinales inferiores pueden presentar una alta vulnerabilidad, así como especies de reptiles y anfibios. Es decir, especies viviendo en ecosistemas “islas”, donde no pueden migrar, o viviendo en los márgenes de sus áreas de distribución, donde pequeños cambios climáticos pueden generar grandes impactos en la salud y capacidad de supervivencia de estas especies.



Agricultura y ganadería

Los principales impactos del cambio climático en la **agricultura y la ganadería** son los cambios fenológicos asociados al desplazamiento de las estaciones, el aumento del estrés hídrico, los daños por calor y por eventos extremos. También sufre impactos indirectos derivados de los efectos del cambio climático sobre otros sectores (suelos, recursos hídricos, etc.).



Autora: M.J. Sanz. Viñedos. La Rioja

Así, se espera un descenso en la producción tanto de cultivos herbáceos como leñosos, siendo mayor en los cultivos de secano. El efecto de la posible limitación de los recursos hídricos para los cultivos de regadío dependerá de los requerimientos de cada tipo de cultivo y de la disponibilidad de dichos recursos en cada región. Ya hay evidencias constatadas del cambio fenológico en algunas especies frutales de hueso y en los cítricos en España debido al avance de las temperaturas primaverales y la falta de días fríos. Asimismo, los viticultores han constatado un adelanto de la fecha de maduración de la uva. Estos cambios tienen efectos en la calidad de las cosechas o en la competitividad del cultivo de estación temprana.

Se esperan afecciones a la distribución de patógenos y enfermedades zoonóticas, pues se extienden los hábitats para especies de otras latitudes. Los cambios en la fauna auxiliar y los polinizadores también pueden ser muy relevantes, incluyendo impactos en el sector apícola.



Autora: M.J. Sanz. Ganado ovino autóctono

El incremento de la matorralización de las últimas décadas en los pastos de montaña supra-forestales, debido a la disminución de la carga ganadera, aumenta la vulnerabilidad de estos sistemas a los incendios, que se prevén más recurrentes debido a los efectos del cambio climático. En la ganadería intensiva se espera que los impactos más importantes sean indirectos; la extensiva y mixta se verán afectadas de manera directa por la limitación del acceso al agua y la exposición al estrés por calor,

sobre todo en pastos donde no hay suficiente arbolado para producir sombra.

Todos estos cambios agravarán la vulnerabilidad de la agricultura y la ganadería españolas y exigirán medidas adaptativas. Por ello, es necesario el estudio de los impactos a nivel regional, por tipo de cultivo y especie ganadera, así como por sistema de explotación; además de la inclusión de indicadores o evidencias del cambio.



Medio marino

En el **medio marino**, los impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas, así como en la pesca y acuicultura, son cada vez mejor conocidos y se deben fundamentalmente al aumento de temperatura, la acidificación y la pérdida de oxígeno. Así, se observan cambios en la distribución y abundancia de especies de flora y fauna marina, cambios fenológicos, establecimiento de especies invasoras y disminución del potencial pesquero y acuícola, principalmente. Estos cambios a nivel de especie influyen en la composición e interacciones dentro de las comunidades biológicas, y en la estructura, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas, con implicaciones para los servicios eco sistémicos marinos, la pesca y la acuicultura.



Autora: M.J. Sanz. Barcos pesqueros. Galicia

Estos impactos se han venido documentando para las regiones Mediterránea, Canaria y Atlántica peninsular, con cada vez más evidencia de especies que cambian sus rangos de distribución, abundancia, presencia y migraciones. Así, los ecosistemas marinos y las comunidades humanas que dependen de ellos serán más vulnerables al cambio climático cuando además estén expuestos a otras presiones e impactos, como la contaminación, la presión urbana o la sobrepesca.

La magnitud acumulada de estas presiones, junto al cambio climático, está aumentando el riesgo de extinción de especies marinas a tasas sin precedentes.



Costas

El cambio climático representa una amenaza importante para las **costas** en España, aunque se trata de uno de los sectores mejor estudiados y que cuenta con su propia estrategia de adaptación. Entre los factores de cambio más importantes se encuentran el ascenso del nivel del mar, los eventos extremos, como las mareas meteorológicas, los cambios en el oleaje y los cambios en la temperatura del agua, pero también diversos factores antropogénicos, como la ocupación de la costa, que aumentan la exposición ante los riesgos climáticos.



Autora: M.J. Sanz. Playas, San Sebastian

El cambio climático está agravando ya muchos de estos procesos y seguirá haciéndolo en el futuro. Como consecuencia de ello, y en ausencia de políticas de adaptación, se espera que aumenten las inundaciones costeras y la erosión, que afectarán tanto a los sistemas naturales como humanos, así como los daños materiales, ecológicos y económicos asociados.



Medio urbano

Los retos de las **ciudades** frente al cambio climático son muchos y diversos. Los núcleos urbanos concentran población e infraestructuras críticas, a la par que conocimiento y bienes sociales y culturales. Además de ser vulnerables al cambio climático por estas razones, también las ciudades están altamente expuestas y son propensas a sufrir impactos por sus características intrínsecas o por su localización en el territorio.

En los planes urbanos de adaptación al cambio climático en España se identifican 7 ejes de riesgo: aumento del nivel del mar, oleaje extremo, precipitación intensa, disminución de las precipitaciones, aumento de las temperaturas, olas de calor y vendavales. Así como diversos sectores afectados

(urbanización, ecosistemas, salud, sectores económicos, etc.).

Actualmente, el grado de desarrollo y detalle de las evaluaciones de riesgo y vulnerabilidad en las ciudades es bajo.

Hay que seguir trabajando para generar conocimiento cualitativo y cuantitativo en torno a los impactos del cambio climático en las áreas urbanas, tanto en lo relativo a su magnitud como a su temporalidad y probabilidad de ocurrencia. Especial atención debe ponerse sobre los grupos más vulnerables y en las zonas dentro de la ciudad más expuestas o menos preparadas.

Es importante tener en cuenta que el cambio climático exacerbará muchos de los problemas actuales en las ciudades, ya que determinados grupos sociales se verán especialmente afectados debido a su menor capacidad de preparación, respuesta y recuperación ante los impactos. Esta información es fundamental a la hora de planificar la inversión en adaptación de forma eficiente y eficaz, teniendo en cuenta los riesgos climáticos más probables, pero sin olvidar la incertidumbre, en particular de aquellos eventos menos probables pero que más daños puedan generar.



Autora: M.J. Sanz. Barcelona

Por último, aunque los impactos son generalmente reconocidos por las consecuencias negativas sobre la gestión urbana, los ecosistemas y recursos, la planificación y las infraestructuras, las actividades económicas o la población, en muchos casos también se identifican impactos con efectos positivos. Esta dualidad, por tanto, debe tenerse en cuenta a la hora de evaluar los costes y beneficios de la adaptación urbana.



Salud humana

El cambio climático en España representa una amenaza para la **salud humana**, con impactos directos e indirectos. Entre los primeros, son especialmente relevantes los riesgos asociados a las temperaturas excesivas y a las inundaciones, que se asocian con morbilidad y mortalidad por causas

cardiovasculares y respiratorias, estrés térmico, agravamiento de enfermedades crónicas y lesiones.

El cambio climático también afecta a la salud humana indirectamente por concurrencia con la contaminación medioambiental (aire, polen o radiaciones ultravioletas, etc.).

Los impactos en los ecosistemas provocan cambios en la distribución geográfica y temporal de los agentes patógenos y sus vectores; cambios facilitados por la globalización y aumento del transporte de personas y mercancías. En España, los riesgos emergentes incluyen enfermedades transmitidas por garrapatas, enfermedades transmitidas por mosquitos en regiones húmedas (destaca el mosquito tigre asiático, que transmite dengue, chikungunya y zika). Los patógenos transmitidos por los alimentos y el agua son sensibles al cambio climático, por ejemplo, por el crecimiento bacteriano mediado por la temperatura o mediante la contaminación del agua por inundaciones. Los riesgos de enfermedades transmitidas por agua o alimentos incluyen la transmisión de *Cryptosporidium*, *Vibrio*, salmonela y *Campylobacter*. Además, las cianobacterias hepatotóxicas en aguas de recreo y superficiales pueden constituir un riesgo adicional para la salud pública en futuros escenarios en España.



Autora: M.J. Sanz. Crecida del Ebro

Otros impactos indirectos se manifiestan a través de los efectos del cambio climático sobre aspectos sociales, como por ejemplo la seguridad alimentaria, la capacidad laboral, el impacto sobre el sistema sanitario y el desplazamiento de la población. Hay que tener en cuenta que todos estos impactos pueden llevar asociados problemas de salud mental.

Entre los factores que agravan la vulnerabilidad frente al impacto del cambio climático en la salud se incluyen la presencia de enfermedades previas, la exclusión y desconexión social, la pobreza, los estilos de vida poco saludables y otros factores socio-económicos y demográficos.

Las áreas urbanas son particularmente sensibles por la densidad de población y alta densidad de grupos vulnerables. Existen factores de vulnerabilidad

emergente, como la resistencia a antibióticos, los nuevos contaminantes en aguas y sus posibles interacciones con el cambio climático y la creciente incidencia de enfermedades generadas por el estilo de vida sedentario.

Todos estos riesgos en salud interactúan entre sí, reduciendo la resiliencia global de la población frente al cambio climático, y se prevé que impacten en la futura salud pública.

Energía

La **energía** hidroeléctrica es la fuente de energía que puede verse más afectada por el cambio climático debido a la menor disponibilidad de agua. Asimismo, los eventos meteorológicos extremos pueden afectar a las infraestructuras energéticas, especialmente las situadas en las zonas costeras, y generar riesgos añadidos sobre el sistema. También existen otros riesgos relacionados con la modificación futura del potencial eólico y solar, aunque las proyecciones existentes tienen una elevada incertidumbre. Si bien el impacto más significativo del cambio climático en nuestro país vendría por el lado del nexo entre agua y energía, también existen otros riesgos relacionados con el nexo entre energía y uso de la tierra, que pueden ser más relevantes a medida que aumente el uso de la biomasa como fuente de energía en el futuro, cuyo potencial puede verse afectado por el cambio climático.



Autora: M.J. Sanz. Energía eólica

Finalmente, el mix energético futuro, con una mayor presencia de energías renovables, aumenta la resiliencia del sistema, al reducir los niveles de dependencia energética, y es una medida de adaptación, ya que se reducen los efectos negativos relacionados con el consumo intensivo de agua por parte de las centrales térmicas. Sin embargo, las instalaciones que utilizan fuentes renovables también generan otros impactos indirectos, ya que competirán con otros usos del suelo.



Infraestructuras y transporte

En cuanto a **las infraestructuras y redes de transporte**, se prevén impactos negativos en las redes troncales de transporte terrestre (red vial y ferroviaria), especialmente debidos a los fenómenos climáticos extremos como las precipitaciones torrenciales; aunque también se pueden experimentar impactos positivos si disminuyen las nevadas y heladas.

Se ha estimado que la magnitud del cambio de vulnerabilidad de la red estatal de transporte terrestre a 30 años a causa del cambio climático es, en promedio, inferior a la vulnerabilidad que ya tienen en la actualidad gran parte de sus secciones.

Las redes portuarias y aeroportuarias también pueden verse afectadas de forma negativa, en especial por eventos extremos en las costas los primeros, y por cambios en el régimen de vientos los segundos, pudiendo aparecer también impactos positivos en este caso.



Turismo

El **sector turístico** puede verse afectado por el cambio climático tanto por los impactos en la oferta como en la demanda. La subida de las temperaturas en las provincias costeras del Mediterráneo, especialmente en el sur, puede disminuir la predisposición de los turistas a visitar estos destinos. Aunque esto también podría provocar que la temporada alta de los destinos de sol y playa españoles se desplazara fuera de los meses de julio y agosto tradicionales.



Autora: M.J. Sanz. Costa mediterránea

La incidencia de eventos extremos en las costas puede también incidir negativamente en el turismo de playa y deportes acuáticos. El turismo relacionado con los deportes de invierno es el que se está viendo ya más afectado, especialmente en el caso de las estaciones de esquí a cotas más bajas por la falta de nieve,

situación que es previsible que se agrave incluso con escenarios climáticos más moderados.

Riesgos

Hay que destacar que, en la actualidad, se dispone de mayor conocimiento que hace dos décadas sobre los impactos y las medidas de adaptación que serían necesarias en muchos de los sectores considerados. En general, todos los sectores abordados presentan impactos que serán negativos (puntualmente podrían presentarse efectos positivos), lo que nos lleva a concluir que en todos ellos se debe de tener en cuenta la necesidad de medidas de adaptación.

Se ha identificado un conjunto de **73 riesgos** a partir de la información existente sobre los impactos del cambio climático en los diferentes estudios disponibles. La lista de riesgos identificados debe considerarse preliminar y como un primer paso que puede ayudar a diseñar nuevos estudios y tomar algunas decisiones sobre las prioridades en algunos sectores. Asimismo, puede servir como base para desarrollar un diálogo con la participación de los actores en los diferentes ámbitos, lo que podría llevar a una revisión y mejora de la misma, y permitir una agregación coherente con las interrelaciones sectoriales.

Más Urgente

- Prioridad de investigación
- Más acción necesaria a corto plazo

Menos Urgente

- Continuar el monitoreo del riesgo
- Continuar las acciones iniciadas

Teniendo en cuenta las limitaciones descritas, y basándonos en la información recopilada sobre los impactos del cambio climático hasta el momento, se ha hecho una valoración en clave de urgencia (más urgente, menos urgente).

Entendiendo urgencia como la necesidad de abordar de cada riesgo en el momento actual (necesidad de nuevas medidas o investigación relacionada con la búsqueda de nuevas medidas).

Sería recomendable la realización de estudios más completos y regulares de los impactos que ya están ocurriendo y los esperados basados en los escenarios climáticos más recientes, teniendo en cuenta las interrelaciones que pueden existir entre ellos y la interacción con las medidas de mitigación que se están contemplando. No por ello deja de ser necesario profundizar en el entendimiento de los procesos climáticos, biofísicos, económicos y sociales subyacentes que condicionan la vulnerabilidad y la respuesta al cambio climático.

URGENTE		MENOS URGENTE	
1	Riesgo de reducción de los caudales de los ríos o de cambios en sus patrones estacionales	7	Riesgo de subsidencia en el terreno que afecte a edificios e infraestructuras por la menor recarga de acuíferos.
2	Riesgo de cambio de distribución y biodiversidad de las comunidades acuáticas en masas de agua dulce.	8	Riesgo de mayor colmatación de embalses.
3	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos para uso doméstico y en el sector servicios.	9	Riesgo de impactos en piscifactorías de agua dulce.
4	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos para usos agrícolas e industriales.	13	Riesgo de disminución de la productividad e incremento de la mortandad de especies arbóreas en los bosques por los cambios de variables climáticas (precipitación y temperatura) y el incremento de la incidencia de plagas y enfermedades.
5	Riesgo de incremento de inundaciones fluviales y pluviales.	14	Riesgo de disminución o fragmentación de los hábitats de algunas especies vegetales, altitudinales y longitudinales (bosques, ecosistemas de montaña, etc.).
6	Riesgo de incremento de la eutrofización y/o deterioro de la calidad del agua.	15	Riesgo de disminución de la biodiversidad, incluyendo desaparición de especies endémicas, cambios en las migraciones de aves.
10	Riesgo de aumento de la superficie de zonas áridas y semiáridas por desertificación.	16	Riesgo de entrada y expansión de especies exóticas e invasivas en los ecosistemas terrestres y de agua dulce.
11	Riesgo de degradación y pérdida de suelo por el incremento de la erosión, disminución de la materia orgánica y cambios/empobrecimiento de biodiversidad en las comunidades edáficas.	19	Riesgo de pérdida de las zonas óptimas para la producción agrícola de cultivos por cambios en la precipitación y temperatura.
12	Riesgo de incremento de incendios forestales por causas naturales y no naturales por incremento/acumulación de combustible y condiciones más favorables para la ignición.	21	Riesgo de pérdida de la calidad de los productos agrarios (por ejemplo, pérdida de la calidad del vino por aumento de la temperatura).
17	Riesgos derivados de los cambios en la fenología de las especies vegetales (aparición de hojas y fructificación) y que pueden provocar el desacoplamiento entre los ciclos biológicos de especies interdependientes incluyendo especies anuales.	22	Riesgo de pérdida de competitividad en el mercado de los productos de estación temprana por subida de temperatura invernal en otros lugares.
18	Riesgo del incremento de las afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.	23	Riesgo de pérdidas de producción ganadera, bienestar animal e incluso mortalidad por subida de temperatura, olas de calor y descenso de precipitaciones.
20	Riesgo de disminución del rendimiento de especies herbáceas, en especial de regadío, por limitaciones en el riego.	24	Riesgo de sobreexplotación de pastos por disminución de la producción de hierba asociada al ascenso de las temperaturas estivales y bajada en las precipitaciones.
28	Riesgo de pérdida de explotaciones por pérdidas de producción y aumento de precio de insumos.	25	Riesgo de incremento de la mortalidad de abejas por aumento de fenómenos extremos que puede derivar en un decaimiento de los servicios de polinización (p.ej. resultando en pérdidas de producción agrícola).
29	Riesgo para el equilibrio ecológico de los hábitats y comunidades marinas por el aumento de la temperatura media del agua en todas sus capas y el efecto de la acidificación y la pérdida de oxígeno, que seguirá causando desplazamientos biogeográficos de especies, nuevas interacciones entre especies y pérdidas de hábitats, en las tres demarcaciones marinas españolas: Atlántico, Mediterráneo y Canarias.	26	Riesgo de aumento de plagas, patógenos y cambios en la distribución de vectores, incluidos los de zoonosis.
33	Riesgos en la estabilidad de los ecosistemas marinos y en las especies importantes para la pesca por aumento de olas de calor en todas las demarcaciones, y con riesgo más elevado en el Mediterráneo donde se han producido mortalidades masivas de organismos (gorgonias, esponjas, moluscos).	27	Riesgo de abandono de sistemas pastoreados por fallos en la viabilidad derivados de subidas de precios de otros cultivos.
37	Riesgo para la pesca industrial por el desplazamiento de stocks de especies objetivo a aguas en las que no hay establecidos acuerdos de acceso o cuotas, y por una gestión no adaptativa.	30	Riesgo para la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos de los océanos, alterando recursos marinos importantes para los servicios de provisión, regulación y culturales debido a los cambios en distribución, abundancia y fenología de especies marinas en las tres demarcaciones.
41	Riesgo en las viviendas, infraestructuras y servicios en las zonas urbanas, asociados especialmente a la subida del nivel del mar y los eventos extremos costeros, aunque también se debe considerar el riesgo de intrusión salina en ríos y acuíferos o la subida del nivel freático. Estos riesgos también pueden afectar a elementos del patrimonio histórico y cultural ubicado en el litoral.	31	Riesgo de disminución de la productividad marina, de las capturas máximas potenciales y de la pesca debido a la estratificación de aguas superficiales y los cambios biofísicos en los océanos.
42	Las infraestructuras industriales, energéticas y de transporte localizadas en la costa deberán hacer frente a los mismos riesgos que los asentamientos urbanos (inundaciones costeras por aumento del nivel del mar y eventos meteorológicos extremos, erosión, intrusión salina).	32	Riesgos en el funcionamiento de los ecosistemas marinos, en la actividad pesquera y en la acuicultura por un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos en el mar (oleaje, temporal, intrusión del nivel del mar), afectando a la flota artesanal, industrial y a las instalaciones de acuicultura.
43	Riesgos de inundación y daños por deslizamientos y erosión en edificaciones y redes de infraestructura urbana (principalmente de saneamiento, drenaje y transporte) y otros elementos constructivos.	34	Riesgo de especies nuevas y/o invasoras que puedan integrarse en la actividad pesquera nacional, el consumo y los mercados, creando nuevas oportunidades, pero causando posible impacto ecológico.
44	Riesgo de desabastecimiento en servicios especialmente de agua y energía.	35	Riesgo para la acuicultura por aumento de episodios de fitoplancton tóxico, cambios en el crecimiento y fenología debidos al aumento de temperatura, al aumento de intensidad y frecuencia de eventos extremos y a la acidificación.
45	Riesgo de deterioro y aumento de los costes de mantenimiento de la infraestructura verde en el medio urbano, incluyendo incendios forestales.	36	Riesgo de pérdida de valor histórico, cultural e identitario asociados a la pesca artesanal y el marisqueo, que están siendo afectados por el cambio climático.
47	Riesgo de pérdida y deterioro de confort y habitabilidad en viviendas y/o adopción de soluciones de mala adaptación.	38	Riesgo de pérdida de ecosistemas costeros, playas, dunas y humedales por la subida del mar, con el consecuente retroceso de la línea de costa y erosión. En cuanto a los sistemas sumergidos, como las praderas de posidonia, el principal riesgo proviene del aumento de temperatura.
49	Riesgo de estrés térmico y reducción del confort térmico en el espacio público.	39	Riesgo de pérdida de cuota de mercado en el sector turismo en las zonas de costa debido a la exposición a fenómenos extremos y disminución de confort térmico, incluyendo también con los que tienen que ver con la degradación ambiental, como la erosión y retroceso de playas.
50	Riesgo de deterioro y deformaciones por cambios de temperatura en elementos y materiales de construcción y mobiliario urbano.	40	Riesgos para la agricultura en zonas costeras debido a inundación e intrusión salina.
52	Riesgo de pérdida de primas de seguros, cambios en la contratación y afectaciones a servicios urbanos.	46	Riesgo de pérdida de funcionalidad paisajística, recreativa y educativa de las áreas verdes en el tejido urbano.
53	Riesgo para la salud relacionado con el estrés por calor (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía envejecida, infantil, o con enfermedades preexistentes.	48	Riesgo de pérdida de valores culturales e identitarios y cambios en las relaciones sociales.
55	Daños personales por desbordamientos e inundaciones, temporales de viento y otros eventos extremos.	51	Riesgo de pérdida o alteraciones en la actividad económica urbana, debido a interrupciones en el transporte y cambios en la demanda.
56	Riesgo de aumento de enfermedades zoonóticas/vectoriales transmitidas por mosquitos (p. ej. dengue, fiebre amarilla, fiebre del Nilo y fiebre del Zika).	54	Riesgo de falta de abastecimiento y calidad de agua insuficiente para consumo doméstico y en sectores agrícola, industrial y servicios.
59	Riesgo de incremento de enfermedades asociadas a el empeoramiento de la calidad del aire.	57	Riesgo de aumento de enfermedades infecciosas transmitidas por agua y alimentos.
61	Riesgo de reducción en la producción de energía hidroeléctrica debida a los cambios de precipitación y temperatura.	58	Riesgo de incremento de la duración y gravedad de las enfermedades alérgicas asociadas al polen como el asma, la rinitis, las conjuntivitis alérgicas o alguna dermatitis.
64	Riesgo de daños a las infraestructuras energéticas por inundaciones costeras.	60	Riesgo de aumento o agravamiento de problemas de salud mental.
66	Riesgo de disminución de la operatividad de los puertos por el aumento de la frecuencia de rebase, fallos y roturas de diques, subida del nivel freático de los muelles como consecuencia de la mayor exposición y debido a la subida del nivel del mar.	62	Riesgo de reducción del disponible hidráulico para centrales que emplean el agua como refrigerante.
67	Riesgo de daños y erosión en taludes, firmes de carretera y puentes por el aumento de la frecuencia de eventos extremos.	63	Aumento del consumo energético o modificación de la dinámica de la demanda (picos y medias).
73	Riesgo de reducción e incluso desaparición del turismo de nieve.	65	Riesgo de afectación de las redes de suministro eléctrico debidas a eventos meteorológicos extremos.
		68	Riesgo de daños en la infraestructura ferroviaria (sobre tensión de las catenarias por tormentas eléctricas, en las vías por subida de la temperatura, saturación de sistemas de drenaje, erosión de taludes y deslizamientos).
		69	Riesgo de interrupción del tráfico ferroviario por caídas de objetos en las vías e impacto en las pantallas actísticas debido al incremento de las rachas de viento, en particular para las líneas de alta velocidad.
		70	Riesgo de disminución de operatividad de los aeropuertos por aumento de nieblas y viento, incendios en las operaciones de repostaje, dificultad de despegue de aviones pesados y saturación de los sistemas de drenaje por el aumento de eventos extremos.
		71	Riesgo de reducción de la estancia media en temporada alta en zonas de turismo de sol y playa, por olas de calor y eventos extremos.
		72	Riesgo de disminución del turismo por la desaparición o degradación de recursos turísticos (playas, parajes naturales, etc.).

Sectores

R. hídricos	M. marino	Salud	Turismo
E. terrestres	Costas	Energía	
Agríc. Y ganad.	A. urbanas	Transporte	

Figura 11.2. Categorías de urgencia (más urgente, menos urgente) asignadas a los riesgos identificados en la tabla 11.1.

Introduction

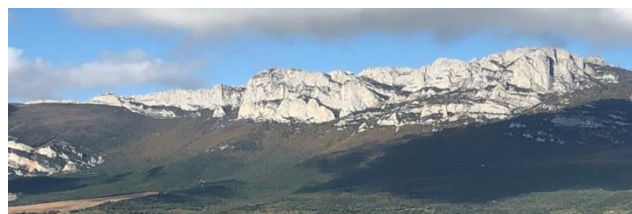
In the year 2005 the Spanish Office of Climate Change (OECC in Spanish) published the report entitled "Preliminary Assessment of the Impacts in Spain from Climate Change"¹. The results from this report provided the basis for the development of the first National Climate Change Adaptation Plan for Adaptation to Climate Change (PNACC-1), adopted by the Council of Ministers in 2006. In the year 2020 the second PNACC (PNACC-2) covering the period 2021-2030, was presented and adopted in 2020. This new National Adaptation Plan, which is part of the Strategic Framework for Energy and Climate in Spain, which brings together a set of instruments, like the Climate Change and Energy Transition Draft Law, the Long-Term Strategy for a Modern, Competitive and Climate-Neutral Economy by 2050, the Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030 and the Just Transition Strategy.

The PNACC-2 aims to meet the growing needs of for adaptation to climate change in Spain, as well as our international commitments in this field (Agenda 2030, the Paris Agreement and various European regulations), laying the groundwork to promote a model of development that is more resilient to climate change climate-resilient development model over the next decade. Thus, it aims to give a boost to adaptation, expanding the issues addressed to date, the actors involved and the ambition of its objectives, always from the conviction that promoting adaptation does not mean giving up mitigating climate change. The preparation of PNACC-2 had as its starting point an in-depth evaluation of the work carried out since 2006 with the first Plan, and has had the support of the LIFE SHARA project², whose general objective is to improve the governance of adaptation to climate change and increase resilience in Spain and Portugal.

The main objective of this Report is to carry out an analysis and synthesis of the main impacts of climate change in a total of 10 work areas, or sectors and natural systems, considered priorities both in the PNACC-1 and in the PNACC-2 (water resources, terrestrial ecosystems, agriculture and livestock, marine environment, coasts, urban areas, health, energy, transport and tourism) based on the information available. In addition, it presents an

initial proposal of the risks derived from these impacts and a preliminary assessment of the urgency of the impacts to be addressed. Most documents analyzed in the report are contained in the AdapteCCa Platform³. In some cases, the authors have supplemented the material available in the platform with other scientific articles.

This Report can also serve to guide the work of future publications on the evolution of the impacts and risks arising from climate change, which could be prepared at least at every five-years interval, as set out in the draft Law on Climate Change and Energy Transition. This information, together with the information related to policies and measures aimed at increasing resilience and reducing vulnerability to climate change in Spain, will be key to meeting the information reporting objectives considered in within the international and European regulations.



Author: M.J. Sanz



Scenarios

In the latest climate change scenarios prepared for Spain by the State Meteorological Agency (AEMET), increases in the annual scale of maximum temperatures of between 2 and 6.4°C are projected, more pronounced in summer, and with greater increases in the interior of the peninsula and smaller increases in the North and Northwest of the peninsula. A similar trend is expected for the minimum temperatures, although less marked than for the maximum, and a decrease in the annual number of frost days. With an increase in warm days and longer heat waves. Rainfall will also tend to be reduced in the last decades of the century. All of this could be accompanied by generalized changes in wind speed and an increase in extreme phenomena.



¹ General Preliminary Assessment of the Impacts in Spain due to the Effect of Climate Change, 840 pp, MIMAM 2005.

² "Awareness and Knowledge for Adaptation to Climate Change". <https://www.lifeshara.es/>

³ <https://adaptecca.es/>

Impacts

Evidence of the impacts of climate change and the identification of potential risks can be found in all sectors considered.



Water resources

As for the impact of climate change on water resources an overall increase in the intensity and magnitude of meteorological and hydrological droughts is expected under scenarios of climate change, mainly due to increased evapotranspiration and, secondarily, to reduced rainfall. These changes translate into decreasing runoff and underground recharge projections, and therefore a reduction in the water inflows to rivers.

There has been a reduction in the flow of the major rivers of the Iberian peninsula during the second half of the twentieth century, with a downward trend of annual flows more pronounced in spring and winter, which This trend can be attributed to several causes, including changes in the pattern of seasonal rains, in addition to other non-climatic factors of great importance and that must be taken into account to better explain temporal and spatial trends.

The increases in temperatures, the possible decreases in annual precipitation, a changes in seasonality, a changes in the snow regime or the intensity of rainfall, as well as a rise in rising sea levels, can produce alterations in the processes of the hydrological cycle, in both in its the groundwater phase (salinization, pollutants concentration of pollutants) and the surface phase (floods due to extreme events or rapid thaw, etc.).

Increased intermittency of water flows or seasonal changes can have a negative impact on some freshwater aquatic habitats (wetlands, springs, etc.) and their species.

In general, even in low-emission scenarios, considerable repercussions on the hydrological cycle are expected, the consequence of which will be a decrease in the availability of water and its quality. Water resources are closely related to all economic sectors, especially those that are most critical to our economy. Therefore, changes in its availability and quality could generate vulnerability at a systemic level with the possibility of cascade effects.



Author: M.J. Sanz. Alcoy

It is important to highlight the vulnerability of the system due to the current use of water resources, which is highly regulated and with a very intensive use in certain areas. This high vulnerability should be considered to adopt a systemic approach in adaptation responses.



Desertification and soils

Projections on climate change in Spain point, among other things, towards increasing aridity and an increase in temperatures. Even if there were no quantitatively significant increases in soil losses, the expected increase in aridity points to an increased risk of desertification. Furthermore, Spain is one of the three countries in the European Union with the highest risk of fires, a risk that may be increased.



Author: M.J. Sanz. Almería

With regard to soils, the decrease in average precipitation or the increase in extreme phenomena (such as droughts, floods or fires, among others) can cause a dangerous increase in erosion, especially in those soils subject to high management intensity.

A decrease in organic matter is expected in soils already poor in organic carbon, particularly in Mediterranean soils. The activity, composition and structure of biotic communities can be generally negatively affected, substantially modifying their

ability to provide the nutrients and services that allow the recovery of the plant communities soils can support.

Nitrogen and carbon cycles can be disrupted. It has been seen observed that the presence of biological crusts in semi-arid and arid soils make them more resilient, although the increase in temperature can induce their reduction.



Terrestrial ecosystems

The functioning of terrestrial ecosystems and their components will be affected in various ways.

Phenological changes have already been observed in forest species, such as advanced leaf unfolding and delayed leaf senescence the increase or displacement of the leaf permanence period in deciduous species, and changes in the flowering and fruiting periods of many species. These alterations can lead to behavioural changes in migratory species, many migratory birds are already early in their arrival to the Peninsula, or in local species, certain insects are anticipating the emergence of adults.

Some forest species are being negatively affected, with an increase in defoliation and increased mortality rates. In many cases tThese phenomena in many cases are also conditioned affected by the management of these ecosystems, which can increase or decrease their vulnerability.



Auhtor: M.J. Sanz. Red band fugi in pine tree forest. Guipúzcoa

Changes in the distribution of some species have been observed, such as the altitudinal ascent of the beech in Montseny or the mountain broom and juniper in the Sierra de Guadarrama.

Likewise, biotic interactions have been altered, such as the distribution and intensity of pests and diseases in coniferous species (the pine processionary, hemiparasitic plants, or fungal infections). Some of these increases in mortality in pine forests have been related to increased droughts.

It is highly likely that the resilience of our forests could be reduced in the future if there are recurring droughts. Complex decay phenomena have already been identified, in which climate change may be playing a role alongside other factors (for example, the abandonment of management or the entry of exotic pathogens). Such is the case of the observed decay in the oak forests in the peninsula.



Author: M.J. Sanz. Oak forest affected by drought. Castellón

Mountain ecosystems and populations located in the southern limits of their distribution and lower elevational levels can present a high vulnerability, as well as species of reptiles and amphibians. In other words, for species living in “island” ecosystems, where they cannot migrate, or living on the margins of their distribution areas, small climatic changes can generate large impacts on the health and survival capacity of these species.



Agriculture and livestock

The main impacts of climate change on agriculture and livestock are phenological changes associated with seasonal displacement, increased water stress, damage from heat and extreme events. The agriculture and livestock sectors also suffer indirect impacts derived from the effects of climate change on other sectors (soils, water resources, etc.).



Author: M.J. Sanz. Vynegards. La Rioja

Thus, a decrease in the production of both herbaceous and woody crops is expected, although greater in rainfed crops. The effect of the possible limitation of water resources for irrigated crops will depend on the

requirements of each type of crop and the availability of these resources in each region. There is already proven evidence of phenological changes in some stone fruit species and in citrus in Spain due to the advance of spring temperatures and the lack of cold days. Likewise, the winegrowers have verified an advance in the grape ripening date. These changes have effects on the quality of the crop production or on the competitiveness of early season growing cultivars.

The distribution of pathogens and zoonotic diseases it is expected that it will be affected, as habitats for species from other latitudes are expanding. Changes in auxiliary fauna and pollinators can also be relevant, including impacts on the beekeeping sector.



Author: M.J. Sanz. Local race of sheep.

The increase in more scrubs encroachment and matorral in recent decades in supra-forestry mountain pastures, due to the decrease in the livestock load, increases the vulnerability of these systems to fires, which are expected to be more recurrent due to the effects of climate change. In intensive livestock farming, the most important impacts are expected to be indirect. The extensive and mixed livestock will be directly affected by the limitation of access to water and exposure to heat stress, especially in pastures where there is not enough trees to give shade.

All these changes will aggravate the vulnerability of Spanish agriculture and livestock and require adaptation measures. For this reason, it is necessary to study the impacts at a regional level, by type of crop and livestock species, as well as by exploitation system, in addition to the inclusion of indicators or evidence of change.



Marine environment

In the marine environment, the impacts on biodiversity and ecosystems, as well as on fisheries and aquaculture, are becoming better known and are

mainly due to increased temperature, acidification, and loss of oxygen. Thus, changes are observed mainly in the distribution and abundance of species of marine flora and fauna, phenological changes, establishment of invasive species and a decrease in the fishing and aquaculture potential. These changes at the species level influence the composition and interactions within biological communities, and the structure, dynamics and functioning of ecosystems, with implications for marine ecosystem services, fisheries, and aquaculture.

These impacts have been documented for the Mediterranean, Canary Islands and Atlantic regions of the peninsula, with increasing evidence of species that change their ranges of distribution, abundance, presence, and migration. Thus, marine ecosystems and human communities that depend on them will be more vulnerable to climate change when they are also exposed to other pressures and impacts, such as pollution, urban pressures or overfishing.



Author: M.J. Sanz. Fishing boats. Galicia

The cumulative magnitude of these pressures, along with climate change, is increasing the risk of marine species extinction at unprecedented rates.



Coasts

Climate change represents a major threat to the coasts of Spain, although it is one of the best-studied sectors and has its own adaptation strategy. Among the most important factors of change are the rise in sea level, extreme events, such as meteorological tides, changes in the waves and changes in water temperature, but also various anthropogenic factors, such as the occupation of the coast, which increase exposure to climatic risks.



Author: M.J. Sanz. Cantabrian Coast Beaches, San Sebastian

Climate change is already aggravating many of these processes and will continue to do so in the future. Therefore, and in the absence of adaptation policies, coastal flooding and erosion are expected to increase, affecting both natural and human systems, as well as the associated material, ecological and economic damage.



Urban environment

The challenges of cities in the face of climate change are many and diverse. Urban town centres concentrate population and critical infrastructure, as well as knowledge and social and cultural assets. In addition to being vulnerable to climate change for these reasons, cities are also highly exposed and prone to impacts due to their intrinsic characteristics, or their location in the territory.

In urban plans for adaptation to climate change in Spain, 7 risk axes are identified: sea level rise, extreme waves, intense precipitation, decrease in rainfall, increase in temperatures, heat waves and gales. As well as various affected sectors (urbanization, ecosystems, health, economic sectors, etc.).

Currently, the level of development and detail in risk and vulnerability assessments in cities is low.

We must continue to work to generate qualitative and quantitative knowledge about the impacts of climate change in urban areas, both in terms of its magnitude and its temporality and probability of occurrence. Special attention should be paid to the most vulnerable groups and to the areas within the city that are either most exposed or least prepared.

It is important to bear in mind that climate change will exacerbate many of the current problems in cities, since certain social groups will be especially affected due to their reduced capacity to prepare, respond and recover from impacts. This information is essential when planning efficiently and effectively investments in adaptation, taking into account the most likely

climate risks, but without forgetting the uncertainty, particularly those events that are less likely but that may generate more damage.



Author: M.J. Sanz. Barcelona

Finally, impacts are generally recognized as negative consequences for urban management, ecosystems, and resources, planning and infrastructure, economic activities, or the population. However, in many cases impacts with positive effects are also identified. This duality, therefore, must be considered when evaluating the costs and benefits of urban adaptation.



Human health

Climate change in Spain represents a threat to human health, with direct and indirect impacts. Among the former, the risks associated with excessive temperatures and floods are especially relevant, which are associated with morbidity and mortality from cardiovascular and respiratory causes, heat stress, aggravation of chronic diseases and injuries.

Climate change also affects human health indirectly through concurrence with environmental pollution (air, pollen or ultraviolet radiation, etc.).

Impacts on ecosystems cause changes in the geographical and temporal distribution of pathogens and their vectors; changes facilitated by globalization and increased transport of people and goods. In Spain, emerging risks include diseases transmitted by ticks, diseases transmitted by mosquitoes in humid regions (the Asian tiger mosquito stands out, which transmits dengue, chikungunya and zika). Food- and water-borne pathogens are sensitive to climate change, for example by temperature-mediated bacterial growth or by contamination of water by floods. The risk of waterborne diseases or foods include transmission of *Cryptosporidium*, *Vibrio*, *Salmonella* and *Campylobacter*. Furthermore, hepatotoxic cyanobacteria in recreational and surface waters may constitute an additional risk for public health for future scenarios in Spain.

Other indirect impacts are manifested through the effects of climate change on social aspects, such as food security, ability to work, the impact on the health system and the displacement of the population. It must be considered that all these impacts can lead to associated mental health problems.

Factors that aggravate vulnerability to the impact of climate change on health include the presence of prior illnesses, social exclusion and disconnection, poverty, unhealthy lifestyles, and other socio-economic and demographic factors.



Author: M.J. Sanz. Zaragoza.

Urban areas are particularly sensitive due to population density and high density of vulnerable groups. There are emerging vulnerability factors, such as resistance to antibiotics, new water pollutants and their possible interactions with climate change and the increasing incidence of diseases caused by sedentary lifestyles.

All these health risks interact with each other, reducing the overall resilience of the population to climate change, and are expected to impact future public health.



Energy

Hydropower energy is the energy source that may be most affected by climate change due to reduced water availability. Likewise, extreme weather events can affect energy infrastructures, especially those located in coastal areas, and generate additional risks to the system. There are also other risks related to the future modification of wind and solar potential, although existing projections are highly uncertain. Although the most significant impact of climate change in our country would come from the side water/energy nexus, there are also other risks related to the nexus between energy and land use, which may be more

relevant as biomass use increases as an energy source in the future, whose potential may be affected by climate change.



Author: M.J. Sanz. Wind power.

Finally, the future energy mix, with a greater presence of renewable energies, increases the resilience of the system, by reducing the levels of energy dependence, is an adaptation measure, since the negative effects related to intensive water consumption are reduced by thermal power plants. However, facilities that use renewable sources also generate other indirect impacts, that will compete with other land uses.



Infraestructuras y transporte

In relation to the infrastructure and transport network, negative impacts are expected in the main terrestrial transport networks (road and rail network), especially due to extreme weather events like heavy rainfall; although positive impacts can also be experienced if snowfall and frost decrease.

It has been estimated that the magnitude of change in the vulnerability of the state roads network in 30 years' time because of climate change is, on average, lower than today's vulnerability in much of its sections.

The port and airport networks can also be negatively affected, especially by extreme events on the coasts in the former, and by changes in the wind regime in the latter, although positive impacts may also appear in this case.



Tourism

The tourism sector can be affected by climate change due to both supply and demand impacts. Rising temperatures in the coastal provinces of the Mediterranean, especially in the south, may decrease the willingness of tourists to visit these destinations. This could however also cause the high season of Spanish sun and beach destinations to shift away from

the traditional months of July and August. The incidence of extreme events on the coasts can also have a negative impact on beach tourism and water sports. Tourism related to winter sports is the one that is already being affected the most, especially in the case of ski resorts at lower levels due to the lack of snow, a situation that is expected to worsen even with more moderate climateic scenarios.



Author: M.J. Sanz. Mediterranean coast

Risks

It should be noted that, at present, there is more knowledge than two decades ago about the impacts and adaptation measures that would be necessary in many of the sectors considered. In general, all the sectors addressed have impacts that will be negative (positive effects could occasionally occur), which leads us to conclude that the need for adaptation measures must be considered in all of them.

A set of 73 risks has been identified from the existing information on the impacts of climate change in the different available studies. The list of identified risks should be considered preliminary and as a first step that can help to design new studies and make some decisions about priorities in some sectors. This can serve as a basis for developing a dialogue with the participation of stakeholders in different areas, which could lead to a review and its improvement, to allow additions consistent with sectoral interrelationships.

Taking into account the limitations described, and based on the information collected on the impacts of climate change so far, an assessment has been made in using an “emergency” criteria (more urgent, less urgent). Understanding urgency and the need for addressing each risk at the present time (need for further action or investigation related to the search for new measures).

Urgent

- Research priority
- More short term action is necessary

Less urgent

- To continue risk monitoring
- To continue on going measures

It would be advisable and strongly recommended to conduct more comprehensive and regular studies on impacts already occurring (observed) and expected impacts based on the most recent climate scenarios, taking

into account interrelationships that may exist between them and the interaction with mitigation measures that are being considered. However, it is still necessary to deepen the understanding of the underlying climatic, biophysical, economic, and social processes that condition vulnerability and adequate responses to climate change

URGENT					LESS URGENT																
1	Risk of reduction in river flows or changes in their seasonal patterns.				7	Risk of subsidence in the land that affects buildings and infrastructures due to the lower recharge of aquifers.															
2	Risk of change in distribution and biodiversity of aquatic communities in freshwater bodies.				8	Risk of greater clogging of reservoirs.															
3	Risk of reducing the availability of water resources for domestic use and in the service sector.				9	Risk of impacts on freshwater fish farms.															
4	Risk of reduction in the availability of water resources for agricultural and industrial uses.				13	Risk of decreased productivity and increased mortality of tree species in forests due to changes in climatic variables (precipitation and temperature) and the increase in the incidence of pests and diseases.															
5	Increased risk of river and storm floods.				14	Risk of reduction or fragmentation of the habitats of some plant species, altitudinal and longitudinal (forests, mountain ecosystems, etc.).															
6	Increased risk of eutrophication and / or deterioration of the quality of the water.				15	Risk of decrease in biodiversity, including disappearance of endemic species, changes in bird migrations.															
10	Risk of increasing the area of arid and semi-arid areas due to desertification.				16	Risk of entry and expansion of exotic and invasive species in terrestrial and freshwater ecosystems.															
11	Risk of degradation and loss of soil due to increased erosion, decrease in organic matter and changes / impoverishment of biodiversity in edaphic communities.				19	Risk of loss of optimal areas for agricultural crop production due to changes in precipitation and temperature.															
12	Risk of increase in forest fires due to natural and unnatural causes due to the increase / accumulation of fuel and more favorable conditions for ignition.				21	Risk of loss of quality of agricultural products (for example, loss of quality of wine due to temperature increase).															
17	Risks derived from changes in the phenology of plant species (appearance of leaves and fruiting) and that can cause decoupling between the biological cycles of interdependent species, including animal species.				22	Risk of loss of competitiveness in the market for early season products due to a rise in winter temperatures elsewhere.															
18	Risk of increasing the effects on the growing cycles and modification / reduction in production as a consequence of the variation in the seasonality of the horticultural activity.				23	Risk of losses in livestock production, animal welfare and even mortality due to temperature rise, heat waves and decreased rainfall.															
20	Risk of decreased yield of herbaceous species, especially irrigation, due to irrigation limitations.				24	Risk of overexploitation of pastures due to a decrease in grass production associated with the rise in summer temperatures and decrease in rainfall.															
28	Risk of loss of farms due to production losses and increase in the price of inputs.				25	Risk of increased bee mortality due to increased extreme events that can lead to a decline in pollination services (see resulting in losses in agricultural production).															
29	Risk to the ecological balance of marine habitats and communities due to the increase in the average temperature of the water in all its layers and the effect of acidification and oxygen loss, which will continue to cause biogeographic movements of species, new interactions between species and losses of habitats, in the three Spanish marine demarcations: Atlantic, Mediterranean and Canary Islands.				26	Risk of increased pests, pathogens and changes in vector distribution, including zoonoses.															
33	Risks to the stability of marine ecosystems and species important for fishing due to increased heat waves in all demarcations, and with the highest risk in the Mediterranean where massive mortalities of organisms have occurred (zooplankton, sponges, mollusks).				27	Risk of abandonment of grazed systems due to failures in viability derived from price rises of other crops.															
37	Risk for industrial fishing due to the movement of stocks of target species to waters in which there are no established access agreements or quotas, and due to non-adaptive management.				30	Risk to the capacity to provide ecosystem services of the oceans, altering important marine resources for provision, regulation and cultural services due to changes in distribution, abundance and phenology of marine species in the three demarcations.															
41	Risk in housing, infrastructure and services in urban areas, especially associated with rising sea levels and extreme coastal events, although the risk of saline intrusion in rivers and aquifers or rising water tables must also be considered. These risks can also affect elements of the historical and cultural heritage located on the coast.				31	Risk of decreased marine productivity, potential maximum catches and fishing due to stratification of surface waters and biophysical changes in the oceans.															
42	The industrial, energy and transport infrastructures located on the coast will have to face the same risks as urban settlements (coastal flooding due to sea level rise and extreme weather events, erosion, saline intrusion).				32	Risks in the functioning of marine ecosystems, in fishing activity and in aquaculture due to an increase in the frequency and intensity of extreme events at sea (waves, storm, sea level intrusion), affecting the artisanal, industrial fleet and aquaculture facilities.															
43	Risks of flooding and damage from landslides and erosion in buildings and urban infrastructure networks (mainly sanitation, drainage and transport) and other construction elements.				34	Risk of new and / or invasive species that can be integrated into the national fishing activity, consumption and markets, creating new opportunities, but causing possible ecological impact.															
44	Risk of shortages in services, especially water and energy.				35	Risk to aquaculture due to increased episodes of toxic phytoplankton, changes in growth and phenology due to increased temperature, increased intensity and frequency of extreme events and acidification.															
45	Risk of deterioration and increased maintenance costs of green infrastructure in urban areas, including forest fires.				36	Risk of loss of historical, cultural and identity value associated with artisanal fishing and shellfish, which are being affected by climate change.															
47	Risk of loss and deterioration of comfort and habitability in homes and / or adoption of poor adaptation solutions.				38	Risk of loss of coastal ecosystems, beaches, dunes and wetlands due to rising seas, with the consequent retreat of the coastline and erosion. Regarding submerged systems, such as posidonia meadows, the main risk comes from the increase in temperature.															
49	Risk of thermal stress and reduction of thermal comfort in public space.				39	Risk of loss of market share in the tourism sector in coastal areas due to exposure to extreme phenomena and a decrease in thermal comfort, including also those that have to do with environmental degradation, such as erosion and receding beaches.															
50	Riesgo de estrés térmico y reducción del confort térmico en el espacio público.				40	Risks to aquaculture in coastal areas due to flooding and saline intrusion.															
52	Risk of loss of insurance premiums, changes in hiring and effects on urban services.				46	Risk of loss of landscape, recreational and educational functionality of green areas in the urban fabric.															
53	Health risk related to heat stress (increased mortality and morbidity), especially in aging citizens, children, or with pre-existing diseases.				48	Risk of loss of cultural and identity values and changes in social relationships.															
55	Personal injury from overflows and floods, wind storms and other extreme events.				51	Risk of loss or alterations in urban economic activity, due to interruptions in transport and changes in demand.															
56	Increased risk of mosquito-borne zoonotic / vector diseases (eg dengue, yellow fever, Nile fever, and Zika fever).				54	Risk of lack of supply and insufficient quality of water for domestic consumption and in the agricultural, industrial and service sectors.															
59	Risk of increased diseases associated with worsening air quality.				57	Increased risk of food- and water-borne infectious diseases.															
61	Risk of reduction in hydroelectric energy production due to changes in precipitation and temperature.				58	Risk of increasing the duration and severity of allergic diseases associated with pollen such as asthma, rhinitis, allergic conjunctivitis or some dermatitis.															
64	Risk of damage to energy infrastructure due to coastal flooding.				60	Risk of increasing or worsening mental health problems.															
66	Risk of decreased port operations due to the increased frequency of overflows, breakdowns and breakages of docks, rise in the water table of the docks as a result of increased exposure and due to the rise in sea level.				62	Risk of reduction in hydraulic available for plants that use water as a coolant.															
67	Risk of damage and erosion on slopes, road surfaces and bridges due to the increased frequency of extreme events.				63	Increase in energy consumption or modification of demand dynamics (peaks and averages).															
73	Risk of reduction and even disappearance of snow tourism.				65	Risk of damage to electricity supply networks due to extreme weather events.															
Sectors					68	Risk of damage to the railway infrastructure (overvoltage of the catenaries due to electrical storms, on the tracks due to a rise in temperature, saturation of drainage systems, erosion of slopes and landslides).															
<table><tr><td>Water Res</td><td>Marine Env</td><td>Health</td><td>Tourism</td></tr><tr><td>Terrestrial Eco</td><td>Coasts</td><td>Energy</td><td></td></tr><tr><td>Agric & Livest</td><td>Urban Env</td><td>Transport</td><td></td></tr></table>					Water Res	Marine Env	Health	Tourism	Terrestrial Eco	Coasts	Energy		Agric & Livest	Urban Env	Transport		69	Risk of interruption of rail traffic due to falling objects on the tracks and impact on acoustic screens due to increased gusts of wind, particularly for high-speed lines.			
Water Res	Marine Env	Health	Tourism																		
Terrestrial Eco	Coasts	Energy																			
Agric & Livest	Urban Env	Transport																			
					70	Risk of decreased airport operations due to increased fog and wind, fires in refueling operations, difficulty in taking off heavy aircraft and saturation of drainage systems due to the increase in extreme events.															
					71	Risk of reduction of the average stay in high season in sun and beach tourism areas, due to heat waves and extreme events.															
					72	Risk of decrease in tourism due to the disappearance or degradation of tourist resources (beaches, natural landscapes, etc.).															

Figure. Risk categories (most urgent, least urgent) assigned to the risks

Figure. Risk categories (most urgent, least urgent) assigned to the risks identified in table 11.1. of the full report.

Introducción

Desde que en el año 2005 la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) publicó el Informe “Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático”⁷, resultado del esfuerzo de un numeroso grupo de expertos para intentar valorar cuáles podían ser los cambios que ocurrirían a lo largo de este siglo XXI en el clima de España y sus impactos, el volumen de la literatura científica disponible sobre la evaluación de impactos del cambio climático, adaptación y vulnerabilidad ha crecido significativamente. Este aumento ha venido acompañado de una mayor diversidad temática. Los resultados de ese Informe proporcionaron las bases para el desarrollo del primer Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC-1) como marco de referencia para el impulso y la coordinación entre las Administraciones Públicas en las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en España.

El PNACC-1, elaborado por la OECC, fue adoptado por el Consejo de Ministros en el año 2006 después de un amplio proceso de consulta pública y participación con los principales órganos de coordinación a nivel nacional: la Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático, el Consejo Nacional del Clima, el Grupo Interministerial de Cambio Climático y la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente. En el mes de septiembre de 2020 el Consejo de Ministros ha aprobado el segundo PNACC (PNACC-2)⁸, para el periodo 2021-2030, también acompañado de un intenso proceso participativo a través de talleres previos a su elaboración, un amplio proceso formal de consultas públicas y un debate intenso en los órganos colegiados de coordinación y participación.

El PNACC-2 forma parte del Marco Estratégico de Energía y Clima de España⁹, que aglutina un conjunto de instrumentos, entre los que destacan el proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética, la Estrategia a Largo Plazo para una Economía Moderna, Competitiva y Climáticamente neutra en 2050, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 y la Estrategia de Transición Justa. Estos documentos incluyen también referencias a la adaptación al cambio climático y poseen evidentes conexiones con el nuevo PNACC.

El PNACC-2 tiene por objetivo dar respuesta a las crecientes necesidades de adaptación al cambio climático en España, así como a nuestros compromisos internacionales en este campo (Agenda 2030, el Acuerdo de París y la normativa europea), sentando las bases para promover un desarrollo más resiliente al cambio climático a lo largo de la próxima década. Así, pretende dar un impulso a la adaptación, ampliando las temáticas abordadas hasta la fecha, los actores implicados y la ambición de sus objetivos, siempre desde la convicción de que impulsar la adaptación no supone renunciar a mitigar el cambio climático. La elaboración del PNACC-2 tuvo como punto de partida la evaluación¹⁰ en profundidad del trabajo realizado desde 2006 con el primer Plan. Esta

⁷ Como resultado del proyecto ECCE (Efectos del Cambio Climático en España). El proyecto se desarrolló durante los años 2003 y 2004, y su informe final se publicó en 2005 (Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático, 840 pp, MIMAM 2005)

⁸ https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pnacc-2021-2030_tcm30-512163.pdf

⁹ <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/participacion-publica/marco-estrategico-energia-y-clima.aspx>

¹⁰ https://www.miteco.gob.es/images/es/informeevaluacion_pnacc_tcm30-499212.pdf

evaluación contó con el apoyo del proyecto LIFE SHARA¹¹ "Sensibilización y Conocimiento para la Adaptación al Cambio Climático", cuyo objetivo general es mejorar la gobernanza de la adaptación al cambio climático y aumentar la resiliencia en España y Portugal.

El presente Informe complementa esta evaluación y tiene como principal objetivo llevar a cabo un análisis y síntesis de los principales impactos del cambio climático por sectores y sistemas en España, a partir de la información generada hasta la fecha. Además, presenta una relación de los principales riesgos derivados de estos impactos y una propuesta de valoración sobre el grado de urgencia con el que deberían ser abordados.

El informe analiza documentación publicada sobre impactos y riesgos climáticos en un total de 10 ámbitos de trabajo o sectores y sistemas naturales, considerados prioritarios tanto en el PNACC-1 como en el PNACC-2 (recursos hídricos, ecosistemas terrestres, agricultura y ganadería, medio marino, costas, áreas urbanas, salud, energía, transporte y turismo), sintetizando la información para cada ámbito de trabajo, así como la interrelación de los riesgos entre diferentes ámbitos, de manera que pueda servir para informar a las personas y organizaciones interesadas en conocer los riesgos derivados del cambio climático en España. La mayoría de la documentación analizada en el Informe está recogida en la Plataforma **AdapteCCa**¹² de intercambio de información sobre impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, lanzada para facilitar la coordinación y la transferencia de información, conocimiento y experiencias en esta materia entre las distintas administraciones españolas, así como entre la comunidad científica, los planificadores y los gestores públicos, privados y otros agentes. En algunos casos, los autores han complementado la documentación recogida en AdapteCCa con otros artículos científicos.

Este Informe puede servir además para orientar el trabajo de las futuras publicaciones de informes sobre la evolución de los impactos y riesgos derivados del cambio climático, contemplados en el proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética, que se elaborarían con una periodicidad al menos quinquenal. Esta información, junto con la relacionada con las políticas y medidas destinadas a aumentar la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad frente al cambio climático en España, será clave para cumplir con los objetivos de información asumidos en la normativa internacional y europea.



Autora: M.J. Sanz

¹¹ <https://www.lifeshara.es>, proyecto coordinado por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, a través de la Fundación Biodiversidad, y está dirigido técnicamente por la OECC. Además, cuenta como socios con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), el Organismo Autónomo de Parques Nacionales, a través del Centro Nacional de Educación Ambiental (CENEAM), y la Agencia portuguesa de Medio Ambiente

¹² <https://www.adaptecca.es/>

Capítulo 1

Escenarios de cambio climático en España

1. ESCENARIOS

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC-1), a través de la iniciativa Escenarios-PNACC, recopila la información climática regional para España, tanto del clima actual como de distintos escenarios futuros de cambio climático, y la pone a disposición de la comunidad que trabaja en la evaluación de impactos y riesgos debidos al cambio climático, así como en la identificación de opciones y medidas de adaptación.

El primer conjunto de datos, Escenarios-PNACC 2012 (Fernández et al., 2012; Gutiérrez et al., 2012), se basó en las proyecciones globales del clima usadas en el Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, conocido por sus siglas en inglés como IPCC, publicado en 2007, fundamentadas en diferentes escenarios de emisiones en el contexto de la inter-comparación de Modelos Globales del Clima¹³.

Los escenarios más recientes generados en el marco del PNACC (Escenarios-PNACC 2017) se basan en las proyecciones globales del clima utilizadas en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC¹⁴. Se han usado dos procedimientos de regionalización estadística (análogos y regresión) y los escenarios de tres Sendas Representativas de Concentración (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5), que se corresponden respectivamente con forzamientos radiativos de 4,5, 6 y 8,5 W/m². Las variables estudiadas son las temperaturas (máxima y mínima) y la precipitación diaria (tabla 1.1.). También se han considerado proyecciones regionalizadas dinámicamente, procedentes del proyecto CORDEX, que incorporan a las variables ya mencionadas la nubosidad, evapotranspiración real, escorrentía, velocidad media y velocidad máxima del viento a 10 m de altitud, considerando, en este caso, solo dos escenarios (RCP4.5 y RCP8.5). El periodo de referencia utilizado en este estudio ha sido 1961-1990, con proyecciones para dos periodos futuros (2046-2065, 2081-2100).

En concreto, EURO-CORDEX¹⁵ proporciona en la actualidad proyecciones con distintos Modelos Climáticos Regionales (RCMs, por sus siglas en inglés), anidados a distintos modelos climáticos globales del CMIP5 (figura 1.1), para el escenario histórico y los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5. Las proyecciones estadísticas siguen siendo puntuales para la misma red de localidades de los escenarios generados anteriormente en el marco del PNACC (Escenarios-PNACC 2012). En las proyecciones CORDEX se ha considerado el dominio europeo con las proyecciones climáticas correspondientes a EUR-11 para España peninsular y las Islas

¹³ Modelos Globales del Clima, GCMs, según sus siglas en inglés. Estas proyecciones globales sirvieron de base para distintos estudios de regionalización aplicando modelos climáticos regionales (ENSEMBLES, a escala europea y ESCENA, a escala nacional, ambos con una resolución de ~20km) y técnicas estadísticas de regionalización (AEMET y ESTCENA, con información puntual para un subconjunto de estaciones/localidades de la red de AEMET). La información de estos proyectos se armonizó y se puso a disposición pública a través de AEMET (datos mensuales) y de los proyectos ESCENA y ESTCENA.

¹⁴ IPCC (2014). Fifth Assessment Report (2014): <http://www.ipcc.ch/report/ar5>. Las nuevas proyecciones globales se basan en una nueva generación de escenarios de emisiones o Sendas Representativas de Concentración (RCPs por sus siglas en inglés: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 Y RCP8.5).

¹⁵ En el ámbito europeo, las proyecciones regionales de cambio climático han sido producidas y actualizadas en el proyecto europeo EURO-CORDEX. Las nuevas proyecciones regionales de EURO-CORDEX alcanzan una resolución de ~10km, aunque se restringen principalmente a los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

Baleares. En él no están incluidas las islas Canarias, dado que el dominio CORDEX de la región de África (AFR-44) no se consideró en la regionalización dinámica de EURO-CORDEX.

Tabla 1.1. Número de proyecciones regionalizadas de temperatura (máxima y mínima) y precipitación obtenidas por métodos de regionalización estadística (análogos y regresión) y regionalización dinámica (CORDEX). Fuente: Escenarios-PNACC 2017.

Escenario	Temperatura				Precipitación			
	Análogos	Regresión	CORDEX	Total	Análogos	Regresión	CORDEX	Total
RCP8.5	14	19	10	43	17	19	10	46
RCP6.0	6	7		13	7	7		14
RCP4.5	13	15	10	38	18	15	10	43
Total	33	41	20	94	42	41	20	103

A partir del conjunto de proyecciones generadas usando las técnicas de regionalización indicadas se ha analizado la evolución futura de los valores medios de las variables y de una selección de sus índices extremos, así como sus incertidumbres. Esta información se presenta en dos tipos de gráficos: mapas de proyecciones y gráficos de evolución temporal. La información sobre las proyecciones se puede obtener a través de AEMET¹⁶ y del visor de escenarios de cambio climático de AdapteCCa¹⁷, que permite visualizar la información de las variables originales (para temperaturas, precipitación, viento y humedad), así como de distintos índices climáticos definidos a partir de ellas, y descargar los mapas y los datos (proporcionados a escala anual y diaria). Los datos disponibles se nutren principalmente de dos fuentes: las proyecciones puntuales de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y las proyecciones en rejilla procedentes de la iniciativa internacional EURO-CORDEX. Este visor ha sido desarrollado en el marco del PNACC y mejorado en sus funcionalidades a través del proyecto LIFE SH

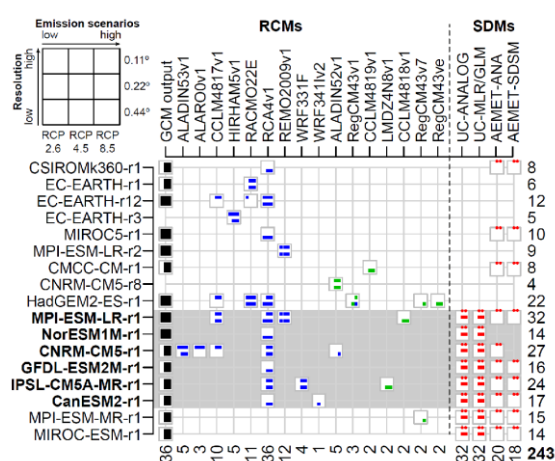


Figura 1.1. Matriz GCM-RCM para la regionalización dinámica (azul -EURO-CORDEX, verde- MED-CORDEX) y estadística (rojo). Conjunto de proyecciones regionales de datos CMIP5 disponible a partir del 30 de abril de 2017. Los números muestran el número de miembros del conjunto (frecuencias marginales) para un GCM dado (filas) o RCM / SDM (columnas). Las proyecciones disponibles comprenden simulaciones en tres resoluciones (0,11°, 0,22° y 0,44°) y para tres escenarios RCP (RCP 2.6, 4.5 y 8.5). Los periodos temporales considerados son cercanos (2011-2040), medio (2041-2070) y lejanos (2071-2100), considerando como periodo de referencia 1971-2000. Fuente: Fernandez et al., 2017. ARA.

¹⁶ http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat

¹⁷ <http://escenarios.adaptecca.es>

2. PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA ESPAÑA

2.1. Temperatura

Temperatura máxima

Todas las proyecciones de los Escenarios-PNACC 2017 muestran un aumento progresivo, a lo largo del siglo XXI, del valor medio anual y estacional de la temperatura máxima. Los tres escenarios (RCPs) considerados coinciden en ese sentido.

Para la España peninsular, considerando todas las proyecciones generadas para el periodo 2081-2100, las variaciones en la escala anual podrían estar comprendidas entre 4,2°C y 6,4 °C bajo el escenario más emisivo, RCP8.5, entre 3,0°C y 4,0 °C bajo el escenario RCP6.0 y entre 2,0°C y 3,4 °C bajo el escenario RCP4.5. Los cambios esperados en verano son superiores al resto de las estaciones, con promedios superiores a los 5°C.

A finales de siglo, se observa que los aumentos de la temperatura máxima pueden ser mayores en el interior y menores en el norte y noroeste peninsular. En consonancia, se tendrían incrementos mayores en las grandes cuencas y menores en las cuencas de Galicia costa y del Cantábrico occidental.

Tanto en la España peninsular como en Baleares y Canarias se observa un aumento en la evolución del número de días cálidos a lo largo del siglo XXI para los tres escenarios analizados. Para finales del siglo, en la España peninsular se espera que la proporción de días cálidos se incremente casi un 50% (entre el 34% y el 58%) para el escenario más emisivo (RCP8.5), mientras que para el escenario de estabilización RCP4.5 este aumento se espera en torno al 24% (entre el 14% y el 31%), observándose un aumento de la incertidumbre de las estimaciones a lo largo del siglo. El incremento del número de días cálidos se manifiesta en todas las comunidades, aunque el ritmo de crecimiento difiere entre ellas.

Respecto a la duración de las olas de calor, todas las proyecciones y técnicas de regionalización concuerdan en que las olas de calor serán más largas, siendo el incremento más acusado en el escenario más emisivo (RCP8.5) y a finales del siglo XXI. La mayor dispersión en la magnitud de su variación entre proyecciones, inducida en parte por las técnicas de regionalización, da lugar a un aumento del rango de valores probables para finales de siglo, donde, 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 a nivel de España peninsular. La magnitud del cambio 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.

Temperatura mínima

Según las proyecciones de los Escenarios-PNACC para el siglo XXI (Amblar et al., 2017), al igual que sucedía con la temperatura máxima, en la escala anual y para todos los métodos de regionalización, se presenta el mismo patrón de aumento de la media de las anomalías de las temperaturas mínimas que en el caso de las temperaturas máximas. Hasta aproximadamente la primera mitad del siglo, la elección del escenario tiene un impacto menor en los resultados de las proyecciones que en el caso de las temperaturas máximas.

Para la España peninsular, considerando todas las proyecciones generadas para el periodo 2081-2100, los aumentos anuales tenderían a estar comprendidos entre 3,7°C y 5,5°C bajo el escenario más emisivo (RCP8.5); entre 2,7°C y 3,1°C bajo el escenario RCP6.0; y entre 1,7°C y 2,9°C bajo el escenario RCP4.5. En los valores estacionales se aprecia un aumento progresivo de los valores de las temperaturas mínimas más rápido para las estaciones de verano y otoño, sobre todo para los escenarios más emisivos. Así, el incremento en valores medios de finales de siglo y bajo el escenario RCP8.5 estaría entre 4,8°C y 6,8°C en verano.

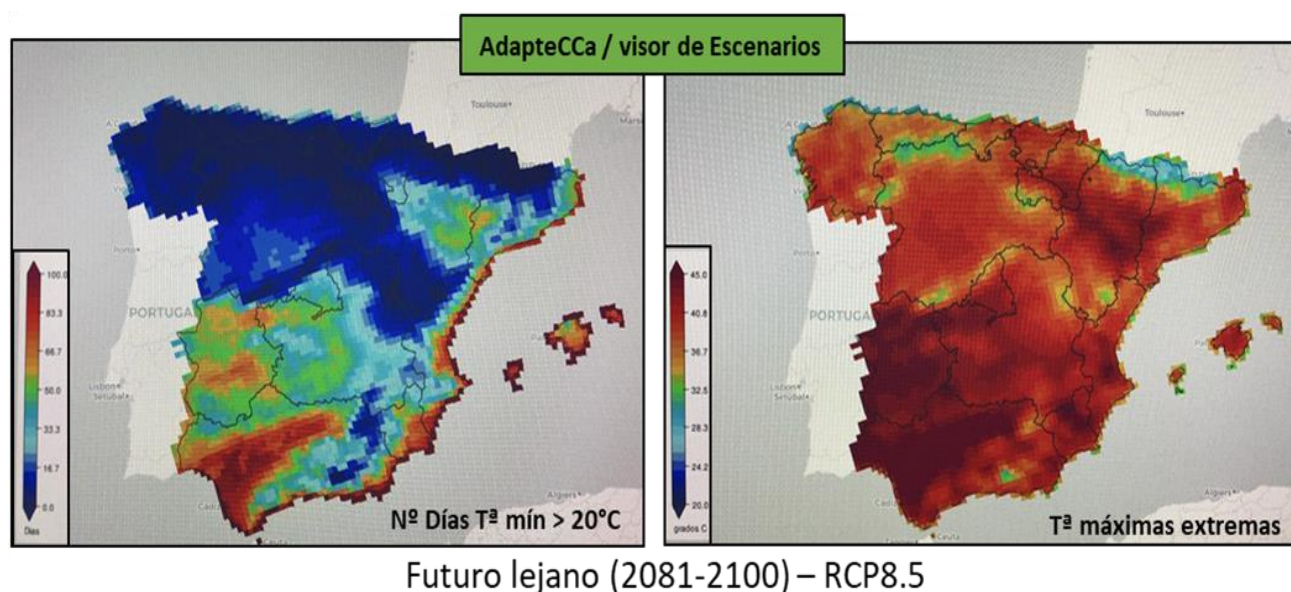


Figura 1.2. Proyecciones del número de días con T^a mínima mayor de 20°C y de la T^a máxima extrema. Fuente: Visor de Escenarios – AdapteCCa.

En la distribución espacial de los valores anuales y estacionales, al igual que para la temperatura máxima (figura 1.2), las proyecciones muestran temperaturas mayores en el interior y en el sur y este peninsular y menores en el norte; siendo más altas en el interior que en las costas.

El número de noches cálidas¹⁸ en la España peninsular muestra, en líneas generales, un aumento progresivo a lo largo del siglo XXI más rápido bajo el escenario RCP8.5, siendo el aumento más pronunciado para Canarias. Solo los dos archipiélagos, el balear y el canario, y la Región de Murcia y, por consiguiente, la cuenca del Segura, muestran valores mayores que el resto de la península ibérica. En el análisis estacional, para las técnicas estadísticas, se observan incrementos menores durante el invierno y la primavera que en el resto de las estaciones. En verano y otoño, las anomalías medias respecto al periodo de referencia y bajo el escenario RCP8.5 se encuentran entre 10 y 50 días.

Para la España peninsular, se observa una disminución del número anual de días de heladas, con una evolución muy similar entre los escenarios hasta 2050 y un descenso más pronunciado para el escenario más emisivo (en torno a 26 días en los métodos estadísticos y 40 días en la regionalización dinámica). 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.

Fernandez et al. (2017) proyectan cambios de la temperatura media anual en el periodo 2021-2050 en la España continental y las islas baleares (figura 1.3.) de hasta casi 3°C ., con incrementos mayores en verano y otoño, con respecto al periodo 1971-2000. Los GCM tienden a proporcionar estimaciones más cálidas, que coinciden con las proyecciones más extremas de los generados con Técnicas de Regionalización Estadística (SDM, por sus siglas en inglés). Estos, sin embargo, muestran intervalos de cambio más amplios y estimaciones de temperatura más bajas en su extremo inferior. Los RCMs proyectan, en general, estimaciones menos cálidas.

¹⁸ Se entiende por noche cálida aquella con una temperatura mínima superior al percentil 90 diario del periodo de referencia, calculado con una ventana de 5 días.

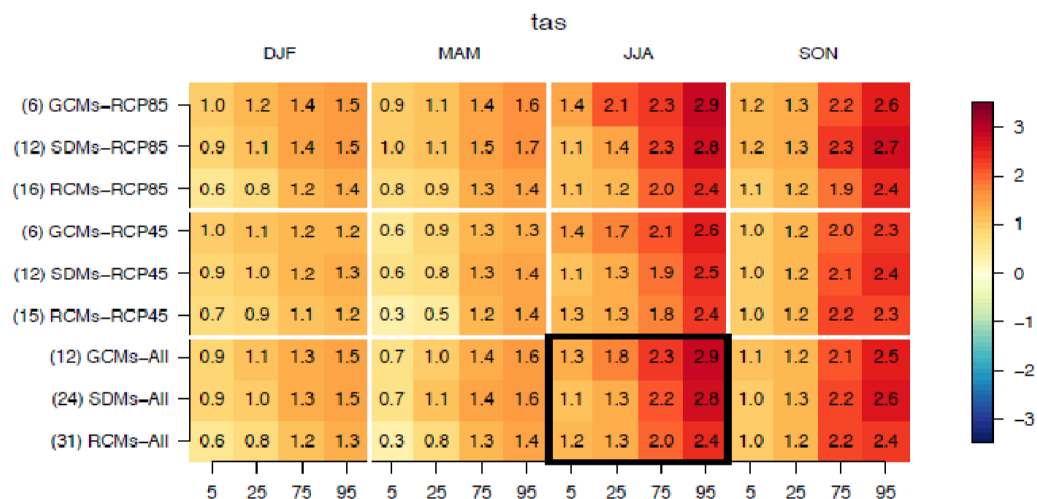


Figura 1.3. Cambios proyectados para la temperatura estacional (°C, arriba) para 2021-2050, con respecto al promedio del período 1971-2000, en promedio para España continental y las Islas Baleares para dos escenarios de forzamiento diferentes (RCP8.5, RCP4.5 y ambos “Todos”) considerando las proyecciones de GCM, SDM o RCM. Se dan para cada caso diferentes percentiles (5, 25, 75 y 95): el 25-75 es utilizado para caracterizar la distribución del conjunto; el 5 y el 95 caracterizan las señales extremas dentro del conjunto. Fuente: Fernandez et al., 2017.

2.2. Precipitación y variables relacionadas

Según las proyecciones de los Escenarios-PNACC para el siglo XXI (Amblar et al., 2017), en la España peninsular se aprecian ligeras disminuciones de las precipitaciones anuales a lo largo de la segunda mitad del siglo, aunque las proyecciones presentan una mayor incertidumbre. El mismo comportamiento se aprecia en la evolución esperada de las precipitaciones estacionales, aunque con incertidumbres mayores que las obtenidas para el caso anual.

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), de entre un 16% y un 4%. En primavera esta reducción estaría entre el 24% y el 0% mientras que en otoño entre -4% y 4%. Las reducciones relativas más importantes se esperan en invierno, en las cuencas hidrográficas en el sur y el Levante y en los dos archipiélagos. Por ejemplo, en las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, las reducciones proyectadas estarían entre -18% y -38% a finales de siglo y bajo el escenario más emisor (RCP8.5). En verano se aprecia que los descensos mayores se localizan en la parte sur peninsular y en el extremo noroeste de la península ibérica (con más concordancia entre modelos en Galicia) con disminuciones relativas que estarían entre el 6% y el 42% para el final de siglo en el escenario más emisor. En las precipitaciones otoñales del cuadrante nordeste peninsular y algunas zonas del interior se observan concordancias menores acerca del sentido en el que se produciría el cambio.

El número medio de días de precipitación anual muestra un comportamiento un tanto independiente de los escenarios, con una tendencia a la disminución (figura 1.4). Más del 80% de las proyecciones apuntan a un decrecimiento para la España peninsular en el periodo 2081-2100 y para el escenario RCP8.5, pudiendo haber, en promedio, hasta 14 días menos de lluvia al año que en el periodo de referencia, con los cambios mayores en Galicia. La longitud del periodo sin lluvias muestra ligeros incrementos en la España peninsular para el RCP8.5 y el último periodo del siglo XXI. Prácticamente todos los métodos y proyecciones dan valores superiores a los

del periodo de referencia, pudiéndose incrementar, en promedio, entre 1 y 11 días; con los aumentos mayores localizados en la mitad sur y en el este peninsular y en Canarias.

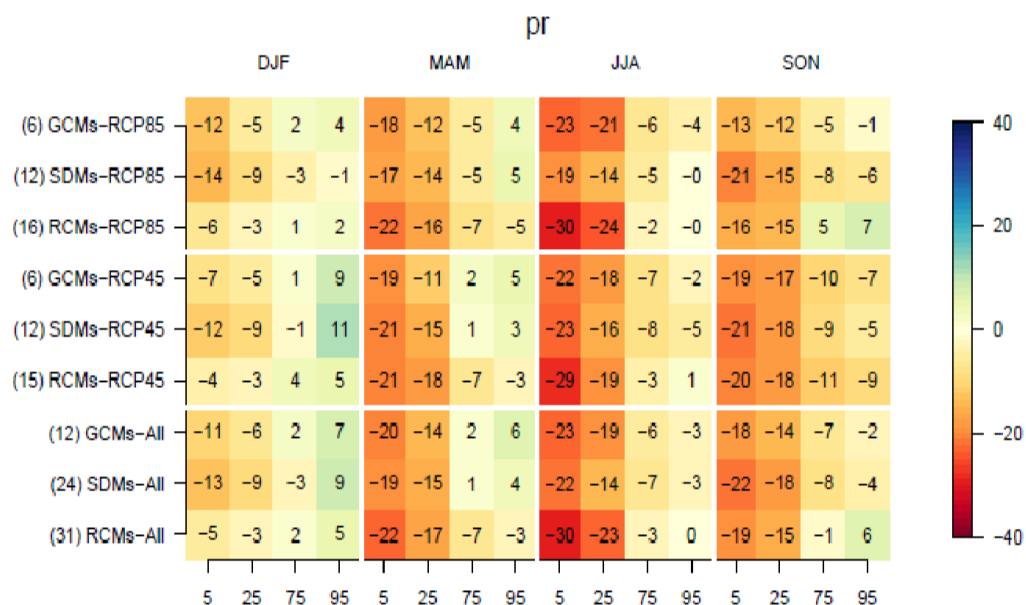


Figura 1.4. Cambios proyectados para la precipitación (% abajo) para 2021-2050, con respecto al promedio del período 1971-2000, en promedio para España continental y las Islas Baleares para dos escenarios de forzamiento diferentes (RCP8.5, RCP4.5 y ambos “Todos”) considerando las proyecciones de GCM, SDM o RCM. Diferentes percentiles (5, 25, 75 y 95) se dan para cada caso: 25-75 utilizado para caracterizar la distribución del conjunto; 5 y el 95 caracterizan las señales extremas dentro del conjunto. Fuente: Fernández et al., 2017.

Para la precipitación (figura 1.4) Fernández et al. (2017) proyectan una tendencia general a la disminución del promedio en todas las estaciones del año, con reducciones que pueden alcanzar el 30% (estimaciones RCM) en verano.

En el cambio en precipitaciones intensas se observan claras diferencias en los tres métodos de regionalización. Este diferente comportamiento conduce a conclusiones poco predecibles respecto a su evolución futura.

La nubosidad presenta, para toda España y en todas las estaciones un ligero descenso progresivo a lo largo del siglo XXI, aunque con muchas incertidumbres.

El patrón espacial de la evapotranspiración real, al igual que el de la escorrentía, viene condicionado en gran medida por el de la precipitación. La evapotranspiración real media de España peninsular presenta en todas las estaciones, salvo en la primavera, un ligero descenso progresivo a lo largo del siglo XXI para el escenario más emisivo (RCP8.5), con variaciones anuales del orden del 25% y estivales del 40% a finales del siglo XXI. Para verano, a escala anual, la disminución relativa de la evapotranspiración es menos clara cuanto más cerca del norte peninsular, con algo de aumento en zonas pequeñas de los grandes sistemas montañosos del extremo norte. Sin embargo, en invierno y otoño hay un aumento de la evapotranspiración real en la parte norte peninsular y una disminución en la parte sur, con predominio de la primera sobre la segunda en invierno. Los aumentos mayores se localizan en las áreas montañosas, especialmente del norte, extendiéndose más hacia los sistemas del sur en el invierno. En estas zonas montañosas es donde la incertidumbre es también mayor. La escorrentía presenta, en líneas generales, valores más bajos que en el periodo de referencia con disminuciones más acusadas bajo el escenario RCP8.5 y para verano. Al igual que en la precipitación y la evapotranspiración real, se alcanzan las disminuciones mayores a finales de siglo. Ambas variables muestran una variabilidad conjunta con oscilaciones decenales.

2.3. Viento

Las proyecciones regionalizadas de los Escenarios-PNACC para el siglo XXI (Amblar et al., 2017) de las velocidades medias del viento (a 10 m de altura) muestran una tendencia al aumento de la velocidad media del viento en verano y una disminución en otoño en gran parte de la península ibérica. Además, en verano se proyecta una disminución de la presión a nivel del mar sobre la cuenca mediterránea y el sur de Europa y un fortalecimiento de los vientos del este sobre la península ibérica, con un posible fortalecimiento del efecto del canal del Estrecho de Gibraltar. En general, no se esperan grandes cambios en la velocidad media del viento a lo largo del siglo, pudiéndose apreciar una ligera disminución para finales de siglo. Dado lo heterogéneo de los resultados de los modelos globales, puede ser más útil considerar el porcentaje de proyecciones que dan cambios negativos de esta variable para los dos últimos decenios del siglo con respecto al valor medio de la misma en el periodo de referencia. Basándose en ello, a escala de España peninsular, todas las proyecciones indican un cambio negativo para finales de siglo de la velocidad media del viento a escala anual y para la primavera y el otoño. Estas variaciones, en general, son pequeñas, con mayor dispersión en el invierno.

Herrera et al. (2018) confirman que los modelos regionales de EURO-CORDEX no muestran cambios significativos de consenso en el valor de retorno a 50 años de la velocidad diaria del viento. Y en líneas generales el cambio proyectado para todas las estaciones y períodos oscila en torno a 0 m/s, con valores positivos y negativos, indicando que no existiría consenso entre los modelos y, por tanto, un cambio que se pueda considerar significativo. En algunos casos (p. ej. el invierno para el periodo 2071-2100 o el otoño para los periodos 2011-2040 y 2041-2070) se proyecta un incremento de más de 10 m/s, aunque dicho incremento presenta una gran incertidumbre. En el noroeste peninsular, en verano, las proyecciones muestran un descenso (~10 km/s) con menor incertidumbre. 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 los dos primeros periodos, 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.

2.4. Fenómenos extremos

Herrera et al. (2018) identifican dos patrones con una mayor incidencia de los eventos extremos asociados a vientos extremos y de alto impacto para las aseguradoras, el patrón Anticiclónico Puro y el Ciclónico Direccional del Noroeste pudiendo considerarse a éstos como posibles patrones de riesgo. Respecto al número de ciclones, no se ha encontrado un cambio significativo en los patrones de frecuencia ni en la incidencia de ciclones o ciclogénesis explosivas en la península ibérica a lo largo del siglo XXI con la excepción del leve crecimiento proyectado para finales de siglo en el escenario RCP8.5.

Otros estudios estiman cambios futuros en fenómenos extremos como los ciclones tropicales (conocidos como "medicanes" cuando se ubican sobre el Mar Mediterráneo) estudiados con modelos globales (CMIP5) (Romero y Kerry, 2017) o ENSEMBLES RCMs. Estos autores proyectan para RCP8.5 un mayor número de medicanes moderados e intensos a expensas de las tormentas menos intensas, con vientos de entre 110 km/h y 170 km/h (Romero y Kerry, 2017).

3. REFERENCIAS

Amblar, P., Casado, M.J.; Pastor, A., Rodríguez, E., 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 Agencia Estatal de Meteorología Madrid, 2017. https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/guia_escenarios_ar5.pdf

Fernández, J., Casanueva, A., Montávez, J.P., Gaertner, M.A., Casado, M.J., Manzanar, R., Gutiérrez, J.M., 2017. Regional Climate Projections over Spain: Atmosphere. Future Climate Projections. CLIVAR Exchanges No. 73, 45-52.

- Fernández, J. et al., 2012. Escenarios-PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica. En "Cambio climático: Extremos e Impactos. Publicaciones de la AEC. Serie A, n8, 63-72. <http://www.meteo.unican.es/node/73108>
- Gutierrez, J.M. et al., (2012): Escenarios-PNACC 2012: Descripción y Análisis de los Resultados de Regionalización Estadística. En "Cambio climático: Extremos e Impactos". Publicaciones de la AEC. Serie A, n8, 125-134. <http://www.meteo.unican.es/node/73082>
- Herrera, S. et al., 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. Informe Final. Grupo de Meteorología de Santander. Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, MACC-UC. 31 pp.
- MAPAMA, 2017. Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. NIPO: 014-17-010-8. Madrid, 102 pp. https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/guia_escenarios_ar5.pdf
- Rodríguez, E., Gutierrez, J.M., 2018. Escenarios-PNACC 2017: Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). <http://escenarios.adaptecca.es/doc/pnacc.pdf>
- Romero, R., Emmanuel, K., 2017. Climate Change and Hurricane-Like Extratropical Cyclones: Projections for North Atlantic Polar Lows and Medicanes Based on CMIP5 Models. *Journal of Climate*, 30 (1), 279–299.

Capítulo 2

Impacto del cambio climático en los recursos hídricos

1. INTRODUCCIÓN

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos no solo dependen de los cambios en la magnitud de las aportaciones de la precipitación al ciclo hidrológico, sino que también vienen condicionados por el reparto temporal de la precipitación y los cambios en la temperatura, así como por el uso y cobertura del suelo. El cambio climático, debido al aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación que se anticipa en España (ver Capítulo 1), provocará con una elevada probabilidad una menor disponibilidad de recursos hídricos, lo cual podría coincidir con una respuesta hacia una mayor demanda del uso consuntivo¹⁹ dominante del agua en España, el regadío, debido a una mayor evapotranspiración. Se espera, por tanto, que los impactos en los recursos hídricos tengan efectos sobre la gestión de los recursos a lo largo de todo el ciclo hídrico, lo cual a su vez tendrá una respuesta en el ciclo hidrológico, ya que la demanda de los recursos en sí afecta al mismo sistema hídrico. Este aspecto solo se considera de forma parcial en este capítulo (p.e. enfoques innovadores que integran escenarios que hablan de cambio global y de cambio climático).

España tiene una distribución espacial y temporal de la precipitación muy heterogénea, mucho más acusada que en otros países, lo cual se une a una extraordinaria variabilidad en el tiempo de las aportaciones. Por lo general, la sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de temperatura y a la disminución de la precipitación es muy alta, particularmente en las zonas con temperaturas medias altas y con precipitaciones bajas; es decir, las zonas más críticas en España son las semiáridas. Sin embargo, estas zonas generalmente ya disponen de infraestructuras de regulación y almacenamiento, así como de una cultura de gestión de la escasez. Precisamente, su ubicación geográfica expuesta a la escasez de agua se refleja en una larga tradición y cultura de adaptación en materia de gestión de los recursos hídricos que se concreta en ejemplos como los sembradores de lluvia y acequias de careo que datan de hace casi diez siglos en Sierra Nevada (Martos et al., 2018; Martos-Rosillo et al., 2019). Los recursos hídricos en España proceden en su mayoría de las precipitaciones que alimentan las aguas superficiales, acuíferos o la nieve en nuestras cordilleras. Asimismo, en España de forma natural ocurren fenómenos hidrológicos extremos, entre los que se destacan las inundaciones o las sequías. Existe un alto consenso de que el cambio climático aumentará la presión existente sobre los recursos hídricos, tanto por la parte de la disponibilidad como por la parte de la demanda, en general con una tendencia a una menor disponibilidad y, por tanto, mayor escasez de agua, así como más eventos extremos y un posible cambio en la temporalidad.

¹⁹ El uso **consuntivo** es aquel en el que el **agua**, una vez usada, no se devuelve al medio donde se ha captado, ni de la misma manera que se ha extraído.

En el presente capítulo, el análisis se ha centrado en los diferentes componentes del ciclo hidrológico. No se analiza el impacto en los diferentes sectores por los probables cambios en el ciclo hidrológico y en las posibles consecuencias en la demanda de recursos, así como en las posibles medidas de respuesta y adaptación frente a estas consecuencias. El capítulo se apoya sobre todo en estudios referentes a España que han analizado el impacto. Para este análisis, los autores recomiendan a los lectores consultar los últimos informes del IPCC (IPCC, 2014), el informe SR1.5 (IPCC, 2018), el informe sobre usos de la tierra (IPCC, 2019a) y sobre la criosfera (IPCC, 2019b), que abordan algunos aspectos del ciclo hidrológico. Asimismo, a nivel europeo se sugiere consultar los informes realizados por la Agencia Ambiental Europea, el Centro de Investigación Conjunta de Ispra (JRC, 2018) y el proyecto PESETA IV (Bisselink et al., 2020)²⁰, y la Agencia Española de Meteorología (Amblar-Francés et al., 2017) sobre escenarios.



Acequia de Mecina (Mecina Bombarón, Granada) en la que se está vertiendo el agua (careando) en una zona de gran capacidad de infiltración (zonas conocidas como "simas" o "matas"). Autor: S. Martos Rosillo

Este capítulo resume el estado de conocimiento de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos, estructurándose de forma que primero se analizan en detalle los riesgos e impactos del cambio climático en los recursos hídricos, considerando la precipitación, evapotranspiración, la humedad del suelo, la escorrentía y el flujo, la criosfera (nieve, glaciares y permafrost), las aguas subterráneas y sistemas acuíferos, la calidad del agua, la erosión del suelo y la carga de sedimentos y, finalmente, los eventos climáticos extremos, los riesgos relacionados con el agua (inundaciones, sequías, olas de calor y temperaturas extremas) y los impactos en los ecosistemas de aguas continentales. Los cambios que se produzcan en los recursos hídricos por efecto del cambio climático pueden afectar a los ecosistemas acuáticos, incluyendo la biodiversidad, así como el vínculo con los ecosistemas marinos y otros ecosistemas terrestres. En el capítulo 11 se identifican los posibles riesgos en los recursos hídricos. Puede haber una interrelación, en particular desde el punto de vista económico, con sectores como son el sector agrario e hidroeléctrico. Otros sectores también se verían afectados si consideramos el ciclo hídrico en su conjunto, como el sector forestal, el turístico, las ciudades, o la salud humana (como se analiza en otros capítulos de este volumen), con probables impactos económicos (Cerdá et al., 2017). También se documentan metodologías innovadoras y enfoques que pueden ser de utilidad para tener una base de

²⁰ <https://ec.europa.eu/jrc/en/peseta-iv>

conocimiento robusta que apoye la toma de decisiones en contextos de alta incertidumbre en recursos críticos para la economía y el bienestar, como es el agua. Las conclusiones y recomendaciones se han incluido en el capítulo 12.

2. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS

2.1. Precipitación, evapotranspiración, humedad del suelo y escorrentía

Tal y como se ha presentado en el capítulo 1, según las proyecciones del cambio climático se espera un impacto en variables claves del ciclo hidrológico.

Impactos detectados

En cuanto a impactos ya detectados, según Garrido et al. (2012) y en base al estudio del CEDEX (2011), durante la segunda mitad del siglo XX se ha detectado una reducción de entre 10% y 20% de los recursos hídricos disponibles en muchas cuencas de la península ibérica. Sin embargo, la bajada en precipitaciones no se traduce automáticamente en una menor escorrentía, ya que intervienen otros factores tales como los cambios del uso de suelo y la demanda de agua. Estas tendencias se confirman a su vez en los estudios regionales de Valencia et al. (2010), que analizaron cómo en la cuenca del Ebro el régimen de precipitaciones es ahora más homogéneo que hace treinta años. Un estudio más reciente (OPCC, 2018) indica que se han detectado descensos significativos del caudal anual en la cuenca del Ebro en más del 50% de las estaciones de aforo estudiadas entre 1950-2010. Lorenzo-Lacruz et al. (2012) analizaron la evolución del caudal de los principales ríos de la península ibérica durante la última mitad del siglo XX. Su estudio evidencia una tendencia a la baja en los caudales anuales, invernales y primaverales, especialmente pronunciada en las cuencas del centro y sur. La reducción del caudal de las corrientes de invierno y primavera se atribuye a varias causas, incluidos los cambios en el patrón de lluvias estacionales y otros factores no climáticos importantes, como la reforestación, el aumento de la demanda de agua y las estrategias actuales de gestión del agua. Finalmente, Vicente-Serrano and Cuadrat-Prats (2007) observan que desde 1951 hasta 2000 se ha producido un aumento de la severidad de las sequías en el Valle Medio del Ebro, aunque con amplia variabilidad espacial.

Llorente et al. (2018) analizaron la precipitación en área de recarga del acuífero de la zona de Medina del Campo, que se extiende a lo largo de 3.700 km² en la cuenca del Duero²¹ y no observan tendencias decrecientes de las precipitaciones en los últimos años. La escasez de datos pluviométricos periódicos y la escasa densidad de estaciones afectan a las estimaciones, y son

particularmente relevantes en áreas con una variabilidad tan grande como esta. Los datos calibrados son cada vez más escasos²² a partir de los años setenta, lo que dificulta la identificación de eventos del pasado cercano.

Mientras tanto, en la cuenca del Alto Guadiana el estudio de Gupta et al. (2018) modelizando los impactos hidro-meteorológicos del cambio climático a escala de cuenca y analizando las tendencias para finales del siglo XX y XXI, indican que los cambios reales parecen estar ocurriendo más rápido de lo previsto por los modelos. Para los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero RCP 4.5 y RCP 8.5 la disminución esperada en

²¹ En esta zona la evapotranspiración potencial media anual de 750 mm y el déficit medio anual de precipitaciones de unos 400 mm.

²² La falta de buenos datos de observación es un área importante y central para realizar análisis robustos sobre el impacto del cambio climático

el volumen de precipitación se asocia principalmente con flujos direccionales del Océano Atlántico y el Mar Cantábrico con una probabilidad decreciente de lluvia (vinculada al aumento de las temperaturas).

Sin embargo, un estudio reciente de Vicente-Serrano et al. (2019) refleja la dificultad en un contexto Mediterráneo de atribuir causalidad a la reducción observada de flujos fluviales. Según los autores, se analizan datos “en base a una red muy densa de estaciones de aforo ($n = 1.874$) de Irlanda, Estados Unidos Reino Unido, Francia, España y Portugal durante el período 1961-2012 para detectar y luego atribuir cambios en caudal anual. Mediante técnicas basadas en regresión, se muestra que el clima (precipitación y atmósfera demanda evaporativa) explica muchas de las tendencias observadas en el noroeste de Europa, mientras que para el suroeste de Europa las perturbaciones humanas explican mejor las tendencias temporales y espaciales. Para este último, grandes aumentos en las zonas de regadío, la intensificación agrícola y la revegetación natural de tierras marginales se infieren como los factores dominantes de la disminución del caudal”.

Impactos proyectados a futuro

En 2012, finalizaron los trabajos del entonces Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente correspondientes al “Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua” con el desarrollo de las siguientes publicaciones: Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural (CEDEX, 2010); Efectos potenciales del cambio climático en las demandas de agua y estrategias de adaptación (CEDEX, 2012a); Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación (CEDEX, 2012b); y Efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua (CEDEX, 2012c).

En 2017, se actualizó el primer informe (CEDEX, 2010) basándose en los nuevos escenarios RCP 4.5 y 8.5 del Quinto Informe de Evaluación (AR5, IPCC 2014) del IPCC (CEDEX, 2017). Los estudios referentes a los años 2010-2012 y 2017, sirven de base para la realización de este capítulo. Se han utilizado también los informes de resumen elaborados por el CEDEX y la OECC (CEDEX, 2012d; OECC, 2018). Abajo se resumen los resultados de los modelos climáticos e hidrológicos (CEDEX, 2017, CEDEX 2018) y una comparación con los estudios anteriores. El estudio incluyó todo el territorio de España con una resolución espacial de 1 km*1 km, presentando información agregada por Demarcación Hidrográfica. Para tener en cuenta la incertidumbre, se realizaron proyecciones para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 utilizando 6 modelos climáticos de circulación general (GCM). Se obtuvo para cada celda valores mensuales simulados de precipitación (PRE), temperatura mínima (TMN) y temperatura máxima (TMX) para tres periodos de impacto (PI: 2010-2040, 2040-2070, 2070-2100) y un periodo de control (PC: 1961-2000), con los que se determinó la evapotranspiración y se alimentó el modelo hidrológico SIMPA. El estudio se centró en comparar los impactos de los tres periodos de futuro respecto al periodo de control. En general, se observó una importante variabilidad en las previsiones de todas las variables según los modelos climáticos. La tabla 2.1 presenta esta variabilidad para el caso de la precipitación. Sin embargo, sí se observa una tendencia decreciente en el tiempo, así como cambios más acentuados para el escenario RCP8.5.

Tabla 2.1: Porcentaje de cambio de precipitaciones según cada proyección para el conjunto de España. Se indican los valores máximos (Mx), mínimos (Mn) y promedio (Med) para cada RCP. Los colores reflejan la gradación del cambio. [Fuente: CEDEX (2017), tabla 6, p. 83]

PRE ESPAÑA Δ Anual (%)	RCP 4.5									RCP 8.5								
	F4A	M4A	N4A	Q4A	R4A	U4A	Mx	Med	Mn	F8A	M8A	N8A	Q8A	R8A	U8A	Mx	Med	Mn
2010-2040	1	-2	-5	-4	-8	9	9	-2	-8	1	-5	-6	-8	-7	-3	1	-4	-8
2040-2070	-4	-5	-5	-7	-13	-1	-1	-6	-13	-4	-11	-11	-9	-16	3	3	-8	-16
2070-2100	-2	-10	-9	-5	-17	1	1	-7	-17	-11	-17	-8	-19	-24	-2	-2	-14	-24

Se observa una variabilidad significativa entre modelos en la proyección estacional (figura 2.1) para el cambio de precipitación que se espera en el periodo 2070 -2100 respecto al periodo de control. Hay modelos que muestran diferencias en las precipitaciones mensuales proyectadas de hasta el 50%. Los valores medios de los modelos muestran disminuciones promedio de 10-25% para la mayoría de los meses y un posible aumento para el mes de febrero.

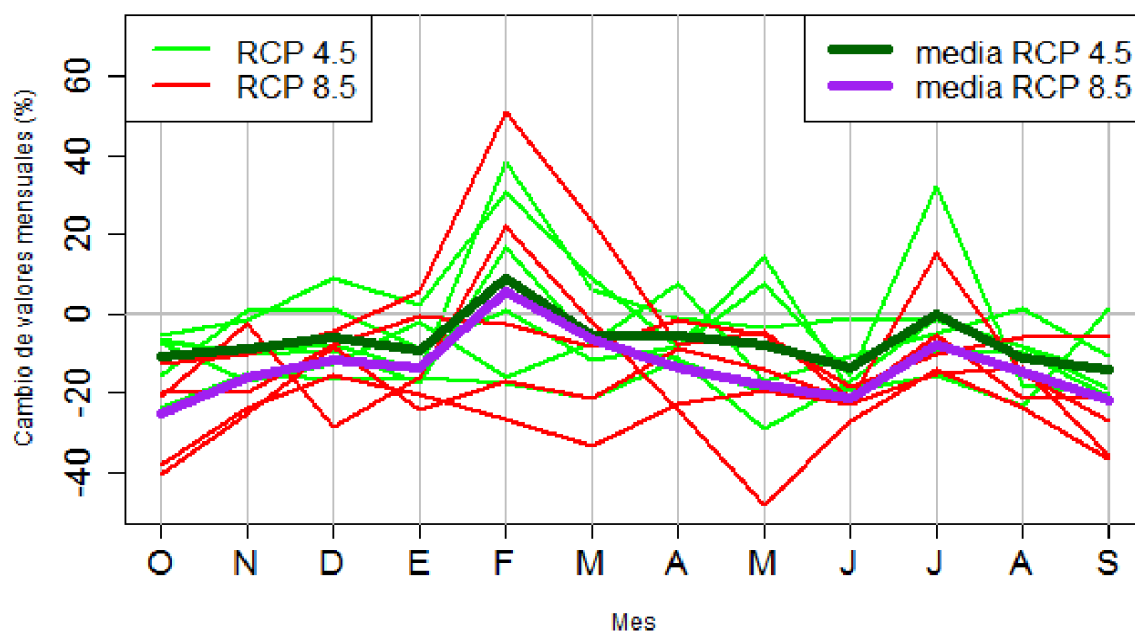


Figura 2.1. Cambios (en porcentaje) en el ciclo anual de precipitación para el largo plazo (2070 – 2100) respecto al periodo de control para el conjunto de España según las distintas proyecciones y sus valores medios para cada RCP. [Fuente: CEDEX (2017), figura 54, p. 93].

La ETP²³ anual, estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100, tiene una tendencia creciente según todas las proyecciones y en ambos RCP (figura 2.2). Debido al descenso de la PRE y al aumento de ETP, es previsible que el suelo pierda humedad. Los mayores descensos se dan en las zonas atlánticas, sobre todo en el noroeste, donde hay más disponibilidad de agua, y los menores descensos se dan en el sureste y Canarias debido a la menor disponibilidad de agua; el suelo está tan seco que apenas hay variación de humedad. Es muy probable que la pérdida de la humedad del suelo (HMS) cause importantes impactos en los ecosistemas y la agricultura. La previsión es que la evapotranspiración real (ETR) disminuya significativamente, pero con unos rangos de variabilidad importantes (figura 2.2). Según el estudio se espera una tendencia decreciente de la recarga subterránea (REC). Los cambios en la escorrentía (ESC) anual estimada para el conjunto de España durante el periodo 2010-2100 revelan una tendencia decreciente según todas las proyecciones y en ambos RCP (4.5 y 8.5) (figura 2.2). En general, se pronostica una reducción del aporte hídrico a los ríos (APN).

²³ La evapotranspiración potencial se obtiene en base a la ecuación de Hargreaves en función de TEM, TMX, TMN y la radiación solar extraterrestre para un cultivo de referencia. Luego se multiplica por los coeficientes de corrección (mapas geoespaciales) Penman-Monteith/Hargreaves y finalmente se multiplica por los coeficientes de cultivo (Kuso) (mapas geoespaciales) para conseguir la ETP de los cultivos reales.

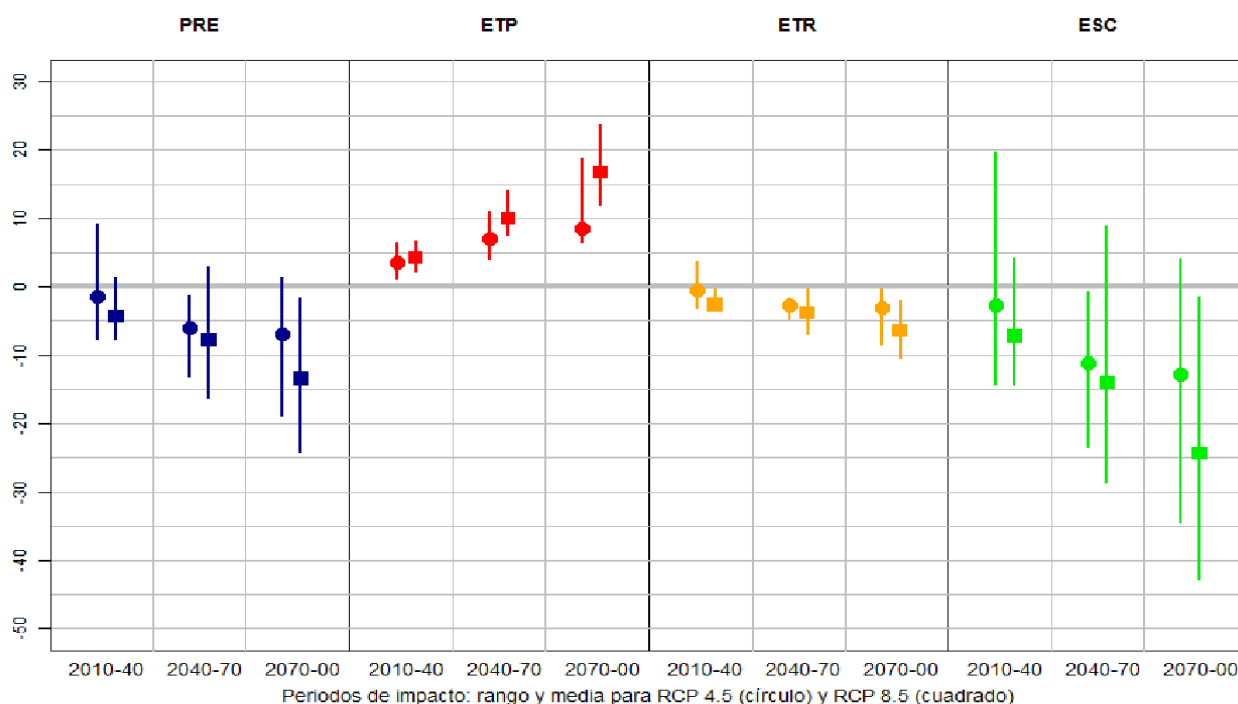


Figura 2.2. Cambio en porcentaje en las principales variables hidrológicas en los tres periodos respecto al periodo control para el conjunto de España. Rango y media de resultados para RCP 4.5 (círculos) y RCP 8.5 (cuadrados). PRE: precipitación, ETP: Evapotranspiración potencial, ETR: Evapotranspiración real, ESC: Escorrentía total. [Fuente: CEDEX (2017), figura 170, p. 246].

2.2. Criosfera (nieve, glaciares y permafrost)

Un informe del Observatorio Pirenaico de Cambio Climático (OPCC, 2018) sobre el 'Cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación' indica que la temperatura media en los Pirineos ha aumentado en un 0,2°C (30%) por década entre 1959 y 2010. La tendencia al calentamiento parece que se mantendrá a lo largo del siglo XXI, en los escenarios más emisivos podría oscilar entre los 4,3°C y 7,1 °C. Esto conllevaría una "disminución significativa de la profundidad de la nieve" en los Pirineos durante los próximos años, y una reducción de la duración del manto de nieve con impactos significativos sobre el ciclo hidrológico. Esto confirma los resultados de un estudio anterior de Pons et al. (2010) que documentan las tendencias observadas de ocurrencia de nieve en el norte de la península ibérica, utilizando datos de ocurrencia diaria de nieve en 33 estaciones que van desde 60 hasta 1350 m de altitud, observando una reducción del número anual de días de nieve de alrededor del 50% desde los años 70; esta reducción es similar para estaciones bajas y altas y para invierno y primavera por separado. Gilaberte-Búrdalo et al. (2017) y Rodrigues et al. (2018) analizan el impacto en el sector del esquí de los cambios en la profundidad de la nieve derivados del incremento de temperaturas tal y como se analiza en más detalle en el capítulo 11.

Las nevadas y un cambio en el régimen nival pueden afectar a la recarga de acuíferos, en zonas en las cordilleras de los Pirineos y Sierra Nevada que reciben nevadas importantes. Pulido et al. (2018) indica que podría haber una gran incertidumbre en esas áreas porque el deshielo actúa como un agente de recarga más 'eficiente' que la lluvia, y el calentamiento podría reemplazar varios días por año las nevadas por lluvia, alterando potencialmente la recarga.

Cuadro 2.1**Cambios en el fenómeno nival e inundaciones en el Arga- impactos del cambio climático****(Extracto de la Estrategia Ebro Resilience)**

En el caso del Pirineo, los modelos pronostican un aumento de las temperaturas máximas y medias, en consonancia con la práctica totalidad de los informes existentes sobre la evolución del clima futuro, y un fuerte incremento en las precipitaciones máximas, lo que influiría decisivamente en los caudales máximos registrados en los episodios de avenidas.

Escenarios temporales actual y futuro para las temperaturas y precipitaciones en el Pirineo. (Fuente: Caracterización de la nieve en España y su incidencia en las inundaciones; SPESA Ingeniería S.A.; 2019 (*) Valor medio, desde el punto de vista fisiográfico, de las cuencas con influencia nival vertientes al Ebro.

Escenario	Temperatura máxima ponderada en el sistema (°C)	Temperatura media ponderada en el sistema	Precipitación máxima ponderada en el sistema (mm)	Precipitación media ponderada en el sistema (mm)
Actual	23,2	5,8	32,5	3,1
Futuro	25,9	7,3	37,0	3,2
% de variación del escenario futuro	+10,5%	+20,1%	+12,3%	+3,5%

En cuanto al fenómeno nival se observa que la nieve precipitada máxima aumenta considerablemente, en consonancia con el aumento de las precipitaciones, aunque la nieve precipitada media, la nieve acumulada máxima y la nieve media acumulada disminuyen, debido al incremento en las temperaturas máxima y media. Del análisis de estos datos cabe esperar que el aumento de las máximas acumulaciones nivales y de las temperaturas lleven asociado un incremento en las fusiones máximas, contribuyendo de forma puntual a incrementar los caudales de manera significativa.

Cuadro 2.1 (cont.)

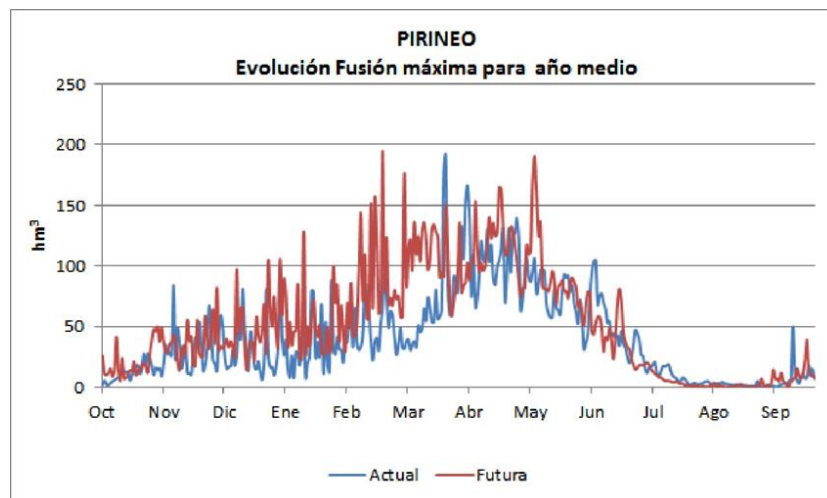
Escenarios temporales actual y futuro para la nieve precipitada y acumulada en el Pirineo. (Fuente: Caracterización de la nieve en España y su incidencia en las inundaciones; SPESA Ingeniería S.A.; 2019 (*) Valor medio, desde el punto de vista fisiográfico, de las cuencas con influencia nival vertientes al Ebro.

Escenario	Nieve precipitada máxima ponderada en el sistema (mm)	Nieve precipitada media ponderada en el sistema (mm)	Nieve acumulada máxima en el sistema (hm³)	Nieve acumulada media en el sistema (hm³)
Actual	27,4	1,3	4.037	858
Futuro	31,1	1,2	3.581	621
% de variación del escenario futuro	+11,8%	-7,6%	-12,7%	-38,1%

El mayor incremento en los valores máximos de precipitación con respecto a los valores medios pone de manifiesto un cambio en el patrón de precipitaciones hacia un modelo más extremo, con más episodios de fuertes lluvias seguidos de periodos con escasa precipitación, siendo especialmente visible en el periodo otoñal y durante el verano. Por otro lado, se observa un fuerte aumento de la fusión nival entre los meses de febrero y abril que, además de contribuir al aumento de caudales en esas fechas cambian el actual patrón de fusión, adelantándose más de un mes y haciendo que disminuya en los meses en los que actualmente se produce. Los incrementos en la fusión máxima durante estos meses, junto con el previsible incremento en las precipitaciones máximas a lo largo de todo el año, provocarán un aumento de los caudales máximos durante el invierno y el inicio de la primavera. Este fenómeno puede deberse a la ya mencionada distribución cíclica en la frecuencia de las inundaciones, pero también a los efectos del cambio climático.

Este aspecto se ha analizado a nivel de toda la cuenca en la Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación del 2º ciclo de la Directiva de Inundaciones de la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

Comparativa entre la fusión máxima diaria actual y en el escenario futuro a lo largo del año. (Fuente: Caracterización de la nieve en España y su incidencia en las inundaciones; SPESA Ingeniería S.A.; 2019)



Estudios realizados en acuíferos kársticos en otros puntos del Mediterráneo (Doummar et al., 2018) indican una reducción en caudales y periodos más largos de escasez con aumentos de temperatura de + 1,5 °C a 2,5 °C, y la consiguiente reducción de la capa de nieve en casi un 100% hacia finales de siglo. Esto podría tener un impacto en fuentes y manantiales dependientes (un 73%) e incrementar la ETP (de 12%-17% a 50%); además, la disminución de la acumulación de nieve en estas zonas y un desagüe de las precipitaciones estacionales pueden conllevar descargas máximas de primavera. Estos posibles impactos podrían reflejarse también en otros sistemas kársticos en condiciones semiáridas en España, con regímenes nivales que son importantes para la gestión futura de los recursos hídricos.

Según los datos de aforos en cuencas poco reguladas (con pocos embalses), como la del Arga, se ha detectado un aumento de la frecuencia e intensidad de inundaciones por el deshielo (Ebro Resilience, 2020) con el aumento de la temperatura media y máxima, con caudales superiores a la media de los máximos anuales (540 m³/s) medidos en la estación de aforos situada en la localidad de Funes (Navarra). Entre 2002 y 2018 se ha superado este valor en 21 ocasiones (16 años de datos), mientras que desde 1979 hasta 2002 solo se superó en 9 ocasiones (23 años de datos). Asimismo, es importante comentar cómo se está notando ya el impacto en ciertas cuencas como la del Arga, uno de los principales afluentes del Ebro, que está poco regulado y permite analizar la evolución de los caudales sin el efecto regulador de los embalses. Según los datos de aforos en cuencas poco o nada reguladas (sin embalses), como la del Arga, se ha detectado un aumento de la frecuencia e intensidad de inundaciones por el deshielo (Ebro Resilience, 2020) con el aumento de la temperatura media y máxima. Visualizando los caudales superiores a la media de los máximos anuales (540 m³/s), medidos en la estación de aforos situada en la localidad de Funes (Navarra), se concluye que entre 2002 y 2018 se ha superado este valor en 21 ocasiones (16 años de datos), mientras que desde 1979 hasta 2002 solo se superó en 9 ocasiones (23 años de datos).

2.3. Aguas subterráneas y acuíferos

Las aguas subterráneas constituyen un recurso estratégico por su capacidad de almacenamiento y efecto de amortiguación, para el mantenimiento de los ecosistemas y la adaptación humana a la variabilidad y el cambio climático; y aún más en un contexto de cambio climático en el que se intensifican sequías e inundaciones y se producen cambios relevantes en la humedad en el suelo o en las aguas superficiales. Sin embargo, el propio

cambio climático también conlleva impactos directos en los procesos naturales de la recarga de acuíferos, descarga, almacenamiento, intrusión salina, reacciones biogeoquímicas y transporte de químicos (Taylor et al., 2013, Bolaños y Betancur, 2018). A nivel mundial, el agua subterránea constituye la mayor reserva de agua dulce (Vaessen y Brentführer, 2015). España es un país bien dotado de recursos subterráneos con unos 300.000 Hm³ (Villarroya et al., en prensa), muchos de ellos ubicados en las zonas de menor precipitación constituyendo un recurso esencial en estas zonas.



Autora: E. López-Gunn

Los impactos posibles en las aguas subterráneas se pueden analizar sobre la base de las entradas, salidas y almacenamiento (Pernia y Fornes, 2009, Bolaños y Betancur, 2018, Vaessen y Brentführer, 2015), y el análisis de sus interrelaciones. La precipitación, las temperaturas y la evapotranspiración pueden afectar a la recarga, descarga y calidad de las aguas subterráneas y, por tanto, todos sus usos asociados, incluidos los servicios ecosistémicos.

El incremento de las temperaturas, la posible disminución de la precipitación anual, el cambio en la estacionalidad o la intensidad de las precipitaciones, así como el aumento del nivel del mar implican posibles alteraciones en los procesos del ciclo hidrológico en su fase subterránea, y en los ecosistemas asociados a las aguas subterráneas (Pernía y Fornés, 2009).

Los sistemas hidrogeológicos de la península y las islas han sufrido grandes cambios en las últimas décadas con ríos que se han secado, humedales que han desaparecido, dejando sus baldes convertidos en tierras de cultivo, y acuíferos intensamente explotados durante años, entre otros. Esto afecta a los servicios ecosistémicos del agua subterránea (Manzano Arellano, Lambán Jiménez, 2012). Los seres humanos han causado la mayor parte de estos impactos que pueden verse empeorados con el cambio climático, con efectos retardados en la cantidad y calidad del agua subterránea (de la Hera et al., 2020).

En cuanto a las entradas: Cambios en la evapotranspiración y el aumento de las temperaturas pueden afectar a las aguas subterráneas más someras, produciéndose una reducción de recursos en las capas más superficiales, que puede originar subsidencias o colapsos en el terreno.

En lo que respecta a *subsidencias* y el posible impacto del cambio climático por afección a las aguas subterráneas, Collados-Lara et al. (2020) obtuvieron una buena correlación entre el agotamiento del nivel del agua subterránea y el hundimiento en los pozos donde el porcentaje de arcilla estaba por debajo del 50%. El análisis de los resultados mostró que, asumiendo un escenario de gestión como el actual, los impactos del cambio climático sobre el hundimiento serían muy significativos. El aumento medio de las tasas máximas de hundimiento en los pozos considerados para el horizonte futuro (2016-2045) y el escenario RCP 8.5 fue del 54%. Este tipo de estudios podrían ayudar a identificar las áreas más vulnerables donde el hundimiento puede causar la inundación permanente, agravar las inundaciones, cambios en los gradientes topográficos, ruptura de la superficie, daños estructurales en edificios e infraestructuras, y una menor capacidad de almacenaje de agua en los acuíferos.

En lo que respecta a *la infiltración*, al depender tanto de la precipitación como de la evapotranspiración, esta se verá afectada probablemente por la disminución de recursos disponibles. También es importante el cambio en cuanto a la estacionalidad, frecuencia e intensidad, ya que afecta al proceso de infiltración y a la escorrentía superficial.

La *recarga* de los acuíferos también puede verse afectada. Según Molina et al. (2013), cambios previstos en las variables meteorológicas, como la temperatura y las precipitaciones, pueden provocar cambios significativos en las tasas de recarga de los acuíferos (Jyrkama y Sykesa, 2007), que pueden conducir a importantes variaciones de nivel piezométrico. Según Molina et al. (2013), a nivel mundial estudios predicen tanto disminución en la recarga (Merritt et al., 2006; Herrera-Pantoja e Hiscock, 2008), como posibles aumentos en la recarga de acuíferos según ciertas condiciones y períodos (Doll, 2009; Green et al., 2007; Gurdak y Roe, 2010; Jyrkama y Sykesa, 2007; Kovalevskii, 2007; Yusoff et al., 2002). Otro aspecto importante y poco estudiado es el impacto inducido por cambios en el uso del suelo en la recarga de acuíferos debido al cambio climático (Bolaños y Betancur, 2018) (p.e. en el tipo de cultivos, masas forestales, etc.). En España, se han realizado diferentes estudios en cuanto a la afección del cambio climático en la recarga de los acuíferos, desde estudios en detalle en acuíferos concretos hasta estudios para toda la península ibérica (excluyendo las islas). A escala de la península ibérica, el estudio de Pulido-Velázquez et al. (2018) proyecta una reducción de la tasa media de recarga en torno al 12% de media, con una mayor reducción en el centro y sureste del territorio, de hasta un 28% en algunas áreas para futuro cercano (2016–2045).

Touhami et al. (2014) realizaron un estudio en el acuífero de Ventos (Alicante), representativo de una de las zonas más secas de la península ibérica. El acuífero tiene unas extracciones medias de 200.000 m³/año, en base a una recarga media de 150.000 m³/año (Touhami et al., 2013) con entradas únicamente por la lluvia sobre los materiales permeables, donde un 40% del agua se dedica al regadío. Las simulaciones realizadas indican que, aunque a corto plazo pudiera haber un aumento de la recarga, en la segunda parte del siglo, esta se reducirá considerablemente, pudiendo llegar a producirse disminuciones en algunos años de casi un 90%-96%, según las previsiones en un escenario A2, y del 59% para el B2.

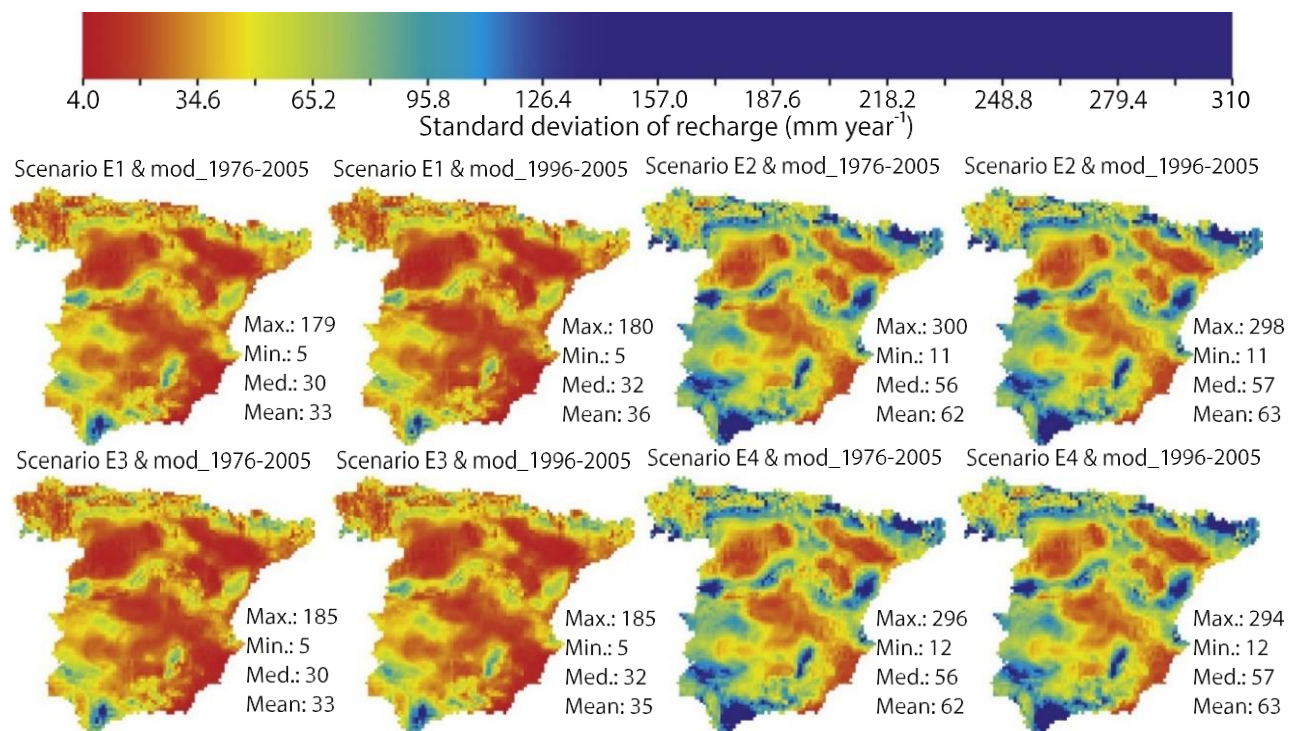


Figura 2.3 Escenarios potenciales futuros de desviación estándar de la recarga neta media del acuífero (mm año — 1) para el período (2011-2045) a partir de la combinación de escenarios potenciales futuros definidos por las cuatro opciones de conjunto (E1, E2, E3 y E4) y dos modelos de recarga (mod_1976-2005 y mod_1996-2005). (Autor: D. Pulido)

Molina et al. (2013) relizaron en el acuífero sobreexplotado Serral-Salinas (cuyos recursos renovables se estiman en 5 Hm³/año, derivados casi exclusivamente de la infiltración de la precipitación) un análisis del impacto en la recarga del cambio climático y de los cambios en el uso de la tierra para dos escenarios (A1 y A1B) a largo plazo (2071-2100). Para ambos escenarios de cambio climático se observa una reducción de las precipitaciones y, en consecuencia, de las tasas de recarga de aguas subterráneas en el acuífero; además, mantener la distribución actual de los cultivos implicaría una extracción del acuífero mayor para compensar mediante el riego el descenso futuro de las precipitaciones. Una reducción de solo el 20% del regadío produciría un impacto mucho mayor en el funcionamiento hidrológico del acuífero que los efectos del cambio climático. Es decir, incluso una pequeña reducción en la zona de regadío puede paliar los impactos hidrológicos, expresados como reducción de la recarga, y la consecuente reducción del almacenamiento de agua subterránea, generada por el cambio climático.

En cuanto a salidas, una reducción en las entradas y almacenamiento afectaría a manantiales, críticos para el suministro de zonas rurales, zonas de riego tradicionales o para humedales dependientes. Los ríos también se verían afectados, al reducirse el caudal base. Es decir, una reducción en las entradas y del almacenamiento se traduce en una reducción de las salidas, incluyendo las descargas desde los acuíferos al sistema fluvial; por tanto, tramos fluviales tradicionalmente “ganadores” (en los que dominan las descargas de aguas subterráneas) reducirán sus ganancias, pudiendo convertirse incluso en “perdedores”. Todo ello se puede traducir en una reducción del caudal base, de gran importancia para el mantenimiento del agua en los ríos en las épocas de estiaje, primordial para el mantenimiento de caudales en las épocas más secas. Sapriza-Azuri et al. (2015) analizan los efectos combinados de las proyecciones de cambio climático y el bombeo de aguas subterráneas en la cuenca del Alto Guadiana. Los resultados indican que se pueden esperar reducciones muy significativas en la disponibilidad de agua para el futuro durante todo el año, pero especialmente durante el verano, que se alargaría en 3 meses más, siendo más caluroso y seco; la humedad del suelo y la evapotranspiración real se reducirían en un 20%, la recarga en un 50% y las respuestas relacionadas con los acuíferos (generación de escorrentía, intercambio de agua subterránea-agua superficial, humedales y caudal) en un 60%.

En cuanto a la subida del nivel del mar, junto con el posible aumento de fenómenos extremos (p.e. tormentas en la costa como las DANAS), también tendrá implicaciones en relación con las aguas subterráneas al cambiar la interfaz entre agua salada y agua dulce. Esto puede causar la intrusión marina, así como reducir la disponibilidad de agua dulce en zonas costeras y posibles problemas geotécnicos. Los humedales costeros, en concreto ecosistemas vulnerables como las playas, los deltas y los humedales litorales (ver Subsección 2.4 y 2.7), pueden también verse afectados. Para más detalle consultar el capítulo de Costas (capítulo 6).

2.4. Calidad del agua, intrusión marina y salinización de acuíferos

En esta sección se pretende hacer una breve introducción de las cuestiones que deben considerarse al examinar los efectos del cambio climático en la calidad del agua. En primer lugar, se pone el foco sobre las aguas superficiales, como los lagos y los ríos, para más adelante reflexionar sobre los problemas relacionados con la intrusión marina y la salinización. La calidad del agua es un concepto amplio que puede incluir variables físicas (como la temperatura o la turbidez), variables químicas (como el pH o las concentraciones de oxígeno), variables biológicas (como la tasa de reproducción de una especie acuática), así como los cambios resultantes en el ecosistema (por ejemplo, como resultado del impacto en las cadenas tróficas).

La calidad del agua está fuertemente determinada por variables climáticas como la temperatura, las precipitaciones anuales y los fenómenos extremos como las inundaciones y las sequías (Benateau et al., 2019). Sin embargo, al mismo tiempo, y de forma igualmente importante, la calidad del agua está fuertemente marcada por la actividad humana, muy especialmente la regulación de los caudales, el uso de la tierra y la urbanización. La interacción de estos factores de estrés, así como la secuencia en la que se producen, se vuelve crítica. Además, las respuestas de los sistemas químicos y biológicos se caracterizan por ser no lineales.

Se indican aquí, por tanto, algunos ejemplos de cuestiones a considerar en España teniendo en cuenta el impacto del cambio climático en la calidad del agua. A medida que los flujos de agua disminuyen, los contaminantes antropogénicos se concentran y agravan la contaminación. Esto puede aumentar tanto los efectos crónicos (por ejemplo, debido a los productos farmacéuticos o a los productos químicos para el hogar) como la toxicidad aguda, por ejemplo, a través de una reducción de los niveles de oxígeno o un aumento de las concentraciones de amoníaco, que es altamente tóxico para la fauna piscícola. El aumento de la erosión provocado por una combinación de uso intensivo de la tierra y condiciones climáticas adversas, como las crecidas repentinas tras las sequías, puede dar lugar tanto a un aumento de la turbidez del agua que afecte a los nichos ecológicos como a la sedimentación en los fondos de los ríos, reduciendo las zonas de reproducción de los peces (la sección 2.7 profundiza el análisis de los impactos en los ecosistemas acuáticos). Al mismo tiempo, estas fuertes interacciones implican que la reconsideración de las prácticas agrícolas, así como la forma en que se conciben y se operan los sistemas urbanos de agua y las grandes presas, pueden ofrecer una gama de posibilidades para mitigar algunos de los impactos del cambio climático (Corominas y Neumann, 2014). Además, es necesario tener en cuenta otros aspectos como la presión del cambio climático en sistemas altamente regulados y su afección a procesos y funciones ecosistémicas esenciales.

Nitratos: Rodríguez-Blanco et al. (2016) analizan si la carga de nitratos en una pequeña cuenca Atlántica agroforestal aumentará debido al impacto del cambio climático, afectando por tanto la calidad de los recursos hídricos, ya que se puede alterar la magnitud y el momento de la entrada de nutrientes a la red de arroyos. El estudio indica que la carga de nitratos aumentará en los horizontes futuros (6% en el periodo 2031-2060, 7% en 2069-2098) en relación con los valores actuales (1981-2010), posiblemente debido a la disminución de la biomasa de los pastizales, así como un aumento en la tasa de mineralización vinculada al aumento de la temperatura. También este podría ser un problema en acuíferos como el del Alto Guadiana (Pulido- Velázquez et al., 2015).

Turbidez y aumento de sedimentos: Según Rodríguez-Blanco et al. (2016), el impacto en los sedimentos puede provocar un deterioro en la calidad del agua si la concentración media de sólidos en suspensión alcanza los 25 mg/l, umbral establecido por la legislación relativa a la calidad de las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable (Directiva 75/440/CEE) (EC, 1975) y para la vida de los peces (Directiva 2006/44/CEE) (EC, 2006).

Intrusión salina y salinización: Un aspecto importante a tener en cuenta en cuanto a la calidad del agua es el posible impacto del cambio climático en la salinización de acuíferos e intrusión salina, así como contaminación de acuíferos por mayor número de eventos extremos que podrían aumentar la carga contaminante en los mismos (Bolaños y Betancur, 2018). Además del aumento de temperatura, una disminución de las precipitaciones, una menor recarga de agua subterránea y un aumento del nivel del mar por el cambio climático, en las costas del área mediterránea se espera una intensificación de la intrusión marina agravada por sobreexplotación (Werner y Simmons 2009; Ferguson y Gleeson 2012; Loáiciga et al., 2012; Benini et al., 2016). Baena Ruiz et al. (2020) muestran que, en muchos casos, los acuíferos son más vulnerables a los efectos del cambio climático sobre la recarga y el bombeo de aguas subterráneas que al aumento del nivel del mar (Ferguson y Gleeson 2012; Rasmussen et al., 2013). Pulido-Velázquez et al. (2018) y Baena-Ruiz et al. (2020) analizan el impacto del cambio climático en relación con la intrusión salina, la subida del nivel del mar y la salinización de los acuíferos. Pulido-Velázquez et al. (2018) analizan el caso del acuífero Plana Oropesa-Torreblanca, considerando cómo el cambio climático y el cambio de uso y cobertura del suelo podrían influir significativamente en la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en el futuro. Aunque el estado histórico muestra que la mayor parte del acuífero estaba ya afectado por la intrusión de agua de mar, las simulaciones muestran una menor sensibilidad al cambio de uso de la tierra que a los escenarios de cambio global incluyendo el cambio climático. Baena-Ruiz et al. (2020) muestran cómo el cambio climático futuro, al afectar a las precipitaciones y a la temperatura, puede producir una ruptura del equilibrio hídrico y una variación en la dinámica agua dulce-agua de mar en las zonas

costeras, lo que agrava los problemas de intrusión de agua de mar en el acuífero de la Plana de Oropesa-Torreblanca en algunos escenarios de gestión.

2.5. Erosión del suelo y carga de sedimentos

La erosión del suelo y los sedimentos es relevante por diferentes razones, entre las que destacan los procesos naturales en cuanto a caudales sólidos, y también la relación con la posible colmatación de embalses. Francesa y Bussib (2014) explican cómo el cambio climático tiene efectos internos, en la misma cuenca, por la posible pérdida del suelo y de su productividad, y efectos externos asociados al posible aumento de la carga de contaminantes, flujos híper-concentrados y la colmatación de los embalses. Estos autores analizan el efecto del cambio climático en la erosión de la cuenca del Río Ésera (cuenca del Ebro) de 1,51 km², bajo dos escenarios de cambio climático y su posible impacto sobre la sedimentación del embalse de Barasona, que regula la cuenca mencionada y que ha presentado problemas históricos de aterramiento. Estos cambios en el transporte de sedimentos se reflejan en un cambio en el aterramiento del embalse, que en el escenario B2 no provoca cambios relevantes frente al escenario de control (con una vida útil esperada de aproximadamente 100 años), sin embargo y de forma paradójica para el escenario A2, más pesimista, se espera una vida útil significativamente más larga (aproximadamente 160 años).

Rodríguez-Blanco et al. (2014) analizan los posibles impactos del cambio climático a medio (2031-2060) y largo plazo (2069-2098) en los sedimentos y erosión en la cuenca del Corbeira, una pequeña cuenca rural de 16 km² ubicada en el noroeste de España, en la Coruña. Se prevé un aumento en el transporte de sedimentos en invierno, posiblemente asociado a una mayor erosión en las áreas cultivadas (11% -17%), debido al aumento de la temperatura, que puede tener un impacto significativo, ya que la erosión del suelo es actualmente superior a la tasa de formación del suelo para las condiciones imperantes en Europa (1,4 t/ha/año). Este hecho sugiere que, en esta época del año, el efecto de la erosión de suelo prevalece sobre la capacidad de transporte de sedimentos.



Autora: E. López-Gunn

Un estudio reciente a nivel global (Moragoda y Cohen 2020) indica que la descarga de los ríos y la dinámica de los sedimentos a nivel mundial son muy sensibles al cambio climático antropogénico en el siglo XXI. A nivel global se proyecta un aumento neto global de la descarga de sedimentos natural de los ríos en los océanos, para

finales del siglo XXI, en todos los escenarios de cambio climático analizados. Ahora bien, cabe destacar que existe una gran heterogeneidad regional, y que en concreto para España se prevé una reducción de caudales. Sin embargo, es importante subrayar los cambios extremos y mayores tasas de cambio esperadas. A nivel global, estos aumentos son mayores con el aumento de los niveles de calentamiento atmosférico. A finales de este siglo, los cambios climáticos proyectados en los escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 podrían conducir a aumentos del 2%, 6%, 7,5% y 11%, respectivamente, en el caudal medio mundial de los ríos en relación con el período 1950-2005. Mientras que el flujo global medio de sedimentos en suspensión mostrará aumentos del 11%, 15%, 14% y 16,4%. El aumento del calentamiento global conducirá a cambios más extremos y mayores tasas de cambios (crecientes o decrecientes) en ambas variables. La variabilidad interanual también aumenta en escenarios de mayor calentamiento. Los cambios en el flujo de sedimentos siguen los patrones previstos para la descarga, y principalmente se explican según la variación espacial y temporal de la precipitación. Sin embargo, se encontró que la relación entre la precipitación, la descarga y el flujo de sedimentos no era lineal ni en el espacio ni en el tiempo.

2.6. Eventos climáticos extremos y riesgos relacionados con el agua

Inundaciones

Esta sección se centra en España y se basa principalmente en tres estudios: i) Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones del Consorcio de Compensación de Seguros y MAPAMA (2017); ii) Inundaciones y cambio climático, Ministerio para la Transición Ecológica MITECO (2018a); y iii) Incorporación del cambio climático en la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) en el segundo ciclo de aplicación de la Directiva de Inundaciones (2007/60/ce). Metodología general. MITECO (2018b). EL MITECO está actualmente desarrollando el segundo ciclo de la planificación de la Directiva de inundaciones, con análisis actualizados que incluyen el efecto del cambio climático sobre eventos extremos sobre inundaciones²⁴.

El estudio del Consorcio de Compensación de Seguros y MAPAMA (2017) indica que “cada año se producen en España una media de 10 episodios graves de inundación. Según el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias (DGPCyE), las inundaciones han causado la muerte de 312 personas en los últimos 20 años y daños materiales por valor de unos 800 millones de euros al año. Las indemnizaciones del seguro por daños materiales causados por las inundaciones, sin incluir explotaciones agropecuarias, ascendieron a 5.826 millones de euros entre 1971 y 2016, en valores actualizados a euros de 2016”. Alfieri et al. (2017), estiman que 216.000 personas están expuestas cada año a las inundaciones en Europa, con unos daños anuales de 5.300 millones de euros. En la mayoría de las regiones de Europa se prevé un aumento del riesgo de inundaciones debido al calentamiento global. Con un escenario global de calentamiento por debajo de 2°C, y teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas actuales, los impactos de las inundaciones podrían ser más del doble, con 525.000 personas/año expuestas a inundaciones y 13.000 millones de euros de pérdidas anuales previstas. Si se consideran condiciones climáticas a corto plazo (2021-2050), aproximadamente 450.000 personas podrían estar expuestas anualmente a las inundaciones, y los daños directos por inundaciones podrían alcanzar los 12.000 millones de euros. Las condiciones climáticas a largo plazo (2071-2100) impuestas a la sociedad actual podrían resultar en más de 700.000 personas expuestas anualmente a inundaciones, mientras que los daños directos por inundación podrían ver un aumento de más del

²⁴ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/planes-gestion-riesgos-inundacion/Cambio-climatico-e-inundaciones.aspx>

triple con respecto a las condiciones actuales, alcanzando los 17.000 millones de euros de pérdidas medias anuales.

Hay diferentes tipos de inundaciones a considerar. En general, se puede distinguir entre inundaciones costeras e inundaciones continentales. Las causas principales de las inundaciones costeras son el aumento del nivel del mar o el oleaje (grandes olas impulsadas hacia el interior por el viento) durante tormentas o temporales que se pueden modificar debido al cambio climático (capítulo 5). En cuanto a las inundaciones continentales, pueden tener su origen en:

- Precipitación copiosa y persistente (normalmente masas de aire atlánticas) que afectan a las cuencas fluviales.
- Precipitación intensa en cuencas pequeñas que genera crecidas repentinas (crecidas súbitas, relámpago o “flash floods”).
- Precipitación intensa “in situ” sobre zonas deprimidas con escaso drenaje y sectores urbanos (inundaciones pluviales).
- Deshielo rápido debido al aumento de la temperatura diurna o por precipitación caída sobre zonas con acumulaciones importantes de nieve.
- Aumento del nivel freático de las aguas subterráneas.

A menudo, en eventos extremos se pueden encontrar combinaciones de estos diferentes tipos de inundaciones. Cambios en la dinámica de inundaciones son debidos a cambios en los patrones de lluvia, en cambios del uso de suelo (forestación, urbanización), o en cambios en la regulación de embalses. A causa de los dos últimos factores resulta difícil atribuir cambios en las tendencias de inundaciones al cambio climático. Por lo tanto, los efectos provocados por el cambio climático en sí se centran en el cambio de patrones de lluvia, sobre todo las lluvias extremas.

El MITECO (2018a) analizaba cambios recientes en la dinámica de lluvias intensas en España concluyendo que “a pesar de las incertidumbres asociadas al estudio de precipitaciones máximas, algunas conclusiones tienen una base amplia. Este es el caso de las precipitaciones extremas (de un periodo de retorno de 20 años), donde se observa un aumento en su magnitud en el Levante español en la mayor parte del año, y un descenso de estas en el sur de la península ibérica.” Recientemente, las proyecciones climáticas de variables particularmente dependientes de la escala regional y local, como es el caso de las lluvias intensas, se han mejorado sustancialmente en el contexto de la iniciativa EURO-CORDEX. Utilizando estos datos, accesibles desde AEMET, el proyecto MITECO (2018a) muestra un aumento claro para la lluvia extrema en todos los horizontes futuros (Fig. 2.4).

Por otro lado, el estudio del MITECO (2018b) aplica una resolución más fina para analizar cambios significativos en las precipitaciones máximas diarias, para un periodo de retorno de 100 años. En los resultados se puede apreciar que hay celdas con aumentos de más de 50% (figura 2.5). También es interesante destacar que hay muchas celdas sin cambios significativos.

Sin embargo, es mucho más difícil estimar cómo afectarían los cambios previstos en la dinámica de lluvias a las dinámicas de inundaciones. Esta dificultad es debida a la incertidumbre en los modelos hidrológicos y considerando el futuro debido a la incertidumbre de la evolución del uso del suelo y en la gestión de embalses. En general, si aumentan las precipitaciones intensas, también se puede esperar un aumento en la magnitud de inundaciones. El efecto climático se puede ver amplificado con el aumento de las áreas urbanizadas (aumento de escorrentía). Por otro lado, una estrategia de adaptación efectiva podría p.e. mitigar los efectos del aumento de precipitaciones intensas (por ejemplo, con sistemas de drenaje sostenible que aumentan la permeabilidad del suelo).

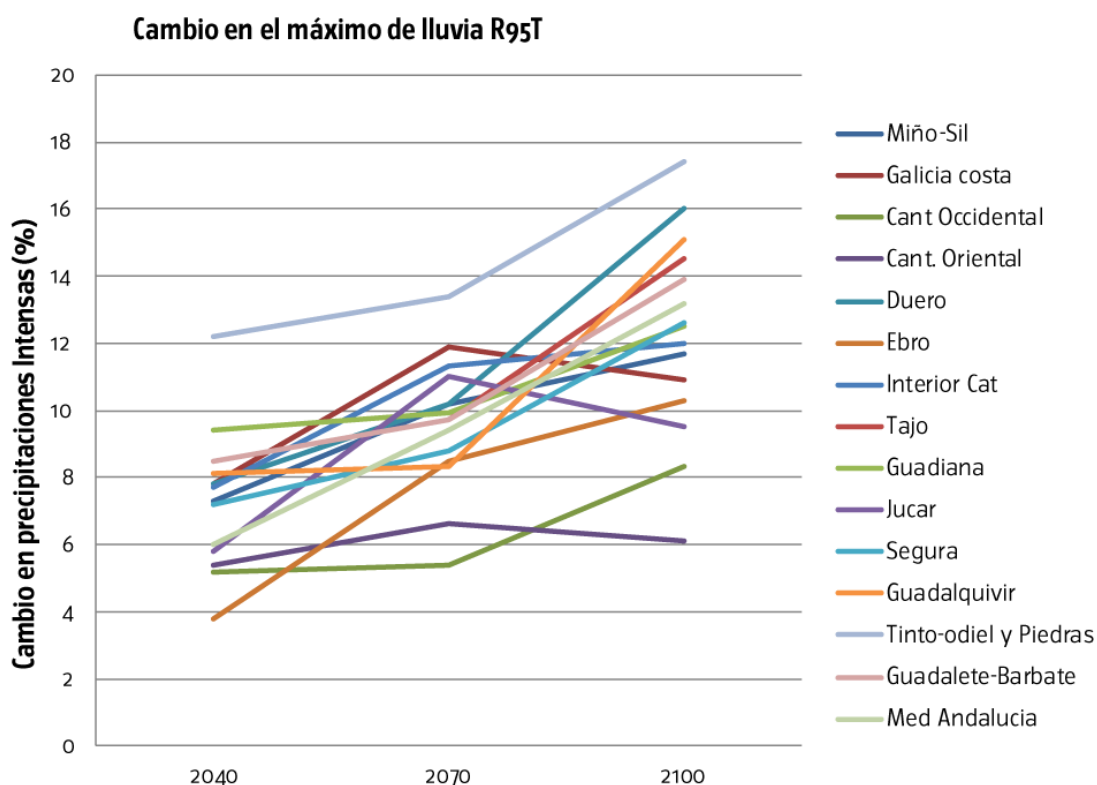


Figura 2.4. Cambio en precipitaciones intensas respecto al periodo de control (1976-2005) para tres ventanas temporales (2011-2040, 2041-2070, y 2071-2100) en diferentes Demarcaciones Hidrográficas. Con datos del AEMET, procedentes del *downscaling* dinámico de EUROCORDEX (MITECO 2018a).

Los trabajos realizados por el MITECO en 2019 muestran el gran alcance de las medidas de adaptación para minimizar inundaciones en el futuro en España. Los trabajos incluyen dos guías de adaptación al riesgo de inundación, una para explotaciones agrícolas y ganaderas (MITECO 2019a) y otro para sistemas urbanos de drenaje sostenible (MITECO 2019b). Se recomienda consultar la página del ministerio para la información más actualizada con respecto a informes para la aplicación de la Directiva de Inundaciones²⁵. Asimismo, se recomienda consultar a Garrote et al. (2020) para una revisión de la literatura y de mejoras prácticas en la modelización en los eventos hidrológicos extremos y el cambio climático.

²⁵ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/planes-gestion-riesgos-inundacion/Cambio-climatico-e-inundaciones.aspx>

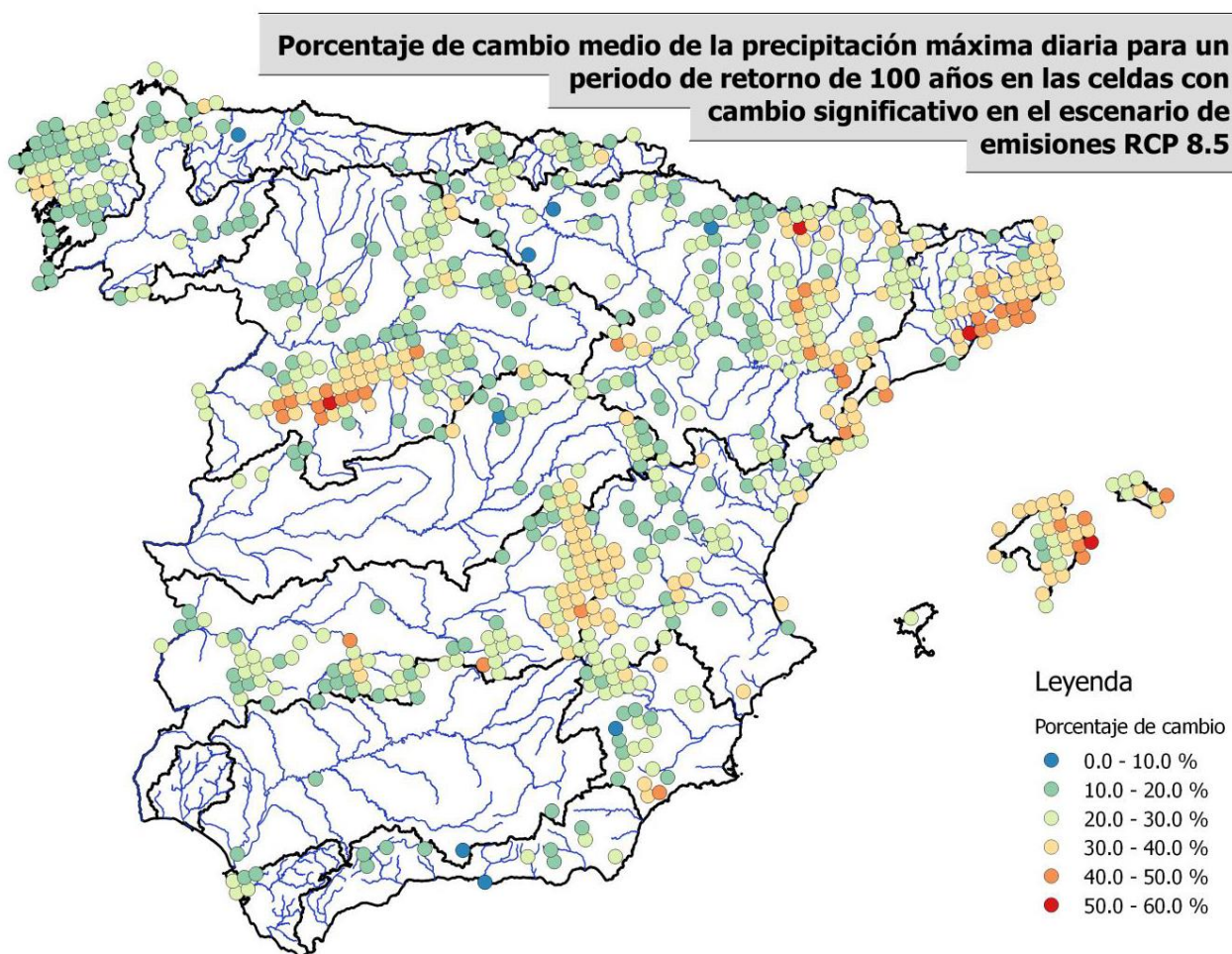


Figura 2.5. Cambios porcentuales de la precipitación en las celdas que cumplen los umbrales de significancia, para la España peninsular e islas Baleares y según el escenario de emisiones RCP 8.5 (MITECO 2018b).

En este momento del ciclo de planificación de los planes de gestión del riesgo de inundación (PGRI) se está poniendo especial énfasis en mejorar el conocimiento, por ejemplo, en cuanto a paleo crecidas, en la cartografía de zonas inundables con una visión más dinámica, en mejorar los sistemas de alerta para la peligrosidad y la información relativa a las tendencias que aún no están claras en relación con el cambio climático (ver Caja 2.1). Asimismo, hay estudios que aportan un mejor conocimiento en cuanto a las inundaciones pluviales con el análisis de casos de estudio, como por ejemplo los casos de Barcelona y Badalona (Martínez Gomáriz et al., 2019).

Cuadro 2.2.**Serie de Guías del MITECO y CCS en relación al impacto de inundaciones**

En estudios recientes en la zona de Medina del Campo (Cuenca del Duero), Aguilera et al. (2018) analizaron cuatro tipos de eventos extremos de la zona: sequías, inundaciones (usando índice de precipitación estandarizado o SPI por sus siglas en inglés), olas de calor y olas de frío (según la AEMET). Los resultados obtenidos indican que las temperaturas máximas y mínimas que definen las olas de frío y calor se han incrementado ligeramente en los últimos años. También que no hay eventos simultáneos de sequías y olas de calor o inundaciones y olas de frío. Asimismo, Llorente et al. (2018), en un estudio en la misma zona, demuestran que se pueden observar tendencias después de un tratamiento adecuado de los valores diarios de precipitación. La precipitación máxima diaria promedio muestra ciclos de 7 a 9 años con una tendencia general decreciente. La precipitación anual muestra ciclos más grandes de alrededor de 17 a 22 años, nuevamente dentro de una tendencia decreciente. Esto, a su vez, dará lugar a sequías e inundaciones más severas para el futuro cercano, con posibles impactos socioeconómicos y ecológicos en la región. Por lo tanto, la gestión de recursos, tanto para el futuro cercano como para el lejano, debe centrarse en aumentar la resiliencia del sistema ante eventos hidrológicos extremos.

Sequías

El análisis de las sequías es complejo, con diferentes metodologías y tipos de sequías como las meteorológicas, hidrológicas y agrícolas. Tal y como explican García-Herrera et al. (2019) se pueden utilizar dos índices para caracterizar las sequías. El SPI solo considera la precipitación, mientras que el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI por sus siglas en inglés) también toma en cuenta la demanda de evaporación atmosférica (AED por sus siglas en inglés), siguiendo un enfoque basado en la ecuación FAO-56 Penman-Monteith, que considera como entradas la duración de la luz solar, la temperatura, la velocidad del viento en la superficie y la humedad relativa.

Un informe reciente, bajo el proyecto PESETA (Camarelli et al., 2020) a nivel europeo, indica cómo con el calentamiento global, las sequías serán más frecuentes, durarán más y serán más intensas en el sur y el oeste de Europa. Con un calentamiento global de 3°C en 2100, las pérdidas por sequía podrían ser 5 veces mayores que en la actualidad, con el mayor aumento de pérdidas por sequía proyectado en las regiones mediterráneas. Las consecuencias sobre los ecosistemas generalmente no se monetizan y, por lo tanto, no se han reflejado en las estimaciones de pérdidas.

Vicente-Serrano et al. (2014), centrándose en los impactos de la sequía en sistemas sensibles, estimaron el impacto del aumento de la demanda evaporativa y una mayor severidad de las sequías en la península ibérica en las últimas cinco décadas. Se observa un aumento de la aridez causado por un aumento significativo de la temperatura (1,5 °C anual; 2,1 °C en verano) junto con una disminución de las precipitaciones (15,6%). Aunque la variabilidad de la sequía se ha controlado principalmente por las precipitaciones, la sequía se ha visto agravada por una mayor demanda de evaporación de la atmósfera, que aumentó un 7,3% anual y un 10,4% en verano en el período 1961-2011; esto muestra que el SPEI refleja una mayor severidad de la sequía en relación con el SPI. Es probable que la gravedad de la sequía y la escasez de agua aumenten en las próximas décadas (Estrela et al., 2012). Asimismo, Marcos-García et al. (2017) indican que los resultados de la cuenca del Júcar muestran un aumento generalizado en la intensidad y magnitud de las sequías meteorológicas e hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, debido a los efectos combinados de la reducción de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración.



Autora: E. López-Gunn

Como comentan los autores, si bien es difícil aislar los efectos del calentamiento sobre el caudal de los arroyos debido a la importante influencia humana en las cuencas hidrográficas, hay evidencia empírica de que las sequías hidrológicas más extremas pueden verse favorecidas por una ET₀ (evapotranspiración de referencia) más alta, confirmada mediante la observación de cuencas naturales y reguladas. Asimismo, los indicadores

indirectos apuntan a un aumento de la severidad de la sequía como consecuencia del aumento de la temperatura, con sistemas naturales que dependen del agua del suelo mostrando una menor cobertura vegetal (Vicente-Serrano et al., 2012) y un crecimiento forestal reducido (Carnicer et al., 2011), principalmente en zonas áridas. Las especies de plantas en estas áreas están aclimatadas a frecuentes sequías de precipitación, pero el aumento de la temperatura y la ET₀ están introduciendo una nueva fuente de estrés por humedad del suelo que, probablemente, sea la explicación del aumento de los impactos ecológicos y la reducción de los recursos hídricos disponibles. Considerando las proyecciones de temperatura para mediados del siglo XXI en el sur de Europa, la vulnerabilidad de los sistemas hidrológicos a la sequía probablemente aumentará.

A nivel europeo, García Herrera et al. (2019) analizan la sequía récord que afectó a Europa occidental y central desde julio de 2016 a junio de 2017 causando impactos generalizados en el suministro de agua, la agricultura y la producción de energía hidroeléctrica, y que se asoció con incendios forestales en la península ibérica. La diferencia con otras sequías comunes a escala continental es que afectó a las regiones del norte y sur de Europa. Con condiciones de sequía en más del 90% de Europa central-occidental, alcanzó valores récord (con respecto a 1979-2017) en el 25% del área. Por lo tanto, el evento puede considerarse como la sequía europea más severa a escala continental desde el año 1979. Usando modelos análogos de circulación de flujo se demuestra que esta sequía fue más severa de lo que hubiera sido en el pasado cercano. Sin embargo, un estudio de Vicente Serrano et al. (2020) relativo a toda Europa occidental indica cautela ya que, con pocas excepciones, las tendencias de las sequías en Europa Occidental no son estadísticamente significativas en el largo plazo. Asimismo, los cambios en las sequías son espacialmente variables. Por lo tanto, la evaluación local y regional detallada de la variabilidad

de la sequía es una prioridad. Tales evaluaciones proporcionarían a los tomadores de decisiones y políticas la información más apropiada para comprender el cambio y la gestión de la sequía.

Varios estudios (Pernia y Fornes, 2009; Bolaños Chavarría and Betancur Vargas, 2018) abordan la importancia de las aguas subterráneas en las sequías. En periodos de escasez, las aguas subterráneas de ciertos acuíferos con buenas reservas y capacidad de almacenamiento presentan una mayor inercia frente a una sequía y pueden aportar recursos clave en la misma área de consumo (sin necesidad de transporte y pérdidas asociadas por mayor ETP, o falta de aportaciones en periodos de sequía). De esta forma pueden suplir picos de demanda, garantizando también mejor calidad por su filtración natural y capacidad de almacenamiento (Bolaños Chavarría and Betancur Vargas, 2018). Esta capacidad de almacenamiento de agua y de amortiguación frente a sequías depende en parte de la litología del acuífero, p.e.: a) acuíferos detríticos como el acuífero terciario de Madrid, o la zona de marismas del acuífero Almonte-Marismas (Huelva y Sevilla) donde se ubica el Parque Nacional de Doñana; b) acuíferos kársticos donde un cambio en el régimen pluvial puede favorecer descargas rápidas y más caudalosas de las aguas subterráneas en surgencias naturales de origen kárstico; o c) acuíferos carbonáticos y evaporíticos fundamentalmente que afloran en el sector oriental y meridional de la península y de las Islas Baleares (Pernia y Fornes, 2009). En España este tipo de acuíferos abunda en el noroeste peninsular y en el Sistema Central, y son claves para el suministro de zonas rurales. Asimismo, será muy importante para el futuro la recarga de acuíferos tanto en zonas urbanas como rurales como mitigación a los efectos del cambio climático (Escalante et al., 2019).

El enfoque de las 3R: recarga, retención y reutilización del agua, propuesto por la UNESCO junto con la Asociación Internacional de Hidrogeólogos, plantea maximizar la capacidad de amortiguamiento frente a fenómenos extremos mediante un buen manejo del agua subterránea y del agua de lluvia, como herramientas fundamentales de adaptación frente a la alta variabilidad en la disponibilidad de recursos hídricos que resulte de los efectos del cambio climático (Flores Elizondo y Kachadourian Marra, 2011).

2.7. Ecosistemas acuáticos y los impactos del cambio climático

En esta sección se hace un resumen de cómo puede afectar el cambio climático tanto a especies como a ecosistemas de aguas continentales.

Nivel de especie

Muchas especies acuáticas son muy sensibles a la temperatura del agua. El aumento de la temperatura media del agua y la recurrencia de olas de calor, junto con la disminución de los flujos de agua, podría terminar reduciendo los nichos actuales de muchas especies de agua dulce (CEDEX, 2012c). Los bajos flujos de agua aumentan la concentración de la contaminación antropogénica derivada del uso del suelo (Ferrer et al., 2012) y de las zonas urbanas (Corominas y Neumann, 2014). Esto puede dar lugar a un aumento de las concentraciones de nutrientes y procesos de eutrofización (p.e. proliferación de cianobacterias u otras algas), lo que puede repercutir tanto en la estabilidad de los sistemas ecológicos como en una amenaza para la salud humana. Según un reciente informe (MedEcc 2019), en la biota de los arroyos se han observado, como consecuencia del cambio climático, cambios en la distribución de organismos hacia latitudes o elevaciones mayores, así como en la composición de las comunidades de organismos, que a menudo resultan en homogeneización y pérdida de diversidad. Las especies capaces de sobrevivir en arroyos con flujos bajos o intermitentes (generalmente especies de pequeño tamaño y ciclos de vida cortos) son menos vulnerables que aquellas que requieren flujos mayores y continuos (Filipe et al., 2013).

Asimismo, el cambio climático puede afectar la fauna piscícola y de macroinvertebrados. En algunos estudios (Muñoz-Mas et al, 2015) se ha puesto de manifiesto la utilidad para la gestión de la simulación del hábitat físico y la cuantificación de las variaciones en el hábitat de la biota fluvial (Bovee et al., 1998). Gracias a estas

simulaciones, se puede evaluar el efecto de diferentes alternativas de gestión, y acciones de restauración que consideren los efectos potenciales del cambio climático (Almodóvar et al., 2012).

En el estudio de Muñoz-Mas et al. (2015), al igual que otros autores (Ayllón et al., 2010, Santiago et al., 2015), analizando en el río Cabriel (Cuenca del Júcar) los cambios en el hábitat adecuado disponible para la trucha marrón grande (*Salmo trutta*) en dos escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5) a corto plazo (2011-2040), anticipan una reducción significativa del caudal y un aumento de la temperatura del agua (tasa media de cambio de aproximadamente -25% y +4% respectivamente). Esto se traduce en una disminución del número de días con un hábitat óptimo para esta especie, que debería soportar condiciones ambientales no óptimas en un 82% de los días de su ciclo.

Asimismo, el cambio climático puede tener un impacto en las aves acuáticas por la disminución de la profundidad del agua y la duración del período de inundación. Ramírez et al. (2017) analizaron el impacto del cambio climático en 69 especies en una red característica de humedales mediterráneos en el suroeste de España. Encontraron que, siendo la salinidad determinante, la idoneidad ambiental para aves buceadoras y recolectoras de vegetación disminuirá en escenarios climáticos futuros, mientras que muchas aves pequeñas se beneficiarán de las nuevas condiciones. Las especies residentes y las que se reproducen en esta red de humedales también sufrirán un impacto más negativo que las que utilizan esta área para pasar el invierno o hacer escala.

Nivel de ecosistema

El aumento de la intermitencia de los flujos de agua o los cambios estacionales (por ejemplo, debido a la dinámica del deshielo de la nieve) pueden destruir algunos hábitats. Asimismo, el aumento de la ETP puede afectar a los ecosistemas asociados a las aguas subterráneas más superficiales (p.e. en los humedales, manantiales y ríos).

En cuanto al impacto en lagos y humedales, Borja et al. (2012) identifican que entre los impulsores de su cambio directo en España están cambios de uso del suelo, la sobreexplotación de los recursos hídricos (especialmente de los acuíferos) tienen el mayor peso con mayor peso, seguido por la contaminación y el cambio climático, la proliferación de especies invasoras, y los cambios en los ciclos biogeoquímicos.

Según el MedEcc (2019), los ecosistemas de agua dulce del Mediterráneo y los humedales continentales están afectados por los descensos en los niveles del agua y la reducción de la calidad del agua (Hermoso y Clavero, 2011). Los humedales en ambientes secos son puntos críticos de diversidad biológica y productividad, y sus ecosistemas están en riesgo de extinción si la escorrentía disminuye y el humedal se seca (Zacharias y Zamparas, 2010).

En relación con los humedales, De la Hera et al. (2017) documentan que en España hay unas 114.000 ha de humedales, de las cuales 98.000 corresponden a humedales costeros y 16.000 a humedales interiores. Hay 74 humedales españoles reconocidos como sitios Ramsar (303.000 ha) donde 59 de ellos tienen interacciones con acuíferos, pero de estos algunos son importantes parques nacionales, como pueden ser Doñana, las Tablas de Daimiel, o las Lagunas de Ruidera. Por ejemplo, hay estudios en Doñana o en los humedales del Alto Empordà (Fatoric et al., 2014) donde ya se indica un aumento de la temperatura del aire, el cambio de las precipitaciones, las sequías prolongadas y el cambio de estaciones. Estos cambios fueron más pronunciados en los últimos veinte años y son de particular preocupación tanto en los humedales como en las áreas circundantes.

Un reciente estudio de Lefebvre et al. (2019) sobre el impacto del cambio climático en humedales de todo el mediterráneo indica que éstos han disminuido de forma significativa en el siglo pasado con una tendencia que aun continua, y donde el cambio climático se ha convertido en una presión adicional, especialmente en regiones como la mediterránea, que ya cuentan con un déficit de agua. El 97% de las 229 localidades estudiadas en la Cuenca Mediterránea parecen tener hábitats todavía en buen estado en las condiciones actuales. Sin embargo, para el 2050, este porcentaje sería del 81% y 68% en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente,

disminuyendo aún más al 52% y 27% para 2100. España se encuentra entre los países con mayor riesgo de degradación y pérdida de humedales, pudiendo verse afectada la biodiversidad y los refugios para fauna y flora, así como los aspectos recreativos y culturales.

En cuanto a los caudales ambientales, el flujo de base y el cambio climático, clave para p. e. los ecosistemas dependientes del agua subterránea, De Graaf et al. (2019) hicieron un análisis a nivel global sobre los límites de caudales ambientales para el bombeo de agua subterránea a escala global, en base a simulaciones de modelos climáticos generales (GCMs) cubriendo el período 1960-2100. Después de 2010, las tendencias de agotamiento primero comienzan a disminuir para dos GCMs (2010-2030), luego aumenta de nuevo, pero no tan rápidamente como antes. Las diferencias entre los modelos globales son grandes, lo que demuestra que, incluso bajo demandas fijas de agua industrial, doméstica y área de riego, el cambio climático, a través del aumento de la demanda de riego, puede tener un impacto importante en los volúmenes futuros de vaciado del agua subterránea. En general, se estima que el vaciado aumentará de 4.190 km³ en 2010 a 7.490 km³ (5.360-10.042 km³) dependiendo del modelo climático utilizado. Sería interesante un estudio parecido a nivel España, al igual que se ha hecho por ejemplo en EE. UU. para el flujo de base (Ficklin et al., 2016).

2.8. Datos: observación y modelización de procesos y evidencia

Un aspecto importante es el reservorio de información y datos que ofrecen los ecosistemas. Por ejemplo, en el Parque Natural de Doñana (en el SO de España), algunos estudios han demostrado el valor de los nombres de lugares como indicadores ambientales, aplicados a los efectos del cambio climático en el pasado. En este caso, en un área de estudio poco alterada por el hombre hasta la segunda mitad del siglo XX, y con un patrimonio muy rico en humedales, Sousa et al. (2009) han comprobado cómo la toponimia refleja la desecación de humedales, en una regresión relacionada con el final de la Pequeña Edad del Hielo y con el inicio del calentamiento en el sur de Europa durante el siglo XX (Sousa et al., 2009, y 2010). Asimismo, sería muy importante priorizar estudios y proyectos para la recopilación sistemática y a largo plazo de datos, como el proyecto con enfoques múltiples actualmente en curso (Kohfalhl et al., 2019)²⁶. Asimismo, ecosistemas como lagunas salinas, como p.e. las Lagunas reales (Castilla León), aportan un enorme valor a la ciencia mediante su huella salina con respecto a cómo funciona el ciclo hidrológico, claves para entender mejor la relación entre las aguas superficiales y subterráneas y el clima (Mediavilla et al., 2020). En esta misma línea se han creado en España reservas fluviales que también son claves para la adaptación basada en ecosistemas, vulnerables en sí al cambio climático, pero también importantes para el conocimiento de los sistemas.

La disponibilidad de mejores datos e información más detallada permitirá ofrecer respuestas más ajustadas (p.e., zonas como el Delta del Ebro o Doñana para convertir zonas de arrozal en humedales) para mitigar los efectos del cambio climático (p.e., por secuestro de carbono) (Anisha et al., 2020) así como para mejorar la calidad del agua de la escorrentía agrícola (Ibáñez et al., 1997, Calvo Cubero, 2014, Iglesias et al., 2015).

3. REFERENCIAS

- Aguilera, H., De la Hera, A., Llorente, M. and Bejarano, M. D., 2018. Preliminary analysis of extreme events in the región of Medina del Campo, Spain). EGU2018-19590-1. European Geosciences Union (EGU), 730497, 730497.
- Aguilera, H., Heredia, J., de la Orden Gómez, J.A., De la Hera, A. and del Barrio, V., 2019). Assessing the feasibility of managed aquifer recharge through unsaturated zona modelling with VS2DTI in a multilayer system. (Eds. J. Jaime Gómez and Bartolomé Andreo). Proceedings of IAH2019, the 46th Annual Congress of the International Association of Hydrogeologists., 604.

²⁶ <http://www.igme.es/CLIGRO/>

- Alfieri, L., Dottori, F., and Feyen, L., 2017. JRC PESETA III project. Task 7 – River floods. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC110308/task_7_floods_final_report_dec2018.pdf
- Almodóvar, A., Nicola, G.G., Ayllón, D. and Elvira, B., 2012) Global warming threatens the persistence of Mediterranean brown trout. *Global Change Biol.* 18 (5), 1549–1560. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02608.x>.
- Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A. and Ochege, F. U., 2020. Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 125163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>
- Amblar Francés, P., Casado Calle, M.J., Pastor Saavedra, A., Ramos Calzado, P. y Rodríguez Camino, E., 2017) Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del ipcc-ar5 AEMET.
- Anisha, N.F., Mauroner, A., Lovett, G., Neher, A., Servos, M., Minayeva, T., Schutten, H. and Minelli, L., 2020) Locking Carbon in Wetlands: Enhancing Climate Action by Including Wetlands in NDCs. Corvallis, Oregon and Wageningen, The Netherlands: Alliance for Global Water Adaptation and Wetlands International.
- Ayllón, D., Almodóvar, A., Nicola, G.G. and Elvira, B., 2010. Ontogenetic and spatial variations in brown trout habitat selection. *Ecol. Freshw. Fish.* 19 (3), 420–432. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0633.2010.00426.x>.
- Baena-Ruiz, L., Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J., Renau-Pruñonosa, A., Morell, I., Senent-Aparicio, J., and Llopis-Albert, C., 2020. Summarizing the impacts of future potential global change scenarios on seawater intrusion at the aquifer scale. *Environmental Earth Sciences*, 79(5), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8847-2>.
- Benateau, S., Gaudard, A., Stamm, C. and Altermatt, F., 2019. Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 Project. Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland. 110 pp.
- Benini, L., Antonellini, M., Laghi, L., 2016. Assessment of water resources availability and groundwater salinization in future climate and land use change scenarios: a case study from a coastal drainage basin in Italy. *Water Resour Manage* 30:731–745. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1187-4>
- Borja, C., Camacho, A. y Florin, F., 2012. Lagos y humedales en la evaluación de los ecosistemas del milenio en España. *Ambienta*, 98(marzo), 82–91.
- Bolaños Chavarría, S. y Betancur Vargas, T., 2018. Estado del Arte sobre el Cambio Climático y las Aguas Subterráneas. Ejemplos en Colombia. *Revista Politécnica*, 14(26), 52–64. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a5>
- Bovee, K.D., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J. and Henriksen, J. (1998. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology Geological Survey - Information and Technology Report 1998-0004, Fort Collins, CO (USA), pp. 130.
- Carnicer J et al., 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 108 1474–8
- Calvo-Cubero, J., 2014. Multifunctional experimental assessment in a newly established Mediterranean restored marsh: marsh elevation, carbon accumulation and pollutant concentration reduction. PhD Thesis May 2014. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1536.1362>
- Cammalleri, C., Naumann, G., Mentaschi, L., Formetta, G., Forzieri, G., Gosling, S., Bisselink, B., Roo, De A. and Feyen, L., 2020. Global warming and drought impacts in the EU. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/597045>
- CEDEX, 2010. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. Informe. Tomo único. Diciembre de 2010. Clave: CEDEX 42-407-1-001.
- CEDEX, 2012a. Efectos potenciales del cambio climático en las demandas de agua y estrategias de adaptación. Informe. Tomo único. Noviembre de 2012. Clave: CEDEX 45-407-1-001.
- CEDEX, 2012b. Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación. Informe. Tomo único. Diciembre de 2012. Clave: CEDEX 43-308-5-001.
- CEDEX, 2012c. Efecto del cambio climático en el estado ecológico de las masas de agua. Informe. Tomo único. Junio de 2012. Clave: CEDEX 44-407-1-001.
- CEDEX, 2012d. Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Diciembre 2012. Tomo único. Clave: CEDEX 40-407-1-001.
- CEDEX, 2017. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Julio de 2017. Informe final. Tomo único. Clave: CEDEX 42-415-001.
- Cerdá, E., Fernández-Haddad, T., Foudi, S., Galaraga, I., Martínez, A., Martínez, P- Montoya, D.H, Nortes, D. Quiroga, S y Suárez, C., 2017. Valoración económica de los efectos del cambio climático en España en el sector de recursos hídricos. Marzo de 2017 (unpublished)
- Corominas, L. and Neumann, M.B., 2014. Ecosystem-based management of a Mediterranean urban wastewater system: A sensitivity analysis of the operational degrees of freedom. *Journal of Environmental Management* 143, 80-87.
- Consorcio de Compensación de Seguros y MAPAMA, 2017. Guía para la reducción de la vulnerabilidad de los edificios frente a las inundaciones.
- Collados-Lara, A.J., Pulido-Velazquez, D., and Pardo-Igúzquiza, E., 2018. An integrated statistical method to generate potential future climate scenarios to analyse droughts. *Water (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/w10091224>

- Collados-Lara, A.J., Pulido-Velazquez, D., Mateos, R.M., and Ezquerro, P., 2020. Potential impacts of future climate change scenarios on ground subsidence. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010219>
- Chirivella Osmá, V., Capilla Romá, J.E. and Pérez Martín, M.A., 2014. Modelling regional impacts of climate change on water resources: the Júcar basin, Spain. *Hydrol. Sci. J.* 60 (1), 30-49. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.866711>
- Díez, H.A., Laín, H.L., and Llorente, M., 2008. Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones Guía metodológica para su elaboración. In Instituto Geológico y Minero de España IGME. p. 113-118. Madrid, España.
- Díez-Herrero, A., Laín-Huerta, L., and Llorente-Isidro, M., 2009. A Handbook on Flood Hazard Mapping Methodologies. (Issue 2). Publications of The Geological Survey of Spain (Igme). Series: Geological Hazards/Geotechnics No. 2.
- de la Hera, A., Custodio Gimena, E., and García Cortés, À., 2017. Evaluating ecosystem services and drivers of change in Spanish groundwater-related wetlands included in the Ramsar Convention. *AIMS Environmental Science*, 4(2), 232–250. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.2.232>
- de la Hera-Portillo, Á., López-Gutiérrez, J., Zorrilla-Miras, P., Mayor, B., and López-Gunn, E., 2020. The ecosystem resilience concept applied to hydrogeological systems: A general approach. *Water (Switzerland)*, 12(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w12061824>
- de Graaf, I. E. M., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H., and Bierkens, M. F. P., 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, 574(7776), 90–94. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4>
- Doll, P., 2009. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.* 4 (3), 035006.
- Doummar, J., Hassan Kassem, A. and Gurdak, J. J., 2018. Impact of historic and future climate on spring recharge and discharge based on an integrated numerical modelling approach: Application on a snow-governed semi-arid karst catchment area. *Journal of Hydrology*, 565, 636–649. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.062>
- Ebro Resilience, 2020. Ebro Resilience: estrategia general de actuaciones Enero (no publicado) <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/delimitacion-y-restauracion-del-dominio-publico-hidraulico/estrategia-nacional-restauracion-rios/Plan-PIMA-ADAPTA-Proyecto-Life-Integrado-Ebro-Resilience.aspx>.
- EC, 1975. European Council Directive 75/440/CEE of the 16 June 1975 for Provision of Water to Provide Potable Water. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:31975L0440>
- EC, 2006. European Council Directive 2006/44/EC of the 6 September 2006 on the Quality of Fresh Waters Needing Protection or Improvement in Order to Support Fish Life. Available online: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:264:0020:0031:EN:PDF>
- Elizondo, R. F. and Marras, A. K., 2011. “Gestión Integral del Recurso Hídrico en el Cambio Climático. Caso del Área Metropolitana de Guadalajara, México (unpublished)”
- Escalante, E. F., Sebastián Sauto, J. S. and Gil, R. C., 2019. Sites and indicators of MAR as a successful tool to mitigate climate change effects in Spain. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091943>
- Estrela, T., Perez-Martin, M. A. and Vargas, E., 2012. Impacts of climate change on water resources in Spain *Hydrol. Sci. J.* 57 1154–67.
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España, 2011. La evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España. Síntesis de Resultados. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid.
- Fatorić, S., Morén-Alegret, R. and Kasimis, C., 2014. Exploring climate change effects in Euro-Mediterranean protected coastal wetlands: the cases of Aiguamolls de l'Empordà, Spain and Kotychi-Strofylia, Greece. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 21(4), 346–360. <https://doi.org/10.1080/13504509.2014.888377>
- Ferrer J., Pérez-Martín M.A., Jiménez S., Estrela T. and andreu J., 2012. GIS-based models for water quantity and quality assessment in the Júcar River Basin, Spain, including climate change effects. *Science of the Total Environment* 440, 42-59.
- Ficke, A.D., Myrick, C.A. and Hansen, L.J., 2007. Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 17(4), 581-613.
- Ficklin, D.L., Robeson, S.M. and Knouft, J.H., 2016. Impacts of recent climate change on trends in baseflow and stormflow in United States watersheds. *Geophys. Res. Lett.* 43, 5079–5088.
- Filipe, A.F., Lawrence, J.E. and Bonada, N., 2013. Vulnerability of stream biota to climate change in Mediterranean climate regions: a synthesis of ecological responses and conservation challenges. *Hydrobiologia*, 719(1), 331-351.
- Francésa, F. and Bussib, G., 2014. Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. *Ribagua*, 1(1), 14–25. [https://doi.org/10.1016/s2386-3781\(15\)30004-9](https://doi.org/10.1016/s2386-3781(15)30004-9)
- García-Herrera, R., Garrido-Pérez, J. M., Barriopedro, D., Ordóñez, C., Vicente-Serrano, S. M., Nieto, R., Gimeno, L., Sorí, R. and Yiou, P., 2019. The European 2016/17 drought. *Journal of Climate*, 32(11), 3169–3187. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0331.1>
- Garrido, A., Willaarts, B., López-Gunn, E. and Rey, D., 2012. Considerations on climate variability and change in Spain. In De Stefano and Llamas (ed) *Water, Agriculture, and the Environment in Spain: Can We Square the Circle?*.

- Garrote, L., Sordo-Ward, A. y Iglesias, A., 2020. Eventos hidrológicos extremos y cambio climático: mejoras prácticas de modelización Fundación Canal, UPM y Fundación Agustín de Betancourt (Madrid). <https://www.fundacioncanal.com/tienda/producto/eventos-hidrológicos-extremos-y-cambio-climático/>
- Gilaberte-Búrdalo, M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E., Jerez, S., Alonso-González, E., López-Martín, F. and Pino-Otín, M.R., 2017. Condition Reliability in the Spanish and andorran Pyrenees for the Second Half of the 20th Century. *Appl. Geogr.*, 79, 127–142.
- González-Zeas, D., Erazo, B., Lloret, P., De Bièvre, B., Steinschneider, S. and Dangles, O., 2019. Linking global climate change to local water availability: Limitations and prospects for a tropical mountain watershed. *Science of the Total Environment*, 650, 2577–2586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.309>
- Green, T.R., Bates, B.C., Charles, S.P. and Fleming, P.M., 2007. Physically based simulation of potential effects of carbon dioxide-altered climates on groundwater recharge. *Vadose Zone J.* 6 (3), 597–609.
- Guardiola-Albert, C., García Bravo, N., Mediavilla, C. and Martín Machuca, M., 2009. Gestión de los recursos hídricos subterráneos en el entorno de Doñana con el apoyo del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas. *Boletín Geológico y Minero*, 120(3), 361–376.
- Gupta, H.V., Sapriza-Azuri, G., Jódar, J. and Carrera, J., 2018. Circulation pattern-based assessment of projected climate change for a catchment in Spain. *Journal of Hydrology*, 556, 944–960. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.032>
- Gurdak, J.J. and Roe, C.D., 2010. Review: recharge rates and chemistry beneath playas of the High Plains aquifer, USA. *Hydrogeol. J.* 18 (8), 1747–1772.
- Hermoso, V. and Clavero, M., 2011. Threatening processes and conservation management of endemic freshwater fish in the Mediterranean basin: a review. *Marine and Freshwater Research*, 62(3), 244–254
- Herrera-Pantoja, M. and Hiscock, K.M., 2008. The effects of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain. *Hydrol. Process.* 22 (1), 73–86.
- Hincapié, S. and Verdugo, J., 2020. Activismo, Medio Ambiente y Derechos Humanos en América Latina. <https://bit.ly/3fuTJlp>
- Ibáñez, C., 2009. Impacts of climate change on Mediterranean coastal wetlands and lagoons. in: Instituto de Ecología A. C. INECOL ed. *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*. Mexico DF;
- Iglesias, A., Sánchez, B., Garrote, L. and López, I., 2017. Towards Adaptation to Climate Change: Water for Rice in the Coastal Wetlands of Doñana, Southern Spain. *Water Resources Management*, 31(2), 629–653. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0995-x>
- Jyrkama, M.I. and Sykes, J.F., 2007. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *J. Hydrol.* 338, 237–250.
- IPCC, 2018. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press
- IPCC, 2019a. Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal, Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].
- IPCC, 2019b. Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- JRC, 2018. Impact of a changing climate, land use, and water usage on Europe's water resources A model simulation study. JRC Technical Reports. doi: 10.2760/847068
- Kohfahl, C., Molano-Leno, L., Martínez, G., Vanderlinden, K., Guardiola-Albert, C. and Moreno, L., 2019. Determining groundwater recharge and vapor flow in dune sediments using a weighable precision meteorological lysimeter. *Science of the Total Environment*, 656, 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.415>
- Kovalevskii, V.S., 2007) Effect of climate changes on groundwater. *Water Resour.* 34 (2), 140–152.
- Lefebvre, G., Redmond, L., Germain, C., Palazzi, E., Terzaghi, S., Willm, L. and Poulin, B., 2019. Predicting the vulnerability of seasonally-flooded wetlands to climate change across the Mediterranean Basin. *Science of the Total Environment*, 692, 546–555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.263>
- Loáiciga, H.A. and Pingel, T.J. and Garcia, E.S., 2012. Sea water intrusion by sealevel rise: scenarios for the 21st century. *Groundwater* 50(1):37–47. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00800.x>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E. and Zabalza, J., 2012. Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*, 414–415: 463–75.

- Llorente, M., Bejarano, M.D., De la Hera, A. and Aguilera, H., 2018. Precipitation trends in the Medina del Campo groundwater body region (Spain): towards implementing nature-based solutions for droughts and floods events. *European Geosciences Union (EGU)*, 2(730497), 730497.
- Manzano-Arellano, M. y Lambán-Jiménez, J., 2012. Una aproximación a la evaluación de los servicios de las aguas subterráneas al ser humano en España *Ambienta*, 98(marzo),
- Marcos-Garcia, P., Lopez-Nicolas, A. and Pulido-Velazquez, M., 2017. Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin. *Journal of Hydrology*, 554, 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.028>
- Martos Rosillo, S. et al., 2018. Careos: siembra y cosecha de agua en la cuenca del río Bérchules (Sierra Nevada, Granada). *Pub. IGME*.
- Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J. M., Martínez-Moreno, F. J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A. and Durán, J. J., 2019. The oldest managed aquifer recharge system in Europe: New insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 578(August), 124047. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124047>
- Martinez- Gomariz, E., Locatelli, L., Guerrero, M., Russo, B. and Martínez, M., 2019. Socio-Economic Potential Impacts Due to Urban Pluvial Floods in Badalona (Spain) in a Context of Climate Change *Water* 201, 11, 2658; doi:10.3390/w11122658
- MedECC, 2019. Risks associated to climate and environmental changes in the mediterranean region: a preliminary assessment by the MedECC Network Science-policy interface – 2019.
- Mediavilla, R., Santisteban, J. I., López-Cilla, I., de Frutos, L. G. and de la Hera-Portillo, Á., 2020. Climate-dependent groundwater discharge on semi-arid Inland Ephemeral Wetlands: Lessons from holocene sediments of Lagunas Reales in Central Spain. *Water (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12071911>
- Merritt, W., Alila, Y., Barton, M., Taylor, B., Cohen, S. and Neilsen, D., 2006. Hydrologic response to scenarios of climate change in the Okanagan basin, British Columbia', *J. Hydrol.* 326, 79–108. 55, 59, 60.
- Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, U., Zhang, L., anderson, C.J., Jorgensen, S.E. and Brix, H., 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*. 28:583-597.
- MITECO, 2018a. Inundaciones y cambio climático Ministerio para la Transición Ecológica.
- MITECO, 2018b. Incorporación del cambio climático en la evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) en el segundo ciclo de aplicación de la Directiva de Inundaciones (2007/60/ce). Metodología general. Ministerio para la Transición Ecológica.
- MITECO, 2019a. Guías de adaptación al riesgo de inundación: explotaciones agrícolas y ganaderas. Ministerio para la Transición Ecológica.
- MITECO, 2019b. Guías de adaptación al riesgo de inundación: sistemas urbanos de drenaje sostenible, 2019. Ministerio para la Transición Ecológica.
- Molina, J. L., Pulido-Velázquez, D., García-Aróstegui, J. L. and Pulido-Velázquez, M., 2013. Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Journal of Hydrology*, 479, 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.038>
- Moragoda, N. and Cohen, S., 2020. Climate-induced trends in global riverine water discharge and suspended sediment dynamics in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 191, 103199. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103199>
- Muñoz-Mas, R., Lopez-Nicolas, A., Martínez-Capel, F. and Pulido-Velazquez, M., 2016. Shifts in the suitable habitat available for brown trout (*Salmo trutta* L.) under short-term climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 544, 686–700.
- OECC (2018) Resumen del estudio “Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Informe Final. CEDEX – Julio 2017”. Febrero de 2018. Oficina Española de Cambio Climático OECC.
- OECC, 2006. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- OECC, 2009. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Segundo Programa de Trabajo. Centro de Publicaciones. Oficina Española de Cambio Climático Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid
- OPCC, 2018. El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación. Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/editor/opcc-resumen-es.pdf>
- PAP/RAC., 2019. The Governance of Coastal Wetlands in the Mediterranean – a Handbook. B. Shipman and Ž. Rajković. Split, Croatia.
- Pernia J.M and Fornes, J., 2009. Climate Change and Groundwater. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 17(2), 172–178.
- Pons, M. R., San-Martín, D., Herrera, S. and Gutiérrez, J. M., 2010. Snow trends in Northern Spain: Analysis and simulation with statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 30(12), 1795–1806. <https://doi.org/10.1002/joc.2016>
- Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J. and Alcalá, F. J., 2018. Assessing impacts of future potential climate change scenarios on aquifer recharge in continental Spain. *Journal of Hydrology*, 567, 803–819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.077>
- Pulido-Velazquez, D., Renau-Pruñonosa, A., Llopis-Albert, C., Morell, I., Collados-Lara, A. J., Senent-Aparicio, J. and Baena-Ruiz, L., 2018. Integrated assessment of future potential global change scenarios and their hydrological impacts in coastal aquifers - A new tool

to analyse management alternatives in the Plana Oropesa-Torreblanca aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 3053–3074. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3053-2018>

Pulido-Velazquez, M., Peña-Haro, S., García-Prats, A., Mocholi-Almudever, A. F., Henriquez-Dole, L., Macian-Sorribes, H. and Lopez-Nicolas, A., 2015. Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4), 1677–1693. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1677-2015>

Ramírez, F., Rodríguez, C., Seoane, J., Figuerola, J. and Bustamante, J., 2018. How will climate change affect endangered Mediterranean waterbirds? *PLoS ONE*, 13(2), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192702>

Rodríguez-Blanco, M. L., Arias, R., Taboada-Castro, M. M., Nunes, J. P., Keizer, J. J. and Taboada-Castro, M. T., 2016. Potential impact of climate change on suspended sediment yield in NW Spain: A case study on the corbeira catchment. *Water (Switzerland)*, 8(10).

Rodrigues, L. C., Freire-González, J., Puig, A. G. and Puig-Ventosa, I., 2018. Climate change adaptation of alpine ski tourism in Spain. *Climate*, 6(2), 1–24. <https://doi.org/10.3390/cli6020029>

Sapriza-Azuri, G., Jódar, J., Carrera, J. and Gupta, H. V., 2015. Toward a comprehensive assessment of the combined impacts of climate change and groundwater pumping on catchment dynamics. *Journal of Hydrology*, 529, 1701–1712.

Santiago, J.M., García de Jalón, D., Alonso, C., Solana, J., Ribalaygua, J., Pórtolos, J. et al., 2015. Brown trout thermal niche and climate change: Expected changes in the distribution of cold-water fish in central Spain. *Ecohydrology* <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1653>.

Sousa, A., 2009. Consecuencias del cambio climático sobre los humedales. Capítulo 4. En: Consecuencias del cambio climático sobre los humedales. Editor: Leoncio García Barrón. Universidad Internacional de Andalucía.

Sousa, A., García-Murillo, P., Sahin, S., Morales, J., and García-Barrón, L., 2010. Wetland place names as indicators of manifestations of recent climate change in SW Spain (Doñana Natural Park). *Climatic Change*, 100(3), 525–557. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9794-9>

Taylor, R.G. et al., 2013. Groundwater and climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3, 322–329.

Touhami, I., Andreu, J.M., Chirino, E., Sánchez, J.R., Moutahir, H., Pulido-Bosch, A., Martínez- Santos, P. and Bellot, J., 2013. Recharge estimation of a small karstic aquifer in a semiarid Mediterranean region (southeastern Spain) using a hydrological model. *Hydrological Processes*, 27, 165–174.

Touhami, I., Chirino Miranda, E., andreu Rodes, J., Sánchez Montahud, J., Pulido Bosch, A., García Sánchez, E. and Bellot Abad, J., 2014. Efecto del cambio climático en la recarga del acuífero del Ventós (Alicante). *Geogaceta*, 56, 87–90.

Travassos, D., 2018. X Congresso Ibérico de Gestão e Planeamento da Água. Coimbra, 6-8 setembro 2018 1. 6–8.

Vaessen, V., and Brentführer, R., 2015. Module 11: Groundwater and Climate Change. Integration of Groundwater Management into Transboundary Basin Organizations in Africa, 4–17.

Valencia, J.L., Saa Requejo, A., Gascó, J.M. and Tarquis, A.M., 2010. A universal multifractal description applied to precipitation patterns of the Ebro River Basin, Spain. *Climate Research*, 44: 17–25.

Vicente-Serrano, S.M. and Cuadrat-Prats, J.M., 2007. Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro valley (NE Spain) during the second half of the twentieth century. *Theoretical and Applied Climatology*, 88: 247–258.

Vicente-Serrano, S.M. et al., 2012a. Accurate computation of a streamflow drought index *J. Hydrol. Eng.* 17 318–32.

Vicente-Serrano, S.M., Zouber, A., Lasanta, T. and Pueyo, Y., 2012b. Dryness is accelerating degradation of vulnerable shrublands in semiarid Mediterranean environments *Ecol. Monogr.* 82 407–28.

Vicente-Serrano, S.M. et al., 2014a) Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms *Clim. Dyn.* doi: 10.1007/s00382-013-1885-7

Vicente-Serrano, S.M., Peña-Gallardo, M., Hannaford, J., Murphy, C., Lorenzo-Lacruz, J., Dominguez-Castro, F., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Noguera, I., Harrigan, S. and Vidal, J. P., 2019. Climate, Irrigation, and Land Cover Change Explain Streamflow Trends in Countries Bordering the Northeast Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 46(19), 10821–10833.

Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Murphy, C., Hannaford, J., Reig, F., Peña-Angulo, D., Trambly, Y., Trigo, R.M., Mac Donald, N., Luna, M.Y., Mc Carthy, M., Van der Schrier, G., Turco, M., Camuffo, D., Noguera, I., García-Herrera, R., Becherini, F., Della Valle, A., Tomas-Burguera, M. and El Kenawy, A., 2020. Long-term variability and trends in meteorological droughts in Western Europe (1851–2018). *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.6719>

Werner, A.D., Simmons, C.T., 2009. Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Groundwater* 47(2):197–204.

Yusoff, I., Hiscock, K.M. and Conway, D., 2002. Simulation of the impacts of climate change on groundwater resources in eastern England. In: Hiscock, K.M., Rivett, M.O., Davison, R.M. (Eds.), *Sustainable Groundwater Development*. Geological Survey of London, London, pp. 325–344.

Zacharias, I. and Zamparas, M., 2010. Mediterranean temporary ponds. A disappearing ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 19(14), 3827–3834.

AGRADECIMIENTOS: Queremos agradecer el apoyo y tiempo de expertos que nos han dedicado su tiempo y han compartido su trabajo, en concreto (por orden alfabético): Mónica Aparicio (MITECO), Emilio Cerda (UCM), África de la Hera (IGME), Juan Fornés (IGME), David Pulido (IGME), Manuel Pulido (UPV), Luis Garrote (UPM), Sergio Martos (IGME), Marisol Manzano (UPCT), Fernando Magdaleno (MITECO), Miguel Llorente (IGME).

Capítulo 3

Impactos del cambio climático en los ecosistemas terrestres

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se contemplan los impactos del cambio climático en los ecosistemas terrestres, en particular los bosques, mientras que los impactos en la agricultura y la ganadería se recogen en el Capítulo 4. Asimismo, se introduce la problemática de la desertificación y los incendios forestales como procesos que están incidiendo en la degradación de los ecosistemas terrestres, y los impactos del cambio climático en los suelos. Se entiende que todos estos procesos están estrechamente relacionados con los cambios en las condiciones climáticas que ya se han observado y los cambios esperados en un futuro (Capítulo 1). Entendiendo que la desertificación y los incendios pueden afectar no solo a los ecosistemas, sino también a otros ámbitos del territorio como las infraestructuras y la población que habita los territorios que sufren estos procesos, en este capítulo no se ha tratado cómo el agravamiento de estos puede afectarles.

2. LA DESERTIFICACIÓN EN ESPAÑA

Contexto

La desertificación²⁷ es ya un problema real o una amenaza para una parte muy importante del territorio español. En la desertificación no existe una relación unívoca de causa-efecto, sino que constituye un proceso muy complejo con múltiples factores relacionados entre sí, que desencadenan un conjunto de procesos y acciones que resultan en una degradación más o menos progresiva. A los factores tradicionales que la provocan – incendios, erosión, salinización, etc.– se añaden actualmente los efectos relacionados con el cambio climático.

El Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) y las acciones del PNACC son dos programas independientes que se complementan. El PAND estima que, en la actualidad (figura 3.1), más de dos terceras partes del territorio español pertenecen a las categorías de áreas áridas, semiáridas y subhúmedas secas²⁸ (MAGRAMA, 2016). Las proyecciones sobre el cambio climático en España apuntan, entre otras cosas, hacia

²⁷ Se define como la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultantes de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas.

²⁸ La clasificación se establece en base al índice de aridez que expresa la relación entre la precipitación anual promedio y la evapotranspiración potencial.

una creciente aridez y un aumento de las temperaturas, es decir, señalan unos escenarios más favorables a los procesos de desertificación.

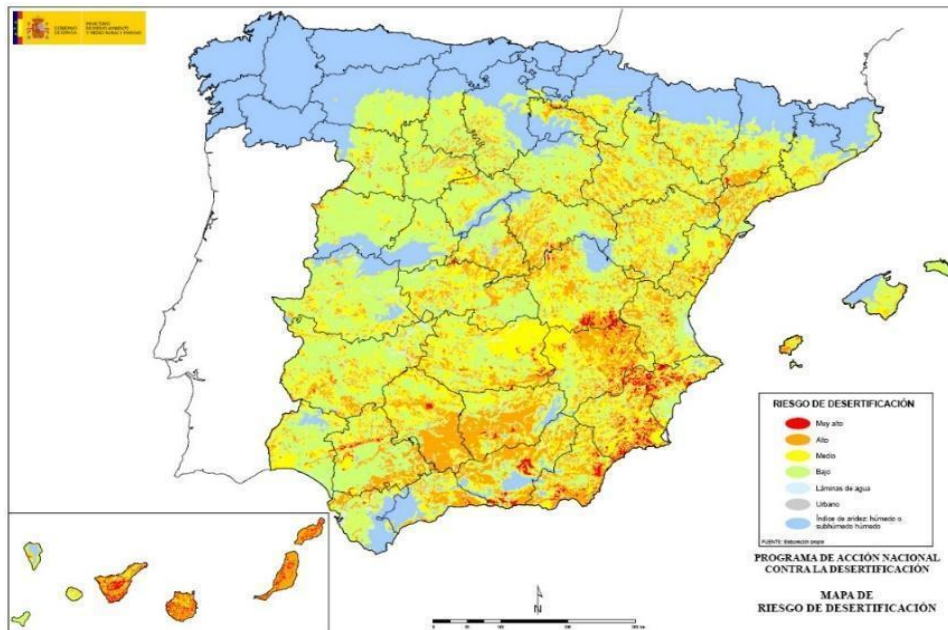


Figura 3.1. Mapa de la distribución geográfica de las categorías de riesgo de desertificación. Programa de Acción Nacional contra la desertificación (PAND). Fuente: Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND, 2008).

La influencia del cambio climático en los procesos de desertificación

Un estudio realizado por el MAGRAMA (2016) que utiliza los datos geoespacialmente explícitos proporcionados por los Escenarios-PNACC-2012 y un escenario intermedio de emisiones, el A1B²⁹, proyectó la evaluación a corto (2011-2040), medio (2041-2070) y largo plazo (2071-2100) de los valores de la aridez y del índice de erosividad de la lluvia (factor R). En el estudio se observa que, considerando conjuntamente la aridez y el factor R, todas las clases de riesgo presentan incrementos, pero son de bastante menor cuantía que teniendo únicamente en cuenta solo los cambios en la aridez. Analizando los cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia de las predicciones en la aridez, se observa que el riesgo aumenta en todas las zonas, y buena parte del territorio (22%), que antes se consideraba fuera de la definición de riesgo de desertificación atendiendo solamente al factor clima, pasaría a formar parte de la zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas (figura 3.2).

Además, los mayores incrementos relativos del porcentaje de superficie en cada clase entre los periodos 2071-2100 y el periodo de control se dan en las categorías de riesgo muy alto y alto, que aumentan en un 45,5% y un 82,4%, respectivamente. En cualquier caso, aun cuando no se produjeran incrementos cuantitativamente importantes de las pérdidas de suelo, el incremento previsto de la aridez apunta a un aumento del riesgo de desertificación.

²⁹ AEMET utiliza actualmente los escenarios RCP, los escenarios SRES (A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2) fueron definidos con anterioridad a los RCPs (2.5, 4.5, 6, 8.5). Ambos conjuntos de escenarios ofrecen una amplia gama de sendas de emisión. Muchos escenarios SRES y RCP son comparables, los tres pares SRES A1F1 / RCP8.5, SRES B2 / RCP6 y SRES B1 / RCP4.5- abarcan el rango de escenarios considerados hasta la fecha por la mayoría de los estudios de impacto. El escenario SRES A1B de uso frecuente no tiene contrapartida entre los RCP, y tampoco el escenario de mitigación fuerte RCP2.6 entre los escenarios SRES.

Es evidente que los ecosistemas más frágiles, con menos capacidad para adaptarse a los cambios previstos en la temperatura y la precipitación, serán los más vulnerables frente a la degradación. Se prevé un ligero incremento a corto plazo de las pérdidas del suelo por erosión hídrica y una disminución generalizada de las pérdidas a largo plazo, dado que se espera una disminución de la precipitación media y una ligera reducción de las precipitaciones máximas diarias (MAGRAMA, 2016). Si se analizan conjuntamente los efectos de la evolución de la aridez y la erosión en la desertificación, los cambios en el mapa de riesgo de desertificación muestran que todas las clases de riesgo sufren incrementos, pero son de bastante menor cuantía que si solamente se tiene en cuenta la influencia de la aridez. Este análisis ofrece una aproximación cualitativa, no cuantitativa. En este contexto es como deben interpretarse los resultados, que no pueden ni deben pretender determinar qué tendencia adquiere más relevancia, si la variación de la aridez o la evolución de la erosión, máxime teniendo en cuenta las incertidumbres de las proyecciones en el pronóstico de los eventos extremos que son los causantes de los episodios erosivos más graves.

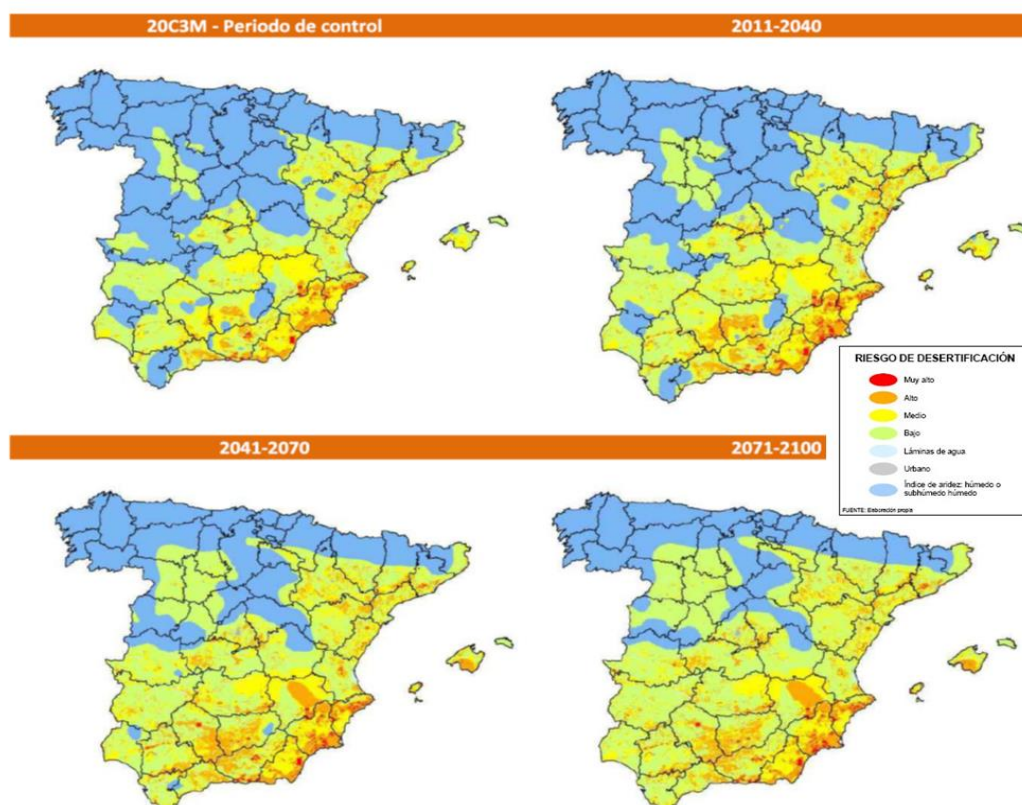


Figura 3.2. Mapa de riesgo de desertificación, considerando cambios en aridez y factor R (erosividad por lluvia) (ESTCENAFIC_CN3). Fuente: MAGRAMA, 2016.

Estudios sobre los impactos del cambio climático en el ámbito europeo (Ciscar et al. 2018) también apuntan como áreas que se verán particularmente afectadas por la severidad de las sequías Andalucía y Extremadura.

3. LOS INCENDIOS EN ESPAÑA

Contexto

Se tiene constancia de que el ser humano ha convivido con el fuego en la Península Ibérica, en parte utilizándolo como práctica de gestión. Por ejemplo, hay evidencias de quemas hace 4.900 años para extender el terreno

destinado a pastizales en los Picos de Europa. A pesar de que las condiciones meteorológicas y la climatología condiciona el riesgo de incendio, los fuegos de origen intencionado son la causa del 55% de los incendios forestales acontecidos en España (2010-2013) y suponen casi el 60% de la superficie quemada (fuente: Estadística General de Incendios Forestales, EGIF, en España), contemplándose hasta 25 motivaciones diferentes como origen de los incendios intencionados. La incidencia de incendios y la superficie afectada en el periodo 1961-2019 se presenta en la figura 3.3, observándose una clara tendencia cíclica con máximos y mínimos alternándose en la superficie total quemada, con grandes incendios a finales de los 70 y los 80. Se observa un incremento en el número de incendios que llega a un máximo a mediados de los 2000.

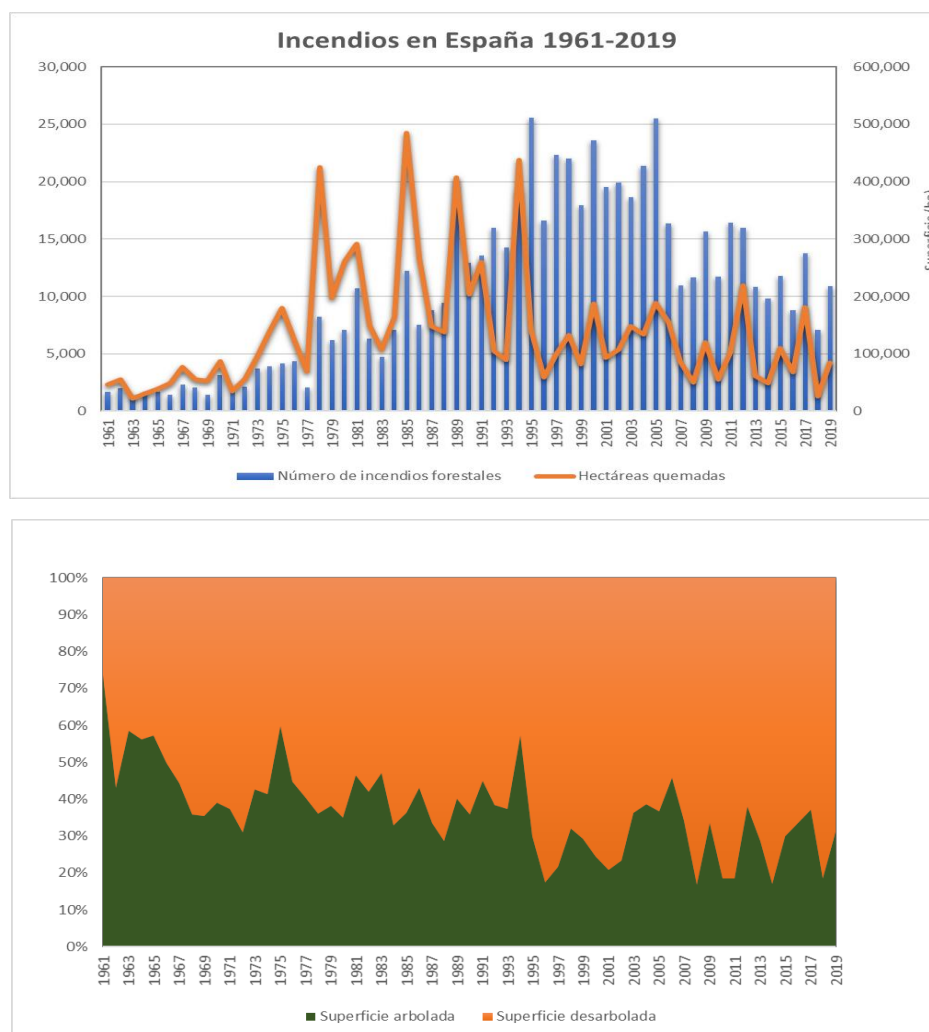


Figura 3.3. Evolución del número y de la superficie total afectada por incendios entre 1961 y 2019. Fuente de datos: EGIF.

En lo que respecta a la superficie quemada, se observa un incremento de la superficie quemada de bosque no arbolado respecto al arbolado en la serie temporal. Parece haberse incrementado el número de fuegos y más superficie quemada en el noroeste en los últimos años.

La influencia del cambio climático en los incendios

Moreno et al. (2014), estudiando los motores de los incendios en el periodo 1968-2010, observan que las variables climáticas son uno de los motores del incremento de los incendios observados en todas las regiones.

Según el informe INFOADAPT (Moreno et al., 2016), estudiando la serie temporal entre 1974 y 2013, los incendios de 1 a 500 has han disminuido desde el inicio de la década de los 90 respecto a los 80 y 70, mientras que el número de conatos de incendio (incendios menores de 1 ha) se incrementaron a partir de los 90, siendo del orden del 70% de los incendios entre 1993 y 2013. Asimismo, observaron que tanto en número de incendios como en superficie quemada se presentan tendencias al alza acusadas en la zona Centro, Oeste y Noreste de España, mientras que no hay una tendencia clara en Galicia o el Levante. Indican que la influencia de la meteorología no se circunscribe al año en curso, sino que, en algunos casos, se han encontrado relaciones con la meteorología de años anteriores, particularmente con las precipitaciones (Pausas 2004), y la relación con la precipitación del año puede variar según la estación en la que se produce (p.e. alta en primavera los incrementa; alta en verano los reduce). En el informe INFOADAT, utilizando el “Fire Weather Index” (FWI)³⁰ para el periodo 1981-2000 en 47 provincias españolas, encuentran relaciones positivas para el área quemada y el número de incendios en 35 y 39 provincias respectivamente. A nivel de la región EU-Mediterránea encuentran que el valor climatológico medio del FWI para la estación de incendios para el periodo 1981-2000 es de más de 50 en casi toda la España con clima mediterráneo.

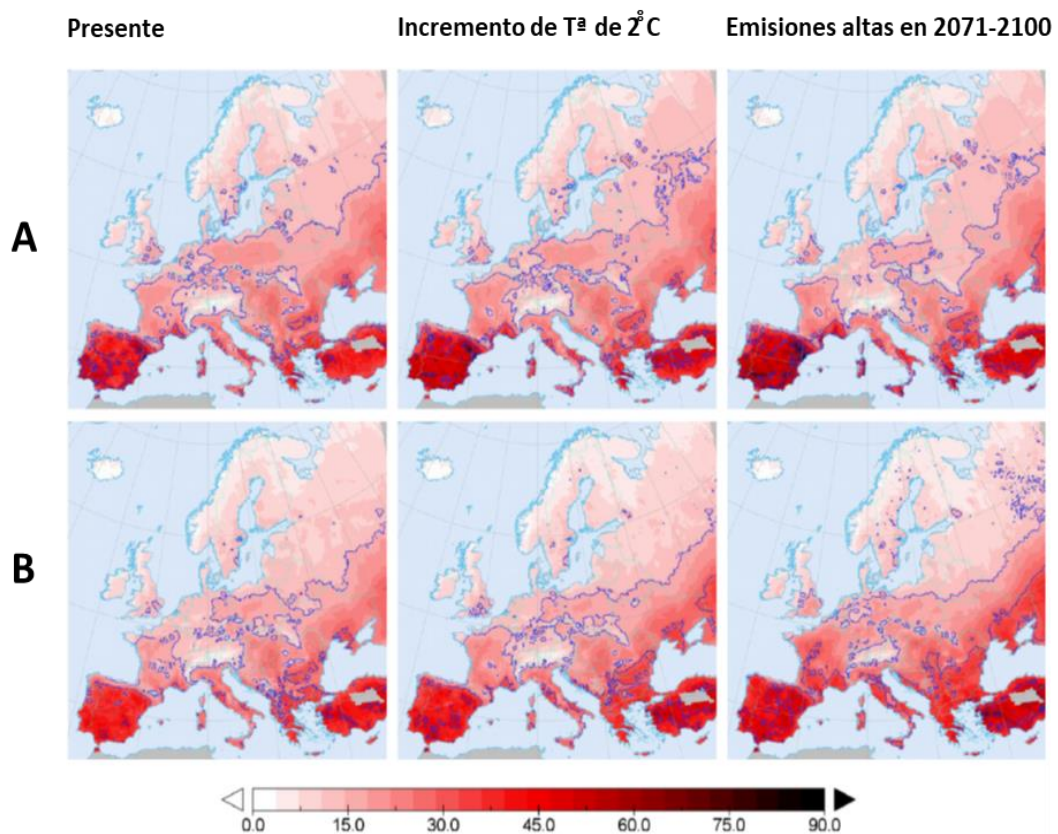


Figura 3.4. Peligro de incendio forestal provocado por el clima en el presente, y bajo dos escenarios de cambio climático, según dos diferentes modelos climáticos (A: WRF331F y IPSL-IPSL-CM5A-MR; B: RCA4 MOHC-HadGEM2-ES). El contorno las líneas denotan incrementos de 15 unidades del índice. Fuente: Modificado de De Rigo et al. 2017.

El cambio climático facilitará la predisposición del combustible a arder y, en consecuencia, a una mayor incidencia de la casuística, incluso en lugares remotos donde con anterioridad los incendios no se propagaban

³⁰ Que utiliza la T^a , P, velocidad del viento y humedad relativa como variables climáticas de entrada (van Wagner 1987).

con excesiva continuidad (Moreno, 2016). Esta misma facilidad de ignición condicionará un mayor riesgo de ignición a igualdad de negligencias y accidentes provocados por la mano del ser humano, principalmente en zonas de interfaz urbano-forestal y agrícola-forestal. Especial hincapié habrá que realizar en las medidas de seguridad y conservación de la maquinaria agrícola, forestal y de construcción, dada la mayor probabilidad de ignición de la vegetación contigua por el salto de chispas, ante los escenarios de mayor riesgo meteorológico. Estas predicciones consideran que el cambio climático implica cambios en las características del combustible (humedad variable, efectos de sequía, velocidad de disparo potencial propagación), pero no consideran otros factores que podrían modificar la gravedad de los efectos (por ejemplo, cambios en la ignición de los rayos) lo que podría alterar significativamente la actividad del fuego en algunos casos.

La variabilidad en la precipitación, la temperatura, el viento y la humedad como resultado del cambio climático, puede implicar que la humedad del combustible de las capas profundas de madera, hojas, suelo y otra materia orgánica en el suelo se vea afectada. Alrededor de la región mediterránea, el cambio climático reduce los niveles de humedad del combustible de los valores actuales. La región se vuelve más seca, lo que aumenta el peligro derivado de factores climáticos de los incendios forestales. Considerando los posibles efectos climáticos en los incendios forestales en un escenario de cambio climático RCP 8.5, De Rigo et al. (2017) predicen, incluso a corto plazo, que en todos los modelos utilizados encuentran un mayor riesgo de incendio en prácticamente toda la Península Ibérica. Si bien existe cierta incertidumbre sobre la magnitud del efecto del cambio climático, está claro que el peligro de incendios forestales provocados por el clima aumenta con el cambio climático en todo el Mediterráneo (figura 3.4).

4. SUELOS

Contexto

Los suelos son la base de las comunidades vegetales y constituyen espacios tridimensionales donde interactúan fenómenos físicos, químicos y biológicos. Tienen pues un papel primordial como hábitat capaz de albergar una parte importante de la biodiversidad del planeta, en el ciclo hídrico, y actúan como un recurso clave para el desarrollo de las actividades humanas, ejerciendo una función clave en la conservación del paisaje y el patrimonio, así como en la provisión de materias primas.

El contenido en materia orgánica del suelo es un factor clave para las disponibilidades edáficas de agua y nutrientes. Son los organismos edáficos que están universalmente presentes en todos los ecosistemas terrestres, presentando gran variedad de estos organismos y complejidad de sus interacciones, los que juegan un papel fundamental en los procesos del suelo. La fauna del suelo, junto con la microflora, juega a su vez un papel fundamental en el funcionamiento del ecosistema: en la descomposición de la materia orgánica, la transformación de nutrientes y (junto con las raíces de las plantas) en el mantenimiento de la estructura de los suelos. El suelo es un sustrato dinámico y altamente estructurado, resultado de las complejas interacciones entre su propia estructura y la biota que alberga.

Una parte importante de la superficie del territorio español está amenazada actualmente por procesos de desertificación (sección 2 de este capítulo). González et al. (2018) en su revisión del contenido de carbono orgánico de los suelos de España basado en un análisis de una selección de la literatura disponible, centrada en usos de suelo agrícola, encuentran que el contenido porcentual del carbono orgánico en 16 provincias está por debajo del 1%, y 28 provincias tienen un porcentaje entre el 1% y el 2%, lo que según algunos autores puede indicar que 44 provincias (88% del total) están en riesgo de pérdidas importantes en la calidad de sus suelos.

Llorente et al. (2017), en estimaciones preliminares extraídas de la base de datos de la Red CARBOSOL³¹ por zonas climáticas, sustratos litológicos o usos de suelo de los stocks de carbono en el primer metro de suelo, encuentran valores medios que oscilan aproximadamente entre los 50 y los 100 Mg C ha⁻¹, observándose los valores de stock más bajos en las zonas climáticas áridas y los más altos en las atlánticas, siendo por usos de suelo los pastizales los que muestran los valores más altos. Según las proyecciones del cambio climático (Capítulo 1), se espera que se agraven dichos problemas de forma generalizada, especialmente en la España con clima mediterráneo seco y semiárido. Cambios futuros con el calentamiento, el aumento de la sequía, la deposición continua de N y los cambios en la gestión o su abandono son parte de los posibles impulsores de los cambios en la biogeoquímica de los suelos. Prácticamente no habrá ningún proceso edáfico que no se vea afectado por el cambio climático.

Impactos del cambio climático en los suelos

El efecto del cambio climático sobre los procesos edáficos puede tener un origen directo (a través de la erosión, los cambios de temperatura y precipitación); indirecto al alterarse los inputs al suelo; o bien la combinación de ambos.

El impacto indirecto se establece a través de una menor entrada de materia orgánica al suelo debido a una disminución de la productividad de biomasa de los ecosistemas afectados por impactos del cambio climático, o de un cambio en la composición química de la materia orgánica que entra en él asociado con un cambio en los tipos de vegetación (p. ej. de bosque a matorral, sabanización). Estos cambios en la productividad y calidad de la materia orgánica producida por la vegetación derivan en una disminución de la capacidad del sistema suelo de almacenar C, así como en una alteración en las comunidades microbianas del suelo responsables de las emisiones de CO₂ y el ciclo de nutrientes que pueden provocar importantes cambios tanto en las tasas de descomposición, como en la capacidad de inmovilización de los nutrientes esenciales, y tanto en la biomasa microbiana como en la matriz edáfica (Gallardo et al., 2015).

La química y actividad biológica del suelo en los ecosistemas mediterráneos está fundamentalmente determinada por la humedad del suelo. Algunos estudios en bosques mediterráneos han reportado los efectos a corto, mediano y largo plazo de las sequías en la materia orgánica del suelo (Navarro-García et al. 2012). A corto plazo, las sequías pueden tener un efecto positivo sobre la materia orgánica del suelo, al verse aumentada la cantidad total de hojarasca y las raíces muertas fruto del marchitamiento de la cubierta vegetal. Sin embargo, a largo plazo, bajo prolongada y sostenida sequía, la materia orgánica del suelo disminuye por la reducción de la cubierta vegetal, lo que implica una disminución en la caída de hojarasca y un aumento de la erosión, al disminuir la protección del suelo y la permeabilidad. La sequía en los ecosistemas mediterráneos, donde la humedad del suelo es el factor limitante, reduce la actividad enzimática (Sardans y Peñuelas, 2005; 2010) y la respiración del suelo (Asensio et al., 2007). Cambios en la temperatura y la precipitación afectan tanto a la cantidad como a la composición de la biomasa microbiana (Curiel-Yuste et al., 2011), aunque en las formaciones arbustivas mediterráneas la reducción de precipitación tiene menor incidencia comparada con la temperatura, sugiriendo que la adaptación histórica a la aridez mediterránea de estas comunidades microbianas hace de ellas comunidades más resistentes a la sequía que en otros ecosistemas más húmedos del centro y norte de Europa (Curiel-Yuste et al., 2014). Castaño et al. (2018) indican que los hongos micorrizados y no micorrizados del

³¹ La red CARBOSOL (<http://carbosol.ctfc.es/>) dispone de una base de datos que recopila datos de propiedades físicas y químicas de 6.609 perfiles de suelo georreferenciados en España asociados a un conjunto de datos analíticos relacionados de 22.100 horizontes compilados a partir de 635 estudios de suelo. La base de datos CARBOSOL proporciona una gran cantidad de información sobre el contenido de materia orgánica del suelo, su distribución a lo largo del perfil y sus determinantes asociados: como tipo de suelo, litología, topografía y cobertura del suelo.

suelo con grandes micelios pueden verse negativamente afectados por el incremento de los periodos de sequía en los pinares mediterráneos, aunque otros estudios sugieren que esas mismas características hacen a los hongos más resistentes a las sequías (Curiel Yuste et al., 2011), ya que las hifas son estructuras filamentosas capaces de atravesar zonas secas del suelo en búsqueda de recursos. Entender el comportamiento de la comunidad de descomponedores de suelo bajo sequía es muy importante para comprender la capacidad de ecosistemas mediterráneos para adaptarse a las condiciones crecientes de sequía. Por otro lado, un incremento de tormentas estivales provocaría un incremento de actividad microbiana, las tasas de mineralización y la disponibilidad de nutrientes a medio plazo (Matías et al., 2011).

En espartales se ha encontrado una reducción de la costra biológica con incrementos de temperatura de 2°C a 3 °C (Maestre et al., 2013). Estos suelos son menos sensibles a la reducción de la precipitación, y la presencia de costras hace el ciclo del N más resiliente a los cambios de temperatura, al amortiguar el incremento de temperatura. El calentamiento surge pues como un factor más determinante que la reducción de precipitación a la hora de afectar el ciclo de N y el C en estos espartales. Ello puede llevar a un incremento de la disponibilidad de N, que podría tener repercusiones importantes en el ecosistema.

Por otra parte, se ha encontrado recientemente que las comunidades microbianas del suelo de sistemas áridos naturales son más resilientes a la sequía que las de los agro sistemas (donde a su vez, las de secano son más resilientes que las de regadío), que están mayoritariamente influenciadas por la historia de sus usos (Moreno et al., 2019). De la misma forma, Albadalejo et al. (2013) señalan que, por lo general, el uso del suelo es el factor que más determina el contenido de carbono orgánico en el suelo, aunque encuentran que en la capa superficial (hasta 40 cm) en zonas forestales semi-áridas el factor más relevante es la precipitación.

En conjunto se ha encontrado que: los cambios de precipitación tienen más influencia sobre los ciclos de nutrientes y los procesos edáficos en zonas mediterráneas más húmedas (por ejemplo, bosques de frondosas perennifolias) que en los ambientes semiáridos (por ejemplo, espartales); estadios sucesionales tardíos en ecosistemas leñosos y la presencia de costras biológicas en los ecosistemas semiáridos disminuyen el impacto del cambio climático en los ciclos de nutrientes y procesos edáficos; y los ciclos de nutrientes se puede ver muy alterados por los cambios de la cantidad y calidad de materia orgánica en los suelos como consecuencia del cambio climático, aunque por lo general el factor más determinante en los cambios del carbono orgánico en suelos son los cambios de uso.

En lo que respecta a los impactos directos del cambio climático, puede influir en la degradación del suelo mediante los procesos de erosión que pueden llevar a la desertificación (ver sección 2 en este capítulo). La disminución de la precipitación media y/o el aumento de fenómenos extremos, como lluvias torrenciales, puede provocar un incremento peligroso de la erosión. Asimismo, con el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación podría haber una mayor incidencia de los incendios forestales (ver sección 3 en este capítulo).

Dada la relación directa entre el carbono orgánico y la estabilidad estructural del suelo, la probabilidad de erosión aumenta cuando el carbono orgánico disminuye, produciendo el consiguiente impacto y empobrecimiento faunístico. Además, debido a que los suelos españoles son pobres en materia orgánica (Rodríguez-Marín et al., 2016) y, por tanto, con alto riesgo de degradación, este se debería ver incrementado en la medida en que se produzca también una disminución como consecuencia del cambio climático. Olaya-Abril et al. (2017) proyectan hasta un 35% de disminución del carbono orgánico en suelos mediterráneos con el cambio climático en parcelas de la Red Natura en Sierra Morena. Otro proceso asociado con el cambio climático es el aumento de la hidrofobicidad de los suelos (repelencia del suelo al agua, Goebel et al., 2011), con consecuencias muy negativas para las tasas de infiltración del agua en los suelos, y, por tanto, para la actividad mineralizadora de los microorganismos del suelo y la accesibilidad de agua para las plantas. Está comprobado que el aumento de la temperatura junto con los cambios en los patrones de precipitación que se observan con el cambio climático (aumento de los fenómenos de sequía extrema seguido por lluvias torrenciales), son

condiciones que favorecen suelos dominados por especies fúngicas cuya naturaleza química estimula la hidrofobicidad (Certini et al., 2005). Asimismo, en este contexto, la aparición de incendios forestales, que es probable que se promuevan por eventos climáticos extremos, puede también intensificar la hidrofobicidad de los suelos. Los efectos de la hidrofobicidad sobre la estabilidad de los sistemas semiáridos pueden ser catastróficos para su supervivencia y deberían ser estudiados en mayor profundidad, ya que también están asociados a los procesos erosivos (Shakesby et al., 2000).

Tabla 3.1. Impactos en los suelos debidos al cambio climático.

Impacto	Factor climático ¹	Referencia
Materia orgánica en el suelo puede aumentar a corto plazo por aumento input y hojarasca, disminución a medio y largo plazo por la disminución de la cobertura, input de hojarasca y aumento de la erosión		Navarro-García et al. 2012
Disminución de la actividad enzimática en el suelo en bosques mediterráneos		Sardans y Peñuelas 2005 Sardans y Peñuelas 2010 Hueso et al. 2011
Disminución de la respiración del suelo en bosques mediterráneos		Asensio et al. 2007
Cambios en la cantidad, estructura y composición de las comunidades microbianas		Curiel-Yuste et al. 2011
Hogos micorrizados y no micorrizados del suelo con grandes micelios pueden verse negativamente afectados por el incremento de los periodos de sequía en los pinares mediterráneos		Castaño et al. 2018
Erosión de las capas superficiales del suelo en ecosistemas mediterráneos por eventos extremos de precipitación, con la consecuente pérdida de nutrientes		Matías et al. 2011
Incremento de la erosión, especialmente en ecosistemas mediterráneos		ECCE, 2015
Reducción de las costras biológicas en los ecosistemas semiáridos (espartales)		Maestre et al. 2013
Reducción del carbono orgánico en el suelo		Olaya-Abril et al. 2017
Incremento de riesgo de incendios, fomentada por las nuevas condiciones climáticas		ECCE, 2005 Capítulo 3

¹  = incremento T^a;  = bajadas de T^a;  = sequías;  = incremento de las precipitaciones extremas

En el futuro, los escenarios climáticos para España (Capítulo 1), incluyen veranos más cálidos y secos seguidos por inviernos cálidos y con mayor precipitación. Este es el ambiente ideal para una reducción en el carbono disponible en la parte más superficial de los suelos como consecuencia de la reducción de las precipitaciones combinada con el calentamiento térmico, aunque se tendría que ver en más detalle cómo esto ocurre en el perfil del suelo. Esta tendencia podría acelerarse sinérgicamente a través de la interacción con la agudización del régimen de incendios, fomentada por las nuevas condiciones climáticas, y de la erosión, promovida tanto por las perturbaciones como por la propia reducción de materia orgánica en los suelos. Ello tendría mayor efecto sobre los ecosistemas mediterráneos.

5. ECOSISTEMAS Y BIODIVERSIDAD

Los impactos asociados al cambio climático en los individuos, las poblaciones y los ecosistemas pueden verse reflejados en alteraciones fisiológicas, fenológicas o demográficas que modifican la composición de las comunidades y su funcionamiento, pudiendo alterar las interacciones bióticas de forma hasta ahora inédita y que pueden resultar en diversas formas de afectación de los servicios de los ecosistemas. No obstante, los cambios del clima interactúan con otros motores de cambio de forma compleja. Por ello, es difícil cuantificar de forma unívoca la contribución del cambio climático, el cual implica cambios en los regímenes de temperatura y precipitaciones o el incremento de CO₂ y su efecto de fertilización. Sin embargo, otros motores de cambio importantes, como el cambio en el uso del suelo, la pérdida y fragmentación de los ecosistemas, las perturbaciones en el ciclo del nitrógeno, la expansión de especies invasoras, etc. son también amenazas a la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas, muchas veces actuando en interacción con el cambio climático. La España continental encierra un porcentaje muy elevado de la biodiversidad europea de plantas y vertebrados (Williams et al., 2000), proporcionalmente mayor en la España insular. Es bien sabido que una parte de esta biodiversidad está actualmente amenazada por diversas causas, siendo la modificación de los hábitats o ecosistemas en los que viven las más importante. Hoy sabemos que se debe sumar el cambio climático como



Autora: M.J. Sanz

una amenaza que ya está afectando la biodiversidad, y es esperable que lo haga de manera más importante en el futuro. En las últimas décadas, se han observado diversos impactos asociados al cambio climático que afectan a los bosques y la biodiversidad terrestre en España. El estudio más completo y reciente del que se dispone es el de Herrero y Zavala (2015), “Informe de Evaluación sobre Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en los Bosques y la Biodiversidad de España frente al Cambio climático”. Esta sección está basada en este informe en gran medida, incluyendo información de algunos estudios más recientes. Los aspectos más genéricos referentes al cambio climático y los procesos de desertificación o los cambios en el régimen de los incendios se han tratado en las secciones 2 y 3 anteriores, así como los impactos en los suelos (sección 4).

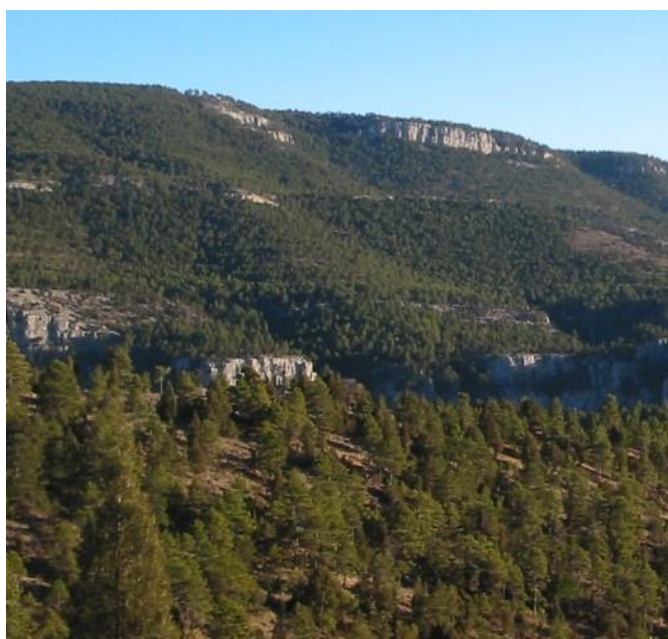
Impactos del cambio climático observados en las últimas décadas

Son múltiples los impactos observados ya en los ecosistemas terrestres, su diversidad y funcionamiento. Un resumen de estos se presenta en la tabla 3.2. Desde los cambios en la fenología (el aumento del periodo de residencia de la hoja en caducifolios, y cambios en la floración y fructificación) en varias especies arbóreas del norte de España asociados al incremento de la temperatura, a cambios en el comportamiento de las especies animales, como es el caso de las aves migratorias, que en algunos casos adelantan su llegada en los años calurosos. También se ha observado que en algunos insectos (como la mariposa blanca de la col, *Pieris brassicae*) pueden acelerar las fases larvarias emergiendo los adultos más temprano.

Asimismo, se han observado alteraciones en el crecimiento y la mortalidad de algunas especies forestales asociadas al cambio climático. En especies de coníferas se han detectado disminuciones del crecimiento, tanto en poblaciones naturales como en plantaciones, en muchos casos atribuibles a cambios de la gestión forestal, con el abandono de prácticas tradicionales y el despoblamiento (que ha resultado en la proliferación de bosques muy densos), combinados con factores climáticos (por ejemplo sequías más frecuentes y prolongadas), resultando en una mayor competencia por los recursos especialmente escasos como el agua. En algunas ocasiones, la gestión histórica de las masas arboladas, como es el caso de cortas intensas en algunos abetales

(*Abies sp.*), puede haber llevado a favorecer genotipos más vulnerables a la sequía y a alterar el microclima del bosque haciéndolo más vulnerable. Además de las reducciones del crecimiento, se han observado defoliaciones y episodios de mortandad que pueden asociarse a factores climáticos. La concurrencia de reducciones de crecimiento, defoliación y mortandad de los individuos constituye lo que se ha venido en denominar “decaimiento de los bosques”, considerándose que el cambio climático es uno de los factores principales que lo provocan, si bien no es el único.

Otro cambio observado es el cambio de distribución de algunas especies, como la ascensión altitudinal del haya (*Fagus sylvatica*) en el Montseny, o el piorno serrano (*Cytisus oromediterraneus*) y el enebro común (*Juniperus communis*) en la sierra de Guadarrama. Estas migraciones pueden ser atribuibles al incremento de la temperatura junto con los cambios de uso del suelo (por ejemplo, la reducción de la actividad ganadera y las quemadas controladas para generar pastos). También se ha detectado una ascensión altitudinal y una reducción del área de distribución de varios lepidópteros en la Sierra de Guadarrama por el aumento de la temperatura, desplazamientos de reptiles tanto latitudinales (hacia el norte) como altitudinales (hacia cotas más altas).



Autora: M.J. Sanz

También las interacciones bióticas se han visto afectadas por el cambio climático. Por ejemplo, la afección por hongos patógenos del género *Batrachochytrium* en anfibios se ha visto favorecido por el aumento de temperatura del agua en donde se reproducen, provocando eventos de mortandad masiva en varias especies de la Sierra de Guadarrama (Sistema Central) y de Tramontana (Islas Baleares). Asimismo, el incremento de las temperaturas en los últimos años está favoreciendo la supervivencia de las orugas de procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) en invierno y su ascenso a cotas más altas, afectando especies de pino que antes solo se veían afectas muy ocasionalmente como el pino silvestre (*Pinus sylvestris*), por ejemplo, en Sierra Nevada, pudiendo causar incluso mortandad (Hodar et al. 2003).

La expansión de la procesionaria se considera como un indicador del cambio climático (Peña et al. 2009). Algunas enfermedades, como es el caso de la banda marrón y roja (*Mycosphaerella dearnessii* y *M. pini*, hongos defoliadores de coníferas) han proliferado causando mortandad en plantaciones de Pino de Monterey (*Pinus radiata*) en la cornisa Cantábrica (Ortiz de Urbina et al., 2016), las cuales pueden atribuirse a factores climáticos, dado que veranos más cálidos con elevada humedad ambiental pueden facilitar la producción de esporas del hongo causante de la banda roja (Pinkard et al., 2017). Otro caso es el de los pinares mediterráneos más continentales de pino rodeno (*Pinus pinaster*), en los que se ha observado una mortalidad creciente en todas las clases de edad y falta de regeneración, que puede atribuirse al estrés hídrico mayoritariamente, pero donde pueden estar interactuando hongos patógenos o plantas hemiparásitas (Gea-Izquierdo et al., 2019). Y aunque tenemos evidencias de que los bosques secos en el sur de la península ibérica han mostrado resiliencia en ciclos de sequía en el pasado, como es el caso estudiado en los bosques de pino rodeno después de la gran sequía de los años 50 (Madrigal-Gómez et al., 2017), la resiliencia del bosque podría verse disminuida por sequías recurrentes, debilitando progresivamente el vigor de los árboles o por el aumento de la intensidad, frecuencia y duración de las sequías, además de otros factores como la mayor incidencia de incendios.

También se han observado interacciones bióticas y abióticas complejas en diversos procesos de decaimiento en la encina (*Quercus ilex*) que han derivado en el decaimiento de algunos encinares en la península ibérica en las que el cambio climático reciente puede tener un papel. Estos encinares ocupan una extensión de varios millones de hectáreas en la península ibérica y proporcionan servicios ecosistémicos de gran valor socioeconómico. La evidencia empírica sugiere que las sequías severas que ocurrieron durante los años 70, 80 y 90 han limitado sustancialmente el crecimiento de la encina (Natalini et al., 2016), y la severa sequía que ocurrió en 2005 limitó el crecimiento y generó mortalidad de esta especie en el noreste de España (Barbeta et al., 2013). Junto con los factores climáticos, no solo el tipo de gestión, o como esta puede promover la entrada de enfermedades, sino que su abandono también puede influir en la salud y crecimiento de la encina (Rolo y Moreno, 2012); e incluso incrementar la competencia intra e interespecífica, lo que desempeña un papel importante en cómo crecen y responden al clima las encinas (Gea-Izquierdo et al., 2011; Martínez -Vilalta et al., 2011). Pero, pese a los recientes esfuerzos para entender las causas de la variabilidad espacio/temporal en la salud fisiológica (Heres et al., 2018; Gea-Izquierdo et al., 2011) y capacidad reproductiva con respecto al cambio climático de los encinares (Pulido et al., 2013) aún se desconoce el modo en que los múltiples agentes implicados interactúan. Recientemente, García-Angulo et al. (2020) en un amplio estudio sobre los encinares en la península ibérica han encontrado que el incremento de temperatura y el descenso de la precipitación tiene incidencia en la defoliación y muerte de las encinas, que a su vez provoca una cascada de procesos que conllevan un cambio en la abundancia relativa de los grupos microbianos funcionales (como son los nitrificantes y las ectomicorrizas) que resulta en importantes alteraciones de los ciclos del N y el P.

Tabla 3.2. Impactos observados en los bosques y su biodiversidad debidos al cambio climático. Modificado de Herrero y Zavala (2015), incluyendo nuevos impactos.

Impacto	Factor climático ¹	Impacto, motores de cambio adicionales	Interacciones bióticas	Referencia
Cambios fenológicos				
Plantas: Adelanto de la floración y retraso de la caída de las hojas especies arbóreas norte de la Península		-. -	-. -	Peñuelas et al. 2002
Animales: adelanto de llegada a España de aves migratorias		-. -	-. -	Gordo, 2015
Decaimiento forestal				
Defoliación y reducción del crecimiento de abetales (<i>A. alba</i>) en Pirineos		Cambios en la gestión forestal	Elevada densidad (competencia por recursos hídricos); hongo patógeno	Camarero et al. 2015
Disminución del crecimiento y aumento de la mortalidad en pinsapares (<i>A. pinsapo</i>) ibéricos		Cambios en la gestión forestal	Elevada densidad (competencia por recursos hídricos); hongo patógeno	Linares et al. 2015
Disminución de crecimiento en pinares de pino laricio (<i>P. nigra</i>) del sur de España		-. -	-. -	Linares et al. 2015
Defoliación y reducción del crecimiento en repoblaciones de pino silvestre (<i>P. sylvestris</i>) y pino laricio en el sureste de España		Cambios en la gestión forestal	Elevada densidad (competencia por recursos hídricos)	Sánchez-Salguero y Navarro-Cerillo 2015

Impacto	Factor climático ¹	Impacto, motores de cambio adicionales	Interacciones bióticas	Referencia
Mortandad masiva de juveniles de pino silvestre y pino laricio en Sierra Nevada		-.-	-.-	Herrero et al. 2013
Defoliación, reducción del crecimiento y aumento de la mortalidad en pinares de pino silvestre en Cataluña		Cambios en la gestión forestal	Elevada densidad (competencia por recursos hídricos); Planta hemiparásita	Vilà-Cabrera et al. 2015
Incremento de la mortandad, falta de regeneración y desplazamiento por otras especies del pino rodeno (<i>P. pinaster</i>) en los pinares mediterráneos más continentales		-.-	Hongos patógenos y plantas hemi-parásitas	Gea-Izquierdo et al. 2019
Reducción del crecimiento y mortandad de encinas (<i>Q. ilex</i>)		Cambios de gestión y abandono	Hongos patógenos	Rolo y Moreno 2012; Barbeta et al. 2013; Natalini et al., 2016 ; García-Angulo et al., 2020
Migración				
Ascenso altitudinal del haya (<i>F. sylvatica</i>) en el Montseny		Cambios de uso forestal y agrario	-.-	Peñuelas et al. 2007
Ascenso altitudinal del enebro común (<i>J. communis</i>) y el piorno serrano (<i>C. oromediterraneus</i>) en la Sierra de Guadarrama		Reducción de la carga ganadera	Reducción de daños por herbivoría	Sanz-Elorza 2015
Ascenso altitudinal y contracción de algunas especies de lepidópteros en la Sierra de Guadarrama		-.-		Wilson et al. 2015
Desplazamientos latitudinales y altitudinales en varias especies de reptiles en las últimas décadas		-.-		Pleguezuelos 2015
Plagas forestales				
Defoliaciones y disminuciones de crecimiento en los bosques meridionales de pino silvestre provocadas por la procesionaria del pino		-.-	El incremento de las T ^a invernales favorece la supervivencia de las larvas de la procesionaria del pino	Hódar 2015; Hódar y Zamora 2004; Hódar et al. 2003
Enfermedades emergentes				
Mortandad masiva en varias especies de anfibios mediada por un hongo patógeno en la sierra de Guadarrama y la Sierra de la Tramontana		-.-	El incremento de las temperaturas favorece el hongo patógeno	Bosh 2015
Defoliación y mortandad de del pino de Monterrey (<i>P. radiata</i>) en el País Vasco		-.-	El incremento de la temperatura y la alta humedad relativa en una mayor exposición a la luz de las copas favorece la producción de esporas del hongo	Ortiz de Urbina et al. 2016; Pinkard, E. et al. 2017

¹ = incremento T^a; = sequías; = sequías extremas; P=Primavera; Tmin= T^a mínima; ^H= humedad

En lo que respecta a la capacidad de secuestro de carbono del bosque en España, sí se ha visto afectada por el cambio climático. Comparando la biomasa viva y su crecimiento entre los dos periodos del Inventario Forestal Nacional (IFN), Vayreda et al., (2015) encuentran que los bosques españoles durante el periodo entre el IFN2 y el IFN3 han incrementado su biomasa, siendo los bosques que aún ostentan un mayor incremento los de la vertiente norte, en particular Galicia, Cantabria, Pirineos y País Vasco. Mientras que los del sur, este y de la meseta presentan incrementos menores (especialmente sur, oeste y costa sur este del Mediterráneo). Teniendo en cuenta que entre el IFN2 y el IFN3 la temperatura media de marzo a agosto ha experimentado un incremento de un grado respecto a los 30 años anteriores (con un rango geográfico entre 0,15 y 2°C), estos autores han encontrado un efecto negativo de este incremento más acusado en las zonas más húmedas del norte y noroeste peninsular y zonas de montaña como los Pirineos (bosque con especies eurosiberianas situadas en el límite sur de su distribución). El incremento de temperatura, sin embargo, apenas tuvo efecto en el secuestro de carbono en las zonas más secas. Se encontró también una relación entre el incremento de temperatura y el abandono de la gestión forestal, reduciéndose la capacidad de sumidero con el calentamiento en los bosques en los que se ha abandonado la gestión. Esto concuerda con las series temporales nacionales para tierras forestales presentadas en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (MITECO, 2019), dado que en la última década no se observa un incremento en la capacidad de secuestro de los bosques españoles en su conjunto.



Autora: M.J. Sanz

La capacidad de secuestro de carbono viene en parte determinada por la estructura del bosque. Estudios recientes indican que desde los años 50 hasta la actualidad se han observado cambios en la estructura debidos al incremento de la temperatura y el decrecimiento de la precipitación en España, mayores que en el centro de Europa (Moreno et al., 2018). Estos cambios podrían derivar en decaimientos y mortandad importante en las masas forestales, por lo que sería necesario tomar medidas de gestión adaptativa para minimizar los impactos en las masas existentes y tener estos impactos en cuenta a la hora de planificar el establecimiento de nuevas masas.

Impactos esperados

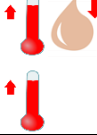
Se espera que los cambios de temperatura y precipitación como consecuencia del cambio climático (Capítulo 1) resulten en unos mayores impactos en los ecosistemas terrestres. Es por ello fundamental entender la vulnerabilidad al cambio climático de estos ecosistemas. Estos cambios en los factores climáticos pueden afectar a los organismos (fenología, fisiología), sus poblaciones (demografía, distribución geográfica), las comunidades en las que se integran (estructura y dinámica, relaciones bióticas), y en su conjunto a los ecosistemas y sus funciones. Las vulnerabilidades de los ecosistemas terrestres (en particular los bosques) asociadas al cambio climático, no solo responden a los factores climáticos involucrados, sino también a los motores de cambio adicionales e interacciones bióticas que contribuyen a la vulnerabilidad en caso de ser relevantes (Herrero y Zavala, 2015).

Los impactos ya observados en los ecosistemas españoles, en particular en los bosques, son suficientes para considerar que el cambio climático está afectando de forma negativa nuestros ecosistemas. En la tabla 3.3 se expone un listado de los impactos esperados y la vulnerabilidad de los diferentes niveles organizativos dentro de los ecosistemas.

Cambios en la distribución y abundancia de las poblaciones de las especies atribuibles a los cambios de las variables climáticas observadas (Capítulo 1) ya se han observado en España (sección 3.2). Es por ello importante no solo conocer la vulnerabilidad de nuestros ecosistemas y sus componentes, sino también poder predecir qué

cambios puede haber en su futura distribución. Y aunque sabemos que las predicciones de distribuciones futuras de especies a partir de modelos bioclimáticos pueden fallar, debido a predicciones inciertas del cambio climático local, estimaciones inexactas de la tolerancia climática de las especies y cambios evolutivos imprevistos en las poblaciones (Bradshaw y Holzapfel, 2006), y que nunca podremos predecir el futuro con precisión, debemos tratar de usar el conocimiento existente para mejorar la comprensión de los probables efectos del clima futuro en la biodiversidad (Araujo y Rahbek, 2006). En la península ibérica se ha hecho un gran esfuerzo por intentar predecir los cambios en la distribución de las especies bajo futuros escenarios climáticos utilizando modelos de distribución de especies (MDE) (en la fauna, Araujo et al., 2011; y en la flora y la vegetación, Felicísimo et al., 2011). Araujo et al. (2011) predicen que la mayor parte de las especies de vertebrados terrestres considerados en la península ibérica observarán contracciones significativas de sus distribuciones climáticas potenciales durante este siglo. Estos estudios predicen una reducción general de la superficie climáticamente adecuada para casi todos los taxones de plantas analizados a lo largo de este siglo, más preocupante en el caso de los pinsapares, los abetales, la encina, el roble albar y el alcornoque. Mientras que, si se utilizan modelos de distribución y abundancia parametrizados con datos de supervivencia y adaptación local, Benito-Garzón et al. (2011) observan para pino rodeno (*Pinus pinaster*) y pino silvestre (*Pinus sylvestris*) que el descenso del rango de distribución es menor que con los tradicionales.

Tabla 3.3. Impactos y vulnerabilidad esperados en los bosques y su biodiversidad debidos al cambio climático. Fuente: extraído de Herrero y Zavala (2015).

Procesos	Factor climático	Impactos
Organismos		
Eco fisiología		El incremento de la aridez puede afectar a la conductancia hidráulica de las especies arbóreas, lo que puede limitar la fijación de carbono Muerte de arbolado poco tolerante por la sequía y las altas temperaturas Modificación de la mortalidad de invertebrados y aceleramiento de su desarrollo Aumento de la actividad y ciclo anual de los reptiles
Fenología		Se prevén cambios adicionales a los ya observados en foliación, caída de hoja, floración y fructificación de las especies arbóreas Se esperan cambios en la migración de las aves por los cambios climáticos en sus zonas de invernada y reproducción Muchos lepidópteros pueden ver adelantada la fecha de emergencia de las larvas y adultos
Poblaciones		
Demografía		Alteración de la proporción de los sexos en recién nacidos en algunas especies de reptiles Reducción de los años favorables para la regeneración de especies arbóreas Reducción del crecimiento de especies arbóreas, e incremento de la mortalidad, especialmente en bosques densos e individuos jóvenes
Distribución y abundancia		Se prevén despagamientos altitudinales y longitudinales de las especies Las migraciones en altitud pueden suponer una disminución del área potencial de distribución cuando ocurren cerca de las cumbres

Procesos	Factor climático	Impactos
		Las especies de las cotas altitudinales más altas son las más vulnerables, por la desaparición de las condiciones climáticas actuales y al estar limitadas las migraciones por la capacidad de dispersión de las especies y la distribución de sus hábitats favorables
Comunidades		
Estructura dinámica y		Debido al cambio de distribución de las especies y su respuesta al cambio climático las comunidades pueden sufrir cambios de composición
		Las diferencias de reclutamiento entre especies de matorral y arbóreas en condiciones de sequía pueden llevar a una “matorralización” de la montaña mediterránea
		Los cambios de composición de las comunidades pueden afectar el funcionamiento del ecosistema
Ecosistemas		
Perturbaciones extremos climáticos y		Se prevé un aumento de la frecuencia y severidad de las sequías extremas
		Se espera un aumento de la frecuencia de los incendios forestales y plagas
		Las perturbaciones recurrentes pueden provocar cambios persistentes en las funciones y estructura del ecosistema
Funciones ecosistémicas, ciclos biogeoquímicos y recursos hídricos		
		Durante la primera mitad del siglo, los modelos prevén un incremento de la producción forestal en España asociado al incremento del CO ₂ atmosférico. Sin embargo, durante la segunda mitad el incremento de la aridez podría reducir la producción forestal
		La respiración del suelo puede verse afectada por el incremento de las temperaturas y los cambios en las precipitaciones, aunque el efecto de la precipitación podría ser más relevante en el caso de los ecosistemas mediterráneos
		Las condiciones de sequía e incremento de la temperatura pueden alterar los ciclos del fósforo y el nitrógeno, aunque la cobertura vegetal y las costras biológicas pueden ayudar a modular los efectos en estos ciclos
	-.-	La deposición atmosférica de nitrógeno puede interactuar con los efectos climáticos en los ciclos de nutrientes
	-.-	Los caudales de estiaje de los ríos españoles pueden reducirse en las próximas décadas
= incremento T ^a ; = bajadas de T ^a ; = sequías; = incremento de las precipitaciones		

Asimismo, se han utilizado modelos de nicho. En este sentido, Benito-Garzón et al. (2013) demostraron que si bien es posible un incremento en el crecimiento de los árboles por el alargamiento del periodo vegetativo y la fertilización de CO₂ debida al cambio climático, en los límites meridionales de distribución estos se pueden ver limitados por incrementos en las tasas de mortalidad, principalmente en las especies eurosiberianas.

Un estudio llevado a cabo con especies forestales de amplia distribución en la Península Ibérica, incluyendo especies templadas, sub-mediterráneas y mediterráneas, concluye que se encuentran en un proceso de expansión

propiciado por los cambios de uso de suelo y la gestión forestal, e incluso una dinámica pos glacial (García-Valdés et al., 2013). Esta expansión podría verse afectada por el cambio climático de diferentes formas, por ejemplo, acelerada en el caso del pino carrasco (*Pinus halepensis*) o ralentizada en el caso del pino laricio (*Pinus nigra*). Zavala et al. (2015), en base a la modelización de la distribución de especies y el efecto del cambio climático, indican que los bosques ibéricos no se hallan en equilibrio con el clima al que están sometidos y han estado sufriendo procesos de expansión durante las últimas décadas; procesos que se pueden ver ralentizados o acelerados por los cambios climáticos y los cambios del uso del suelo dependiendo de la especie, su distribución actual y factores históricos.

El cambio climático podría afectar también a la dinámica de las invasiones de plantas exóticas. Bien afectando a las comunidades nativas, limitando o beneficiando a ciertas especies y alterando las relaciones interespecíficas a todos los niveles, o favoreciendo los rasgos biológicos individuales de especies invasoras concretas (Capdevila-Argüelles et al., 2011). Además, es poco probable que muchas de las especies invasoras se vean afectadas negativamente por el cambio climático (Vilà et al., 2015). Es previsible que algunas plagas y enfermedades en plantas y animales puedan extenderse fuera de sus hábitats conocidos y afectar con un impacto sin precedentes.

Podemos deducir del conocimiento existente que hay especies, poblaciones y ecosistemas más vulnerables que otros en la península ibérica (Herrero y Zavala, 2015). En este sentido, los ecosistemas de montaña son especialmente vulnerables al cambio climático debido a sus características de “isla ecológica”. Las poblaciones situadas en los límites meridionales de distribución y cotas altitudinales inferiores pueden presentar una alta vulnerabilidad debido a su alta exposición. Las poblaciones relictas son especialmente vulnerables al cambio climático debido a su pequeño tamaño poblacional y su aislamiento. Además, con frecuencia se desconoce su existencia.



Autora: M.J. Sanz

En el caso de las aves, una gran proporción no están amenazadas todavía, pero podrían estarlo en el futuro (Treviño et al., 2015). Los anfibios y los reptiles son especialmente vulnerables debido a la limitada capacidad de dispersión, su vulnerabilidad a enfermedades emergentes y su gran dependencia de la temperatura.

En general, las especies de ciclo vital largo, en función de su potencial reproductivo, pueden tener menos margen para responder al cambio climático con procesos evolutivos.

6. REFERENCIAS

- Albaladejo, J., Ortiz, R., García-Franco, N., Navarro, A. R., Almagro, M., Pintado, J. G., Martínez-Mena, M., 2012. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. *Journal of Soils and Sediments*, 13(2), 265–277.
- Araújo, M.B., Rahbek, C., 2006. How Does Climate Change Affect Biodiversity? *Science*, 313, 1396–1397.
- Araújo, M.B., Guilhaumon F., Neto D. R., Pozo, I., Calmaestra R., 2011. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio. Climático de la Biodiversidad Española. 2 Fauna de Vertebrados. Dirección general de medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid, 640 p.
- Asensio, D., Peñuelas, J., Ogaya, R., Llusia, J., 2007. Seasonal soil and CO₂ exchange rates in a Mediterranean holm oak forest and their responses to drought conditions. *Atmos Env* 41:2447–2455.
- Barbeta, A., Ogaya, R., Peñuelas, J., 2013. Dampening effects of long-term experimental drought on growth and mortality rates of a holm oak forest. *Glob. Change Biol.* 19, 3133–3144. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12269>
- Benito-Garzón et al., 2013. Inter-specific differences in tree growth and mortality responses to climate determine the potential species distribution limits in the Iberian forest. *Global Ecology and Biogeography*, 22: 1141–1151.
- Benito-Garzon et al., 2011. Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distribution under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 20: 766–778.
- Bosh, J., 2015. Implicaciones del cambio climático en la incidencia de los hongos quitridios patógenos de anfibios. En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Bradshaw, W.E., Holzapfe C.M., 2006. Climate change. Evolutionary response to rapid climate change. *Science* 312, 1477
- Camarero et al., 2015. El decaimiento de abetares pirenaicos como paradigma de vulnerabilidad de los bosques ante el cambio climático (Capítulo 18). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Capdevila-Argüelles, L., Zillett, B., Suárez Álvarez, V.A., 2011. Cambio climático y especies exóticas invasoras en España. Diagnóstico preliminar y bases de conocimiento sobre impacto y vulnerabilidad. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 146 Pp.
- Castaño, C., Lindahl, B. D., Alday, J. G., Hagenbo, A., Martínez de Aragón, J., Parladé, J., ... Bonet, J. A., 2018. Soil microclimate changes affect soil fungal communities in a Mediterranean pine forest. *New Phytologist*. doi:10.1111/nph.15205
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143: 1.
- Ciscar, D. et al. 2018. Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project, EUR 29427 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97218-8, JRC112769.
- Curiel-Yuste, J., Fernandez-Gonzalez, A.J., Fernandez-Lopez, M., Ogaya, R., Peñuelas, J., Sardans, J., Lloret, F., 2014. Strong functional stability of soil microbial communities under semiarid mediterranean conditions and subjected to a long term shifts in baseline precipitation. *Soil Biology and Biochemistry*, 69: 233–33.
- Curiel-Yuste, J., Peñuelas, J., Estriarte, M., Gascía-Mas, J., Mattana, S., Ogaya, R., Pujol, M., Sardans, J., 2011. Drought-resistant fungi control soil organic matter decomposition and its response to temperature. *Global Change Biology*, 17: 1475–86.
- de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., Artés Vivancos, T., San-Miguel-Ayán, J., 2017. Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty, EUR 28926 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN: 978-92-79-77046-3, doi:10.2760/13180, JRC108974
- FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy
- Felcísimo, Á. M. (coord.), 2011. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española. 2. Flora y vegetación. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 552 pág.
- Gallardo, A., Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F.T., 2015. Vulnerabilidad de los ciclos de nutrientes y los procesos del suelo frente a los principales impactos del cambio climático (Capítulo 29). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- García-Angulo, D., Hereş, A.-M., Fernández-López, M., Flores, O., Sanz, M.J., Rey, A., Valladares, F., Curiel Yuste, J., 2020. Holm oak decline and mortality exacerbates drought effects on soil biogeochemical cycling and soil microbial communities across a climatic gradient, *Soil Biology and Biochemistry* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107921>.
- García-Valdés et al., 2013. Chasing moving target: protecting climate change-induced changes in non-equilibrium tree species distributions. *Journal of Ecology*, 101: 441–453

- Gea-Izquierdo, G., Cherubini, P., Cañellas, I., 2011. Tree-rings reflect the impact of climate change on *Quercus ilex* L. along a temperature gradient in Spain over the last 100 years. *For. Ecol. Manage.* 262, 1807–1816.
- Gea-Izquierdo, G., Férriz, M., García-Garrido, S., Aguín, O., Elvira-Recuenco, M., Hernández-Escribano, L., Martín-Benito, D., Raposo, R., 2019. Synergistic abiotic and biotic stressors explain widespread decline of *Pinus pinaster* in a mixed forest. *Science of the Total Environment* 685, 963-975.
- Goebel, M., Bachmann, J., Reichstein, M., Janssens, I. A., Guggenberger, G., 2011, Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition – is there a link to extreme climatic events? *Global Change Biology*, 17: 2640-2656.
- González, G., Veroz, O., Gil, J.A., Odoñez, J.M., 2018. Iniciativa 4 por mil: el carbono orgánico del suelo como herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático en España. MAPAMA, NIPO: 013-18-014-7 (en línea). Madrid. 264 pp.
- Gordo, O., 2015. Impactos del cambio climático en la migración de aves (Capítulo 9). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Hereş, A.M., Kaye M.W., Granda E., Benavides R., Lázaro-Nogal A., Rubio-Casal A.E., Valladares F., Curiel Yuste J., 2018. Tree vigour influences secondary growth but not responsiveness to climatic variability in Holm oak. *Dendrochronologia* 49, 68-76.
- Herrero et al., 2013. Growth and stable isotope signals associated with drought-related mortality in saplings of two coexisting pine species. *Oecología*. 173: 1613-1624.
- Herrero, A., Zavala, M.A., (editores) 2015. Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Hódar et al., 2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forest under climatic warming. *Biological Conservation*, 110: 123-129.
- Hodar J.A., Zamora R., 2004. Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking Caterpillar attacks a relict, boreal pine species. *Biodiversity and Conservation* 13: 493-500.
- Hódar, J.A., 2015. Incidencia de la procesionaria del pino como consecuencia del cambio climático: previsiones y posibles soluciones (Capítulo 22). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Linares J.C. et al., 2015. Efecto del cambio climático sobre el crecimiento de *Abies pinsapo* y *Pinus nigra* en el sur de la Península Ibérica: tendencias pasadas, presentes y futuras. En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Madrigal-González, J., Herrero, A., Ruiz-Benito, P., Zavala, M., 2017. Resilience to drought in a dry forest: Insights from demographic rates *Forest Ecology and Management* 389 (2017) 167–175.
- Maestre, F.T. et al. 2013. Changes in the biocrust cover drive carbon cycles responses to climate change in drylands. *Global Change Biology*, 19: 3835-47.
- MAGRAMA, 2016. Impactos del cambio climático en los procesos de desertificación en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Madrid. DP M-16615-2016.
- Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Breshears, D., 2011. Drought-induced forest decline: causes, scope and implications. *Biology Letters*, 689-691.
- Matías, L. Castro, J., Zamora, R., 2011. Soil-nutrient availability under global change scenario in a Mediterranean mountain ecosystem. *Global Change Biology*, 17:1646-57.
- Moreno, A., Neumann, M., Hasanauer, H., 2018. Climate limits on European forest structure across space and time. *Global and Planetary Change*, doi:10.1016/j.gloplacha.2018.07.018.
- Moreno, J. L., Torres, I. F., García, C., López-Mondéjar, R., Bastida, F., 2019. Land use shapes the resistance of the soil microbial community and the C cycling response to drought in a semi-arid area. *Science of The Total Environment*, 648, 1018–1030.
- Moreno, J.M., 2016. Los incendios forestales en España en un contexto de cambio climático: información y herramientas para la adaptación (INFOADAPT). Memoria Final del Proyecto presentada a la Fundación Biodiversidad. 327 pp.
- Moreno, M.V., Conedera, M., Chuvieco, E. Pezzati, B., 2014. Fire regime changes and major driving forces in Spain from 1968 to 2010. *Environmental Science & Policy*, 37, 11-22.
- Moreno, J.M. et al., 2015. Los incendios forestales en España ante el cambio climático (Capítulo 34). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Moreno, M. V., Conedera, M., Chuvieco, E., Pezzatti, G. B., 2014. Fire regime changes and major driving forces in Spain from 1968 to 2010. *Environmental Science & Policy*, 37, 11–22.
- Natalini, F., Alejano, R., Vázquez-Piqué, J., Cañellas, I., Gea-Izquierdo, G., 2016. The role of climate change in the widespread mortality of holm oak in open woodlands of Southwestern Spain. *Dendrochronologia* 38, 51–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2016.03.003>

- Navarro-García, F., Casermeiro, M.A., Schimel, J.P., 2012. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. *Soil Biol Biochem* 44:1–8.
- Olaya-Abril, A., Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., Obregón-Romero, R., 2017. Soil organic carbon distribution in Mediterranean areas under a climate change scenario via multiple linear regression analysis. *Science of The Total Environment*, 592, 134–143.
- Ortíz de Urbina, E., Nebai Mesanza, N., Aragonés, A., Raposo, R., Elvira-Recuenco, M., Boqué, R., Patten, C., Aitken, J., Iturrutxa, E., 2016. Emerging Needle Blight Diseases in Atlantic Pinus Ecosystems of Spain. *Forests* 2017, 8, 18
- PAND, 2008. Programa de acción nacional contra la desertificación. Ministerio de Medio Ambiente y Merio Rural y Marino. 262 pp. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/pand_agosto_2008_tcm30-177181.pdf
- Pausas, J., 2004. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Clim. Change* 63, 337–350.
- Peña, G.S., Martinez, B.T., Gonzalez, M.P., 2009. Anuario de Sanidad Forestal 2009. Servicio de Protección de los Montes contra Agentes Nocivos (SPCAN). Subdirección General de Política Forestal y Desertificación. Ministerio del Medio ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, 80 pp.
- Peñuelas et al., 2007. Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30: 829-837.
- Peñuelas, J., Filella, I. and Comas, P., 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean Region. *Global Change Biol.* 8, 531–544.
- Pinkard, E., Wardlaw, T., Kriticos, D., Ireland, K., Bruce, J., 2017. Climate change and pest risk in temperate eucalypt and radiata pine plantations: a review. *Australian Forestry*, 80(4), 228–241.
- Pleguezuelos, J.M., 2015. Vulnerabilidad de los reptiles ibéricos al cambio climático (Capítulo 8). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Pulido, F., Moreno, G., García, E., Obrador, J.J., Bonal, R., Díaz, M., 2013. Resource manipulation reveals flexible allocation rules to growth and reproduction in a Mediterranean evergreen oak. *Journal of Plant Ecology*, 7(1): 77–85.
- Rodríguez Martín, J. A., Álvaro-Fuentes, J., Gonzalo, J., Gil, C., Ramos-Miras, J. J., Grau Corbí, J. M., Boluda, R., 2016. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma*, 264, 117–125.
- Rolo, V., Moreno, G., 2012. Interspecific competition induces asymmetrical rooting profile adjustments in shrub-encroached open oak woodlands. *Trees* 26 (3), 997-1006.
- Sánchez-Salguero, R., Navarro-Cerillo, R.M., 2015. La sequía y la gestión histórica como factores del decaimiento forestal en poblaciones de *Pinus sylvestris* y *P. nigra* en el sur peninsular (Capítulo 20). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- San-Miguel-Ayanz, J. et al., 2017. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2017. EUR 29318 EN, ISBN 978-92-79-92831-4, doi: 10.2760/663443
- Sanz-Elorza, M., 2015. Efectos del cambio climático sobre la vegetación de la península ibérica (Capítulo 5). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Sardans, J., Peñuelas, J., 2005. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean holm oak forest. *Soil Biol Biochem*, 37:455–461.
- Sardans, J., Peñuelas, J., 2010. Soil enzyme activity in a Mediterranean forest after six years of drought. *Soil Sci Soc Am J*, 74:838–851.
- Shakesby, R.A. Doerr, S.H., Walsh, R.P.D., 2000. The erosional impact of soil hydrophobicity: current problems and future research directions, *Journal of Hydrology*, Volumes 231–232: 178-191,
- Treviño, M. et al., 2015. Evaluación integral del riesgo ante el cambio climático para las aves de la Península Ibérica. En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Vayreda, J. et al., 2015. Vulnerabilidad de los bosques españoles al cambio global: efectos sobre el stock y la capacidad de sumidero de carbono. En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Vilà, M. et al., 2015. Las invasiones biológicas bajo un escenario de cambio climático. En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.
- Vilà-Cabrera et al., 2015. Vulnerabilidad de los bosques ibéricos de pino albar ante el cambio climático (Capítulo 21). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático. MAGRAMA, Madrid, España.

Williams, P.H., Humphries, C., Araújo, M.B., Lampinen, R., Hagemer, W., Gasc, J.-P., Mitchell-Jones, T., 2000. Endemism and important areas for representing European biodiversity: A preliminary exploration of atlas data for plants and terrestrial vertebrates. *Belgian Journal of Entomology*, 2, 21-46.

Wilson et al., 2015. Cambios experimentados por los lepidópteros de la Sierra de Guadarrama en los periodos 1967-1973 y 2004-2005 (Capítulo 11). En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, *Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático*. MAGRAMA, Madrid, España.

Zavala, M.A, Ruiz-Benito, P., Benito-Garzón, M., García-Valdés, R. 2015. Aplicación de los Modelos de Distribución de Especies (MDE) para el análisis de los efectos del cambio climático en los bosques ibéricos. En: Herrero, A., Zavala, M.A. editores, *Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación de los bosques y la biodiversidad en España frente al cambio climático*. MAGRAMA, Madrid, España.

Capítulo 4

Impactos del cambio climático en la agricultura y la ganadería

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura y la ganadería en España ocupa a menos de un 5% de la población activa y corresponde a menos de un 5% del PIB. Sin embargo, si se tienen en cuenta también todas las actividades asociadas de todo el conjunto del sistema agroalimentario, es decir, la industria de insumos y servicios, la industria agroalimentaria, el transporte y la distribución, contribuye con un 14,2% al empleo y un 10,6% al PIB. De esta manera, el sector agroalimentario español es económicamente de los primeros sectores, muy cercano al turismo (Pwc, 2019). Así, España es el segundo país de la Unión Europea en términos de superficie agraria y ocupa el segundo puesto en términos de producción, con 25.357 millones de euros en 2017, un 13% de la producción europea (Pwc, 2019).

Además de la importancia económica, el sector agrario es estratégico para proporcionar la seguridad alimentaria a nivel nacional, es la actividad que más extensión ocupa, llegando a generar paisajes agrarios de gran valor ecológico y cultural.

Los cultivos herbáceos representan la mitad de toda la superficie cultivada en España, de los cuales, el 70% corresponde a cereales de grano, en su gran mayoría de secano (81%). Los cultivos leñosos ocupan en extensión un 30% de la superficie cultivada total, una proporción mucho mayor que la media europea, la mitad de la cual corresponde a olivar, seguido de frutales no cítricos (22%) y viñedo (19%). Aunque el olivar y el viñedo son cultivos tradicionales de áreas mediterráneas y resistentes a la sequía, un 30% y 40% respectivamente de la superficie plantada está irrigada. Por otra parte, prácticamente la totalidad (93%) de la superficie de cítricos y el 30% de los otros frutales se cultivan en regadío. A los 17 millones de hectáreas de la totalidad de superficie de cultivo en España, hay que añadir los aproximadamente 8,3 millones de has de prados y pastizales potencialmente utilizables por los sistemas ganaderos en extensivo (MAPA, 2018a).

Si bien tradicionalmente en los sistemas extensivos montañosos el ganado ovino ha sido muy importante, a lo largo del siglo XX se ha reducido muchísimo el número de cabezas de ganado, aumentando la de vacuno no lechero, que tiene menos costes de mantenimiento (Lasanta et al., 2015). En la actualidad, los sistemas de ovino de carne son extensivos o semi-extensivos, con los animales aprovechando pastos, barbechos y rastrojeras, pero siendo suplementados en determinados momentos del ciclo y con la finalización en cebadero de los corderos. Por el contrario, los sistemas de ovino lechero suelen ser intensivos, aunque sí que hay sistemas extensivos de producción lechera, con un carácter regional muy marcado. Lo mismo pasa con el vacuno. Por ejemplo, en la cornisa cantábrica abundan las explotaciones de vacuno lechero semi-extensivas, y en el suroeste español los sistemas extensivos de vacuno de carne, mientras que en el valle del Ebro son mayoría los sistemas intensivos de vacuno de carne.

Los tipos de ganado que han aumentado el número de cabezas en los últimos 15 años son el porcino, avícola y vacuno de carne (MAPA, 2017a). El porcino no ibérico o porcino blanco es el mayoritario y se produce en

sistemas intensivos, es decir, permanentemente estabulados y con alimentación controlada (MAPA, 2017b). Es la misma situación que la avicultura de carne y gallinas de puesta, pues a pesar de que aumenta el número de aves camperas, los sistemas intensivos suponen un 91,1% y un 92% de la producción de carne y huevos respectivamente (MAPA, 2017c, 2017d).

Respecto a la acuicultura en España, en términos de producción, es fundamentalmente de origen marino (ver Capítulo 5), y solo alrededor del 6% procede de acuicultura continental. La acuicultura marina está representada principalmente por la producción de mejillón, mientras que la producción de peces corresponde aproximadamente a un 20%, aunque muestra una tendencia ascendente (García Díez y Remiro Perlado, 2014). En este informe, los detalles sobre los efectos del cambio climático en la acuicultura están desarrollados en el capítulo 5.

Por último, en lo que respecta a la apicultura, a pesar de que en los últimos 15 años el número de colmenas en España ha aumentado un 25%, la producción total de miel ha disminuido un 17% (MAPA, 2017a).

En los últimos años la estructura del sector agrario en España se ha transformado considerablemente. Actualmente, el número de explotaciones agrarias es la mitad que el registrado en 1990, y esta tendencia a desaparecer se concentra en las explotaciones de menor tamaño e ingreso. Además, los efectos de perder determinadas actividades disminuyen la resiliencia de los ecosistemas, como el abandono de pastos por desaparición de las explotaciones de pequeña escala de ganado extensivo en la cornisa cantábrica y la superpoblación de *Cortaderia selloana* (González-Díaz et al., 2019). Hay muchos factores que explican esta tendencia, de los cuales queremos destacar los sociales ligados a la pérdida de población del medio rural y los relacionados con la viabilidad económica de las explotaciones. En cuanto a esta última, un claro ejemplo de dificultad es el aumento de insumos, en los últimos 10 años ha aumentado en 1,6 veces el gasto en insecticidas, fungicidas, nematicidas y acaricidas en España (MAPA, 2018b) y los precios de los piensos un 25% (MAPA, 2018b). Estas tendencias ponen de manifiesto la urgente necesidad de apoyar técnicas y manejos menos dependientes de insumos, así como otros canales de distribución para reducir la vulnerabilidad de agricultores y ganaderos.

La agricultura sufre directamente todos los efectos del cambio climático y también los impactos mencionados en capítulos anteriores, como el aumento de la erosión de los suelos, las inundaciones y las sequías, además del incremento de plagas y enfermedades. Gran parte de las explotaciones agrarias en España están apoyadas por la Política Agraria Común (PAC). En el período actual de la PAC (2014-2020) se incluyen medidas relacionadas con el cambio climático a través del Pilar 1 (pagos básicos y *greening*) y del Pilar 2 (medidas agroambientales). En cuanto a la protección de fallos en la producción, desde las instituciones españolas se está fomentando el uso de los seguros agrarios, incluso entre agricultores que tienen sus tierras en regadío, para la protección en futuros escenarios de sequía y escasez de agua (Rey et al., 2016), aunque se prevé que un aumento de la siniestralidad causará un aumento de las primas (Medina Martín, 2015).



Figura 4.1. Los efectos de perder determinadas actividades disminuyen la resiliencia de los ecosistemas, como el abandono de pastos por desaparición de la ganadería extensiva de pequeña escala en la Cornisa Cantábrica y la superpoblación de *Cortaderia selloana*. Autora: E. Galán.

Por otro lado, una de las carencias que se destaca en el Informe de Evaluación del PNACC-1 (Fernández et al., 2019), es la falta de desarrollo de modelos que simulen el comportamiento de distintos agentes patógenos con respecto al clima, la capacidad de adaptación al biotopo y la dinámica estacional de los distintos procesos, una cartografía del riesgo para las diversas parasitosis, así como los cambios de distribución de patógenos debidos a la influencia del clima. Así, para incluir una introducción a este tema se han realizado los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3 con información de literatura científica y de las instituciones sanitarias correspondientes. Asimismo, el Informe de Evaluación también indica que, en el marco del PNACC-1, no se han llevado a cabo acciones de desarrollo o recopilación de indicadores de cambio climático para el sector agrícola y ganadero.

Por su particular relación directa con el clima, además de los numerosos informes publicados en los últimos años, hay infinidad de documentos que recogen información relacionada con la agricultura y la ganadería en España y el cambio climático (ej. estudios sobre series a largo plazo o sobre percepciones de agricultores o ganaderos, noticias, etc.), que aportan testimonios y observaciones de evidencias del cambio climático, así como opciones de adaptación al mismo. Aunque un análisis exhaustivo de estas evidencias queda más allá del objetivo del presente informe, se ha querido recoger algunas de ellas en este capítulo por la especial atención que se le está dando tanto científica como socialmente. Cabe señalar que los impactos del cambio climático coexisten con muchas otras tendencias de cambio ambiental no climáticas. De esta manera, el cambio climático viene a sumarse a todos los otros factores (aumento del precio de los insumos, bajada de los precios de los productos en los mercados, introducción de especies y patógenos exóticos, despoblación de las zonas rurales, etc.) que aumentan la vulnerabilidad del sector y subsectores agrícolas y ganaderos. Así pues, las medidas más eficaces de adaptación al cambio climático serían todas aquellas que en su transversalidad disminuyan esta vulnerabilidad, como la cría de razas autóctonas o la producción en ecológico, la formación específica o la revitalización de redes del entorno rural (Muntané-Puig et al., 2019).

2. IMPACTOS EN LA AGRICULTURA EN ESPAÑA: ASPECTOS GENERALES

Los aspectos generales de la relación entre los factores de cambio climático y los impactos en la agricultura y la ganadería española se describen a continuación. Los impactos potenciales en cultivos específicos y producciones ganaderas se detallan en la siguiente subsección.

El aumento de la temperatura media provoca cambios fenológicos de adelanto de la primavera y retraso del otoño. Debido a la prolongación de las temperaturas estivales, la floración se adelanta y las cosechas se hacen más tempranas. Se espera que esto provoque un cambio de distribución de los cultivos a largo plazo, ya que algunas zonas dejarán de ser óptimas y otras pasarán a ser aptas y por lo tanto afectará a la competencia relativa entre países y regiones. Pese a que de manera general se espera que los cultivos más afectados por el aumento de temperaturas se desplacen hacia el norte, no es posible señalar la dirección de estos cambios de manera robusta para cada tipo de cultivo porque los modelos agroeconómicos que se han usado en distintos escenarios de cambio climático (GLOBIOM y MAGPIE) reflejan resultados muy dispares (Boere et al., 2019). A la dificultad de proyectar los impactos del cambio climático en la agricultura en interacción con el sistema económico, se suma la incertidumbre de los impactos ambientales que generaría un nuevo cultivo. Por ejemplo, el aumento de las temperaturas puede convertir algunas zonas mediterráneas en óptimas para el cultivo de frutas tropicales. Sin embargo, el paso a este tipo de cultivos (mango, aguacate, chirimoya y níspero), como viene sucediendo en la costa granadina desde los años 80, ha estado caracterizado por un aumento del uso de los recursos hídricos y deterioro de la calidad de las aguas subterráneas (Durán Zuazo et al., 2013). El efecto indirecto del aumento generalizado de temperaturas es que se alargue la temporada de plagas y aumente su supervivencia en invierno (cuadro 4.1).

El aumento de la temperatura mínima en invierno (inviernos suaves) implicará un menor riesgo de helada. También conllevará cambios fenológicos en la dirección contraria, provocando el atraso de la floración de cultivos que necesitan un mínimo de horas de frío para florecer. El aumento estival de las temperaturas máximas y de la mínima nocturna crean olas de calor que generan daños por estrés térmico, tanto en plantas como en animales, como las olas de calor de 2003 y 2006, que aumentaron la mortalidad de ganado bovino (Morignat et al., 2014, Vitali et al., 2015).

En general, el aumento de la temperatura generará un incremento de la demanda hídrica, que junto con la menor disponibilidad de recursos hídricos puede provocar déficit hídrico en los cultivos, mermas en la producción o pérdidas de la cosecha. La subida del nivel del mar puede colaborar a la disminución de los recursos hídricos con la intrusión salina de los acuíferos, pero también con reducción de zonas cultivables en las zonas costeras (apítulo 6). El aumento de fenómenos extremos (sequías e inundaciones, tormentas, heladas) provocará el aumento de la erosión del suelo y la alteración de su composición química (Capítulo 2 y 3). Aunque la tendencia general sea de aumento de temperaturas, paradójicamente, el avance de la floración puede implicar mayor riesgo de daños por heladas (Nardone et al., 2010). De hecho, las heladas siguen siendo la principal causa de siniestralidad en frutales (Agroseguro, 2018).

Cuadro 4.1

Plagas y patógenos de los cultivos y cambio climático

Aspectos generales

En general, temperaturas más elevadas siempre están asociadas a mayores tasas de desarrollo, crecimiento y reproducción. Sin embargo, los modelos de predicción de impactos del cambio climático en los cultivos raramente incluyen el efecto de las plagas, que está previsto que afecten más a las zonas templadas que las tropicales (Deutsch et al., 2018). Esto se debe a que no existen suficientes datos de monitorización a largo plazo para poder modelizar los impactos con suficientes niveles de certidumbre (Barzman et al., 2015).

El aumento de las temperaturas medias incrementa los hábitats para el potencial establecimiento de especies de otras latitudes. El avance de las temperaturas primaverales favorece desarrollos más tempranos de la planta, alargando la duración de las temporadas y posibilitando la transmisión de patógenos de un cultivo al siguiente (EFSA, 2011). Por otra parte, los inviernos menos fríos hacen que la mortalidad de patógenos disminuya y se alargue la temporada reproductiva de los patógenos, dando tiempo a que se desarrollen más generaciones en un mismo año, incrementando así la virulencia de sus impactos (EFSA, 2011).

Los fenómenos extremos pueden producir expansiones abruptas, como fue el caso de la procesionaria del pino en Italia, cuando la ola de calor de 2003 favoreció que la plaga se expandiera a una velocidad 10 veces mayor que la observada en los últimos 50 años. El umbral de temperatura para que suceda el vuelo nocturno (14°C) fue 5 veces más frecuente durante 2003 que la media para la zona de los Alpes italianos, lo cual incrementó la capacidad de dispersión de la plaga (Battisti et al., 2006). Por otra parte, el viento y las corrientes de agua favorecen la dispersión a gran escala de semillas, insectos y patógenos.

El efecto aislado del cambio climático en la dispersión de plagas y patógenos es difícil de observar debido al gran peso de la acción humana directa, como la importación de material vegetal infectado y de liberación de especies exóticas. Ejemplos bien conocidos son el caracol manzana, originario de la cuenca del Amazonas y que se observó por primera vez en el Ebro en 2009, o la *Tuta absoluta* (originaria de Suramérica y detectada en España por vez primera en 2006) que, en ausencia de medidas de control, puede causar hasta el 100% de pérdida de la cosecha de tomates.

Por otro lado, la implantación de nuevos cultivos también contribuye a la distribución de nuevos patógenos. Es el caso del chancro bacteriano del kiwi (*Pseudomonas syringae*) que se detectó en España por primera vez en 2011 (Abelleira et al., 2011), o los asociados a los cultivos para las ensaladas preparadas (Gullino et al., 2019). Temperaturas más cálidas implican que insectos que anteriormente no podrían haber sobrevivido en áreas nuevas son capaces de establecerse y colonizar.

Por último, el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico suele considerarse un efecto positivo por aumentar la tasa fotosintética sobre todo en plantas C3 (p.ej. trigo, cebada o avena), pero en mucha menor

medida en plantas C4 (p.ej. maíz o amaranto) (Boere et al., 2019). En pastos, las especies leguminosas tienden a mostrar una mayor respuesta productiva a concentraciones elevadas de CO₂ que los pastos con especies de gramíneas (Allard et al., 2003; Nowak et al., 2004). Aunque esto suceda depende de los otros factores limitantes, es decir, agua y nutrientes del suelo, por lo que no se sabe exactamente su influencia en la producción de biomasa, así que hay que tener cautela en la interpretación de sus efectos (Pérez Domínguez et al., 2018). La fertilización por CO₂ es una variable crucial porque cambia por completo la magnitud de los impactos en la producción de los cultivos cuando se modelizan escenarios futuros de cambio climático. Por esta razón, los informes más recientes de los proyectos europeos PESETA III y COACCH ya incluyen comparaciones de los escenarios incluyendo y no incluyendo este efecto (Boere et al., 2019; Pérez Domínguez et al., 2018).

3. IMPACTOS EN LA AGRICULTURA Y LA GANADERÍA: ASPECTOS ESPECÍFICOS

Sector agrícola

Temperaturas excesivamente altas durante la época de floración y desarrollo del grano (aproximadamente desde mediados de abril hasta mediados de julio) pueden influir en el rendimiento de los cultivos herbáceos. Se estima que los días con temperaturas >25°C, umbral a partir del cual pueden disminuir los rendimientos, aumenten en 10 días durante los próximos 30 años (Agriadapt, 2018). Esto hará que aumenten las necesidades hídricas de los cultivos lo que, unido a la bajada de precipitaciones, hará que el número de zonas óptimas para los cereales disminuya.

En secano, los impactos debidos a temperaturas más cálidas y precipitaciones más escasas dependen del tipo de cultivo. Así, está previsto que en un escenario a corto plazo (hasta 2030) sean los cultivos de secano de verano (maíz, remolacha y girasol principalmente) de las regiones del sur europeo las que más sufran los impactos. Por ejemplo, en algunas zonas de Galicia las pérdidas de producción de maíz y remolacha azucarera podrían llegar al 50%.

En España, los regadíos constituyen un 65% de la demanda total de agua. En las simulaciones en las que el agua no es un factor limitante, en un escenario a corto plazo (hasta 2030) la bajada de producción de los principales cultivos de regadío sería básicamente debido a altas temperaturas, y se situaría sobre un 20%, mucho menor que en secano (Ciscar et al., 2018). Si no hubiera ningún otro factor limitante (agua, nutrientes del suelo, materia orgánica), la mayor concentración de CO₂ respecto a los niveles actuales tendría un efecto fertilizante que podría compensar los otros impactos (Ciscar et al., 2018). Sin embargo, los episodios de sequía sí afectan a la cantidad de agua que reciben los agricultores, la cual puede ser insuficiente para cubrir las demandas de los cultivos, con la consecuente bajada de rendimientos y sus efectos en la rentabilidad (De Stefano and Llamas, 2012).

Evidencias: Durante la segunda mitad del siglo XX se ha detectado una reducción de entre 10 y 20% de los recursos hídricos disponibles en muchas cuencas de la península. En algunas de ellas (Duero, Guadalquivir, Guadiana y Júcar) la precipitación media ha bajado entre un 2% y un 8% en las últimas seis décadas, mientras que en otras como la del Ebro y las cuencas internas de Catalunya esta reducción no ha sido significativa. Sin embargo, la bajada en precipitaciones no explica *per se* la disminución de aguas superficiales, entre otros factores se encuentran cambios en los usos del suelo y la creciente extracción de agua. Se prevé que esta tendencia de disminución del agua disponible continúe a lo largo del siglo XXI. Por ejemplo, se estima que en los próximos 50 años la evapotranspiración aumentará entre un 5% y un 11% en la cuenca del Duero (De Stefano and Llamas, 2012).

Los cultivos leñosos no presentan el potencial de gestión adaptativa de avance o retraso de la siembra según las condiciones climáticas; por ello, los cambios fenológicos son muy evidentes. Esto, además de la importancia ya señalada del olivar y del viñedo, hace que exista numerosa información. En experimentos de campo con olivos

se ha comprobado que incrementar 4°C por encima de la temperatura ambiente avanza la floración y disminuye la cantidad de flores hermafroditas, por lo que se incrementa la necesidad de polinización cruzada (Benlloch-González et al., 2019). También se retrasa la maduración, se forman menos frutos y se incrementa la relación semilla/pulpa. A nivel productivo se observan dos tendencias, se reduce la cantidad de aceite por árbol, y la talla de los árboles aumenta (Benlloch-González et al., 2019).

Debido a la disminución de precipitaciones está previsto que los rendimientos bajen un 3,5% y un 7% para olivares irrigados y de secano respectivamente, en el periodo 2030-2050 respecto al periodo 1980-2009 (simulación para la Sierra de Mágina, Jaén) (Ronchail et al., 2014). En el periodo 2080-2100 la reducción sería mayor, de 11% y 23% respectivamente. Esta misma reducción de precipitaciones limitará la potencialidad de la instalación de regadíos como medida para hacer frente a los efectos del cambio climático. Por ello, se prevé que las comunidades de regantes y los organismos gestores de cuenca deberán capacitarse para poder desarrollar estrategias colectivas de gestión del agua. Sin embargo, actualmente esto se ve dificultado por la escasa concienciación y escepticismo sobre el cambio climático de los agricultores de la zona (solo 4 de 15 declararon estar convencidos sobre el cambio climático futuro). Además, los problemas económicos a los que se enfrentan los agricultores de la zona, debido a lo ajustado de los precios, dificultan la planificación a largo plazo y la toma de decisiones (Ronchail et al., 2014).

Los impactos del cambio climático en el viñedo dependen del periodo de crecimiento de la planta. Así, mientras que la subida de la temperatura media en invierno puede resultar beneficiosa por disminuir el riesgo de heladas, en verano, durante la época de maduración, se corre el riesgo de disminución de la calidad (menor acidez, color y taninos) y aumento del grado alcohólico. Esto es debido a que, con temperaturas elevadas más tempranas, sobre todo con un descenso del diferencial de temperatura día-noche, la pulpa alcanza una elevada concentración de azúcar de manera precipitada, mientras que pieles y semillas maduran más lentamente. Así, si se cosecha la uva en su nivel óptimo de azúcar, puede no tener el aroma ni el color buscado, pero si se espera a la maduración aromática, se corre el riesgo de excesivo grado alcohólico (Agriadapt, 2018; COAG, 2016).



Figura 4.2. Aunque el viñedo es un cultivo tradicional de áreas mediterráneas y resistentes a la sequía, un 30 y 40% respectivamente de la superficie plantada está irrigada. Viñedo en regadío de la Rioja Alavesa. Autora: E. Galán.

La disminución de las precipitaciones puede disminuir la presencia de hongos en zonas húmedas, pero, a pesar de ser un cultivo de bajas necesidades hídricas, en los cultivos de secano de las zonas áridas puede generar disminución de rendimientos, al margen de un mayor riesgo de incendios (COAG, 2016).

Los tiempos y las condiciones idóneas de maduración son distintos según la variedad, así que los impactos y las posibilidades de adaptación serían distintos según la denominación de origen. Los mayores desfases entre el ciclo de las variedades y el clima debido al incremento de las temperaturas serían en la mitad sur peninsular y en las regiones más cálidas del valle del Ebro. Como resultado, se limitaría tanto la calidad como las variedades que se pueden cultivar (COAG, 2016). Por ejemplo, variedades de ciclo largo se verían favorecidas por encima de variedades de ciclo corto, como el chardonnay (Zurimendi, 2019).

Evidencias: Los viticultores han detectado un avance generalizado de la vendimia, y Bodegas Torres ha comprado terrenos en zonas del Pre-Pirineo para buscar temperaturas más frías³². Los daños de las heladas sobre el valor de la producción en viñedos han pasado del 5,5% al 0,7% desde la década de los ochenta a la primera del 2000 (COAG, 2016). En una encuesta a 481 viticultores de la DOP Rioja, un 72% constataron que ha habido cambios en la cosecha de la uva y el 71,8% cree que en el futuro será necesario hacer instalaciones de riego (Cabello et al., 2019).

Los cambios fenológicos en frutales de hueso están bien documentados. El avance de las temperaturas primaverales provoca avances en la floración en frutales de climas templados (Ramírez and Kallarackal, 2015), que de media en Europa se está adelantando 2,5 días por década desde los años 70 (Menzel et al., 2006). Sin embargo, en pomáceas y frutales de hueso cultivados en climas más cálidos, la falta de un número suficiente de horas-frío mientras están en estado latente puede generar la dinámica opuesta, es decir, retrasos en la floración (Campoy et al., 2011). Además, la floración se muestra irregular y con mayor tendencia a caer.

Por otra parte, muchos de estos frutales (almendros, albaricoqueros, cerezos) tienen flores hermafroditas cuyas partes femenina y masculina maduran a diferentes ritmos. Tradicionalmente, los agricultores han resuelto este desfase combinando filas de distintas variedades, como las de almendras ‘Desmayo Largueta’–‘Marcona’, ayudados por fauna polinizadora. La tendencia hacia el retraso en la floración y el desacoplamiento de las interacciones planta-insecto ha sido observada durante los últimos 40 años (Gordo and Sanz, 2005), así que es probable que la actual sincronización para la polinización cambie (Campoy et al., 2011). Esto puede provocar reducciones en la producción, pero sobre todo un descuadre en la planificación que puede hacer que no resulte viable la recogida y la comercialización de la fruta. La consecuencia a escala europea es que habrá más territorios óptimos para el cultivo de la cereza y otros frutales de hueso restringidos por las temperaturas frías y esto supondría la pérdida de la ventaja comparativa de España en el mercado europeo de fruta temprana.

Evidencias: Los efectos en el retraso de la fenología de algunas especies frutales en España están bien documentados. Las respuestas son diferentes según variedades. Por ejemplo, se ha demostrado que las variedades tardías de cereza pierden mucha más producción por este efecto que las variedades tempranas (Campoy et al., 2019). Lo mismo ha sido observado para las variedades de almendras tardías (Prudencio et al., 2018), para albaricoques cultivados en zonas de clima mediterráneo (Bartolini et al., 2019) y para manzanas (Legave et al., 2015).

En varias especies de cítricos se ha observado un adelantamiento en la época de floración en ambiente mediterráneo entre 1960-2010. Sin embargo, en aquellas regiones donde los inviernos tuvieron temperaturas por encima de los 10°C, los cítricos siguieron la dinámica antes escrita para los frutales de hueso: se retrasó la floración hasta alcanzar una acumulación suficiente de horas-frío (Fitchett et al., 2014). En el otro extremo, otoños más cálidos hacen que los limones tarden más en adquirir la coloración amarilla. Para unas simulaciones de Murcia, en un escenario RCP4.5, en 2050, los limones empezarían a amarillear a mediados de octubre,

³² <https://www.torres.es/es/blog/planeta-vino/mirando-al-futuro>

mientras que con un RCP8.5, lo harían en noviembre, y nunca llegarían al tono de amarillo que conocemos actualmente (Erena et al., 2019).

Evidencias: Los cambios en la fenología hacen que las cosechas de distintas variedades de cítricos se solapen, contribuyendo, junto a otros factores (afectaciones a la calidad, competencia con importaciones de otros países, fragmentación de la comercialización y organización sectorial insuficiente) a que bajen los precios recibidos por el agricultor³³.

Cuadro 4.2

Plagas y patógenos de los cultivos y cambio climático

Aspectos específicos

Insectos

La mayoría de los insectos son ectotermos y su fenología, reproducción y desarrollo está ligado a la exposición de las condiciones climáticas. Debido a que su ciclo de vida es muy corto, las adaptaciones evolutivas son muy rápidas y ya están reflejando los cambios climáticos actuales.

Dos ejemplos muy bien conocidos son la expansión de la procesionaria del pino (Battisti et al., 2005) y la mosca del olivo (Gutierrez et al., 2009), que se extienden desde latitudes bajas hacia los polos y desde altitudes bajas hacia altas, eliminando así la función de barrera fría que ejercen las montañas. Además, hasta ahora, las temperaturas invernales impedían que las especies introducidas desde regiones más cálidas se naturalizaran. Una evidencia del cambio en esta tendencia es la reciente expansión del picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*) que, a pesar de estar presente en las palmeras de la península ibérica desde 1993, en solo dos años, entre 2004 y 2006, colonizó la totalidad de la región mediterránea (Robinet and Roques, 2010).

Por otra parte, los cambios fenológicos, que en general se manifiestan con temporadas más largas, hacen que se elimine la diapausa invernal y se completen más generaciones por año, creando ataques más virulentos y aumentando la capacidad de generar resistencias a tratamientos (Barzman et al., 2015; Robinet and Roques, 2010).

Interacciones planta-insecto. En general, los cambios fenológicos en los insectos suceden más rápidamente que en las plantas. Por ejemplo, se ha observado que el ciclo del escarabajo de la patata (*Leptinotarsa decemlineata*) se adelanta, mientras que las fechas de siembra de la patata se han mantenido constantes, por lo que el escarabajo tiene tiempo de completar más generaciones en una misma temporada. Por el contrario, los cambios fenológicos perjudican a la mosca del olivo (*Bactrocera oleae*), ya que la fecha de floración se ha adelantado, pero menos días que la aparición de la mosca, con lo que la primera generación de mosca de la temporada se vio debilitada (Gordo and Sanz, 2005).

Interacciones depredador-plaga y huésped-patógeno. Inviernos cálidos posibilitan que los áfidos (pulgones) permanezcan en hospedadores secundarios, que pueden ser plantas cultivadas o adventicias, y colonizar rápidamente al principio de la estación (Barzman et al., 2015). Las larvas de coccinélidos (mariquitas), que son voraces depredadoras de áfidos, se desarrollan peor con temperaturas >30°C, así que es esperable que sus poblaciones se reduzcan, y con ello su eficacia como controladores de plagas, si se generalizan las temperaturas próximas a los extremos de su rango de tolerancia (Bjorkman and Niemela, 2015).

Hongos

El comportamiento de los hongos es más difícil de predecir, ya que dependen de interacciones complejas entre muchos factores. Uno puede ser la duración de la humedad en las hojas. Así, en un futuro a medio plazo se espera que los riesgos de infección fúngica aumenten en un otoño e invierno de media más cálidos y que disminuyan en verano (Huber et al., 2018). Sin embargo, las condiciones diferentes a las óptimas para las que se ha desarrollado un cultivo modifican la expresión de los genes de resistencia a hongos. Por ejemplo, es bien conocido cómo las sequías hacen que los árboles sean más susceptibles a plagas (EFSA, 2011). Por otra parte, los efectos de un patógeno pueden ser muy graves cuando la variabilidad genética de un cultivo es baja en un área, como sucede en extensas áreas especializadas en un solo cultivo (Barzman et al., 2015).

³³ <https://www.mapa.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/-El-Ministerio-de-Agricultura,-Pesca-y-alimentacion-presenta-al-sector-16-iniciativas-para-revitalizar-el-mercado-de-los-citricos-/tcm:30-507427>

Cuadro 4.2 (cont.)**Bacterias**

El caso de las bacterias es más preocupante que los otros patógenos, pues no solo migran con las plantas a las que infectan y se extienden (junto con los vectores) con ambientes más cálidos, sino que temperaturas más cálidas hacen que emerjan nuevas cepas. La combinación de todos estos factores está detrás de la actual plaga de *Xylella fastidiosa*, cuya prevalencia y expansión de los vectores que la transmiten (insectos chupadores del xilema) se ven favorecidos por unos inviernos suaves (Sicard et al., 2018). La *Xylella fastidiosa* es responsable de varias enfermedades con efectos graves en numerosas especies de interés agrícola, como el quemado de hojas en leñosas y el enanismo de la alfalfa. Además, existen otras especies de árboles, arbustos y plantas ornamentales y silvestres que pueden hospedar la bacteria sin mostrar síntomas, sirviendo de fuente de inóculo para la infección de otros cultivos. Recientemente, se ha extendido por amplias zonas de Italia con el síndrome del desecamiento rápido del olivo. En 2016 se detectó en las islas Baleares y en 2017 en la Comunidad Valenciana afectando principalmente a almendros. Por el momento no hay tratamiento y la única solución es la eliminación total de la planta.

Virosis

Se sabe poco sobre la conexión de las infecciones causadas por virus y el cambio climático. De manera opuesta a los hongos y a las bacterias patógenas, se ven favorecidos por eventos extremos que generan ambientes secos (Anderson et al., 2004). Los virus no tienen mecanismos propios de dispersión y utilizan vectores para dispersarse. El virus de la cuchara del tomate, por ejemplo, diagnosticado por primera vez en 1992 en el sur de la península ibérica y a partir del año 2000 en el norte, se transmite a través de la mosca blanca (*Bemisia tabacci*) y se expande con ésta (Canto et al., 2009). Lo mismo ha sucedido con el virus que genera la tristeza de los cítricos, cuyo vector es originario de Sudamérica (Canto et al., 2009).

En los sistemas de pastos peninsulares no se espera que el efecto fertilizante del CO₂ se manifieste debido a que existen muchos otros factores limitantes, como el agua o los nutrientes del suelo (Rubio and Roig, 2017). La subida de la temperatura media y las mínimas de invierno, así como el aumento de la irregularidad de las precipitaciones, alterará la fenología de las especies pratenses actuales, produciendo cambios en la abundancia de especies, además de crear hábitats favorables para especies invasoras. Todo esto disminuye la producción y la calidad de los pastos, disminuyendo el número de cabezas de ganado que puede sostener sin producirse sobrepastoreo. Por otro lado, las bajadas de producción previstas para otros cultivos aumentarán el riesgo de abandono y disminuirán las parcelas donde actualmente se realiza aprovechamiento de rastrojeras. Esta dinámica puede acarrear más presión sobre las zonas de pasto (Rubio and Roig, 2017).

El efecto del sobrepastoreo combinado con eventos extremos aumenta el riesgo de erosión y alteraciones en la química del suelo, lo que a su vez genera cambios en la calidad nutricional del pasto. El esperable aumento de frecuencia, magnitud e intensidad de incendios forestales favorecerá la aparición de especies pirófitas, que también afectarán a la calidad nutricional del ganado (Rubio and Roig, 2017).

Evidencias: Pastores de los Pirineos han observado cambios ambientales relacionados con el aumento de las temperaturas, como un descenso de la cantidad de nieve acumulada y el consecuente descenso del caudal de las fuentes de montaña, cuestión que ha podido ser contrastada con observaciones científicas (Fernández-Giménez and Fillat, 2012). Otros cambios ambientales observados, como el aumento de las cubiertas vegetales arbustivas y arboladas en zonas de pasto abandonadas, aumenta la vulnerabilidad del sistema al cambio climático, pues esta materia vegetal incrementa el riesgo de incendio (Fernández-Giménez and Fillat, 2012).

Sector ganadero

El aumento de temperatura en forma de eventos extremos y el aumento de las temperaturas mínimas en verano generan episodios de estrés térmico en los animales, lo cual hace disminuir su bienestar, su ingesta, y su producción, pudiendo incluso llegar a ser mortal. Para las vacas lecheras, los efectos en bienestar pueden notarse a umbrales muy bajos de temperatura, por ejemplo, 23°C para humedades relativas superiores a 50% (Galán et

al., 2018). Los cerdos, debido a su baja capacidad de sudoración, también son muy sensibles a altas temperaturas. Por ejemplo, las cerdas que paren con temperaturas ambiente $>33^{\circ}\text{C}$ muestran unas tasas de mortalidad 5-6 veces superior a la media. La exposición a temperaturas superiores a $>30^{\circ}\text{C}$ causa también altas mortalidades en pollos. En general, la exposición a altas temperaturas disminuye la fertilidad de los animales, incluyendo gallinas (con la correspondiente bajada de producción de huevos), conejos y caballos (Nardone et al., 2010).

La disminución de precipitaciones acarreará una disminución en la disponibilidad de agua, disminuyendo la capacidad de los animales de mitigar el estrés por calor e incrementando el malestar animal (Nardone et al., 2010). Además, el aumento generalizado de las temperaturas y de las mínimas de invierno cambiará los patrones y las plagas de enfermedades a los que está expuesto el ganado (cuadro 4.3) (Rubio and Roig, 2017).

La magnitud de los impactos sobre el ganado dependerá de la capacidad de incluir en los parámetros de selección la tolerancia al estrés por calor, que suele estar en contraposición con los productivos (Kadzere et al., 2002). El riesgo de sobrepastoreo dependerá del manejo de los rebaños y de las densidades ganaderas con las que se trabajen (DeLonge and Basche, 2018). De esta manera, la capacidad de adaptación de los ganaderos no solo vendrá facilitada por su conocimiento técnico, sino que tendrá consecuencias culturales e implicaciones financieras (Rivera-Ferre et al., 2016).



Autora: E. Galán

Estos impactos generales tendrán mayor o menor efecto según el sistema. En los sistemas intensivos industriales, los animales están permanentemente en establos, cuyas condiciones ambientales pueden modificarse (ventiladores, duchas, corrientes de aire, etc.). Por eso se espera que los efectos directos del cambio climático (estrés por calor, disponibilidad de agua y alimentos) sean menores en estos sistemas, aunque siempre con aumento de los costes de producción. Hay que tener en cuenta, además, que las razas animales más productivas, que son las que se suelen emplear en estos sistemas, son las que tienen umbrales más bajos de estrés por calor (Nardone et al., 2010), mayor reducción de fertilidad (López-Gatius, 2003) y mayor aumento de la mortalidad (Nørgaard et al., 1999). Con todo, se espera que los impactos más importantes en sistemas industriales sean indirectos, es decir, los derivados del incremento de los costes de agua, alimentación, alojamiento, transporte o destrucción de infraestructuras debido a eventos extremos (Rivera-Ferre et al., 2016).

En los sistemas mixtos y extensivos los animales tienen acceso al exterior, así que se verán afectados de manera directa por la limitación del acceso al agua y la exposición al estrés por calor, sobre todo en pastos donde no hay suficiente arbolado para producir sombra (Deniz et al., 2019). A su vez, también les afectarán el detrimento de calidad y cantidad del pasto y todo lo que pueda afectar a las infraestructuras de que dispongan (Rivera-Ferre et al., 2016). Por lo general, estos sistemas se verán más expuestos a plagas y patógenos (sobre todo si se trata de parásitos que usen a fauna salvaje como vector), por lo que se necesitarán medidas de adaptación específicas, como, por ejemplo, limitar el acceso de fauna salvaje a puntos de agua, etc.

Cuadro 4.3 Enfermedades del ganado y zoonosis relacionadas con factores climáticos**Enfermedades del ganado*****Enfermedades*****1. Enfermedades transmitidas por mosquitos del género *Culicoides***

Actúan de vectores para los virus de la lengua azul (que apareció por vez primera en España en 2007 (Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2019a), la peste equina africana y schmallenberg (Jiménez-Ruiz et al., 2019). Se espera que el aumento general de las temperaturas y de las mínimas en invierno aumenten su distribución en España (Cuéllar et al., 2018).

2. Tuberculosis

La prevalencia en rebaños de la tuberculosis bovina y caprina tendió a descender durante la primera década del 2000, hasta que a partir del año 2013 volvió a ascender, tendencia que se ha interrumpido en el año 2017 (Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2017a). La temperatura óptima para la supervivencia de la bacteria es entre 12°C y 24°C, por lo que el aumento de las temperaturas mínimas en invierno favorecería su supervivencia. Sin embargo, hay otros factores de más peso relacionados con la prevalencia y la incidencia, como el traslado de ganado o la presencia de rebaños de toro de lidia (García-Saenz et al., 2014).

3. Peste Porcina Africana. Vector: Garrapatas del género *Ornithodoros*

Actúan como vectores de la Peste Porcina Africana (erradicada de España en 1995), más frecuente en sistemas extensivos de producción porcina, la transmiten después de haber picado a roedores o reptiles. En ellas el virus puede permanecer activo hasta 8 años, es por esto que la presencia de estas garrapatas, asociadas a ambientes áridos y cuya presencia ha sido detectada en el sur de la península ibérica, dificulta la erradicación de la enfermedad una vez se manifiesta (EFSA, 2013).

Zoonosis

Además del cambio climático, son muchos otros los factores que pueden influenciar en la epidemiología de las enfermedades vectoriales: composición atmosférica, urbanización, desarrollo económico y social, comercio internacional, migraciones humanas, desarrollo industrial, uso de la tierra-regadíos-desarrollo agrícola (López-Vélez and Molina Moreno, 2005).

1. Fiebre Hemorrágica del Congo. Vector: Garrapatas del género *Hyalomma*

El primer caso de fiebre hemorrágica del Congo en España fue detectado en un hombre de 62 años sin antecedentes de viajes, comenzó con síntomas el 16 de agosto 2016 y falleció nueve días después. Su vector, las garrapatas del género *Hyalomma* prevalece en los meses de abril-junio, pero su supervivencia está favorecida por inviernos suaves (Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2017b). Ya han sido halladas en Andalucía, Castilla-León, Madrid, Extremadura, Aragón, Castilla La Mancha y Ceuta, siendo menos abundantes en el norte de la península. En una campaña realizada de 2001 a 2015, la gran mayoría de las garrapatas positivas fueron capturadas sobre ciervos, gamos y jabalíes (Moraga-Fernández et al., 2019). La frecuencia de garrapatas positivas fue de 2,78% (44/1.579), similar a los países de la región europea donde la fiebre hemorrágica del Congo ya se considera endémica (Kosovo, Bulgaria y Albania) (Negredo et al., 2019).

2. Fiebre del Valle del Rift. Vector: mosquito del género *Aedes*

La especie más afectada es la ovina, por lo que se espera que las personas expuestas al contacto con ovejas corran más riesgo de transmisión zoonótica. Pese al reciente despliegue de la enfermedad en la costa africana del Mediterráneo, no se han detectado casos en España. Se considera que Andalucía es la región con más alto riesgo, aunque el mosquito vector se encuentra actualmente presente en las zonas mediterráneas de la Península (Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2019b).

3. Fiebre del Nilo occidental. Vector: mosquito del género *Aedes* y *Culex*

Se desplaza largas distancias porque las aves migratorias tienen capacidad de ser portadoras y afecta a équidos. En España, los primeros focos en équidos fueron detectados en 2010 en Andalucía (Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2017c). La presencia de mosquitos *Culex* se relaciona con temperaturas cálidas, con preferencia en zonas urbanas y zonas rurales con proximidad a granjas de ovejas (Bravo-Barriga et al., 2017).

Evidencias: Los efectos del cambio climático en sistemas ganaderos en extensivo se ven atenuados por la capacidad adaptativa de los ganaderos y ganaderas (p. ej. poner depósitos de agua, cambiar de pasto cuando se agosta, etc.), de ahí la dificultad de monitorear evidencias de los efectos contemporáneos del cambio climático. Por ello, hay estudios que están utilizando a los propios ganaderos y ganaderas para notificar evidencias. De una muestra de 100 ganaderos y ganaderas del sector de la ganadería extensiva española, 78% constataron que han observado un incremento de períodos de sequía (menos lluvia en verano y primavera), 73% desplazamientos de las estaciones, 70% una disminución del caudal de los cuerpos de agua y 69% incrementos en las temperaturas máximas (Muntané-Puig et al., 2019). La inclusión de los mismos agricultores y ganaderos como observadores e informantes clave en combinación con observaciones científicas puede aportar una valiosa fuente de información, como se ha demostrado en algunos estudios (Fernández-Giménez and Fillat, 2012, López i Gelats et al. 2017, Muntané-Puig et al. 2019).

El aumento de temperaturas puede provocar divergencias entre la fenología de los polinizadores y las especies que polinizan y generar ambientes compatibles con especies vegetales exóticas. Sin embargo, esto afectaría más a especies polinizadoras especialistas y menos a las abejas melíferas (apicultura), ya que son más generalistas. Por esta razón, se prevé que la abeja melífera sea menos vulnerable al cambio climático que otros insectos. La distribución de patógenos y su virulencia también están relacionadas con la temperatura. Por ejemplo, a más temperatura la varroa muestra menos virulencia, mientras que *Nosema cerana* puede desarrollarse en un rango de temperaturas mayor que la menos virulenta *Nosema apis*. Por otra parte, los cambios en la floración (no solo por temperatura sino también por escasez de lluvias otoñales) pueden conllevar escasez de alimentos en determinadas épocas del año.

Los fenómenos meteorológicos extremos, como tormentas, sequías, inundaciones o incendios pueden incrementar la mortalidad. Así, en general, el cambio climático se comportaría como un agravante de los factores que ya amenazan a las abejas: los parásitos y patologías (varroosis, nosemosis), enemigos recientes, como la avispa asiática (*Vespa velutina*), la fragmentación de hábitats, intoxicaciones provocadas por la agricultura industrial, o el síndrome de despoblamiento de las colmenas (López i Gelats et al., 2017). También se ha observado cierto desacoplamiento entre los primeros vuelos de polinizadores y los períodos de floración en zonas mediterráneas; así, en 30 años la aparición de la abeja (*A. mellifera*) fluctúa a diferentes ritmos que las especies de árboles cuya floración coincide con el mes de marzo (Gordo and Sanz, 2005).

Evidencias: En el informe: “Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la apicultura mediterránea en España” (López i Gelats et al., 2017) se entrevistaron a 33 apicultores de la región mediterránea que describieron que habían observado:

- Temperaturas anormalmente altas que acortan y adelantan la floración y reducen la cantidad de flores, lo que dificulta la alimentación de las abejas.
- Desacoplamiento entre la fenología de las abejas y la de las plantas.
- Acortamiento de la parada invernal, que se relaciona con mayor producción pero que favorece a los parásitos.
- Expansión de especies enemigas de las abejas, de patologías y de variaciones en su virulencia.
- Mortalidad local producida por fenómenos extremos.

4. REFERENCIAS

- Abelleira, A., López, M.M., Peñalver, J., Aguin, O., Mansilla, J.P., Picoaga, A., García, M.J., 2011. First Report of Bacterial Canker of Kiwifruit Caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in Spain. *Plant Dis.* 95, 1583–1583. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-11-0537>
- Agriadapt, 2018. Discussion Paper 2018 Life Agriadapt: Sustainable Adaptation of EU Farming Systems to Climate Change.
- Agroseguro, 2018. Informe anual 2018 Agroseguro.

- Albizua, A., Corbera, E., Pascual, U., 2019. Farmers' vulnerability to global change in Navarre, Spain: large-scale irrigation as maladaptation. *Reg. Environ. Change* 19, 1147–1158. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01462-2>
- Allard, V., Newton, P. C., Lieffering, M., Clark, H., Matthew, C., Soussana, J. F., & Gray, Y. S. 2003. Nitrogen cycling in grazed pastures at elevated CO₂: N returns by ruminants. *Global Change Biology*, 9(12), 1731-1742.
- Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R., Daszak, P., 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends Ecol. Evol.* 19, 535–544. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.07.021>
- Bartolini, S., Massai, R., Iacona, C., Guerriero, R., Viti, R., 2019. Forty-year investigations on apricot blooming: Evidences of climate change effects. *Sci. Hortic.* 244, 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.070>
- Barzman, M., Lamichhane, J.R., Booij, K., Boonekamp, P., Desneux, N., Huber, L., Kudsk, P., Langrell, S.R.H., Ratnadass, A., Ricci, P., Sarah, J.-L., Messean, A., 2015. Research and Development Priorities in the Face of Climate Change and Rapidly Evolving Pests, in: Lichtfouse, E. (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16742-8_1
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E., Larsson, S., 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Glob. Change Biol.* 12, 662–671.
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., Larsson, S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecol. Appl.* 15, 2084–2096.
- Benlloch-González, M., Sánchez-Lucas, R., Bejaoui, M.A., Benlloch, M., Fernández-Escobar, R., 2019. Global warming effects on yield and fruit maturation of olive trees growing under field conditions. *Sci. Hortic.* 249, 162–167. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.046>
- Bjorkman, C., Niemela, P., 2015. *Climate Change and Insect Pests*. CABI.
- Boere, E., Valin, H., Bodirsky, B., Baier, F., Balkovic, J., Batka, M., Folbert, C., Karstens, K., Kindermann, G., Leclere, D., Wang, X., Weindl, I., Havlik, P., Lotze-Campen, H., 2019. D2.2 Impacts on agriculture including forestry and fishery. Deliverable of the H2020 COACCH project. Ministerio para la Transición Ecológica.
- Bravo-Barriga, D., Gomes, B., Almeida, A.P.G., Serrano-Aguilera, F.J., Pérez-Martín, J.E., Calero-Bernal, R., Reina, D., Frontera, E., Pinto, J., 2017. The mosquito fauna of the western region of Spain with emphasis on ecological factors and the characterization of *Culex pipiens* forms. *J. Vector Ecol.* 42, 136–147. <https://doi.org/10.1111/jvec.12248>
- Cabello, S.A., Ramalle-Gomara, E., Miranda, J.G., Sáinz, L.A., Santamaria, M.P.D., Bellido, N.P., 2019. El territorio del Rioja ante el desafío del cambio climático [WWW Document]. *The Conversation*. URL <http://theconversation.com/el-territorio-del-rioja-ante-el-desafio-del-cambio-climatico-117195> (accessed 8.16.19).
- Campoy, J.A., Darbyshire, R., Dirlwanger, E., Quero-García, J., Wenden, B., 2019. Yield potential definition of the chilling requirement reveals likely underestimation of the risk of climate change on winter chill accumulation. *Int. J. Biometeorol.* 63, 183–192. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1649-5>
- Campoy, J.A., Ruiz, D., Egea, J., 2011. Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context: A review. *Sci. Hortic.* 130, 357–372. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.011>
- Canto, T., Aranda, M.A., Fereres, A., 2009. Climate change effects on physiology and population processes of hosts and vectors that influence the spread of hemipteran-borne plant viruses. *Glob. Change Biol.* 15, 1884–1894. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01820.x>
- Ciscar, J.C., Feyen, L., Ibarreta, D., Soria, A., European Commission, Joint Research Centre, 2018. *Climate impacts in Europe: final report of the JRC PESETA III project*.
- COAG, 2016. *Cambio climático y viñedo en España* (No. M-7560–2016). Madrid.
- Cuéllar, A.C., Jung Kjær, L., Baum, A., Stockmarr, A., Skovgard, H., Nielsen, S.A., Andersson, M.G., Lindström, A., Chirico, J., Lühken, R., Steinke, S., Kiel, E., Gethmann, J., Conraths, F.J., Larska, M., Smreczak, M., Orłowska, A., Hamnes, I., Sviland, S., Hopp, P., Brugger, K., Rubel, F., Balenghien, T., Garros, C., Rakotoarivony, I., Allène, X., Lhoir, J., Chavernac, D., Delécolle, J.-C., Mathieu, B., Delécolle, D., Setier-Rio, M.-L., Venail, R., Scheid, B., Chueca, M.Á.M., Barceló, C., Lucientes, J., Estrada, R., Mathis, A., Tack, W., Bødker, R., 2018. Monthly variation in the probability of presence of adult *Culicoides* populations in nine European countries and the implications for targeted surveillance. *Parasit. Vectors* 11, 608. <https://doi.org/10.1186/s13071-018-3182-0>
- De Stefano, L., Llamas, M.R., 2012. *Water, agriculture and the environment in Spain: can we square the circle?* CRC Press.
- DeLonge, M., Basche, A., 2018. Managing grazing lands to improve soils and promote climate change adaptation and mitigation: a global synthesis. *Renew. Agric. Food Syst.* 33, 267–278. <https://doi.org/10.1017/S1742170517000588>
- Deniz, M., Schmitt Filho, A.L., Farley, J., de Quadros, S.F., Hötzel, M.J., 2019. High biodiversity silvopastoral system as an alternative to improve the thermal environment in the dairy farms. *Int. J. Biometeorol.* 63, 83–92. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1638-8>
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R.B., Naylor, R.L., 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* 361, 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>

- Durán Zuazo, V.H., Rodríguez Pleguezuelo, C.R., Francia Martínez, J.R., Martín Peinado, F.J., 2013. Land-use changes in a small watershed in the Mediterranean landscape (SE Spain): environmental implications of a shift towards subtropical crops. *J. Land Use Sci.* 8, 47–58. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2011.620992>
- EFSA, 2013. Scientific Opinion on the Role of Tick Vectors in the Epidemiology of Crimean-Congo Hemorrhagic Fever and African Swine Fever in Eurasia. *EFSA J.* 8, 1703.
- EFSA, 2011. Emerging Risks in Plant Health - from plant pest interactions to global change. EFSA SCIENTIFIC COLLOQUIUM XVI. 9 – 10 June 2011 Parma, Italy (No. 16).
- Erena, M., Brotons, J.M., Conesa, A., Manera, F.J., Castaner, R., Porras, I., 2019. Influence of Climate Change on Natural Degreening of Lemons (*Citrus limon* L. Burm. f). *J. Agric. Sci. Technol.* 21, 169–179.
- Fernández, J.G., Trujillo, I., Martín, C.E., Ramo, J.F., Aguilera, I.L., Ruggeroni, J.R.P., Silleras, S.N., Clima, D., Chaparro, J.R., Sánchez, M.J.S., Torres, E.F., Lasiera, C.M., Lombardo, M.Á., Pons, A., Zamanillo, M.S., Camino, E.R., Hernández, F.H., Bajo, M.S., Guerra, M.S., n.d. Informe de evaluación del plan nacional de adaptación al cambio climático 371.
- Fernández-Giménez, M.E., Fillat, F., 2012. Pyrenean Pastoralists' Ecological Knowledge: Documentation and Application to Natural Resource Management and Adaptation. *Hum. Ecol.* 40, 287–300. <https://doi.org/10.1007/s10745-012-9463-x>
- Fitchett, J.M., Grab, S.W., Thompson, D.I., Roshan, G., 2014. Spatio-temporal variation in phenological response of citrus to climate change in Iran: 1960–2010 285–293.
- Galán, E., Llonch, P., Villagrà, A., Levit, H., Pinto, S., del Prado, A., 2018. A systematic review of non-productivity-related animal-based indicators of heat stress resilience in dairy cattle. *PLOS ONE* 13, e0206520. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206520>
- García Díez, C., Remiro Perlado, J.P., 2014. Impactos del cambio climático sobre la Acuicultura en España. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente., Madrid.
- García-Saenz, A., Saez, M., Napp, S., Casal, J., Saez, J.L., Acevedo, P., Guta, S., Allepuz, A., 2014. Spatio-temporal variability of bovine tuberculosis eradication in Spain (2006–2011). *Spat. Spatio-Temporal Epidemiol.* 10, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2014.06.002>
- González Díaz, J.A., Celaya, R., Fernández García, F., Osoro, K., Rosa García, R., 2019. Dynamics of rural landscapes in marginal areas of northern Spain: Past, present, and future. *Land Degradation & Development* 30, 141–150. <https://doi.org/10.1002/ldr.3201>
- Gordo, O., Sanz, J.J., 2005. Phenology and climate change: a long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia* 146, 484–495. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0240-z>
- Gullino, M.L., Gilardi, G., Garibaldi, A., 2019. Ready-to-Eat Salad Crops: A Plant Pathogen's Heaven. *Plant Dis.* PDIS-03-19-0472. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-19-0472-FE>
- Gutierrez, A.P., Ponti, L., Cossu, Q.A., 2009. Effects of climate warming on olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy. *Clim. Change* 95, 195–217.
- Huber, L., Bancal, M., Launay, M., 2018. Impact of climate change on fungal diseases of agroecosystems, in: The Impact of Global Change on the Emergence of Plant Diseases and Pests in Europe. 23 and 24 April. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety (ANSES), in collaboration with the European Food Safety Authority (EFSA) and the European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO), Paris, p. 16.
- Jiménez-Ruiz, S., Paniagua, J., Isla, J., Martínez-Padilla, A.B., de los Ángeles Risalde, M., Caballero-Gómez, J., Cano-Terriza, D., Pujols, J., Arenas, A., García-Bocanegra, I., 2019. Description of the first Schmallenberg disease outbreak in Spain and subsequent virus spreading in domestic ruminants. *Comp. Immunol. Microbiol. Infect. Dis.* 65, 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.cimid.2019.06.002>
- Kadzere, C.T., Murphy, M.R., Silanikove, N., Maltz, E., 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livest. Prod. Sci.* 77, 59–91.
- Lasanta, T., Nadal-Romero, E., Arnáez, J., 2015. Managing abandoned farmland to control the impact of re-vegetation on the environment. The state of the art in Europe. *Environ. Sci. Policy* 52, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.05.012>
- Legave, J.-M., Guédon, Y., Malagi, G., El Yaacoubi, A., Bonhomme, M., 2015. Differentiated Responses of Apple Tree Floral Phenology to Global Warming in Contrasting Climatic Regions. *Front. Plant Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01054>
- López i Gelats, F., Vallejo Rojas, V., Rivera Ferre, M.G., 2017. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la apicultura mediterránea en España. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente., Madrid.
- López-Gatius, F., 2003. Is fertility declining in dairy cattle? *Theriogenology* 60, 89–99. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(02\)01359-6](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(02)01359-6)
- López-Vélez, R., Molina Moreno, R., 2005. Cambio climático en España y riesgo de enfermedades infecciosas y parasitarias transmitidas por artrópodos y roedores. *Rev. Esp. Salud Pública* 79, 177–190. <https://doi.org/10.1590/S1135-57272005000200006>
- MAPA, 2018a. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España. Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca, y Alimentación.

- MAPA, 2018b. Anuario de Estadística 2018. Parte Tercera: Estadísticas agrarias y alimentación. Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, Madrid.
- MAPA, 2017a. Anuario de Estadística 2017. Parte Tercera: Estadísticas agrarias y alimentación. Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación, Madrid.
- MAPA, 2017b. Porcino Blanco. BASES ZOOTÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE ALIMENTARIO DE NITRÓGENO Y DE FÓSFORO. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- MAPA, 2017c. Aves de carne. BASES ZOOTÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE ALIMENTARIO DE NITRÓGENO Y DE FÓSFORO. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- MAPA, 2017d. Aves de puesta. BASES ZOOTÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DEL BALANCE ALIMENTARIO DE NITRÓGENO Y DE FÓSFORO. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.
- Medina Martín, F., 2015. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector agrario: Aproximación al conocimiento y prácticas de gestión en España. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheffinger, H., Striz, M., Susnik, A., Vliet, A.J.H.V., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Züst, A., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Change Biol.* 12, 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- Morignat, E., Perrin, J.-B., Gay, E., Vinard, J.-L., Calavas, D., Hénaux, V., 2014. Assessment of the Impact of the 2003 and 2006 Heat Waves on Cattle Mortality in France. *PLoS ONE* 9, e93176. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093176>
- Moraga-Fernández, A., Royo-Hernández, L., Habela, M.A., Ruiz Fons, F., Calero-Bernal, R., Gortazar, C., de la Fuente, J., Fernandez de Mera, I., 2019. Detection of New Crimean-Congo Hemorrhagic Fever Virus Genotypes in Ticks Feeding on Deer and Wild Boar, Spain (SSRN Scholarly Paper No. ID 3314445). Social Science Research Network, Rochester, NY.
- Muntané-Puig, J., Rivera Ferre, López i Gelats, F., Oteros-Rozas, E., Dean, G., Manuel, J., Di Masso, M., Varela, E., Brumen, M., 2019. Estrategias de adaptación al Cambio Climático de la ganadería extensiva española: una perspectiva social. Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid.
- Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M.S., Bernabucci, U., 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livest. Sci.* 130, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>
- Negredo, A., Habela, M.Á., Ramírez de Arellano, E., Diez, F., Lasala, F., López, P., Sarriá, A., Labiod, N., Calero-Bernal, R., Arenas, M., Tenorio, A., Estrada-Peña, A., Sánchez-Seco, M.P., 2019. Survey of Crimean-Congo Hemorrhagic Fever Enzootic Focus, Spain, 2011–2015. *Emerg. Infect. Dis.* 25, 1177–1184. <https://doi.org/10.3201/eid2506.180877>
- Nørgaard, N.H., Lind, K.M., Agger, J.F., 1999. Cointegration analysis used in a study of dairy-cow mortality. *Prev. Vet. Med.* 42, 99–119.
- Nowak, R. S., Ellsworth, D. S., Smith, S. D. 2004. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂—do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? *New phytologist*, 162(2), 253–280. OECD, 2006.
- Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Oficina Española De Cambio Climático. S: G. Para La Prevención De La Contaminación Y Del Cambio Climático. Ministerio De Medio Ambiente.
- Pérez Domínguez, I., Fellmann, T., Europäische Kommission, Gemeinsame Forschungsstelle, 2018. PESETA III agro-economic analysis of climate change impacts in Europe: final report.
- Prudencio, A.S., Martínez-Gómez, P., Dicenta, F., 2018. Evaluation of breaking dormancy, flowering and productivity of extra-late and ultra-late flowering almond cultivars during cold and warm seasons in South-East of Spain. *Sci. Hortic.* 235, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.073>
- Pwc, 2019. El futuro del sector agrícola español.
- Ramírez, F., Kallarackal, J., 2015. Responses of Fruit Trees to Global Climate Change, SpringerBriefs in Plant Science. Springer International Publishing.
- Rey, D., Garrido, A., Calatrava, J., 2016. Comparison of Different Water Supply Risk Management Tools for Irrigators: Option Contracts and Insurance. *Environ. Resour. Econ.* 65, 415–439. <https://doi.org/10.1007/s10640-015-9912-2>
- Rivera-Ferre, M., López-i-Gelats, F., Howden, S., Smith, P., Morton, J.F., Herrero, M., 2016. Re-framing the climate change debate in the livestock sector: mitigation and adaptation options: Mitigation and adaptation options in the livestock sector. <https://doi.org/10.1002/wcc.421>
- Robinet, C., Roques, A., 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integr. Zool.* 5, 132–142. <https://doi.org/10.1111/j.1749-4877.2010.00196.x>

Ronchail, J., Cohen, M., Alonso-Roldán, M., Garcin, H., Sultan, B., Angles, S., 2014. Adaptability of Mediterranean Agricultural Systems to Climate Change: The Example of the Sierra Mágina Olive-Growing Region (Andalusia, Spain). Part II: The Future. *Weather Clim. Soc.* 6, 451–467. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-12-00045.1>

Rubio, A., Roig, S., 2017. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en los sistemas extensivos de producción ganadera en España. Oficina Española de Cambio Climático (OECC), Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).

Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2019a. Programa nacional de vigilancia, control y erradicación del virus de la Lengua Azul. Subdirección General de Sanidad e Higiene Animal. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2019b. Fiebre del Valle del Rift. Subdirección General de Sanidad e Higiene Animal y Trazabilidad. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2017a. INFORME FINAL TÉCNICO-FINANCIERO PROGRAMA NACIONAL DE LA TUBERCULOSIS BOVINA. Subdirección General de Sanidad e Higiene Animal y Trazabilidad. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2017b. INFORME DE SITUACIÓN Y EVALUACIÓN DEL RIESGO DE TRANSMISIÓN DEL VIRUS DE FIEBRE HEMORRÁGICA DE CRIMEA-CONGO (FHCC) EN ESPAÑA. Subdirección General de Sanidad e Higiene Animal y Trazabilidad. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Secretaría General de Agricultura y Alimentación, 2017c. INFORME EPIDEMIOLÓGICO DE LA FIEBRE DEL NILO OCCIDENTAL (FNO) EN ESPAÑA. Subdirección General de Sanidad e Higiene Animal y Trazabilidad. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Sicard, A., Zeilinger, A.R., Vanhove, M., Schartel, T.E., Beal, D.J., Daugherty, M.P., Almeida, R.P.P., 2018. *Xylella fastidiosa*: Insights into an Emerging Plant Pathogen. *Annu. Rev. Phytopathol.* 56, 181–202. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-045849>

Vitali, A., Felici, A., Esposito, S., Bernabucci, U., Bertocchi, L., Maresca, C., Nardone, A., Lacetera, N., 2015. Effects of heat waves on mortality of dairy cows. *Advances in Animal Biosciences* 6, 15–16. <https://doi.org/10.1017/S2040470014000429>

Zurimendi, A., 2019. La crisi climàtica ja afecta la producció de vi amb veremes abans d'hora i més graduació alcohòlica [WWW Document]. URL <https://www.publico.es/public/crisi-climatica-crisi-climatica-ja-afecta-produccio-vi-amb-veremes-abans-d-hora-i-mes-graduacio-alcoholica.html> (accessed 8.29.19).

Capítulo 5

Impactos del cambio climático en el medio marino

1. INTRODUCCIÓN

El medio marino es sustento de biodiversidad, recursos marinos, salud y bienestar. Es por ello que uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU para 2030 es el buen estado de los océanos (ODS 14: Vida submarina). A través de la sostenibilidad de los océanos también se puede contribuir significativamente a otros ODS, como Hambre Cero (ODS 2), Salud y Bienestar (ODS 3), o Energía Asequible y no Contaminante (ODS 7). Sin embargo, el cambio climático amenaza la función de los océanos tanto en la provisión de servicios y bienestar como en la contribución a las metas de desarrollo sostenible (Singh et al., 2019). En España, la mayor parte del territorio estatal se encuentra en los 1,04 millones de km² de superficie marina dentro de las zonas económicas exclusivas, que forman parte de las regiones marinas del Atlántico peninsular, el Mediterráneo (incluyendo las demarcaciones del Estrecho-Alborán y levantino-balear) y Canarias. En este capítulo se revisan las evidencias sobre los impactos del cambio climático en estas regiones marinas y sus implicaciones para la sostenibilidad de la pesca y la acuicultura.

La biodiversidad y los distintos procesos naturales de los ecosistemas del medio marino proveen de servicios ambientales fundamentales para el bienestar de las personas. Entre estos servicios se encuentra desde el soporte de especies marinas a través de hábitats y nutrientes, hasta la provisión de alimentos provenientes de la pesca y la acuicultura, el transporte marítimo, la producción de energía, o la regulación del clima (Díaz et al., 2015). El cambio climático inducido por la actividad humana amenaza a todos los servicios y funciones del mar, según indican nuevos informes publicados por el IPCC. Una de las principales conclusiones del Informe especial sobre océanos y criosfera concluye que el calentamiento del océano está causando efectos en multitud de especies, afectando a la pesca y a la producción de alimentos y seguridad alimentaria a nivel global (IPCC, 2019). Además, este informe, junto con el Informe especial de 1.5°C (IPCC, 2018), evidencia la importancia de las políticas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (mitigación), ya que los impactos esperados en los océanos bajo los escenarios altos de emisiones son mayores que los proyectados para escenarios de bajas emisiones y muchas veces alcanzan puntos de no retorno. Por ejemplo, el aumento de temperatura en el mar se proyecta en 2-4 veces el observado para los escenarios de bajas emisiones, pero el aumento para altas emisiones está proyectado en 5-7 veces la tasa actual (IPCC, 2019).

Para las aguas oceánicas del territorio nacional, estos cambios tienen implicaciones regionales, donde se esperan impactos en diferentes direcciones, distribuidos de forma desigual en las regiones y teniendo repercusiones diferentes sobre los servicios ecosistémicos y las comunidades marinas. Las evidencias para el caso español fueron revisadas en varias ocasiones, a partir de la Evaluación Preliminar de los Impactos del Cambio Climático en España de 2005 (Moreno et al., 2005), con un capítulo sobre el medio marino y la pesca (Anadón et al., 2005), con los informes posteriores de impacto en la acuicultura (García-Díez & Remiro-Perlado, 2014), y con el más reciente informe sobre impactos, vulnerabilidad y adaptación en el medio marino español (Kersting, 2016). El presente capítulo se basa en estos trabajos previos para actualizar las evidencias de impactos de cambio

climático en el medio marino español, haciendo énfasis en la cadena de impactos desde el nivel biofísico hasta las actividades marinas y las poblaciones dependientes del mar. Para ello, se presentan tres secciones donde se revisan los impactos físico-químicos del cambio climático en el medio marino (sección 2), así como los impactos en los ecosistemas marinos y biodiversidad (sección 3) y en las actividades de pesca y acuicultura (sección 4).

2. IMPACTOS FÍSICO-QUÍMICOS EN EL MEDIO MARINO

El cambio climático está causando cambios importantes en el océano a nivel global, regional y local, afectando también a las regiones marinas españolas. Los océanos están absorbiendo alrededor del 90% del exceso del calor acumulado en la atmósfera, lo que causa un aumento de la temperatura del agua (Cheng et al., 2020; Zanna et al., 2019). Además de la temperatura, hay otras características físico-químicas y procesos del océano que se están viendo afectados, como la acidez; la salinidad y el oxígeno en el agua; el nivel del mar; la circulación y corrientes marinas; la formación de masas de agua; los afloramientos; la capa de mezcla; la estratificación del agua; los nutrientes; el oleaje y los eventos extremos.

La Tabla 5.1 sintetiza los impactos físico-químicos del cambio climático en océanos y recoge la evidencia existente acerca de los cambios experimentados en las regiones marinas españolas desde finales del siglo XX hasta la actualidad. La evidencia de impactos es clara para la temperatura del agua, donde se observan incrementos de entre 0,1°C y 0,75°C por década, siendo los valores más altos para el Atlántico. La salinidad ha aumentado en las tres regiones, siendo el aumento mínimo de 0,003 gramos de sal por litro (psu) por década y el máximo de 0,38 psu por década, ambos en el Mediterráneo. Se observa una acidificación del agua en todas las regiones marinas y a diferentes profundidades debido a la absorción del CO₂ atmosférico, siendo el cambio más acelerado en el Mediterráneo (0,010 - 0,044 unidades de pH por década). Las tendencias del oxígeno en aguas españolas no están claras, pero a nivel global se sabe que un aumento de la temperatura implica menos oxígeno disuelto. El nivel medio del mar está aumentando globalmente, con una aceleración en las últimas décadas, debido a las crecientes tasas de pérdida de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, así como a la pérdida continua de masa de los glaciares, sumado a la expansión térmica del océano (IPCC, 2019). Los impactos en las corrientes marinas y afloramientos son indicativos de algunos cambios de intensidad y dirección, si bien no se observan tendencias claras. La capa de mezcla ha sufrido un aumento generalizado de la estratificación en las aguas superficiales, siendo el efecto menor en las zonas de afloramientos. El oleaje se ha incrementado en el Atlántico y ha disminuido en el Mediterráneo. Finalmente, los eventos extremos han aumentado, con una mayor incidencia e intensidad de los mismos.

En cuanto a las proyecciones a futuro para escenarios de emisiones moderadas (RCP 4.5) y altas (RCP 8.5), los resultados más coincidentes entre modelos son los que proyectan la temperatura y el nivel del mar durante el siglo XXI. Se proyecta un aumento de temperatura y del nivel del mar en todas las zonas marinas españolas (figura 5.1, consultar el capítulo 6 para más detalles acerca de proyecciones futuras para el nivel del mar) (Adloff et al., 2015; Carillo et al., 2012; Chust et al., 2010, 2011, 2014; Gomis et al., 2012, 2016; Gualdi et al., 2013; Jordà et al., 2012; Lionello et al., 2008; Slangen et al., 2017; Somot et al., 2006, 2016). El aumento de temperatura a finales del siglo XXI variará entre 1,8 y 3,8 °C en función de la región, para el RCP8.5 (Jordà et al., 2017). Estos aumentos de temperatura llevan asociados una intensificación y una mayor frecuencia de olas de calor marinas (Darmaraki et al., 2019).

Debido al calentamiento de las aguas, la estratificación se va a acentuar afectando a la disponibilidad de los nutrientes (Kersting, 2016). Se prevé que la estratificación de densidad media anual de los 200 metros superiores, con un promedio entre 60 ° S y 60 ° N, aumente en un 12 %-30 % para RCP8.5 y 1 %-9 % para RCP2.6, para 2081-2100 en relación con 1986-2005, inhibiendo los flujos verticales de nutrientes, carbono y oxígeno (IPCC, 2019). Además, como consecuencia del aumento medio del nivel del mar, se prevé que los

eventos extremos costeros se repitan con mayor frecuencia en el futuro (consultar el capítulo 6 para más detalles acerca de proyecciones futuras para los eventos extremos).

Tabla 5.1. Cambios generales observados en indicadores físico-químicos para las regiones marinas españolas. Se incluyen las referencias de estudios publicados entre 2016-2019, consultar Kersting (2016) para información más detallada y referencias anteriores. Fuente: elaboración propia

Indicador	Cambio detectado			Referencias
	Atlántico Peninsular	Mediterráneo	Canarias	
Temperatura superficial del agua	Aumento [0,20 y 0,75°C/década]	Aumento [0,10 y 0,40°C/década]	Aumento [0,25°C/década]	Peck & Pinnegar (2018); Vargas Yáñez et al. (2019)
Salinidad	Aumento [0,03 y 0,13 psu/década]	Aumento [0,003 y 0,38 psu/década]	Aumento [0,02 psu/década]	Pastor et al. (2018); Quereda-Sala et al. (2018); Salat et al. (2019); von Schuckmann et al. (2019); Vargas Yáñez et al. (2019)
pH	Disminución (Acidificación) [0,016 unidades de pH por década entre los 100 y 700 m de profundidad]	Disminución (Acidificación) [0,010-0,044 unidades de pH por década afectando a todas las masas de agua]	Disminución (Acidificación) [0,013 y 0,025 unidades de pH por década en capas superficiales]	Kapsenberg et al. (2017); Lacoue-Labarthe et al. (2016); Peck & Pinnegar (2018)
Oxígeno	Una menor disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua asociada a altas temperaturas. En el Mediterráneo no se han encontrado tendencias robustas de la evolución del oxígeno disuelto en el agua desde los años 90 hasta la actualidad.			Oschlies et al. (2018); Vargas Yáñez et al. (2019)
Nivel del mar	Aumento [1-2 mm al año durante el siglo XX y de 4 a 8 mm al año a partir de los años 90]	Disminución [Durante el siglo XX] Aumento [0,3-10 mm al año entre finales del siglo XX y XXI]	Aumento [1-2 mm/año]	Iglesias et al. (2017); Salat et al. (2019); von Schuckmann et al. (2019); Vargas Yáñez et al. (2019)
Circulación, corrientes, formación de masas de agua y afloramientos	Debilitamiento de la intensidad de los afloramientos en el norte e intensificación en el suroeste (Golfo de Cádiz). No hay tendencias definitivas en los patrones de corrientes.	Cambios en los procesos de formación de agua profunda en el Mediterráneo Noroccidental.	No se han detectado tendencias significativas en el afloramiento costero de la Corriente de Canarias.	Schroeder et al. (2016)
Capa de mezcla, estratificación y nutrientes	Aumento generalizado de la estratificación en las aguas superficiales, siendo el efecto menor en las zonas de afloramiento. Esto influye negativamente en la disponibilidad de nutrientes. En el Mediterráneo no se han encontrado tendencias robustas de la evolución de los nutrientes, de la clorofila, ni de la capa de mezcla desde los años 90 hasta la actualidad.			Somavilla et al. (2017); Vargas Yáñez et al. (2019)
Intensidad del oleaje	Aumento	Ligera disminución	Aumento [zona norte] Ligera disminución [zona sur]	Kersting (2016)
Eventos extremos	Mayor incidencia y frecuencia de eventos extremos (ej. temperaturas extremas del agua, inundaciones, lluvias intensas, olas de calor en el mar).			Holbrook et al. (2019); Kersting (2016)

Varios modelos proyectan aumentos de afloramientos marinos y una expansión de su duración en el Atlántico peninsular (Gomis et al., 2016; Wang et al., 2015), mientras que otras proyecciones regionales indican una disminución de la intensidad de estos fenómenos en esta misma región (Cordeiro Pires et al., 2016). Los cambios de las demás características físico-químicas y procesos son inciertos y en general existen pocos estudios que aborden el cambio climático a nivel regional en el sur de Europa (Adloff et al., 2015; Alvarez et al., 2017; Casabella et al., 2014; Gomis et al., 2016; Miranda et al., 2013; Somot et al., 2006). Se espera una reducción generalizada (<10%) de la altura de la ola en todas las zonas marinas españolas (Casas-Prat & Sierra, 2013; Charles et al., 2012; Gomis et al., 2012, 2016; Hemer et al., 2013; Lionello et al., 2008; Marcos et al., 2012; Martínez-Asensio et al., 2016; Pérez et al., 2015) y un aumento o disminución de la salinidad en función de la región (figura 5.1) (Adloff et al., 2015; Carillo et al., 2012; Chust et al., 2010; Gomis et al., 2016).

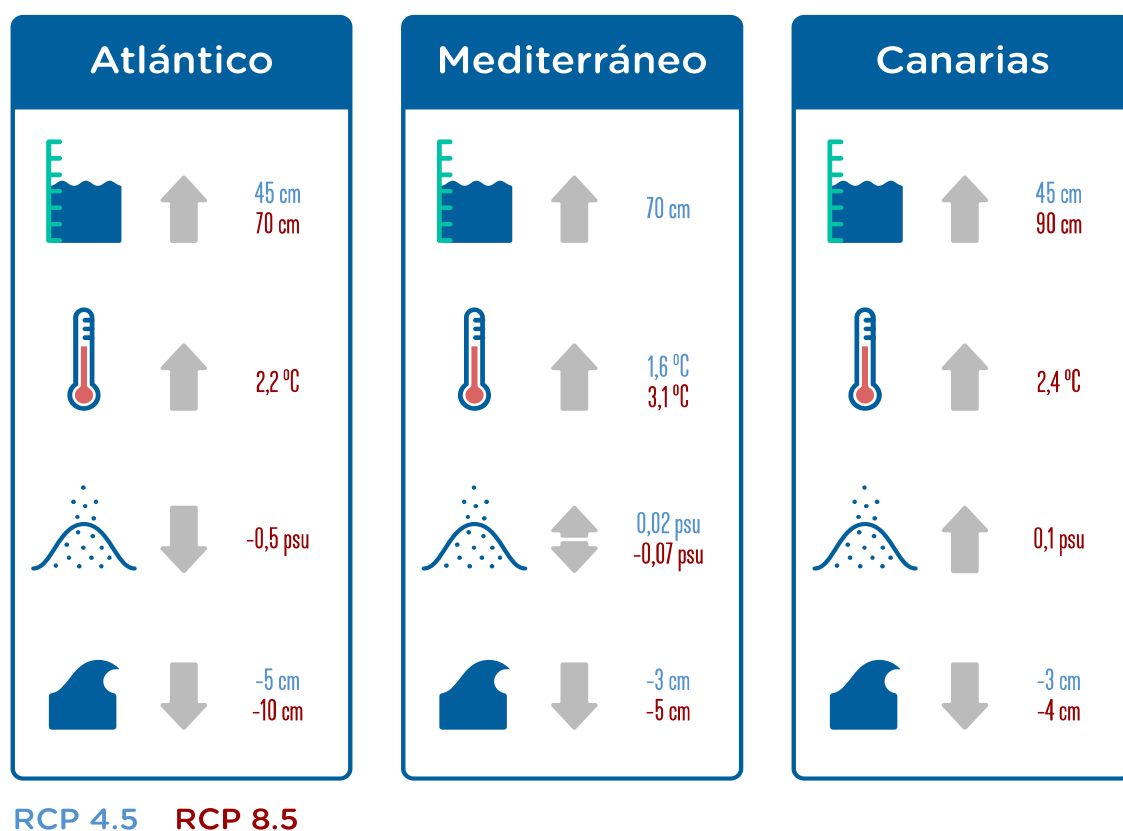


Figura 5.1. Síntesis de los impactos físico-químicos medios proyectados con escenarios moderados (RCP 4.5) y altos (RCP 8.5) de emisiones para 2100*. Se incluye la dirección de las proyecciones respecto al periodo de referencia, y el valor medio estimado de cambio para las tres regiones marinas españolas del Atlántico, Mediterráneo y Canarias. De arriba abajo los símbolos corresponden a 1) cambios en el nivel del mar en centímetros; 2) cambios en la temperatura superficial del agua en grados centígrados; 3) cambios en la salinidad superficial del agua en psu (equivalente a gramos de sal por litro); y 4) cambios en la altura significativa de las olas en centímetros. Fuente: elaboración propia con valores a partir de la revisión realizada por Jordà et al. (2017), que incluye datos de Church et al. (2013), Perez et al. (2015) y Somot et al. (2016), y se ha completado con Darmaraki et al. (2019) y Soto-Navarro et al. (2020). Estos datos son resultado de la integración de múltiples modelos y en general tienen una incertidumbre alta asociada. Hay variaciones en cuanto a las fechas proyectadas en los diferentes estudios (todas corresponden a la segunda mitad o finales del siglo XXI) y en los periodos de referencia (variaciones ± 5 dentro del periodo 1961-2005). *La figura muestra una síntesis cualitativa de las proyecciones existentes para los escenarios RCP aplicados regionalmente, procedente de varias fuentes bibliográficas y conjuntos de modelos de emisiones, por lo que los datos deben interpretarse con cautela y pueden no ser representativos a nivel local. El informe Ramírez Pérez et al. (2019) también incluye datos actualizados.

3. IMPACTOS EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS Y BIODIVERSIDAD

Impactos en especies y ecosistemas

Los cambios físico-químicos del agua descritos en la sección anterior están alterando la vida marina y su biodiversidad (Gascuel & Cheung, 2019). A nivel internacional, se han documentado impactos en la fenología y fisiología de organismos marinos, en el rango y patrón de distribución de determinadas especies, en la composición e interacciones dentro de las comunidades biológicas, y en la estructura y dinámica de los ecosistemas (Philippart et al., 2011; Poloczanska et al., 2016; Pörtner et al., 2014; Richardson et al., 2012; Walther et al., 2002). Las proyecciones muestran que estos impactos continuarán a lo largo del siglo XXI (Jones & Cheung, 2015). Se espera que la acidificación y desoxigenación del océano afecten a la productividad, abundancia, y distribución de especies marinas, incluidas especies pesqueras (Olsen et al., 2018). Para el periodo 2081-2100, los modelos globales proyectan una reducción de la producción primaria neta mundial entre un 4% y 11% para el escenario de altas emisiones (RCP 8.5), siendo la reducción menor para el escenario de bajas emisiones (IPCC, 2019). Esto se traducirá en cambios generalizados de biomasa, producción y estructura de comunidades biológicas en los ecosistemas marinos (IPCC, 2019). También se predice una redistribución a escala global de las especies marinas, la mayoría de las cuales se moverán hacia los polos y hacia mayores profundidades (Parmesan & Yohe, 2003; Sydeman et al., 2015).

Las tasas de desplazamiento hacia los polos en los rangos de distribución de diferentes especies marinas desde la década de 1950, son de 52 ± 33 km por década para organismos en los ecosistemas epipelágicos (capa superficial del mar que se extiende hasta los 200 metros de profundidad) y de 29 ± 16 km por década para los organismos que habitan el fondo marino (Poloczanska et al., 2016). La velocidad y la dirección de estos cambios están determinadas por la temperatura local, el oxígeno y las corrientes oceánicas a través de gradientes de profundidad, latitud y longitud (IPCC, 2019). También existen evidencias de que algunos copépodos calanoides se están expandiendo hacia el polo norte del Atlántico, a un ritmo de hasta 232 km por década (Beaugrand, 2009; Chivers et al., 2017). Las nuevas condiciones ambientales darán lugar a invasiones y a extinciones locales de especies, según sean o no favorables a las nuevas condiciones marinas, pudiendo alterar los ecosistemas marinos (Cheung et al., 2009). En el siguiente apartado se estudian los impactos en especies observados para cada región marina española.

Impactos en diferentes regiones marinas peninsulares (Atlántico, Mediterráneo e Islas Canarias)

Región Marina del Atlántico

De forma análoga a otras regiones y a raíz del incremento de temperatura, en las costas atlánticas y cantábricas se han registrado cambios biogeográficos y en composición de bosques de macroalgas (Díez et al., 2012). Esto es debido a que el norte de la península ibérica supone el límite sur de muchas especies de macroalgas de sistemas templados-fríos (Kersting, 2016) y a que existe un marcado gradiente este-oeste en su distribución (Anadón et al., 2009). Las poblaciones de *Gelidium* spp, macroalga formadora de hábitats, están sufriendo un retroceso generalizado a lo largo de toda la costa cantábrica (figura 5.2) (Anadón et al., 2009; Gorostiaga et al., 2011). También se ha detectado la recesión de especies de aguas templado-frías, como *Fucus spiralis*, *Fucus vesiculosus*, *Fucus serratus*, *Himanthalia elongata* y *Saccorhiza polyschides* para la costa Asturiana (Anadón et al., 2009, 2014; Duarte et al., 2013), y se ha observado el incremento de la presencia de especies calcáreas como *Corallina elongata*, *Jania rubens*, *Lithophyllum incrustans* y especies filamentosas de afinidad meridional como *Aglaothamnion tenuissimum* y *Gayliella flaccida* en la costa vasca (figura 5.2) (Gorostiaga et al., 2011). En general, se está detectando un retroceso de especies cuyo óptimo se encuentra en aguas más frías y un

aumento de especies típicas de aguas más cálidas (Gorostiaga et al., 2011). Por otro lado, cada vez son más frecuentes las citas de peces subtropicales que aparecen en el Cantábrico y las costas gallegas (Arronte et al., 2004; Bañón, 2004; Bañón & Sande, 2008; Bañón et al., 1997; Bañón et al., 2002; Fernández-Cordeiro & Bañón, 1997). Con respecto a los efectos a nivel fenológico, cabe destacar la tendencia hacia la atenuación de la estacionalidad del ciclo reproductor de mejillones, ostras y peces (1988-2007) (Gorostiaga et al., 2011), las alteraciones en su zonación y la sincronización de las migraciones que grandes peces migratorios, como los túnidos, realizan para llevar a cabo la reproducción (Dufour et al., 2010). Finalmente, cabe mencionar la introducción de especies foráneas como la macroalga *Herposiphonia sp* en la costa del País Vasco (Gorostiaga et al., 2011).

Distribución	Cambios en la composición de especies		REGRESIÓN <i>Gelidium corneum</i> (Atlántica) <i>Cystoseira baccata</i> (Atlántica) <i>Himanthalia elongata</i> (Atlántica) <i>Cymodocea nodosa</i> (Canarias) <i>Gelidium canariense</i> (Canarias)	EXPANSIÓN <i>Millepora sp</i> (Canarias) <i>Dendrophyllia labareli</i> (Canarias) <i>Corallina elongata</i> (Atlántica) <i>Jania rubens</i> (Atlántica) <i>Lythoglym incrustans</i> (Atlántica) <i>Aglaophthamnium tenuissimum</i> (Atlántica) <i>Gayiella floccida</i> (Atlántica)
	Reducción de rango de distribución		<i>Sardina pilchardus</i> (Canarias) <i>Coris julis</i> (Canarias) <i>Sciaenops ocellatus</i> (Canarias) <i>Labrus bergylla</i> (Canarias) <i>Sprattus sprattus</i> (Mediterráneo)	
	Expansión de rango de distribución		<i>Sardinella aurita</i> (Mediterráneo y Canarias) <i>Caranx rhonchus</i> (Mediterráneo) <i>Diplodus cervinus cervinus</i> (Mediterráneo) <i>Xyrichtys novacula</i> (Mediterráneo)	<i>Canthidermis sufflamen</i> (Canarias) <i>Caranx crysos</i> (Canarias) <i>Grantholepis thomsoni</i> (Canarias) <i>Xyrichtys novacula</i> (Canarias)
Abundancia	Reducción de abundancia		<i>Alosa fallax</i> (Mediterráneo) <i>Argentina sphyraena</i> (Mediterráneo) <i>Molva macrocephala</i> (Mediterráneo)	
	Aumento de abundancia		<i>Caranx rhonchus</i> (Mediterráneo) <i>Diplodus cervinus cervinus</i> (Mediterráneo) <i>Seriola lalandi</i> (Mediterráneo) <i>Trachinotus viridensis</i> (Mediterráneo) <i>Trachinotus ovatus</i> (Mediterráneo)	<i>Diadema africanum</i> (Canarias) <i>Aulostomus strigosus</i> (Canarias) <i>Sparisoma cretense</i> (Canarias) <i>Heteropriacanthus cruentatus</i> (Canarias) <i>Aluterus scriptus</i> (Canarias)
Fenología	Migraciones		Túnidos (Atlántica)	
	Ciclos reproductivos		Mejillones (Atlántica) Ostras (Atlántica) <i>Posidonia oceanica</i> (Mediterráneo)	

Figura 5.2. Principales impactos del cambio climático en las especies marinas. Se muestran impactos en la distribución, abundancia y fenología de algunas especies marinas, con ejemplos de especies afectadas en aguas territoriales del estado español, encontradas en la literatura. Fuente; elaboración propia a partir de las referencias citadas en la sección 3. El símbolo N (norte) representa los impactos de cambios de distribución y el símbolo del calendario/reloj representa los impactos en fenología.

Región Marina del Mediterráneo

El Mar Mediterráneo es uno de los principales lugares con mayor biodiversidad marina del mundo (Bianchi & Morri, 2000; Moullec et al., 2019; Myers et al., 2000) y según las predicciones de los modelos climáticos, la cuenca Mediterránea será una de las regiones más afectadas por el aumento de eventos extremos y por el

calentamiento global (Hoegh-Guldberg et al., 2014; Marbà et al., 2015). Esto hace que el Mediterráneo pueda ser utilizado como ejemplo para anticipar los efectos que tendrá el cambio climático sobre la biota marina a nivel mundial (Lejeusne et al., 2010). Son varios los autores que han cuantificado (Calvo et al., 2011; Lejeusne et al., 2010; Marbà et al., 2015) y revisado (Kersting, 2016) el impacto del cambio climático sobre los organismos marinos en el Mediterráneo. A día de hoy, han sido documentados efectos sobre el crecimiento, supervivencia, fertilidad, migración y fenología de organismos pelágicos y bentónicos, desde fitoplancton hasta vegetación marina, invertebrados y vertebrados, siendo la mayoría de las evidencias reportadas para peces y cnidarios (figura 5.2) (Marbà et al., 2015).

Los cambios en la abundancia y la distribución de la biota marina en esta región darán lugar a la meridionalización (Calvo et al., 2011). Este fenómeno es el que favorece la expansión de especies más termófilas desde el sur de la cuenca hacia el norte donde habitan las especies templadas cuyas poblaciones podrán verse comprometidas debido a que la morfología de la cuenca (semicerrada) no permitirá que cambien su rango de distribución y así mantener su nicho térmico (Lejeusne et al., 2010; Marbà et al., 2015). Evidencia de este fenómeno son las más de 30 especies de peces autóctonos de aguas cálidas del Mediterráneo que se han registrado al norte de su distribución geográfica original (Calvo et al., 2011) y la drástica disminución de la abundancia de algunas especies boreales (CIESM, 2008; Quignard & Raibault, 1993). Otro ejemplo es la alacha (*Sardinella aurita*), pez pelágico que se ha visto favorecido por el calentamiento aumentando su abundancia y su rango de distribución hacia el norte (Sabatés et al., 2006; Lloret et al., 2015), frente al espadín (*Sprattus sprattus*), especie de aguas frías que era muy común en la costa del mar catalán pero que prácticamente ha desaparecido de los desembarcos comerciales en los últimos 25 años (Calvo et al., 2011). Otros ejemplos de peces que han ampliado su distribución llegando a establecerse son: la macarela real (*Caranx rhonchus*), el sargo real (*Diplodus cervinus cervinus*), el pez verde (*Thalassoma pavo*), la chova (*Pomatomus saltatrix*), el roncador (*Pomadasyus incisus*), el galán (*Xyrichtys novacula*) y el mero (*Epinephelus marginatus*) (Francour et al., 1994; Lloret et al., 2015; Raya & Sabatés, 2015). Por otro lado, el atún rojo (*Thunnus thynnus*) y la seriola (*Seriola dumerili*) han alargado su estadía en las aguas del norte y centro del Mediterráneo modificando su migración como respuesta al cambio climático (Bombace, 2001). Las praderas marinas de *Posidonia oceanica* también están mostrando cambios asociados directamente al calentamiento del agua, por un lado se ha documentado una disminución en su distribución y biomasa (Marbà & Duarte, 2010), y por otro se ha registrado una floración masiva tras la ola de calor de 2003, afectando la fenología de la especie (Díaz-Almela et al., 2009). La ola de calor registrada en 2003, también provocó la mortalidad masiva de organismos bentónicos, incluidos gorgonias, esponjas, moluscos y briozoos (Garrabou et al., 2009; Kersting, 2016).

El Mediterráneo sufre una acidificación del agua de mar más rápida, en comparación con los océanos globales (Calvo et al., 2011). Esta acidificación puede ser perjudicial para la calcificación de las principales algas coralinas bioconstructoras (Martin & Gattuso, 2009). Otro efecto derivado del calentamiento es el establecimiento de especies invasoras, ya que sus poblaciones pueden verse favorecidas. Por ejemplo, el alga *Caulerpa cylindracea*, que se está estableciendo en el Mediterráneo (Occhipinti-Ambrogi, 2007), junto con el alga roja *Lophocladia lallemandii*, están modificando significativamente el paisaje submarino en los fondos someros de la costa mediterránea (Cebrian & Ballesteros, 2007, 2010; Kersting et al., 2014).

Finalmente cabe destacar, tal y como menciona Calvo et al. (2011), que para la región Mediterránea también se han registrado cambios en la distribución de aves marinas derivados directa e indirectamente del calentamiento. Este es el caso *Puffinus mauretanicus*, especie en peligro de extinción para las Islas Baleares que está desplazándose hacia las aguas del Atlántico Nororiental, de forma directa, en función de las temperaturas más cálidas; y de forma indirecta, en función de la influencia que está teniendo la temperatura en el cambio de la distribución y composición del zooplancton que nutre a sus presas (Luczak et al., 2011). Según Gambaiani et al. (2009), el calentamiento del mar y la reducción de los recursos de presas pueden tener posibles efectos sobre los cetáceos mediterráneos como los delfines comunes (*Delphinus delphis*), los delfines mulares (*Tursiops*

truncatus) o los delfines listados (*Stenella coeruleoalba*). En cuanto a la biomasa zooplanctónica, Vargas Yáñez et al. (2019) no han encontrado tendencias significativas en su evolución a lo largo de las últimas décadas en las áreas analizadas del Mediterráneo.

Región Marina de las Islas Canarias

El cambio climático es hoy en día la mayor amenaza para los ecosistemas marinos canarios (Riera et al., 2014). Dada la ubicación subtropical de este archipiélago, localizado entre las regiones Atlántico-Mediterráneo y Atlántico tropical, los cambios que se están dando en la distribución y abundancia de ciertos organismos marinos muestran claramente el efecto de la tropicalización. Debido a ello, las Islas Canarias pueden usarse como referencia para comprender mejor este proceso causado por el calentamiento global del mar. La tropicalización se da cuando especies de climas cálidos se establecen y otras especies de afinidad templada sufren una regresión. En rasgos generales, la proporción de organismos tropicales se ha incrementado tanto en la flora como fauna marina de las Islas Canarias (Brito & Falcón, 2006; Afonso-Carrillo et al., 2007; Cassano et al., 2008; Falcón et al., 2005), probablemente por el calentamiento global (Brito, 2008). Según Falcón et al. (2005), el 78% de las especies de peces registradas en los últimos años tienen orígenes tropicales. Ejemplo del establecimiento de poblaciones de especies de peces tropicales son: *Canthidermis sufflamen*, *Caranx crysos* o *Grantholepis thomsoni*, todas ellas presentan en la actualidad poblaciones estables en el archipiélago (Falcón et al., 2005; Brito, 2008); en particular, el gallo aplomado (*C. sufflamen*) es hoy en día un importante recurso pesquero en las islas occidentales (Brito, 2008; Clemente, 2007) (figura 5.2). *Canthidermis maculata*, otra especie de peces de la familia Balistidae, también ha sido recientemente documentado en las Islas Canarias (Guerra Marrero et al., 2019). Según Kersting (2016), los ejemplos de regresión de especies templadas son: la *Sardina pilchardus*, que ha sufrido un declive en sus poblaciones, las cuales están siendo sustituidas por la alacha (*Sardinella aurita*); la julia (*Coris julis*), el corvallo (*Sciaena umbra*) y la maragota (*Labrus bergylta*), estas últimas han experimentado su retroceso especialmente en las islas occidentales (El Hierro, La Gomera y La Palma) (figura 5.2). Otros indicios de tropicalización son la presencia de coral tropical (*Millepora* sp.) en la costa este de Tenerife (Clemente et al., 2011), el aumento de las poblaciones de *Dendrophyllia laboreli*, otro cnidario de afinidad tropical (Ocaña et al., 2011) y la reciente descripción de una nueva especie de dinoflagelado bentónico de aguas cálidas (*Coolia guanchica* sp. nov.) (David et al., 2019). También la presencia del tiburón ballena (*Rhincodon typus*) se relaciona con el calentamiento del agua (Brito, 2008). Muchas especies nativas de peces de afinidad tropical han experimentado un crecimiento poblacional bajo las nuevas circunstancias climáticas, como la vieja (*Sparisoma cretense*), la calufa (*Heteropriacanthus cruentatus*), el gallo azul (*Aluterus scriptus*) o el pez trompeta (*Aulostomus strigosus*). Por el contrario, las macroalgas *Fucus spiralis*, *Cystoseira* spp. (*C. tamariscifolia*, *C. mauritanica* and *C. abies-marina*) y *Gelidium canariense* están en marcada regresión (Kersting, 2016), como lo está también la fanerógama marina *Cymodocea nodosa* (Fabbri et al., 2015; Tuya et al., 2004), cuyas praderas de gran importancia ecológica (Hemminga & Duarte, 2000) se están viendo reemplazadas por el alga *Caulerpa racemose* aff. *cylindracea* en varias localidades (Verlaque et al., 2004).

Además de estos cambios en la distribución y abundancia de determinadas especies, las condiciones oceanográficas más cálidas que se están dando en el archipiélago canario, junto a la sobrepesca de sus depredadores, han provocado una expansión incontrolada del erizo *Diadema africanum* (Hernández et al., 2010). Esta especie está teniendo un efecto cascada en los fondos someros canarios: el aumento de la temperatura está influyendo de forma positiva en el reclutamiento y la supervivencia de los juveniles de esta especie (Hernández et al., 2010), y este eficaz herbívoro está provocando la desaparición de las algas en amplias zonas rocosas, dando lugar a los llamados blanquiales (Kersting, 2016).

4. IMPACTOS EN PESCA Y ACUICULTURA

Impactos en comunidades recolectoras, pesqueras y marisqueras

En el contexto español, el 96% de la flota opera en caladeros nacionales y es responsable, aproximadamente, del 39% de las capturas totales del país (CEPESCA, 2019). El 4% de la flota restante genera el 61% de las capturas totales (5% proviene de caladeros de la UE o aguas no españolas y el 56% de caladeros internacionales) (CEPESCA, 2019). El pescado y marisco contribuyen en un 12,3% al consumo total de proteína en el territorio estatal y el número de puestos de empleo en actividades pesqueras contribuye al 25% del total de la Unión Europea para este sector (Comisión Europea, 2018; Barange et al., 2018). Estas cifras ilustran una cultura vinculada fuertemente a los sistemas marinos y una importante dependencia de la sociedad sobre sus recursos biológicos.

Como se ha visto en la sección 3, las comunidades ecológicas claves que configuran los ecosistemas marinos, como los bosques de macroalgas, los arrecifes rocosos templados o las praderas de fanerógamas marinas, están siendo afectadas por el cambio climático a lo largo de la costa española. Así, especies objetivo de actividades de recolección, pesca comercial y recreativa e interés socio-cultural ligadas a estos ecosistemas (Pita et al., 2018, 2019) pueden verse en peligro tras cambios en sus hábitats y sus condiciones biológicas y a su vez afectar a dichas actividades humanas. A modo de ejemplo, los desplazamientos latitudinales y en profundidad de estas especies pueden provocar cambios en las capturas y en el esfuerzo pesquero. Además, gran número de comunidades españolas dependen de estos recursos algales, pesqueros y marisqueros (Comisión Europea, 2018) y presentan diferentes grados de vulnerabilidad a los efectos del cambio climático (Barazzetta et al., 2018; Ruiz-Díaz et al., 2018).

Los impactos observados en el noroeste peninsular (zona atlántica) descritos en la sección 2, tales como el aumento de temperatura, la acidificación del agua y los cambios en los afloramientos marinos, están impactando a recursos clave como la sardina, el pulpo o el mejillón (Bode et al., 2008). En el caso de la palometa (*Brama brama*), se han observado cambios en la migración en el Atlántico Noroeste que están fuertemente ligados a cambios de temperatura a 200 metros de profundidad y al afloramiento de las aguas gallegas (Quinzán et al., 2016). Las proyecciones para las próximas décadas en esta región apuntan a escenarios donde los recursos pesqueros, marisqueros y de acuicultura seguirán impactados (Bode et al., 2008). A pesar del debilitamiento actual del afloramiento, los resultados de las proyecciones futuras de diferentes modelos científicos no concuerdan sobre cómo este proceso oceanográfico se comportará en los próximos años (ver sección 2). Esta información será clave para recursos como el percebe, para el cual la dispersión larval y la productividad están estrechamente relacionados con los afloramientos en el mar Cantábrico (Rivera et al., 2013).

Siguiendo en la zona gallega, se observan tendencias negativas en la biomasa disponible de especies de marisco como la almeja babosa, almeja fina o almeja japónica, que pueden haber jugado un papel decisivo en el descenso de desembarques y precios de venta de estos organismos en los últimos años, provocando una reducción del esfuerzo pesquero (Pita et al., 2019). Aunque este descenso se debe a varias causas, se espera un impacto directo del calentamiento global sobre estas especies de marisco, agravando las consecuencias ya de por sí negativas de contaminación y de mareas rojas que les afectan (Pita et al., 2019). Las mareas rojas son un fenómeno natural clave para el marisqueo, que consiste en la proliferación de fitoplancton – el cual puede estar compuesto por especies que producen toxinas peligrosas para la salud humana – bajo ciertas condiciones ambientales (temperatura, pH, vientos, etc.) (Álvarez-Salgado et al., 2008). El fitoplancton se acumula y es visualizado como manchas de color rojizo, pardo o verdoso (ver relación con acuicultura en la sección 4 Impactos en la acuicultura marina). Estudios que integran el conocimiento ecológico local también refuerzan la evidencia existente sobre las tendencias de los recursos marinos en Galicia y el cambio climático. Las comunidades costeras y colectivos

marisqueros han observado y esperan en el futuro ver disminuciones en la abundancia, o desapariciones de especies comerciales clave para la próxima década (Villasante, 2018).

Paralelamente, en el noroeste de la costa mediterránea se observa cómo la abundancia en especies de interés pesquero está variando debido al cambio climático. Análisis multidisciplinares describen cómo especies de aguas cálidas como la alacha (*Sardinella aurita*) o el palometón (*Lichia amia*) experimentan procesos de colonización; y en cambio, especies de aguas frías como la maruca (*Molva molva*) o el espadín (*Sprattus sprattus*) sufren procesos de regresión (Lloret et al., 2015; ver también sección 3 y figura 5.2). Estas evidencias permiten entender la transversalidad del fenómeno climático y su cercana y directa vinculación con las actividades humanas. Hasta ahora, existe escasa información sobre cambio climático y sus impactos en las dimensiones socioeconómicas y culturales de las comunidades costeras dependientes en las regiones españolas.

En cuanto a otras especies objetivo a nivel de la Unión Europea, existe evidencia de que 16 de los 21 stocks de peces comerciales clave están desplazándose o expandiendo su área de distribución debido al cambio climático en aguas europeas, de los cuales 8 se han desplazado fuera de sus áreas históricas de pesca (ICES, 2016). Algunos ejemplos que afectan a España son el rape (*Lophius*), que ha disminuido su ocurrencia en aguas nacionales debido a los cambios de temperatura; el eglefino (*Melanogrammus aeglefinus*), que ha aumentado su ocurrencia en el Golfo de Bizkaia; la platija (*Pleuronectes platessa*), que ha disminuido su abundancia en el Golfo de Bizkaia debido al efecto nocivo de la temperatura en el hábitat de los juveniles; y el lenguado (*Solea solea*), que ha mostrado desplazamientos, entre otras especies (ICES, 2016; Montero-Serra et al., 2015; Punzón et al., 2016). Por el contrario, se espera que la anchoa del cantábrico (*Engraulis encrasicolus*) aumente su abundancia de larvas en el Golfo de Bizkaia entre un 1,05 y un 2,66 bajo los impactos del cambio climático en 2050 y 2100 respectivamente, para el escenario RCP8.5 (Erauskin-Extramiana et al., 2019a). Para esta especie, los modelos también predicen una expansión de las áreas de desove de 7,8% en 2050 y 16,4% en el 2100 (RCP8.5) (Erauskin-Extramiana et al., 2019a).

El bonito del norte (*Thunnus alalunga*), que constituye una pesquería tradicional, se ha desplazado hacia el norte, lo que implica mayores costes de explotación en términos de tiempo de desplazamiento y combustible para la flota (Anadón et al., 2009). Un reciente estudio atribuye los desplazamientos de las capturas a la presión pesquera sobre esta especie, pero identifica un cambio en la migración del bonito del norte en el que se adelanta 2,3 días por década (periodo 1981-2017), asociado al calentamiento del mar (Chust et al., 2019). Otros autores han analizado capturas de pesca de atún blanco (*Thunnus alalunga*) y atún rojo (*Thunnus thynnus*), y han detectado que también están llegando antes al noreste Atlántico durante sus rutas migratorias y que la latitud media de captura del atún blanco muestra una tendencia creciente con el tiempo, es decir, que se desplaza más al norte (Dufour et al., 2010). Las descargas en puertos del Mediterráneo de alacha (*Sardinella aurita*) también se están viendo afectadas con una tendencia a aumentar en puertos del norte (Sabatés et al., 2006). Gracias al estudio global de Free et al. (2019) hay constancia de que algunos caladeros españoles están perdiendo productividad pesquera. Proyecciones globales también muestran una disminución del potencial máximo de capturas en las zonas del Atlántico y de Canarias de entre el 20% y el 30% para el escenario RCP 2.6, y del 30% al 40% para el escenario de altas emisiones (RCP 8.5) a finales de siglo (IPCC, 2019). Cabe destacar que estas proyecciones disponibles están hechas con modelos globales que pueden no estar representando las dinámicas regionales de forma adecuada para entender bien los impactos a escala estatal. Se espera que estos cambios en las especies objetivo de la pesca y en el potencial de captura afecten a las comunidades pesqueras. Sin embargo, es imprescindible volver a señalar que hay escasas evidencias acerca de los daños o beneficios socioeconómicos derivados de cambios de distribución o abundancia en especies comerciales en las regiones marinas de España.

Finalmente, en cuanto a los caladeros europeos e internacionales, el movimiento de especies puede generar conflicto a la hora de repartir los derechos de pesca (Baudron et al., 2020; Pinsky et al., 2018). Un ejemplo es la reciente disputa pesquera entre la Unión Europea, Noruega, Islandia y las Islas Faroe debido al

desplazamiento del verdel (*Scomber scombrus*) (Spijkers and Boonstra, 2017). En aguas internacionales, donde España tiene capturas de atún sustanciales, también se han recogido cambios en la distribución del hábitat de túnidos tropicales (Erauskin-Extramiana et al., 2019b), aunque la gestión y los cambios tecnológicos de las pesquerías de gran altura operando en esas aguas pueden minimizar los impactos de los cambios de distribución causados por el cambio climático (Rubio et al., 2020). Free et al. (2019) muestran cómo la gestión sostenible de la pesca y recuperación de stocks podría compensar la mayor parte de estas pérdidas debidas al cambio climático a escala global.

Impactos en la acuicultura marina

La acuicultura marina es uno de los sectores decisivos para cubrir la demanda de pescado a nivel mundial (FAO, 2018) y está considerado como uno de los sectores más vulnerables a los efectos del cambio climático (Comisión Europea, 2013; OESA, 2015). Dentro de la producción acuícola de peces y moluscos marinos, el cultivo del mejillón (*Mytilus galloprovincialis*) posiciona a España a la cabeza de la Unión Europea en términos de volumen (APROMAR, 2019), alcanzando las 273.600 toneladas en 2018, de un total de 348.395. Al mejillón le siguen la lubina (*Dicentrarchus labrax*) y la dorada (*Sparus aurata*), con 22.460 y 14.930 toneladas respectivamente. Otras especies de especial interés son la corvina y el atún rojo (APROMAR, 2019). Estas especies sustentan un sector en crecimiento cada vez más importante a nivel internacional para alcanzar la seguridad alimentaria, y requieren diferentes tipos de infraestructuras y alimento a nivel local.

El aumento de la temperatura del agua, la acidificación del océano, los cambios en el patrón de vientos (que afectan a las corrientes marinas y afloramientos), así como la disponibilidad de oxígeno, la eutrofización y los fenómenos extremos como el oleaje y los temporales más intensos evidencian una serie de impactos que pueden afectar al cultivo de estas especies (Catalán et al., 2019; De Silva & Soto, 2009; García-Diez & Remiro-Perlado, 2014; Rosa et al., 2012). Para el cultivo del mejillón en las rías gallegas, se prevé que aumenten los episodios de proliferación de mareas rojas (Álvarez-Salgado et al., 2008; 2017), implicando cierres temporales de los polígonos de bateas debido a la acumulación de toxinas en estos moluscos que pueden poner en riesgo la salud de las personas. Ante este escenario, los sistemas de alerta temprana se convierten en un elemento necesario y algunos trabajos ya apuntan en esa dirección (Comeau et al., 2019; Anderson, 2009). Por otro lado, se han identificado relaciones significativas entre radiación solar, intensidad de vientos costeros y aportes fluviales que pueden incentivar un crecimiento más rápido de este molusco cuando se dan condiciones para un afloramiento intenso, planteando un escenario en el que se podría reducir sensiblemente su ciclo de cultivo (Álvarez-Salgado et al., 2017; Fuentes-Santos et al., 2016). Las olas de calor son otro de los fenómenos identificados que pueden desencadenar la proliferación de organismos del *biofouling*, como los cnidarios de la especie *Actinothoe sphyrodeta*, que se adhieren a la concha del bivalvo, debilitando el desarrollo de su biso y su adherencia a las cuerdas, pudiendo provocar desprendimientos (Babarro et al., 2018). Además de estos impactos, el mejillón también es vulnerable a la acidificación del agua por su sensibilidad a disminuciones de pH y a los cambios de salinidad esperados (Freitas et al., 2017; Pita et al., 2019). Estos efectos provocan en el organismo problemas reproductivos, de crecimiento y de resistencia a enfermedades, características clave con importantes implicaciones económicas (Freitas et al., 2017; Pita et al., 2019).

En acuicultura de peces, el aumento de la temperatura puede afectar la vulnerabilidad de las especies cultivadas a enfermedades por expansión de patógenos y parásitos (Callaway et al., 2012). En este sentido, una menor disponibilidad de oxígeno asociada a altas temperaturas puede producir variaciones en el crecimiento (Peleteiro, 2010) y la maduración, aumentando también la mortalidad de los peces (Callaway et al., 2012). Del mismo modo, la proliferación de medusas está incrementando su frecuencia (Canepa et al., 2014) y puede incidir negativamente sobre la dorada y la lubina cultivadas en jaulas, ocasionándoles también infecciones y patologías (Baxter et al., 2011). Por otra parte, la previsión de una mayor frecuencia de temporales puede provocar estrés

en los peces cultivados en jaulas, así como daños en la infraestructura, con importantes consecuencias socio-económicas debido a los escapes (AQUADAPT, 2018; Arechavala-Lopez et al., 2018). Cabe destacar la planificación espacial marina como alternativa imprescindible para limitar los efectos negativos del cambio climático, como puede ser la probabilidad de difusión de enfermedades, aumentando la distancia mínima entre las granjas e implantando programas de bioseguridad, y sistemas de monitorización y alarma temprana. Por otra parte, ante determinados escenarios de emisión, puede ser necesaria la reubicación de instalaciones de acuicultura a localidades que vayan a sufrir en menor medida las consecuencias del cambio climático en base a modelos predictivos de anomalías térmicas o exposición al oleaje (AquaSpace, 2019; Sanchez-Jerez et al., 2016; De Silva & Soto, 2009; Mardones et al., 1999).

5. REFERENCIAS

- Adloff, F., Somot, S., Sevault, F., Jordà, G., Aznar, R., Déqué, M., Herrmann, M., Marcos, M., Dubois, C., Padorno, E., Alvarez-Fanjul, E., Gomis, D., 2015. Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. *Clim. Dyn.* 45, 2775–2802. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2507-3>
- Afonso-Carrillo, J., Sansón, M., Sangil, C., Díaz-Villa, T., 2007. New records of benthic marine algae from the Canary Islands (eastern Atlantic Ocean): Morphology, taxonomy and distribution. *Bot. Mar.* 50, 119–127. <https://doi.org/10.1515/BOT.2007.014>
- Álvarez-Salgado, X.A., Labarta, U., Fernández-Reiriz, M.J., Figueiras, F.G., Rosón, G., Piedracoba, S., Filgueira, R., Cabanas, J.M., 2008. Renewal time and the impact of harmful algal blooms on the extensive mussel raft culture of the Iberian coastal upwelling system (SW Europe). *Harmful Algae* 7, 849–855. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2008.04.007>
- Álvarez-Salgado, X.A., Labarta, U., Vinseiro, V., Fernández-Reiriz, M.J., 2017. Environmental drivers of mussels flesh yield in a coastal upwelling system. *Ecol. Indic.* 79, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.039>
- Alvarez, I., Lorenzo, M.N., deCastro, M., Gomez-Gesteira, M., 2017. Coastal upwelling trends under future warming scenarios from the CORDEX project along the Galician coast (NW Iberian Peninsula). *Int. J. Climatol.* 37, 3427–3438. <https://doi.org/10.1002/joc.4927>
- Anadón, R., Afonso-Carrillo, J., Araujo, R., Arenas, F., Arrontes, J., Bárbara, I. et al., 2014. Cambios recientes en la distribución y abundancia de macroalgas marinas en el norte de la península ibérica y Canarias en respuesta al cambio climático., in: XVIII Simposio Ibérico de Estudios de Biología Marina. Gijón, Spain.
- Anadón, R., Duarte, C., Fariña, C., 2005. 4. Impactos sobre los ecosistemas marinos y el sector pesquero. En *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE - Informe final*.
- Anadón, R., Fernández, C., García Flórez, L., Losada, I., Valdés Santurio, L., 2009. Costas y Oceanos, in: *Evidencias y Efectos Potenciales Del Cambio Climático En Asturias*. Eds: Consejería de Medio Ambiente, Ordenación Del Territorio e Infraestructuras. Viceconsejería de Medio Ambiente, Oficina Para La Sostenibilidad, Cambio Climático y La Participación. Gobierno del Principado de Asturias. pp. 126-173.
- Anderson, D.M., 2009. Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs). *Ocean Coast. Manag.* 52, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.04.006>
- APROMAR, 2019. Informe La Acuicultura en España 2019.
- AQUADAPT, 2018. Variables asociadas al cambio climático que afectan a la acuicultura de las especies objetivo Identificación y análisis. Proyecto AQUADAPT: Plan de Adaptación de l sector de la acuicultura marina española al cambio climático.
- AquaSpace, 2019. Project: Ecosystem Approach to making Space for Aquaculture (2015-2018).
- Arechavala-Lopez, P., Toledo-Guedes, K., Izquierdo-Gomez, D., Šegvić-Bubić, T., Sanchez-Jerez, P., 2018. Implications of Sea Bream and Sea Bass Escapes for Sustainable Aquaculture Management: A Review of Interactions, Risks and Consequences. *Rev. Fish. Sci. Aquac.* 26, 214–234. <https://doi.org/10.1080/23308249.2017.1384789>
- Arronte, J.C., Pis-Millán, J.A., Fernández, M.P., García, L., 2004. First records of the subtropical fish *Megalops atlanticus* (Osteichthyes: Megalopidae) in the Cantabrian Sea, northern Spain. *J. Mar. Biol. Assoc. United Kingdom* 84, 1091–1092. <https://doi.org/10.1017/S0025315404010501h>
- Babarro, J.M.F., Padin, X.A., Filgueira, R., El Morabet, H., Portabales, M.A.L., 2018. The impact of the sea anemone *Actinotheres sphyrodeta* on *Mytilus galloprovincialis* mussel cultivation (Galicia, Spain). *Biofouling* 34, 1138–1149. <https://doi.org/10.1080/08927014.2018.1547818>

- Bañón, R., 2004. New records of two southern fish in Galician waters (NW Spain). *Cybium* 28, 367–368.
- Bañón, R., Casas, J.M., Piñeiro, C.G., Covelo, M., 1997. Capturas de peces de afinidades tropicales en aguas atlánticas de Galicia (noroeste de la península Ibérica). *Bol. - Inst. Esp. Oceanogr.* 13, 57–66.
- Bañón, R., del Río, J., Piñeiro, C., Casas, M., 2002. Occurrence of tropical affinity fish in Galician waters, north-west Spain. *J. Mar. Biol. Assoc. United Kingdom* 82, 877–880.
- Bañón, R., Sande, C., 2008. First record of the red cornetfish *Fistularia petimba* (Syngnathiformes: Fistulariidae) in Galician waters: A northernmost occurrence in the eastern Atlantic. *J. Appl. Ichthyol.* 24, 106–107. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2007.00918.x>
- Barange, M., Bahri, T., Beveridge, M.C.M., Cochrane, K.L., Funge-Smith, S., Poulain, F. (eds), 2018. Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options. FAO Fisheries and Aquaculture. Technical Paper No. 627. Rome, FAO. 628 pp.
- Barazzetta, F., Busck, A.G., Ojea, E., 2018. Master thesis: Fishers livelihoods and climate change: the adaptive capacity of shellfish gatherers. Department of Geosciences and Natural Resource Management. University of Copenhagen.
- Baudron, A.R., Brunel, T., Blanchet, M.A., Hidalgo, M., Chust, G., Brown, E.J., Kleisner, K.M., Millar, C., MacKenzie, B.R., Nikolioudakis, N., Fernandes, J.A., Fernandes, P.G., 2020. Changing fish distributions challenge the effective management of European fisheries. *Ecography (Cop.)*. 43, 494–505. <https://doi.org/10.1111/ecog.04864>
- Baxter, E.J., Albinyana, G., Girons, A., Isern, M.M., García, A.B., Lopez, M., Canepa, A., Olariaga, A., Gili, J., Fuentes, V., 2011. Jellyfish-inflicted gill damage in marine-farmed fish: an emerging problem for the Mediterranean?, in: XIII Congreso Nacional de Acuicultura. Castelldefels, Barcelona.
- Beaugrand, G., 2009. Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 56, 656–673. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.022>
- Bianchi, C., Morri, C., 2000. Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: Situation, problems and prospects for future research. *Mar. Pollut. Bull.* 40, 367–376. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00027-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00027-8)
- Bode, A.; Álvarez-Salgado, X.A.; Ruíz-Villarreal, M.; Bañón Díaz, R.; Gonzalez Castro, C.; Molares Vila, J.; Otero, J.; Rosón, G.; Varela, M., 2008. Impacto do cambio climático nas condicións oceanográficas e nos recursos mariños, in: Evidencias Del Cambio Climático En Galicia. pp. 619–636.
- Bombace, G., 2001. Influence of climatic changes on stocks, fish species and marine ecosystems in the Mediterranean Sea. *Arch Ocean. Limnol* 22, 67–72.
- Brito, A., 2008. Influencia del calentamiento global sobre la biodiversidad marina de las Islas Canarias, in: Afonso-Carrillo J (Ed) *Naturaleza Amenazada Por Los Cambios En El Clima*. Actas III Semana Científica Telesforo Bravo. IEHC, pp. 141–161.
- Brito, A., Falcón, J., 2006. Primera cita para Canarias de dos nuevos peces de origen tropical: *Diodon holocanthus* Linnaeus, 1758 y *Canthidermis maculata* (Bloch, 1786). *Rev. Acad. Canar. Cienc.* 18, 89–92.
- Callaway, R., Shinn, A.P., Grenfell, S.E., Bron, J.E., Burnell, G., Cook, E.J., Crumlish, M., Culloty, S., Davidson, K., Ellis, R.P., Flynn, K.J., Fox, C., Green, D.M., Hays, G.C., Hughes, A.D., Johnston, E., Lowe, C.D., Lupatsch, I., Malham, S., Mendzil, A.F., Nickell, T., Pickerell, T., Rowley, A.F., Stanley, M.S., Tocher, D.R., Turnbull, J.F., Webb, G., Wootton, E., Shields, R.J., 2012. Review of climate change impacts on marine aquaculture in the UK and Ireland. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 22, 389–421. <https://doi.org/10.1002/aqc.2247>
- Calvo, E., Simó, R., Coma, R., Ribes, M., Pascual, J., Sabatés, A., Gili, J.M., Pelejero, C., 2011. Effects of climate change on Mediterranean marine ecosystems: The case of the Catalan Sea. *Clim. Res.* 50, 1–29. <https://doi.org/10.3354/cr01040>
- Canepa, A., Fuentes, V., Sabatés, A., Piraino, S., Boero, F., Gili, J.-M., 2014. Chapter 11 *Pelagia noctiluca* in the Mediterranean Sea, in: Pitt, K., Lucas, C. (Eds.), *Jellyfish Blooms*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-007-7015-7_11
- Carillo, A., Sannino, G., Artale, V., Ruti, P.M., Calmanti, S., Dell'Aquila, A., 2012. Steric sea level rise over the Mediterranean Sea: Present climate and scenario simulations. *Clim. Dyn.* 39, 2167–2184. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1369-1>
- Casabella, N., Lorenzo, M.N., Taboada, J.J., 2014. Trends of the Galician upwelling in the context of climate change. *J. Sea Res.* 93, 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2014.01.013>
- Casas-Prat, M., Sierra, J.P., 2013. Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea. *J. Geophys. Res. Ocean.* 118, 3548–3568. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20233>

- Cassano, V., Gil-Rodríguez, M., Senties, A., Toyota Fujii, M., 2008. Laurencia caduciramulosa (Ceramiales, Rhodophyta) from the Canary Islands, Spain: A new record for the eastern Atlantic Ocean. *Bot. Mar.* 51, 156–158. <https://doi.org/10.1515/BOT.2008.021>
- Catalán, I.A., Auch, D., Kamermans, P., Morales-Nin, B., Angelopoulos, N. V., Reglero, P., Sandersfeld, T., Peck, M.A., 2019. Critically examining the knowledge base required to mechanistically project climate impacts: A case study of Europe's fish and shellfish. *Fish Fish.* 20, 501–517. <https://doi.org/10.1111/faf.12359>
- Cebrian, E., Ballesteros, E., 2010. Invasion of Mediterranean benthic assemblages by red alga *Lophocladia lallemandii* (Montagne) F. Schmitz: Depth-related temporal variability in biomass and phenology. *Aquat. Bot.* 92, 81–85. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2009.10.007>
- Cebrian, E., Ballesteros, E., 2007. Invasion of the alien species *Lophocladia lallemandii* in Eivissa-Formentera (Balearic Islands), in: Third Mediterranean Symposium on Marine Vegetation. Marseilles. RAC/SPA, pp. 34–41.
- CEPESCA, 2019. Informe del sector pesquero español 2019. Madrid.
- Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Déqué, M., Le Cozannet, G., 2012. Climate change impact on waves in the bay of Biscay, France. *Ocean Dyn.* 62, 831–848. <https://doi.org/10.1007/s10236-012-0534-8>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K.E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., Mann, M.E., 2020. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Cheung, W.W.L., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J.L., Kearney, K., Watson, R., Pauly, D., 2009. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish Fish.* 10, 235–251. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00315.x>
- Chivers, W.J., Walne, A.W., Hays, G.C., 2017. Mismatch between marine plankton range movements and the velocity of climate change. *Nat. Commun.* 8, 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms14434>
- Church, J.A., Gregory, J.M., 2019. Sea Level Change, in: Encyclopedia of Ocean Sciences. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Chust, G., Allen, J.I., Bopp, L., Schrum, C., Holt, J., Tsiaras, K., Zavatarelli, M., Chifflet, M., Cannaby, H., Dadou, I., Daewel, U., Wakelin, S.L., Machu, E., Pushpadas, D., Butenschon, M., Artioli, Y., Petihakis, G., Smith, C., Garçon, V., Goubanova, K., Le Vu, B., Fach, B.A., Salihoglu, B., Clementi, E., Irigoien, X., 2014. Biomass changes and trophic amplification of plankton in a warmer ocean. *Glob. Chang. Biol.* 20, 2124–2139. <https://doi.org/10.1111/gcb.12562>
- Chust, G., Borja, Á., Caballero, A., Irigoien, X., Sáenz, J., Moncho, R., Marcos, M., Liria, P., Hidalgo, J., Valle, M., Valencia, V., 2011. Climate change impacts on coastal and pelagic environments in the southeastern Bay of Biscay. *Clim. Res.* 48, 307–332. <https://doi.org/10.3354/cr00914>
- Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C., Borja, Á., 2010. Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 87, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.12.021>
- Chust, G., Goikoetxea, N., Ibaibarriaga, L., Sagarminaga, Y., Arregui, I., Fontán, A., Irigoien, X., Arrizabalaga, H., 2019. Earlier migration and distribution changes of albacore in the Northeast Atlantic. *Fish. Oceanogr.* 28, 505–516. <https://doi.org/10.1111/fog.12427>
- CIESM (The Mediterranean Science Commission), 2008. Climate warming and related changes in Mediterranean marine biota. Briand F (ed) CIESM workshop monograph 35. CIESM, Monaco.
- Clemente, S., 2007. Tesis doctoral: Evolución de las poblaciones del erizo *Diadema aff. antillarum* en Canarias y valoración de la depredación como factor de control. Universidad de la Laguna. Facultad de Biología. Departamento de Biología Animal (Ciencias Marinas).
- Clemente, S., Hernández, J.C., Brito, A., 2011. Context-dependent effects of marine protected areas on predatory interactions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 437, 119–133. <https://doi.org/10.3354/meps09243>
- Comeau, L.A., Babarro, J.M.F., Riobó, P., Scarratt, M., Starr, M., Tremblay, R., 2019. PSP-producing dinoflagellate *Alexandrium minutum* induces valve microclosures in the mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Aquaculture* 500, 407–413. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.10.025>
- Comisión Europea. Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries., 2018. Facts and figures on the common fisheries policy : basic statistical data : 2018 edition.

- Comisión Europea, 2013. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones: Estrategia de adaptación al cambio climático de la Unión Europea. Bruselas, BE. Document 52013DC0216.
- Cordeiro Pires, A., Nolasco, R., Rocha, A., Ramos, A.M., Dubert, J., 2016. Climate change in the Iberian Upwelling System: a numerical study using GCM downscaling. *Clim. Dyn.* 47, 451–464. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2848-y>
- Darmaraki, S., Somot, S., Sevault, F., Nabat, P., Cabos Narvaez, W.D., Cavicchia, L., Djurdjevic, V., Li, L., Sannino, G., Sein, D. V., 2019. Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea. *Clim. Dyn.* 53, 1371–1392. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z>
- David, H., Laza-Martínez, A., Rodríguez, F., Fraga, S., Orive, E., 2019. *Coolia guanchica* sp. nov. (Dinophyceae) a new epibenthic dinoflagellate from the Canary Islands (NE Atlantic Ocean). *Eur. J. Phycol.* <https://doi.org/10.1080/09670262.2019.1651400>
- De Silva, S.S., Soto, D., 2009. Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation., in: K. Cochrane, C. De Young, D. Soto and T. Bahri (Eds). *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 530. Rome, FAO. pp. 151-212.
- Díaz-Almela, E., Marba, N., Martínez, R., Santiago, R., Duarte, C.M., 2009. Seasonal dynamics of *Posidonia oceanica* in Magalluf bay (Mallorca, Spain): Temperature effects on seagrass mortality. *Limnol. Oceanogr.* 54, 2170–2182. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6.2170>
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., Larigauderie, A., Adhikari, J.R., Arico, S., Báldi, A., Bartuska, A., Baste, I.A., Bilgin, A., Brondizio, E., Chan, K.M.A., Figueroa, V.E., Duraipappah, A., Fischer, M., Hill, R., Koetz, T., Leadley, P., Lyver, P., Mace, G.M., Martin-Lopez, B., Okumura, M., Pacheco, D., Pascual, U., Pérez, E.S., Reyers, B., Roth, E., Saito, O., Scholes, R.J., Sharma, N., Tallis, H., Thaman, R., Watson, R., Yahara, T., Hamid, Z.A., Akosim, C., Al-Hafedh, Y., Allahverdiyev, R., Amankwah, E., Asah, T.S., Asfaw, Z., Bartus, G., Brooks, A.L., Caillaux, J., Dalle, G., Darnaedi, D., Driver, A., Erpul, G., Escobar-Eyzaguirre, P., Failler, P., Fouda, A.M.M., Fu, B., Gundimeda, H., Hashimoto, S., Homer, F., Lavorel, S., Lichtenstein, G., Mala, W.A., Mandivenyi, W., Matczak, P., Mbizvo, C., Mehrdadi, M., Metzger, J.P., Mikissa, J.B., Moller, H., Mooney, H.A., Mumby, P., Nagendra, H., Nesshover, C., Oteng-Yeboah, A.A., Pataki, G., Roué, M., Rubis, J., Schultz, M., Smith, P., Sumaila, R., Takeuchi, K., Thomas, S., Verma, M., Yeo-Chang, Y., Zlatanova, D., 2015. The IPBES Conceptual Framework - connecting nature and people. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 14, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- Diez, J.M., D'Antonio, C.M., Dukes, J.S., Grosholz, E.D., Olden, J.D., Sorte, C.J.B., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., Early, R., Ibáñez, I., Jones, S.J., Lawler, J.J., Miller, L.P., 2012. Will extreme climatic events facilitate biological invasions? *Front. Ecol. Environ.* 10, 249–257. <https://doi.org/10.1890/110137>
- Duarte, C.M., Losada, I.J., Hendriks, I.E., Mazarrasa, I., Marbà, N., 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Chang.* 3, 961–968. <https://doi.org/10.1038/nclimate1970>
- Dufour, F., Arrizabalaga, H., Irigoien, X., Santiago, J., 2010. Climate impacts on albacore and bluefin tunas migrations phenology and spatial distribution. *Prog. Oceanogr.* 86, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.04.007>
- Erauskin-Extramiana, M., Alvarez, P., Arrizabalaga, H., Ibaibarriaga, L., Uriarte, A., Cotano, U., Santos, M., Ferrer, L., Cabré, A., Irigoien, X., Chust, G., 2019a. Historical trends and future distribution of anchovy spawning in the Bay of Biscay. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 159, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.07.007>
- Erauskin-Extramiana, M., Arrizabalaga, H., Hobday, A.J., Cabré, A., Ibaibarriaga, L., Arregui, I., Murua, H., Chust, G., 2019b. Large-scale distribution of tuna species in a warming ocean. *Glob. Chang. Biol.* 25, 2043–2060. <https://doi.org/10.1111/gcb.14630>
- Fabbri, F., Espino, F., Herrera, R., Moro, L., Haroun, R., Riera, R., González-Henríquez, N., Bergasa, O., Monterroso, O., Ruiz de la Rosa, M., Tuya, F., 2015. Trends of the seagrass *Cymodocea nodosa* (Magnoliophyta) in the Canary Islands: population changes in the last two decades. *Sci. Mar.* 79, 7–13. <https://doi.org/10.3989/scimar.04165.19b>
- Falcón, J.M., Herrera, R., Ayza, O., Brito, A., 2005. Sobre la tropicalización reciente de la ictiofauna litoral de las islas Canarias y su relación con cambios ambientales y actividades antrópicas. *Rev. Acad. Canar. Cienc.* 33, 515–526.
- FAO, 2018. Impactos del cambio climático en la pesca y la acuicultura. Síntesis de los conocimientos y las opciones de adaptación y mitigación actuales. Resumen del Documento Técnico de Pesca y Acuicultura de la FAO no. 627. Roma. 48 pp.
- Fernández-Cordeiro, A., Bañón, R., 1997. Primera cita de jurel dentón *Pseudocaranx dentex* (Blochampsand Schneider en Schneider, 1801) en aguas de Galicia (noroeste ibérico). *Bol. - Inst. Esp. Oceanogr.* 13, 87–90.
- Francour, P., Boudouresque, C.F., Harmelin, J.G., Harmelin-Vivien, M.L., Quignard, J.P., 1994. Are the Mediterranean waters becoming warmer? Information from biological indicators. *Mar. Pollut. Bull.* 28, 523–526. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(94\)90071-X](https://doi.org/10.1016/0025-326X(94)90071-X)
- Free, C.M., Thorson, J.T., Pinsky, M.L., Oken, K.L., Wiedenmann, J., Jensen, O.P., 2019. Impacts of historical warming on marine fisheries production. *Science*. 363, 979–983. <https://doi.org/10.1126/science.aau1758>

- Freitas, R., De Marchi, L., Bastos, M., Moreira, A., Velez, C., Chiesa, S., Wrona, F.J., Figueira, E., Soares, A.M.V.M., 2017. Effects of seawater acidification and salinity alterations on metabolic, osmoregulation and oxidative stress markers in *Mytilus galloprovincialis*. *Ecol. Indic.* 79, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.04.003>
- Fuentes-Santos, I., Labarta, U., Álvarez-Salgado, X.A., Fernández-Reiriz, M.J., 2016. Solar irradiance dictates settlement timing and intensity of marine mussels. *Sci. Rep.* 6. <https://doi.org/10.1038/srep29405>
- Gambaiani, D.D., Mayol, P., Isaac, S.J., Simmonds, M.P., 2009. Potential impacts of climate change and greenhouse gas emissions on Mediterranean marine ecosystems and cetaceans. *J. Mar. Biol. Assoc. United Kingdom* 89, 179–201. <https://doi.org/10.1017/S0025315408002476>
- García-Diez, C., Remiro-Perlado, J.P., 2014. Impactos del Cambio Climático sobre la Acuicultura en España. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 38 pp.
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Cigliano, M., Diaz, D., Harmelin, J.G., Gambi, M.C., Kersting, D.K., Ledoux, J.B., Lejeune, C., Linares, C., Marschal, C., Pérez, T., Ribes, M., Romano, J.C., Serrano, E., Teixido, N., Torrents, O., Zabala, M., Zuberer, F., Cerrano, C., 2009. Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: Effects of the 2003 heat wave. *Glob. Chang. Biol.* 15, 1090–1103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>
- Gascuel, D., Cheung, W.W.L., 2019. Marine biodiversity and ecosystem services: the large gloomy shadow of climate change, in: *Predicting Future Oceans*. Elsevier, pp. 79–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817945-1.00008-3>
- Gomis, D., Álvarez-Fanjul, E., Jordà, G., Marcos, M., Aznar, R., Rodríguez-Camino, E., Sánchez-Perrino, J., Rodríguez-González, J., Martínez-Asensio, A., Llasses, J., Pérez, B., Sotillo, M., 2016. Regional marine climate scenarios in the NE Atlantic sector close to the Spanish shores. *Sci. Mar.* 80, 215–234. <https://doi.org/10.3989/scimar.04328.07A>
- Gomis, D., Marcos, M., Jordà, G., Calafat, F.M., Martínez-Asensio, A., Llasses, J., Álvarez-Fanjul, E., Aznar, R., Sotillo, M.G., Gómez, M., Pérez, B., Padorno, E., Sánchez, J.C., Rodríguez-González, J.M., Ramos, D., Conde, J., Rodríguez-Camino, E., Somot, S., Tsimplis, M.N., 2012. Escenarios climáticos marinos en el entorno de la Península Ibérica. *Rev. Española Física* 26, 42–51.
- Gorostiaga, J., Irigoien, X., Borja, A., Fernandes, J., Chifflet, M., Gonzalez, M., Revilla, M., Bald, J., Valle, M., Garmendia, J., Valencia, V., Fontán, A., Chust, G., 2011. Biodiversidad, ecosistemas y recursos marinos, in: *Cambio Climático: Impacto y Adaptación En La Comunidad Autónoma Del País Vasco*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco (Eds.). Vitoria-Gasteiz. Eusko Jaurlaritza., pp. 53–63.
- Gualdi, S., Somot, S., Li, L., Artale, V., Adani, M., Bellucci, A., Braun, A., Calmanti, S., Carillo, A., Dell'Aquila, A., Déqué, M., Dubois, C., Elizalde, A., Harzallah, A., Jacob, D., L'Hévéder, B., May, W., Oddo, P., Ruti, P., Sanna, A., Sannino, G., Scoccimarro, E., Sevault, F., Navarra, A., 2013. The circe simulations: Regional climate change projections with realistic representation of the mediterranean sea. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 65–81. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00136.1>
- Guerra Marrero, A., Jiménez Alvarado, D., Castro Hernández, J.J., 2019. First Record of Exotic Fish *Canthidermis maculata* (Bloch, 1786) (Pisces: Balistidae) in the Canary Islands (Central-East Atlantic). *Thalass. An Int. J. Mar. Sci.* 35, 675–678. <https://doi.org/10.1007/s41208-019-00162-2>
- Hemer, M.A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., Wang, X.L., 2013. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nat. Clim. Chang.* 3, 471–476. <https://doi.org/10.1038/nclimate1791>
- Hemminga, M., Duarte, C., 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press. 298 pp.
- Hernández, J.C., Clemente, S., Girard, D., Pérez-Ruzafa, Á., Brito, A., 2010. Effect of temperature on settlement and postsettlement survival in a barrens-forming sea urchin. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 413, 69–80. <https://doi.org/10.3354/meps08684>
- Hoegh-Guldberg, O., Cai, Rongshuo, Poloczanska, E.S., Brewer, P.G., Sundby, Svein, Hilmi, Karim, Fabry, V.J., Jung, Sukgeun, Perry, I., Richardson, A.J., Brown, C.J., Schoeman, D., Signorini, S., Sydeman, W., Zhang, R., van Hooidonk, R., McKinnell, S.M., Turley, C., Omar, L., Cai, R., Poloczanska, E., Brewer, P., Sundby, S., Hilmi, K., Fabry, V., Jung, S., Field, C., Dokken, D., Mach, K., Bilir, T., Chatterjee, M., Ebi, K., Estrada, Y., Genova, R., Girma, B., Kissel, E., 2014. The Ocean, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Barros, V.R., et Al. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1655–1731.
- Holbrook, N.J., Scannell, H.A., Sen Gupta, A., Benthuisen, J.A., Feng, M., Oliver, E.C.J., Alexander, L. V., Burrows, M.T., Donat, M.G., Hobday, A.J., Moore, P.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Wernberg, T., 2019. A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nat. Commun.* 10, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10206-z>

- ICES, 2016. Report of the Working Group on Fish Distribution Shifts (WKFISHDISH). ICES HQ, Copenhagen, Denmark. ICES CM 2016/ACOM: 55. 197 pp.
- Iglesias, I., Lorenzo, M.N., Lázaro, C., Fernandes, M.J., Bastos, L., 2017. Sea level anomaly in the North Atlantic and seas around Europe: Long-term variability and response to North Atlantic teleconnection patterns. *Sci. Total Environ.* 609, 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.220>
- IPCC, 2019. Summary for Policymakers, in: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds)]. In press.
- IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate [...]. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds)]. In Press.
- Jones, M.C., Cheung, W.W.L., 2015. Multi-model ensemble projections of climate change effects on global marine biodiversity. *ICES J. Mar. Sci.* 72, 741–752. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu172>
- Jordà, G., Marbà, N., Duarte, C.M., 2012. Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming. *Nat. Clim. Chang.* 2, 821–824. <https://doi.org/10.1038/nclimate1533>
- Jordà, G., Menéndez, M., Aznar, R., Sánchez-arcilla, A., Estado, P., 2017. CLIVAR Exchanges: Volumen especial sobre el clima en la Península Ibérica, CLIVAR Exchanges. <https://doi.org/10.31978/639-18-002-5>
- Kapsenberg, L., Alliouane, S., Gazeau, F., Mousseau, L., Gattuso, J.P., 2017. Coastal ocean acidification and increasing total alkalinity in the northwestern Mediterranean Sea. *Ocean Sci.* 13, 411–426. <https://doi.org/10.5194/os-13-411-2017>
- Kersting, D.K., 2016. Cambio climático en el medio marino Español: Impactos, vulnerabilidad y adaptación. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. 166 pp.
- Kersting, D.K., Ballesteros, E., De Caralt, S., Linares, C., 2014. Invasive macrophytes in a marine reserve (Columbretes Islands, NW Mediterranean): Spread dynamics and interactions with the endemic scleractinian coral *Cladocora caespitosa*. *Biol. Invasions* 16, 1599–1610. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0594-9>
- Lacoue-Labarthe, T., Nunes, P.A.L.D., Ziveri, P., Cinar, M., Gazeau, F., Hall-Spencer, J.M., Hilmi, N., Moschella, P., Safa, A., Sauzade, D., Turley, C., 2016. Impacts of ocean acidification in a warming Mediterranean Sea: An overview. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 5, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2015.12.005>
- Lejeune, C., Chevaldonné, P., Pergent-Martini, C., Boudouresque, C.F., Pérez, T., 2010. Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. *Trends Ecol. Evol.* 25, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.009>
- Lionello, P., Cogo, S., Galati, M.B., Sanna, A., 2008. The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Glob. Planet. Change* 63, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.004>
- Lloret, J., Sabatés, A., Muñoz, M., Demestre, M., Solé, I., Font, T., Casadevall, M., Martín, P., Gómez, S., 2015. How a multidisciplinary approach involving ethnoecology, biology and fisheries can help explain the spatio-temporal changes in marine fish abundance resulting from climate change. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 24, 448–461. <https://doi.org/10.1111/geb.12276>
- Luczak, C., Beaugrand, G., Jaffré, M., Lenoir, S., 2011. Climate change impact on Balearic shearwater through a trophic cascade. *Biol. Lett.* 7, 702–705. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0225>
- Marbà, N., Duarte, C.M., 2010. Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Glob. Chang. Biol.* 16, 2366–2375. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x>
- Marbà, N., Jordà, G., Agustí, S., Girard, C., Duarte, C., 2015. Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota. *Front. Mar. Sci.* 2, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00056>
- Marcos, M., Chust, G., Jordà, G., Caballero, A., 2012. Effect of sea level extremes on the western Basque coast during the 21st century. *Clim. Res.* 51, 237–248. <https://doi.org/10.3354/cr01069>
- Mardones, L.S., Marioni, S., Sierra, A.P., 1999. Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Mar.* 25, 1–30.
- Martin, S., Gattuso, J.P., 2009. Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Glob. Chang. Biol.* 15, 2089–2100. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01874.x>

- Martínez-Asensio, A., Marcos, M., Tsimplis, M.N., Jordà, G., Feng, X., Gomis, D., 2016. On the ability of statistical wind-wave models to capture the variability and long-term trends of the North Atlantic winter wave climate. *Ocean Model.* 103, 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.02.006>
- Miranda, P.M.A., Alves, J.M.R., Serra, N., 2013. Climate change and upwelling: Response of Iberian upwelling to atmospheric forcing in a regional climate scenario. *Clim. Dyn.* 40, 2813–2824. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1442-9>
- Montero-Serra, I., Edwards, M., Genner, M.J., 2015. Warming shelf seas drive the subtropicalization of European pelagic fish communities. *Glob. Chang. Biol.* 21, 144–153. <https://doi.org/10.1111/gcb.12747>
- Moreno, J.M., Aguiló, E., Alonso, S., Álvarez Cobelas, M., Anadón, R., Ballester, F., Benito, G., Catalán, J., Castro, M. de, Cendrero, A., Corominas, J., Díaz, J., Díaz-Fierros, F., Duarte, C.M., Talaya, A.E., Peña, A.E., Estrela, T., Fariña, A.C., Ferná, F., Zazo, C., 2005. Evaluación Preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE - Informe final.
- Moullec, F., Velez, L., Verley, P., Barrier, N., Ulses, C., Carbonara, P., Esteban, A., Follesa, C., Gristina, M., Jadaud, A., Ligas, A., Díaz, E.L., Maiorano, P., Peristeraki, P., Spedicato, M.T., Thasitis, I., Valls, M., Guilhaumon, F., Shin, Y.-J., 2019. Capturing the big picture of Mediterranean marine biodiversity with an end-to-end model of climate and fishing impacts. *Prog. Oceanogr.* 178, 102179. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102179>
- Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., da Fonseca, G., Kent, J., 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858.
- Ocaña, O., Herrera, R., Brito, A., Garrido, M., González-Lorenzo, G., Monterroso, O., Aguilar, R., 2011. Current Status and Distribution of the Madreporaria *Dendrophyllia Laboreli* in the Canaries, South Portugal and Mediterranean Sea. *Rev. Acad. Canar. Cienc.* 22, 53–68.
- Occhipinti-Ambrogi, A., 2007. Global change and marine communities: Alien species and climate change. *Mar. Pollut. Bull.* 55, 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.11.014>
- OESA, 2015. Plan Estratégico Plurianual de la Acuicultura Española 2014 – 2020.
- Olsen, E., Kaplan, I.C., Ainsworth, C., Fay, G., Gaichas, S., Gamble, R., Girardin, R., Eide, C.H., Ihde, T.F., Morzaria-Luna, H.N., Johnson, K.F., Savina-Rolland, M., Townsend, H., Weijerman, M., Fulton, E.A., Link, J.S., 2018. Ocean futures under ocean acidification, marine protection, and changing fishing pressures explored using a worldwide suite of ecosystem models. *Front. Mar. Sci.* 5, 1–23. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00064>
- Oschlies, A., Brandt, P., Stramma, L., Schmidtke, S., 2018. Drivers and mechanisms of ocean deoxygenation. *Nat. Geosci.* 11, 467–473. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0152-2>
- Parmesan, C., Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37–42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>
- Pastor, F., Valiente, J.A., Palau, J.L., 2018. Sea Surface Temperature in the Mediterranean: Trends and Spatial Patterns (1982–2016). *Pure Appl. Geophys.* 175, 4017–4029. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1739-z>
- Peck, M., Pinnegar, J., 2018. Chapter 5: Climate change impacts, vulnerabilities and adaptations: North Atlantic and Atlantic Arctic marine fisheries., in: *Impacts of Climate Change on Fisheries and Aquaculture: Synthesis of Current Knowledge, Adaptation and Mitigation Options*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 627. Rome, FAO. 628 pp.
- Peleteiro, J.B., 2010. Influencia del cambio climático en la acuicultura. *IEO*. 709–718.
- Perez, J., Menendez, M., Camus, P., Mendez, F.J., Losada, I.J., 2015. Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe. *Ocean Model.* 96, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.001>
- Philippart, C.J.M., Anadón, R., Danovaro, R., Dippner, J.W., Drinkwater, K.F., Hawkins, S.J., Oguz, T., O’Sullivan, G., Reid, P.C., 2011. Impacts of climate change on European marine ecosystems: Observations, expectations and indicators. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 400, 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.02.023>
- Pinsky, M.L., Reygondeau, G., Caddell, R., Palacios-Abrantes, J., Spijkers, J., Cheung, W.W.L., 2018. Preparing ocean governance for species on the move. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.aat2360>
- Pita, P., Fernández-Márquez, D., Antelo, M., Macho, G., Villasante, S., 2019. Socioecological changes in data-poor S-fisheries: A hidden shellfisheries crisis in Galicia (NW Spain). *Mar. Policy* 101, 208–224. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.09.018>
- Pita, P., Fernández-Márquez, D., Freire, J., 2018. Spatiotemporal variation in the structure of reef fish and macroalgal assemblages in a north-east Atlantic kelp forest ecosystem: Implications for the management of temperate rocky reefs. *Mar. Freshw. Res.* 69, 525–541. <https://doi.org/10.1071/MF17193>

- Poloczanska, E.S., Burrows, M.T., Brown, C.J., García Molinos, J., Halpern, B.S., Hoegh-Guldberg, O., Kappel, C. V., Moore, P.J., Richardson, A.J., Schoeman, D.S., Sydeman, W.J., 2016. Responses of Marine Organisms to Climate Change across Oceans. *Front. Mar. Sci.* 3, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00062>
- Pörtner, H.O., Karl, D.M., Boyd, P.W., Cheung, W.W.L., Lluich-Cota, S.E., Nojiri, Y., Schmidt, D.N., Zavialov, P.O., 2014. Ocean systems, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* pp. 411–484. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0015br>
- Punzón, A., Serrano, A., Sánchez, F., Velasco, F., Preciado, I., González-Irusta, J.M., López-López, L., 2016. Response of a temperate demersal fish community to global warming. *J. Mar. Syst.* 161, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.05.001>
- Quereda-Sala, J., Chiva-Montón, E., Vázquez-Quereda, V., 2018. The increase in temperatures in the north of the Valencia region: Value and nature (1950-2016). *Investig. Geogr.* 41–53. <https://doi.org/10.14198/INGEO2018.69.03>
- Quignard, J., Raibault, A., 1993. Ichthyofauna of the Languedocian coast (Gulf of Lion). *Vie Milieu* 43, 191–195.
- Quinzán, M., Castro, J., Marín, M., Costas, G., Monserrat, S., Amores, A., Massutí, E., Hidalgo, M., 2016. Unveiling the influence of the environment on the migration pattern of the Atlantic pomfret (*Brama brama*) in North-eastern Atlantic waters. *Fish. Oceanogr.* 25, 610–623. <https://doi.org/10.1111/fog.12176>
- Ramírez Pérez, M., Menéndez García, M., Camus Braña, P., Losada Rodríguez, I., 2019. Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española. Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española. IH Cantabria.
- Raya, V., Sabatés, A., 2015. Diversity and distribution of early life stages of carangid fishes in the northwestern Mediterranean: Responses to environmental drivers. *Fish. Oceanogr.* 24, 118–134. <https://doi.org/10.1111/fog.12097>
- Richardson, A., Brown, C., Brander, K., Bruno, J., Buckley, L., Burrows, M., Duarte, C., Halpern, B., Hoegh-Guldberg, O., Holding, J., Kappel, C., Kiessling, W., Moore, P., O'Connor, M., Pandolfi, J., Parmesan, C., Schoeman, D., Schwing, F., Sydeman, W., Poloczanska, E., 2012. Climate change and marine phytoplankton. *Biol. Lett.* 8, 907–909.
- Riera, R., Becerro, M.A., Stuart-Smith, R.D., Delgado, J.D., Edgar, G.J., 2014. Out of sight, out of mind: Threats to the marine biodiversity of the Canary Islands (NE Atlantic Ocean). *Mar. Pollut. Bull.* 86, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.014>
- Rivera, A., Weidberg, N., Pardiñas, A.F., González-Gil, R., García-Flórez, L., Acuña, J.L., 2013. Role of upwelling on larval dispersal and productivity of gooseneck barnacle populations in the Cantabrian sea: Management implications. *PLoS One* 8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078482>
- Rosa, R., Marques, A., Nunes, M.L., 2012. Impact of climate change in Mediterranean aquaculture. *Rev. Aquac.* 4, 163–177. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2012.01071.x>
- Rubio, I., Ganzedo, U., Hobday, A.J., Ojea, E., 2020. Southward re-distribution of tropical tuna fisheries activity can be explained by technological and management change. *Fish. Fish.* 21, 511–521. <https://doi.org/10.1111/faf.12443>
- Ruiz-Díaz, R., Liu, X., Ojea, E., 2018. The socio-ecological vulnerability of artisanal fisheries to climate impact. Poster in *The Effects of Climate Change on the World's Oceans (ICES-PICES)*.
- Sabatés, A., Martín, P., Lloret, J., Raya, V., 2006. Sea warming and fish distribution: The case of the small pelagic fish, *Sardinella aurita*, in the Twestern Mediterranean. *Glob. Chang. Biol.* 12, 2209–2219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01246.x>
- Salat, J., Pascual, J., Flexas, M., Chin, T.M., Vazquez-Cuervo, J., 2019. Forty-five years of oceanographic and meteorological observations at a coastal station in the NW Mediterranean: a ground truth for satellite observations. *Ocean Dyn.* 69, 1067–1084. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01285-z>
- Sanchez-Jerez, P., Karakassis, I., Massa, F., Fezzardi, D., Aguilar-Manjarrez, J., Soto, D., Chapela, R., Avila, P., Macias, J.C., Tomassetti, P., Marino, G., Borg, J.A., Franičević, V., Yucel-Gier, G., Fleming, I.A., Biao, X., Nhhala, H., Hamza, H., Forcada, A., Dempster, T., 2016. Aquaculture's struggle for space: The need for coastal spatial planning and the potential benefits of Allocated Zones for Aquaculture (AZAs) to avoid conflict and promote sustainability. *Aquac. Environ. Interact.* 8, 41–54. <https://doi.org/10.3354/aei00161>
- Schroeder, K., Chiggiato, J., Bryden, H.L., Borghini, M., Ben Ismail, S., 2016. Abrupt climate shift in the Western Mediterranean Sea. *Sci. Rep.* 6, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep23009>
- Singh, G.G., Hilmi, N., Bernhardt, J.R., Cisneros Montemayor, A.M., Cashion, M., Ota, Y., Acar, S., Brown, J.M., Cottrell, R., Djoundourian, S., González-Espinosa, P.C., Lam, V., Marshall, N., Neumann, B., Pascal, N., Reygondeau, G., Rocklöv, J., Safa, A.,

- Virto, L.R., Cheung, W., 2019. Climate impacts on the ocean are making the Sustainable Development Goals a moving target travelling away from us. *People Nat.* 1, 317–330. <https://doi.org/10.1002/pan3.26>
- Slangen, A.B.A., Adloff, F., Jevrejeva, S., Leclercq, P.W., Marzeion, B., Wada, Y., Winkelmann, R., 2017. A Review of Recent Updates of Sea-Level Projections at Global and Regional Scales. *Surv. Geophys.* 38, 385–406. <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9374-2>
- Somavilla, R., González-Pola, C., Fernández-Díaz, J., 2017. The warmer the ocean surface, the shallower the mixed layer. How much of this is true? *J. Geophys. Res. Ocean.* 122, 7698–7716. <https://doi.org/10.1002/2017JC013125>
- Somot, S., Jordà, G., Harzallah, A., Darmaraki, S., 2016. Sub-chapter 1.2.3. The Mediterranean Sea in the future climate projections., in: *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*. IRD editions, Marseille. 738 pp.
- Somot, S., Sevaut, F., Déqué, M., 2006. Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model. *Clim. Dyn.* 27, 851–879. <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0167-z>
- Soto-Navarro, J., Jordà, G., Amores, A., Cabos, W., Somot, S., Sevaut, F., Macías, D., Djurdjevic, V., Sannino, G., Li, L., Sein, D., 2020. Evolution of Mediterranean Sea water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble, *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05105-4>
- Spijkers, J., Boonstra, W.J., 2017. Environmental change and social conflict: the northeast Atlantic mackerel dispute. *Reg. Environ. Chang.* 17, 1835–1851. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1150-4>
- Sydesman, W.J., Poloczanska, E., Reed, T.E., Thompson, S.A., 2015. Climate change and marine vertebrates. *Science*. 350, 772–777. <https://doi.org/10.1126/science.aac9874>
- Tuya, F., Boyra, A., Sanchez-Jerez, P., Barbera, C., Haroun, R.J., 2004. Relationships between rocky-reef fish assemblages, the sea urchin *Diadema antillarum* and macroalgae throughout the Canarian Archipelago. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 278, 157–169. <https://doi.org/10.3354/meps278157>
- Vargas Yáñez, M., García Martínez, M.C., Moya Ruiz, F., López-Jurado Marqués, J.L., Serra Tur, M., Santiago Domenech, R., Balbín Chamorro, R., 2019. The present state of marine ecosystems in the Spanish Mediterranean in a climate change context. *Instituto Español de Oceanografía, IEO*. 185 pp.
- Verlaque, M., Afonso-Carrillo, J., Gil-Rodríguez, M., Durand, C., Boudouresque, C., Le Parco, Y., 2004. Blitzkrieg in a marine invasion: *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Bryopsidales, Chlorophyta) reaches the Canary Islands (north-east Atlantic). *Biol. Invasions* 6, 269–281. <https://doi.org/10.1023/b:binv.0000034589.18347.d3>
- Villasante, S., 2018. Social adaptation to climate change in Galician (NW Spain) shellfisheries. *International Workshop “Interdisciplinary Approaches to the Study of Human and Mollusc Interactions: from Prehistory to Present”*.
- von Schuckmann, K., Le Traon, P.-Y., Smith, N., Pascual, A., Djavidnia, S., Gattuso, J.-P., Grégoire, M., Nolan, G., 2019. Copernicus Marine Service Ocean State Report. Issue 3. *J. Oper. Oceanogr.* in press. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2019.1633075>
- Walther, G., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T., Fromentin, J., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F., 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 389–395.
- Wang, D., Gouhier, T.C., Menge, B.A., Ganguly, A.R., 2015. Intensification and spatial homogenization of coastal upwelling under climate change. *Nature* 518, 390–394. <https://doi.org/10.1038/nature14235>
- Zanna, L., Khatiwala, S., Gregory, J.M., Ison, J., Heimbach, P., 2019. Global reconstruction of historical ocean heat storage and transport. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 116, 1126–1131. <https://doi.org/10.1073/pnas.1808838115>

Capítulo 6

Impactos del cambio climático en las costas

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son uno de los ámbitos más estudiados en el contexto del cambio climático, especialmente en relación con el aumento del nivel del mar y los eventos extremos (Wong et al., 2014). España es también una de las áreas cuyo estudio y planificación ha experimentado un mayor progreso.

La importancia de las zonas costeras reside en que concentran una parte importante de la población mundial (entorno al 10%) y de las infraestructuras socioeconómicas, por lo que se consideran puntos calientes en cuanto a vulnerabilidad climática, a pesar de que representan una parte pequeña de la superficie emergida de la Tierra (Revi et al., 2014). En Europa, un tercio de la población reside en una franja de 50 km de la costa (Ciscar et al., 2018). Se estima que en los últimos 40 años la población en riesgo de sufrir inundaciones costeras severas ha aumentado en un 95% (McGranahan et al., 2007). Durante el siglo XX, los factores socioeconómicos han sido la principal causa del aumento de la exposición y vulnerabilidad en las zonas costeras, aunque se espera que el cambio climático agrave esta situación en el futuro (Wong et al., 2014). Las inundaciones costeras en Europa generan unos daños económicos anuales medios de 1.250 millones EUR y más de 100.000 personas se ven afectadas (Ciscar et al., 2018).

El aumento del nivel del mar representa, junto con los eventos extremos costeros, una de las mayores amenazas del cambio climático (IPCC, 2014). Globalmente, el nivel del mar ha aumentado unos 20 cm desde finales del siglo XX (Hardy y Nuse, 2016) y desde 1993 este ascenso está ocurriendo a una velocidad mayor, de hasta 3 mm al año (Hay et al., 2015; Watson et al., 2015). Es muy probable que esta aceleración continúe en el futuro (Jackson and Jevrejeva, 2016; Wigley, 2018), incluso aunque los esfuerzos globales de mitigación consiguieran reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el aumento de temperatura global (Rogelj et al., 2016).

La situación de la costa española no es muy diferente de estas tendencias globales. Aproximadamente la mitad de los 7.900 km de costa consisten en zonas acantiladas (especialmente en el Atlántico) y un 25% son playas arenosas (Sánchez-Arcilla et al., 2016a). Ecosistemas naturales, como las marismas, coexisten con una gran variedad de actividades antrópicas, desde zonas urbanas, a instalaciones industriales, pasando por las prácticas tradicionales como la pesca y el marisqueo o el turismo. En las últimas décadas, el modelo de desarrollo urbano y la sobreexplotación de algunos recursos han puesto una enorme presión sobre las zonas costeras, causando pérdida de biodiversidad y degradación ambiental, al mismo tiempo aumentando su exposición y vulnerabilidad ante eventos climáticos (Losada et al., 2019). Un estudio que analizaba las costas de Murcia y Alicante concluyó que dos periodos de aumento importante de la exposición ante inundaciones están directamente relacionados con dos picos de desarrollo urbanístico, ocurridos entre 1978–1982 y 1997–2007 (Pérez-Morales et al., 2015). Aunque la política de gestión de inundaciones durante los últimos años ha contribuido a mejorar esta situación y la sociedad es hoy más resiliente que en el pasado, hay aspectos que siguen pendientes, como el control de los

procesos de urbanización y la adaptación de entornos edificados, de forma que las pérdidas económicas por inundaciones pueden seguir siendo importantes en el futuro (Olcina et al., 2016).

Para evaluar el impacto del cambio climático sobre las zonas costeras, se apoyó el Proyecto C3E - Cambio climático en la costa de España, que se desarrolló durante el Segundo Programa de Trabajo (2010-2014) del PNACC y cuyo informe final se publicó en 2014 (Losada et al., 2014)³⁴. Este informe es un trabajo extenso y exhaustivo que analiza el sistema costero del Estado, los factores climáticos de cambio (aumento del nivel del mar, cambios en el oleaje y las corrientes, etc.), desarrolla proyecciones para España y una metodología para la evaluación de impactos para toda la costa, incluyendo el medio natural, así como diversos sistemas socioeconómicos. Es un informe de referencia que ha sentado las bases de la Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española, aprobada en 2016.

El objetivo de este capítulo no es igualar la magnitud del esfuerzo realizado hasta el momento, sino ampliar la información existente sobre los impactos del cambio climático en la costa a partir de estudios publicados entre 2015 y 2019, incluyendo la información existente hasta el momento en la plataforma AdapteCCa (ver resumen en la Tabla 6.3).

2. FACTORES DE CAMBIO

El último informe especial del IPCC sobre océanos y criosfera publicado recientemente (IPCC, 2019) presenta unas proyecciones globales de aumento del nivel del mar ligeramente superiores a las del 5º Informe de Evaluación (Church et al., 2013). En el escenario más favorable (RCP2.6), el aumento del nivel del mar en 2100 puede alcanzar una media de 43 cm, con un rango probable de 29 cm – 59 cm. En el escenario más desfavorable, RCP8.5, el aumento medio sería muy superior, de 84 cm con un rango probable de entre 61 cm y 110 cm (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Aumento medio del nivel del mar global (NMMG) a lo largo del siglo XXI para tres escenarios de emisión. Los datos, en metros, representan la mediana de la distribución de probabilidades y entre paréntesis el rango probable. Fuente: IPCC (2019).

Periodo	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
2031-2050	0,17 (0,12-0,22)	0,18 (0,13-0,23)	0,20 (0,15-0,26)
2046-2065	0,24 (0,17-0,32)	0,26 (0,19-0,34)	0,32 (0,23-0,40)
2081-2100	0,39 (0,26-0,53)	0,49 (0,34-0,64)	0,71 (0,51-0,92)
2100	0,43 (0,29-0,59)	0,55 (0,39-0,72)	0,84 (0,61-1,10)

Aunque hasta el momento el mecanismo que ha contribuido principalmente al aumento del nivel del mar ha sido la expansión térmica, en el futuro se espera que el deshielo de las grandes capas de Groenlandia y la Antártida representen una contribución mayor.

El nivel del mar puede variar sustancialmente a escala regional, por ejemplo, puede ser hasta un 30% mayor en zonas ecuatoriales, Australia o la costa este de EE. UU., mientras en Europa es similar a la media global (Slangen et al., 2014). Además, puede haber diferencias locales importantes, como en el Delta del Ebro, donde la

³⁴ Recientemente, se ha publicado también una guía metodológica para el acceso a los datos de proyecciones climáticas regionales marinas en España, junto con un visor web y una base de datos climáticos, para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española (Ramírez et al., 2019). Todos los documentos están accesibles en la plataforma AdapteCCa.

velocidad de ascenso alcanza entre 5 mm y 8 mm al año (Ibáñez et al., 2010). Es importante subrayar que las tendencias medias de los diferentes escenarios de aumento del nivel del mar son similares hasta 2050, aproximadamente, momento a partir del cual divergen de forma importante. Este hecho podría dar lugar a infravalorar el riesgo costero, puesto que la incertidumbre y los impactos aumentan con el tiempo y serán más evidentes hacia la mitad de siglo (Sánchez-Arcilla et al., 2016a).

Las proyecciones de ascenso del nivel medio del mar en Europa varían entre 21 cm y 24 cm en 2050 en función del escenario de emisión, RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente. A final de siglo, el nivel medio del mar podría alcanzar 53 cm en el escenario de emisión intermedio (RCP4.5) y 77 cm en el más desfavorable (RCP8.5). Los mayores aumentos del nivel medio del mar se dan en el Mar del Norte y la costa Atlántica europea.

El aumento del nivel del mar dará lugar a eventos extremos costeros más frecuentes. Las últimas estimaciones globales muestran que eventos que ocurrían una vez cada 100 años, en 2100 ocurrirán anualmente en todos los escenarios de cambio climático considerados (IPCC, 2019). En Europa también se esperan aumentos en los eventos extremos. Vousdoukas et al. (2017) estimaron los cambios en los eventos que se obtienen de la combinación de aumento del nivel del mar, el efecto de las mareas y mareas de tormenta con un periodo de retorno 100 años. Un resumen de los resultados para las diferentes áreas costeras españolas se muestra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Variación absoluta y relativa de los eventos costeros extremos de periodo de retorno de 100 años, considerando dos escenarios de ascenso del nivel del mar, RCP4.5 y RCP8. Fuente: Vousdoukas et al. (2017).

Región	RCP4.5 (2050)		RCP4.5 (2100)		RCP8.5 (2050)		RCP8.5 (2100)	
	ΔT_{100} (cm)	% ΔT_{100}	ΔT_{100} (cm)	% ΔT_{100}	ΔT_{100} (cm)	% ΔT_{100}	ΔT_{100} (cm)	% ΔT_{100}
Golfo de Bizkaia	18	4.0%	53	11.6%	22	4.9%	80	17.4%
Atlántico Sur	18	4.9%	48	12.9%	18	4.9%	66	17.8%
Mediterráneo occidental	20	15.8%	51	41%	24	19.7%	75	60.7%
Europa (media)	25	8.3%	57	19.4%	27	9.2%	81	27.3%

En España, las evidencias sobre la contribución de la marea meteorológica muestran una tendencia negativa, debido a que los forzamientos atmosféricos ralentizan el aumento del nivel del mar (Losada et al., 2014). Otro estudio encontró variaciones de $\pm 5\%$ en mareas meteorológicas en el Mediterráneo (Conte and Lionello, 2013).

El oleaje varía geográfica y estacionalmente en la costa española, donde el Mediterráneo tiene un clima marítimo más suave que el Cantábrico; de la misma forma, el oleaje es más importante en invierno que en verano. En cuanto a las proyecciones, Vousdoukas et al. (2017) no encontraron variación en el oleaje para Europa, aunque en España éstas parecen indicar un oleaje más suave (una intensidad 70% menor) en el futuro respecto al periodo de referencia (Losada et al., 2014). Un estudio sobre la energía del oleaje en Menorca concluyó que la distribución espacial y la dirección de la energía del oleaje en el futuro se espera que sean similares a las actuales. Respecto a la energía del oleaje parece que podría reducirse ligeramente, aunque debido a la alta variabilidad entre modelos los resultados no son concluyentes (Sierra et al., 2017). La amplitud mareal se espera que disminuya en todos los estuarios en 2080, excepto en el levante donde se obtiene un ligero ascenso (Universidad de Granada, 2018).

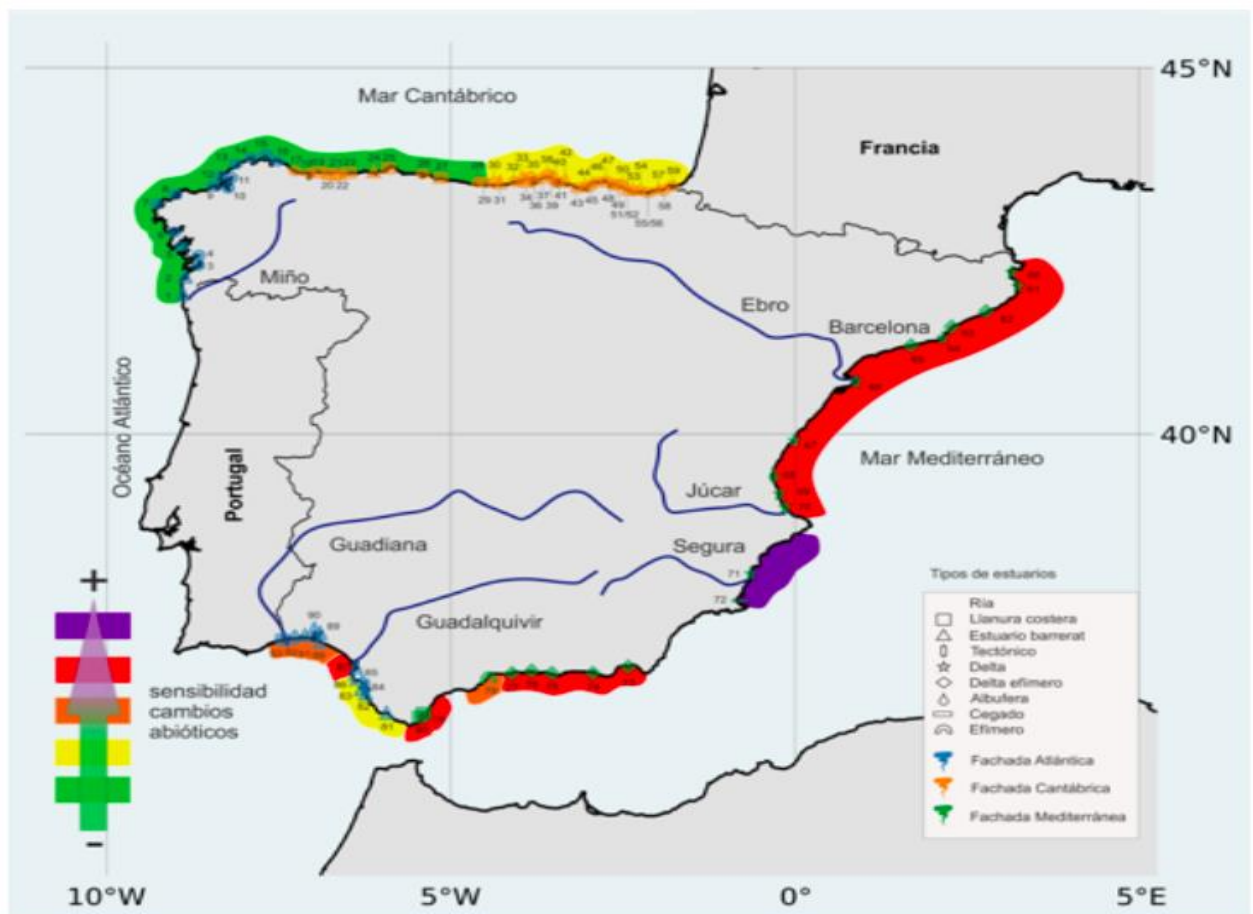


Figura 6.1. Zonas costeras más sensibles a los cambios abióticos en el horizonte hasta 2080. Fuente: Universidad de Granada (2018).

En 2080 se espera un aumento de la temperatura media del agua en toda la costa, cuya tendencia en el Cantábrico varía entre 0,029 y 0,035 °C/año, de forma similar a la costa mediterránea oriental (0,03-0,035 °C/año) y la costa atlántica gallega (0,028 °C/año). La tendencia de aumento de temperatura es menor en el Mar de Alborán (0,02-0,025 °C/año) y el Golfo de Cádiz (0,02 °C/año). También se prevé una disminución de la aportación de agua dulce, que varía entre una reducción del 14% en la costa atlántica norte de Galicia y un 49% en el Golfo de Cádiz. La salinidad aumentará en el Mediterráneo y se reducirá en el Cantábrico y costa atlántica. Las zonas costeras más sensibles a los cambios abióticos (amplitud de marea, caudal fluvial, temperatura y salinidad) son la costa de levante en la cuenca del Segura, seguida del resto de la costa mediterránea, el Golfo de Cádiz y la costa cantábrica oriental; Galicia y la costa cantábrica occidental serían las menos vulnerables, tal y como se muestra en la figura 6.1.

3. IMPACTOS

Los principales impactos sobre las zonas costeras se refieren a inundaciones temporales o permanentes, aumento de la erosión, pérdida de humedales e intrusión de agua salobre (Wong et al., 2014), además de los impactos sobre los sistemas socioeconómicos. La información disponible no está distribuida de forma homogénea, sino que predominan los estudios relacionados principalmente con los efectos de las inundaciones, y en segundo lugar aquellos relacionados con la erosión.

Riesgos de inundación y erosión

Dos de las principales amenazas del cambio climático en las zonas costeras son el riesgo de inundación y erosión (Kron, 2013). Aunque ambas son diferentes, en los estudios identificados se abordan conjuntamente, por lo que en esta sección incluimos ejemplos de ambos.

A escala regional, la costa mediterránea española presenta valores de vulnerabilidad y exposición altos o muy altos comparada con otras zonas del Mediterráneo, donde las amenazas climáticas son mayores. Resultados similares se obtienen para la costa suroeste francesa y la costa norte del Adriático, todas ellas densamente pobladas (Satta et al., 2017).

A nivel estatal, la cota de inundación podría aumentar en 2040 un 8% en las costas atlántica y cantábrica y Mar de Alborán, alrededor del 6% en Canarias y entre un 2% y un 3% en el resto de la costa Mediterránea y el Golfo de Cádiz, asumiendo que la tendencia de ascenso del nivel del mar actual continúa durante la primera mitad de siglo. En cuanto a los eventos extremos, se espera que aumente su frecuencia e intensidad en el futuro. Por ejemplo, en Bilbao la intensidad, medida como el cambio en la cota de inundación, podría aumentar de 3,85 m en 2010 a 4 m en 2040, y su frecuencia³⁵ aumentará de una vez cada 50 años (2010) a una vez cada 15 años en 2040. En Barcelona, sin embargo, no se esperan cambios en intensidad y el aumento de la frecuencia es también menor (el periodo de retorno pasa de 50 a 40 años) (Losada et al., 2014).

En cuanto a la erosión³⁶, hay diversos procesos antropogénicos, especialmente los procesos de urbanización, que están contribuyendo a la erosión de la costa, pero ésta se verá intensificada por el efecto del cambio climático. Canarias, Galicia y la costa cantábrica son las zonas donde puede haber un mayor retroceso, de hasta 3 m en 2040. En el Golfo de Cádiz y la costa mediterránea el retroceso podría ser de 2 m, entorno al estrecho de Gibraltar y de 1,5 m en el resto. Aunque los cambios en la intensidad y dirección del oleaje también pueden generar retrocesos, estos son un orden de magnitud menor que el originado por el aumento del nivel del mar. Los cambios en el transporte de sedimentos también afectan al equilibrio entre la costa y el nivel del mar. En 2040 se espera un aumento de alrededor del 20% en la erosión, más acentuada en la costa cantábrica, algunos puntos de Cataluña y el Delta del Ebro. Por el contrario, en el levante, Canarias, Baleares y la zona del Mar de Alborán y Golfo de Cádiz pueden darse procesos de acreción de entorno al 5-10%, e incluso significativamente mayor en algunas zonas de Canarias y la Costa Brava (Losada et al., 2014).

En Asturias se ha desarrollado un estudio piloto para definir, con alto nivel de detalle, un enfoque de riesgo basado en el marco metodológico propuesto por el IPCC (2014) que caracteriza el riesgo a partir de las amenazas, la exposición y la vulnerabilidad. Este enfoque responde a los requisitos establecidos en la Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española (MAPAMA, 2016) y se trata de una metodología que permite producir información sobre las amenazas del cambio climático en la costa asturiana (aumento del nivel del mar, mareas meteorológicas, oleaje), de exposición a las inundaciones costeras y de vulnerabilidad, con resultados de alta resolución y escalables. Los resultados se han estimado con una resolución de 5 m, aunque se muestran a escala de municipio. Además, el estudio incorpora una valoración de los impactos socioeconómicos en la región (Toimil et al., 2017b). Está previsto que este estudio piloto se amplíe a toda la costa española a través del Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al cambio climático en la costa (PIMA Adapta Costas).

A escala comarcal, Sayol y Marcos (2018) calculan el riesgo en el Delta del Ebro, considerando no sólo el aumento local del nivel del mar con sus diferentes componentes, sino también la subsidencia del delta, oleaje y

³⁵ Frecuencia correspondiente a una cota de inundación de 3,85 m.

³⁶ La erosión también se aborda en el apartado de playas y dunas en la sección 3.2 y la sección 3.3 sobre impactos socioeconómicos.

mareas meteorológicas. En línea con las proyecciones globales, el aumento del nivel del mar en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 siguen evoluciones similares, de 22 cm y 25 cm respectivamente, hasta mitad de siglo. A partir de 2050, el aumento medio diverge entre escenarios, y la diferencia entre ambos en el nivel del mar medio alcanza 20 cm en 2099 (47 cm en el escenario RCP4.5 y 67 cm en el RCP8.5). El ascenso del nivel del mar aumentaría el área en riesgo de inundación un 7% en 2050 y un 5% en 2099, para ambos escenarios. La subsidencia del delta tendría un efecto mayor, del 6%-7% y casi un 15% en 2050 y 2099 respectivamente. Además, las mareas meteorológicas y el oleaje podrían aumentar el riesgo de inundación un 20% en ambos escenarios³⁷.

En la región de Maresme, al norte de Barcelona, Jiménez et al. (2018) analizaron e identificaron zonas especialmente vulnerables³⁸ en relación con su entorno, al efecto de una determinada amenaza climática, en este caso las tormentas meteorológicas. Entre las diferentes áreas identificadas destaca el delta de Tordera, donde desarrollaron un estudio de detalle experimental para medir la efectividad de distintas estrategias ante la erosión.

Sistemas naturales

El cambio climático representa un gran riesgo para los ecosistemas y la biodiversidad terrestres, acuáticos y marinos, así como para los servicios de los ecosistemas que proveen al ser humano. El cambio climático se espera que genere cambios en la distribución geográfica de especies, los patrones de migración, reproducción, abundancia e interacción entre especies, aumentando las tasas de extinción, especialmente en la segunda mitad del siglo XXI (Settele et al., 2014). En cuanto a los ecosistemas costeros, las principales amenazas son el calentamiento del océano, la acidificación, la pérdida de oxígeno y el aumento del nivel del mar (IPCC, 2019).

Playas

Las playas y dunas son sistemas costeros dinámicos, sujetos a cambios estacionales que modifican su morfología de manera natural. Durante el último siglo y a escala global, las playas y dunas han sufrido una erosión neta, aunque es difícil conocer con exactitud la contribución del cambio climático debido a la coexistencia de multitud de factores naturales y antropogénicos. Aunque algunos de estos sistemas podrán migrar hacia el interior, en muchos lugares esto no será posible por la presencia de estructuras que ejercen de barrera, que pueden ser tanto naturales (playas encajonadas) como artificiales (existencia de un entorno edificado). En estos casos, las playas y dunas irán reduciendo su extensión, pudiendo llegar a desaparecer (Wong et al., 2014).

En la sección anterior se ha visto que, en ausencia de medidas de adaptación, en España también se esperan retrocesos de playa importantes, sobre todo en el cantábrico, Galicia y Canarias. En Asturias se ha desarrollado un estudio piloto de alta resolución que analiza el impacto de la erosión derivada del aumento del nivel del mar (escenario RCP8.5) en 57 playas arenosas de la región, utilizando un enfoque probabilístico. A final de siglo, obtienen retrocesos que varían entre 8.92 ± 3.05 m en El Viso y 88.15 ± 26.93 m en Navia. La mayoría de las playas presentan retrocesos por encima de 31.56 ± 11.64 m (Toimil et al., 2017a).

En la costa catalana el retroceso de la línea de costa³⁹ provocado por el aumento del nivel del mar se ha estimado para dos escenarios de cambio climático. En 2050 los resultados son similares en ambos escenarios, con retrocesos de 20 m y 22 m en el RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Sin embargo, a final de siglo el retroceso aumenta a 47 m en el RCP4.5 y 65 m, RCP8.5. En un tercer escenario, que representa un aumento del nivel del

³⁷ Una limitación del estudio es que no considera la erosión, ni el movimiento de sedimentos.

³⁸ Lo que ellos denominan “*coastal hotspots*”.

³⁹ El estudio se centra en las zonas arenosas susceptibles de erosión y que, quitando la costa rocosa y las zonas urbanizadas, representa aproximadamente un 48% de la costa catalana.

mar mayor⁴⁰, el retroceso sería de 41 y 153 m en 2050 y 2100 (Jiménez et al., 2017). Además, el estudio aborda el impacto de este retroceso en las funciones recreativas y de protección de las playas. El retroceso estimado representa un riesgo importante para el turismo y los usos recreativos. La capacidad de protección también se verá mermada por el retroceso, por lo que podrían darse daños sin cambios en las tormentas meteorológicas, salvo que se adoptaran medidas de adaptación.

El ascenso del nivel del mar y una mayor frecuencia de mareas de tormenta pueden afectar también a la función de protección frente a eventos costeros extremos que ofrecen las playas. Utilizando los escenarios del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, Sánchez-Arcilla et al. (2014) estimaron que en Cataluña podrían fallar en su función protectora entre un 19% y un 21% de las playas, en función del escenario de aumento del nivel del mar considerado (B1, más favorable, o A1FI, más negativo, respectivamente), frente a un 14% de las playas en la actualidad.

Marismas y humedales

La pérdida importante de hábitats de vegetación costera durante las últimas décadas ha generado una mayor vulnerabilidad de las costas ante procesos de erosión y de aumento del nivel del mar (Wong et al., 2014). Las marismas tienen la capacidad de adaptarse a determinadas tasas de aumentos del nivel del mar, a través de la acreción vertical que les permite elevar su altura topográfica relativa respecto al nivel del mar, sirviendo al mismo tiempo de protección de nuestras costas (Cearreta et al., 2013). Además, son importantes reservas de carbono, por lo que su pérdida provocaría un efecto de retroalimentación que podría afectar a los objetivos de mitigación. Sin embargo, una aceleración del ascenso del nivel del mar podría exceder la capacidad natural de acreción de las marismas y forzarlas a migrar, aunque esto no es siempre posible, bien por motivos geomorfológicos (humedales o playas encajadas) o por la existencia de barreras antrópicas, como infraestructuras o zonas urbanas en las inmediaciones que limitan su capacidad de adaptación (IPCC, 2019).

Globalmente, diversos estudios sugieren que las marismas podrían perder entre el 20% y el 90% de su superficie, en función del escenario de emisión considerado, debido al ascenso del nivel del mar, lo que dará lugar a una pérdida importante de biodiversidad y de los servicios que ofrecen al ser humano (Crosby et al., 2016; Spencer et al., 2016). Schuerch et al. (2018) estimaron que, teniendo en cuenta las características geomorfológicas y las posibilidades de adaptación (migración y acreción), las pérdidas de superficie de los humedales costeros podrían ser mucho menores, entre cero y 30% en 2100, asumiendo que aumenta el espacio de acomodación existente en la actualidad. Así, la resiliencia de los humedales costeros depende fundamentalmente de la disponibilidad de un espacio de acomodación, que a su vez está relacionada con la urbanización y la construcción de infraestructuras en su entorno. Estos resultados muestran que es posible frenar la pérdida de superficie de marisma, incluso en un contexto de cambio climático.

Esta tendencia global coincide con las conclusiones del informe sobre los impactos del cambio climático en la costa española que advierte que la principal pérdida se espera en aquellos humedales ubicados en entornos urbanos, industriales o cuyo entorno haya sido antropizado, como la ría de Avilés, Bilbao o Ferrol. El estudio también cuantifica las pérdidas de humedales en toda la costa española a una resolución de 5 m para diferentes escenarios de ascenso del nivel del mar y su impacto económico en término de pérdida de los servicios ecosistémicos que proveen. Así, por ejemplo, en 2040, los daños económicos por inundación permanente podrían alcanzar el 0,12% del PIB (2008) en Cantabria, la provincia más afectada de la costa cantábrica; el daño podría subir al 0,14% considerando también el impacto de los eventos extremos de periodo de retorno de 50 años. Aunque esta estimación no contempla la capacidad de adaptación de los ecosistemas, que podría atenuar

⁴⁰ Son los que se conocen como escenarios *high-end* y que se generan incorporando una contribución mayor de las grandes capas de hielo (Groenlandia y la Antártida) al aumento del nivel del mar de lo que considera el RCP8.5.

el impacto, tampoco incorpora otros efectos del cambio climático como el aumento de la temperatura del mar, las olas de calor o el cambio en el régimen de precipitaciones (Losada et al., 2014).

Estuarios

Las praderas submarinas se encuentran actualmente bajo estrés debido al cambio climático. Las olas de calor provocan mortalidad masiva en especies como la *Zostera* en el Atlántico o las praderas de *Posidonia* en el Mediterráneo (Wong et al., 2014). En las costas españolas, uno de los impactos más relevantes sobre los ecosistemas como consecuencia del cambio climático es la pérdida de praderas de *Posidonia oceánica*, ecosistema endémico y emblemático del Mediterráneo. La densidad de este ecosistema podría reducirse al 10% de la densidad actual (Losada et al., 2014).

Como se ha mencionado anteriormente los ecosistemas, además de su valor intrínseco, también ofrecen una serie de servicios al ser humano. El uso de praderas de *posidonia* como medida verde de adaptación al cambio climático en zonas portuarias ha sido testado en dos puertos de Cataluña, de forma experimental y a través de modelización numérica. Los resultados muestran un efecto de atenuación del oleaje y del rebosamiento de la lámina de agua para un aumento del nivel del mar intermedio (RCP4.5) (Joan Pau Sierra et al., 2017).

Un estudio reciente ha estimado los impactos por inundación costera permanente bajo diferentes escenarios de ascenso del nivel del mar en cuatro estuarios de la costa cantábrica: Eo y Villaviciosa en Asturias, Santoña (Cantabria) y Bidasoa (Gipuzkoa). Este último sería el más afectado por el aumento de la superficie inundada como consecuencia del aumento del nivel del mar en términos porcentuales. A final de siglo, la superficie inundada sería un tercio mayor que en la actualidad en el escenario RCP8.5 que corresponde a un aumento del nivel medio del mar de 57 cm. El estuario de Santoña es el que mayor superficie neta vería afectada, aunque porcentualmente es menor que en el caso de Bidasoa (un 12% más en 2100, RCP8.5). El estuario de Eo sería el menos afectado por el aumento del nivel del mar (un 4% más de superficie inundada en 2100, RCP8.5). El incremento de la superficie inundada de forma permanente generará, además, impactos sobre los ecosistemas de marisma (IHCantabria, 2018).

Impactos socioeconómicos

Daños económicos por inundación o erosión

En Europa, los costes de las inundaciones costeras y la erosión en 2050 podrían alcanzar entre 6.500 millones y 40.000 millones EUR al año en función del escenario de emisión y socioeconómico seleccionado, en este caso el escenario intermedio RCP4.5 y el más intensivo en emisiones (RCP8.5) combinado con el escenario de desarrollo socioeconómico SSP5. El número de personas afectadas, teniendo en cuenta los mismos escenarios, podría variar entre 460.000 millones y 740.000 millones anualmente (Ciscar et al., 2018). Hacia finales de siglo, estos costes podrían dispararse, sobre todo para los escenarios más desfavorables. Estos resultados muestran un aumento desproporcionado de los costes para el escenario de altas emisiones durante la segunda mitad de siglo, y da una indicación de la importancia de poner en marcha tanto estrategias de mitigación como de adaptación al cambio climático (COACCH, 2018). Si no hubiera inversiones adicionales en adaptación de la actualidad hasta finales de siglo, los daños asociados a inundaciones costeras podrían alcanzar entre 93.000 millones y 961.000 millones EUR y el número de personas afectadas ascendería a 1,5 millones -3,65 millones (Vousdoukas et al., 2018).

España se encuentra ya entre los países de Europa que más ha gastado en protección de la costa y adaptación al cambio climático en el periodo entre 1998 y 2015 (Semeoshenkova y Newton, 2015). Proyecciones a 2040

estiman que la población expuesta a inundación permanente en la costa cantábrica podría alcanzar un 2%-3% en Cantabria, Gipuzkoa o A Coruña. Si además se incorporan los eventos extremos, en Cantabria habría un 9% de la población expuesta, seguida de Bizkaia y A Coruña, con entorno a un 4% de la población. En cuanto al impacto económico, a finales de siglo los daños por inundación permanente en el Cantábrico podrían alcanzar 1.000 millones y 8.000 millones EUR, entre el 0,05% y el 0,6% del PIB (2008) de cada provincia. Los daños podrían llegar a duplicarse si se consideran los eventos meteorológicos extremos y las provincias más afectadas serían Bizkaia y Gipuzkoa, aunque Cantabria lo sería en términos relativos. En cuanto a los usos del suelo afectados, las infraestructuras serían las más afectadas por las inundaciones costeras, seguidas del suelo para actividades industriales. Resulta llamativo que en la costa atlántica (A Coruña y Pontevedra) entre un 15% y un 20% de la superficie de infraestructuras se encuentra en zonas de riesgo por inundación costera (Losada et al., 2014).

En Asturias se ha estimado la pérdida del valor recreativo de las playas de la región como consecuencia del retroceso inducido por el cambio climático, todo ello en un marco de riesgos probabilístico. El valor recreativo se estima a partir de la superficie de playa disponible, así como el número de horas potenciales de uso de las playas. En 2100, y bajo condiciones de cambio climático, los resultados muestran que en 2100 un evento de periodo de retorno de 50 años podría generar pérdidas de más de 670 millones de euros. Incluso, un evento de periodo de retorno de 5 años podría causar la desaparición de algunas playas, como en el municipio de Lluvia. Si no se toman medidas de adaptación, el daño acumulado podría aumentar un 220% en la segunda mitad del siglo, y las pérdidas alcanzarían el 6,5% del stock de capital asturiano (Toimil et al., 2018).

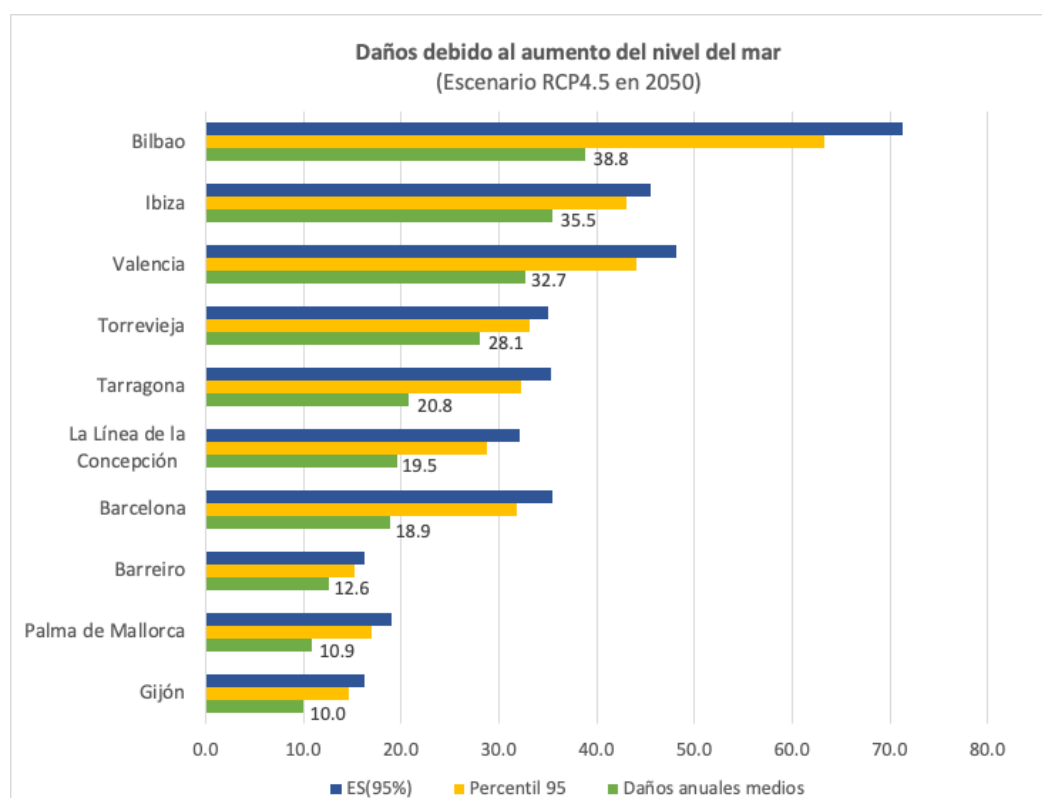


Figura 6.2. Daños económicos en las 10 ciudades españolas con un riesgo de inundación costera mayor. En verde se muestran los daños anuales medios, en amarillo los daños en el percentil 95 de la distribución de probabilidades y en azul la media del 5% de peores casos, ES (95%). Los datos se muestran en millones de euros y se corresponden al escenario de ascenso del nivel del mar RCP4.5 en 2050. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Abadie et al. (2019).

El aumento del nivel del mar puede generar daños importantes en las ciudades costeras del estado. Un estudio que analiza el impacto económico potencial del aumento del nivel del mar, sin contemplar eventos extremos, en

36 ciudades costeras muestra un daño anual medio agregado de 245 millones EUR en 2030, en el escenario intermedio RCP4.5. En 2050, los daños anuales medios podrían aumentar a 390 millones EUR y en 2100 superan los 600 millones EUR. El análisis probabilístico les ha permitido, además, analizar el riesgo de daños de baja probabilidad, considerando el percentil 95 de la distribución de probabilidades, así como la media del 5% de los peores casos (Abadie et al., 2019). La figura 6.2 muestra los resultados en 2050 para las 10 ciudades que presentan riesgos mayores.

La figura 6.2 muestra la diferencia, en ocasiones muy sustancial, entre utilizar daños medios y considerar también los eventos de baja probabilidad. Existen numerosos estudios que argumentan que a pesar de que la probabilidad de que ocurra sea muy pequeña (en el caso de los datos mostrados en la figura 6.2 en amarillo y azul, sería del 5% o inferior), la enorme magnitud de su impacto hace necesaria tenerlos en consideración. Hay estudios que sugieren que estos datos podrían utilizarse para hacer pruebas de estrés o incluso utilizarse para definir umbrales de riesgo aceptable (Galarraga et al., 2018).

Impactos sobre el turismo

Tal y como recoge la Estrategia Nacional de Cambio Climático en la Costa Española, las zonas costeras son uno de los principales valores para el turismo. Es más, el turismo costero es el más relevante en términos de flujos y de impacto económico y el Mediterráneo es uno de los principales destinos internacionales (MAPAMA, 2016).

Los impactos del cambio climático en el sector turístico podrían generar una pérdida de la cuota de mercado del 6% al 4,8% ya en 2030. También se prevé que el aumento de las temperaturas y la falta de confort térmico provoque un descenso en la llegada de turistas de hasta el 20% en 2080 a favor de otras zonas más al norte, como el propio litoral cantábrico, así como la pérdida de peso relativo del turismo de sol y playa (Olcina Cantos and Vera-Rebollo, 2016)

Como se ha visto anteriormente, la erosión de las playas puede causar la reducción de su capacidad física de carga y la pérdida, por tanto, de servicios recreativos. La pérdida de capacidad de carga de las playas catalanas ha sido estudiada bajo tres escenarios de ascenso del nivel del mar: RCP4.5, RCP8.5 y un escenario de aumento extremo del nivel del mar. En base a estos escenarios, las playas podrían ver reducida su capacidad de carga en un 33%, 36% y 55% respectivamente. En cualquier caso, los impactos en el litoral catalán no distribuyen de forma homogénea. Por ejemplo, una de las zonas que podría verse más afectada es la Costa Brava, que es un destino turístico importante pero cuyas playas son relativamente estrechas. Sin embargo, a largo plazo y en el escenario RCP8.5, los efectos serán significativos en la mayor parte del territorio de forma que en 2075 las playas solo podrían acoger un 51% de la demanda turística actual. En 2100 la capacidad de carga podría responder tan sólo al 34% de la demanda. Por último, hay que destacar que a escala comarcal es viable una redistribución de usuario de forma que no afecte de manera importante a la demanda agregada, por lo que la gestión de los flujos turísticos en el futuro será un elemento clave (López-Dóriga et al., 2019).

Puertos

La actividad portuaria es otro de los sectores socioeconómicos importantes que se ubican en la costa. Los puertos de interés general son la puerta de entrada y salida de la mayoría de la actividad comercial del país. Ya en 2014 se preveía una pérdida de operatividad y fiabilidad de las infraestructuras portuarias, especialmente en el Cantábrico, Canarias y Mallorca, como consecuencia de los impactos del cambio climático tanto sobre la propia infraestructura portuaria como sobre su funcionamiento (Losada et al., 2014).

Gomis y Álvarez-Fanjul (2016) analizaron los cambios registrados y las tendencias futuras de las principales variables climáticas que pueden condicionar la vulnerabilidad de los puertos del Estado, siendo las más importantes, la temperatura del aire y el mar, el régimen de precipitaciones, cambios en el oleaje y corrientes, la salinidad y el aumento del nivel del mar. El riesgo principal identificado en este estudio regional se refiere al

aumento de la frecuencia de rebase de diques. Aunque no se prevén cambios en el régimen de oleaje, su combinación con el ascenso del nivel del mar generará rebases más frecuentes que a su vez disminuirán la operatividad de los puertos.

Tabla 6.3. Resumen de la información existente en AdapteCCa sobre impactos en costas. Fuente: Elaboración propia.

Estudios e informes disponibles	Año de publicación	FACTORES				IMPACTOS												
		Cambios nivel del mar	Eventos extremos costeros	Oleaje	Otros (T°, salinidad ...)	Inundación	Erosión	Sistemas socioeconómicos				Sistemas naturales			Ámbito			
								Daños económicos	Turismo	Puertos	Otros	Playas y dunas	Humedales	Estuarios	Estatal	CC.AA.	Comarca/municipio	
Informe Cambio Climático en la Costa Española	2014	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Visor cartográfico	2014	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Proyección de impactos de cambio climático en la costa española	2019	✓	✓	✓	✓											✓	✓	✓
Visor de escenarios	2019	✓	✓	✓	✓											✓	✓	✓
Sensibilidad física y biótica de los estuarios peninsulares al cambio global	2018	✓	✓	✓	✓													
Elaboración de mapas de riesgo de los sistemas naturales frente al cambio climático en los estuarios cantábricos	2018	✓	✓			✓									✓			✓
Catálogo – guía de fenómenos meteorológicos adversos que afectan a la isla de Gran Canaria	2018		✓	✓													✓	
Diagnóstico de Riesgos y vulnerabilidades y adaptación al cambio climático en la isla de Gran Canaria	2018	✓			✓	✓					✓						✓	
Impactos climáticos en Europa - Informe final del proyecto PESETA III	2018	✓	✓			✓	✓	✓								✓		
Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe	2017	✓	✓					✓			✓					EU		

Por su parte, Sánchez-Arcilla et al. (2016b) revisaron los impactos potenciales del cambio climático en 47 puertos de Cataluña, concluyendo que incluso un ascenso moderado del nivel del mar (RCP4.5) afectará a la vulnerabilidad de estos puertos. Los efectos de la agitación del oleaje también han sido estudiados en Cataluña, obteniendo una ligera reducción en la mayoría de los 13 puertos estudiados, excepto en los ubicados más al norte y más al sur donde se han obtenido ligeros aumentos de la agitación. Aunque los valores medios muestran cambios muy limitados en los valores medios, hay algunos puertos en los que el aumento en la altura de las olas (hasta un 20% mayor que en la actualidad) podría dar lugar a importantes problemas de gestión (Sierra et al., 2015).

El tiempo de operatividad⁴¹ es uno de los indicadores claves en el funcionamiento de un puerto definidos por estándares nacionales o internacionales, pudiendo verse afectado por la meteorología adversa y, a medio y largo plazo, por el cambio climático. Camus et al. (2019) estimaron los cambios en la operatividad del Puerto de Candás, en Asturias. Aunque el aumento del nivel del mar es, a menudo, la única amenaza considerada, los autores incorporan también cambios en el oleaje y en las mareas meteorológicas. Los resultados muestran una reducción drástica en el tiempo de operatividad, pasando de un promedio de 198,90 h a 332,13 h en el Área 1 y, en el Área 2, de 313,62 h a 475,14 h. Este cálculo se ha realizado considerando un ascenso del nivel del mar de 26 cm en 2050 y 63 cm a final de siglo.

4. REFERENCIAS

- Abadie, L.M., Galarraga, I., Markandya, A., Sainz de Murieta, E., 2019. Risk measures and the distribution of damage curves for 600 European coastal cities. *Environ. Res. Lett.* 14, 064021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab185c>
- Galarraga, I., Sainz de Murieta, E., Markandya, A., Abadie, L.M., 2018. Addendum to ‘Understanding risks in the light of uncertainty: low-probability, high-impact coastal events in cities.’ *Environmental Research Letters* 13, 029401. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa513>
- Camus, P., Tomás, A., Díaz-Hernández, G., Rodríguez, B., Izaguirre, C., Losada, I.J., 2019. Probabilistic assessment of port operation downtimes under climate change. *Coast. Eng.* 147, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.01.007>
- Cearreta, A., García-Artola, A., Leorri, E., Irabien, M.J., Masque, P., 2013. Recent environmental evolution of regenerated salt marshes in the southern Bay of Biscay: Anthropogenic evidences in their sedimentary record. *J. Mar. Syst.* 109–110, Supplement, S203–S212. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.07.013>
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, T., Stammer, D., Unnikrishnan, A.S., 2013. Sea level change, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1137–1216.
- Ciscar, J.C., Ibarreta, D., Soria, A., Dosio, A., Toreti, A., Ceglar, A., Fumagalli, D., Dentener, F., Lecerf, R., Zucchini, A., Panarello, L., Niemeyer, S., Pérez-Domínguez, I., Fellman, T., Kitous, A., Després, J., Christodoulou, A., Demirel, H., Alfieri, L., Dottori, F., Voudoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Cammalleri, C., Barbosa, P., Micale, F., Vogt, J.V., Barredo, J.I., Caudullo, G., Mauri, A., de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., Artés Vivancos, T., San-Miguel-Ayán, J., Gosling, S.N., Zaherpour, J., De Roo, A., Bisselink, B., Bernhard, J., Bianchi, L., Rozsai, M., Szewczyk, W., Mongelli, I., Feyen, L., 2018. Climate impacts in Europe: Final report of the JRC PESETA III project (No. EUR 29427 EN). European Commission, Luxembourg.
- COACCH, 2018. The economic cost of climate change in Europe: synthesis report on state of knowledge and key research gaps (Policy brief by the COACCH Project).
- Conte, D., Lionello, P., 2013. Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios. *Glob. Planet. Change* 111, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.09.006>
- Crosby, S.C., Sax, D.F., Palmer, M.E., Booth, H.S., Deegan, L.A., Bertness, M.D., Leslie, H.M., 2016. Salt marsh persistence is threatened by predicted sea-level rise. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 181, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.08.018>
- Gomis, D., Álvarez-Fanjul, E., 2016. Vulnerabilidad de los puertos españoles ante el cambio climático. Vol. 1: Tendencias de variables físicas oceánicas y atmosféricas durante las últimas décadas y proyecciones para el siglo XXI. Puertos del Estado, IMEDEA, AEMET, CEDEX, pp. 281.
- Hardy, R.D., Nuse, B.L., 2016. Global sea-level rise: weighing country responsibility and risk. *Clim. Change* 137, 333–345. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1703-4>
- Hay, C.C., Morrow, E., Kopp, R.E., Mitrovica, J.X., 2015. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature* 517, 481–484. <https://doi.org/10.1038/nature14093>
- Ibáñez, C., Sharpe, P.J., Day, J.W., Day, J.N., Prat, N., 2010. Vertical Accretion and Relative Sea Level Rise in the Ebro Delta Wetlands (Catalonia, Spain). *Wetlands* 30, 979–988. <https://doi.org/10.1007/s13157-010-0092-0>
- IHCantabria, 2018. Subida del nivel del mar en futuros escenarios de cambio climático en estuarios cantábricos. IHCantabria, Santander.

⁴¹ El tiempo de operatividad es el tiempo disponible para realizar las operaciones que garantizan el correcto funcionamiento del puerto, e incluye el tiempo de entrada y salida de buques, así como de carga y descarga de mercancías (Losada et al., 2014).

- IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- IPCC, 2014. Summary for Policymakers, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, pp. 1–32.
- Jackson, L.P., Jevrejeva, S., 2016. A probabilistic approach to 21st century regional sea-level projections using RCP and High-end scenarios. *Glob. Planet. Change* 146, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.006>
- Jiménez, J.A., Sanuy, M., Ballesteros, C., Valdemoro, H.I., 2018. The Tordera Delta, a hotspot to storm impacts in the coast northwards of Barcelona (NW Mediterranean). *Coast. Eng., RISC-KIT: Resilience-increasing Strategies for Coasts – Toolkit* 134, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.012>
- Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I., Bosom, E., Sánchez-Arcilla, A., Nicholls, R.J., 2017. Impacts of sea-level rise-induced erosion on the Catalan coast. *Reg. Environ. Change* 17, 593–603. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1052-x>
- Kron, W., 2013. Coasts: the high-risk areas of the world. *Nat. Hazards* 66, 1363–1382. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0215-4>
- López-Dóriga, U., Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I., Nicholls, R.J., 2019. Impact of sea-level rise on the tourist-carrying capacity of Catalan beaches. *Ocean Coast. Manag.* 170, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.028>
- Losada, I.J., Izaguirre, C., Díaz, P., 2014. Cambio climático en la costa española. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Losada, I.J., Toimil, A., Muñoz, A., García-Fletcher, A.P., Díaz-Simal, P., 2019. A planning strategy for the adaptation of coastal areas to climate change: The Spanish case. *Ocean Coast. Manag.* 104983. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104983>
- MAPAMA, 2016. Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- McGranahan, G., Balk, D., Anderson, B., 2007. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environ. Urban.* 19, 17–37. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- Olcina Cantos, J., Vera-Rebollo, J.F., 2016. Cambio climático y política turística en España: diagnóstico del litoral mediterráneo español. *Cuad. Tur.* 38, 323–371.
- Olcina, J., Sauri, D., Hernández, M., Ribas, A., 2016. Flood policy in Spain: a review for the period 1983-2013. *Disaster Prev. Manag. Int. J.* 25, 41–58. <https://doi.org/10.1108/DPM-05-2015-0108>
- Pérez-Morales, A., Gil-Guirado, S., Olcina-Cantos, J., 2015. Housing bubbles and the increase of flood exposure. Failures in flood risk management on the Spanish south-eastern coast (1975-2013): Housing bubbles and increase of flood risk in Spain. *J. Flood Risk Manag.* 11, S302–S313. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12207>
- Ramírez, M. et al., 2019. Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española. Tarea 2: proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española. MITECO, Madrid.
- Revi, A., Satterthwhite, D.E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R.B.R., Pelling, M., Roberts, D.C., Solecki, W., 2014. Urban areas, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 535–612.
- Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., Meinshausen, M., 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 534, 631–639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>
- Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., Gracia, V., Devoy, R., Stanica, A., Gault, J., 2016a. Managing coastal environments under climate change: Pathways to adaptation. *Sci. Total Environ.* 572, 1336–1352. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.124>
- Sánchez-Arcilla, A., Gómez, M., Gracia, V., Gironella, X., García-León, M., 2014. Reliability analysis of beaches as defenses against storm impacts under a climate change scenario. *Coast. Eng. Proc.* 1, 12. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.management.12>
- Sánchez-Arcilla, A., Sierra, J.P., Brown, S., Casas-Prat, M., Nicholls, R.J., Lionello, P., Conte, D., 2016b. A review of potential physical impacts on harbours in the Mediterranean Sea under climate change. *Reg. Environ. Change* 16, 2471–2484. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0972-9>
- Satta, A., Puddu, M., Venturini, S., Giupponi, C., 2017. Assessment of coastal risks to climate change related impacts at the regional scale: The case of the Mediterranean region. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 24, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.06.018>
- Sayol, J.M., Marcos, M., 2018. Assessing Flood Risk Under Sea Level Rise and Extreme Sea Levels Scenarios: Application to the Ebro Delta (Spain). *J. Geophys. Res. Oceans* 123, 794–811. <https://doi.org/10.1002/2017JC013355>

- Schuerch, M., Spencer, T., Temmerman, S., Kirwan, M.L., Wolff, C., Lincke, D., McOwen, C.J., Pickering, M.D., Reef, R., Vafeidis, A.T., Hinkel, J., Nicholls, R.J., Brown, S., 2018. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature* 561, 231–234. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0476-5>
- Semeoshenkova, V., Newton, A., 2015. Overview of erosion and beach quality issues in three Southern European countries: Portugal, Spain and Italy. *Ocean Coast. Manag., Coastal systems under change* 118, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.08.013>
- Settele, J., Scholes, R., Betts, R., Bunn, S., Leadley, P., Nepstad, D., Overpeck, J.T., Taboada, M.A., 2014. Terrestrial and inland water systems, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sierra, J. P., Casas-Prat, M., Campins, E., 2017. Impact of climate change on wave energy resource: The case of Menorca (Spain). *Renew. Energy* 101, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.060>
- Sierra, J.P., Casas-Prat, M., Virgili, M., Mössö, C., Sánchez-Arcilla, A., 2015. Impacts on wave-driven harbour agitation due to climate change in Catalan ports. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 1695–1709. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1695-2015>
- Sierra, Joan Pau, García-León, M., Gracia, V., Sánchez-Arcilla, A., 2017. Green measures for Mediterranean harbours under a changing climate. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Marit. Eng.* 170, 55–66. <https://doi.org/10.1680/jmaen.2016.23>
- Slangen, A.B.A., Carson, M., Katsman, C.A., Wal, R.S.W. van de, Köhl, A., Vermeersen, L.L.A., Stammer, D., 2014. Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Clim. Change* 124, 317–332. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1080-9>
- Spencer, T., Schuerch, M., Nicholls, R.J., Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Reef, R., McFadden, L., Brown, S., 2016. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: The DIVA Wetland Change Model. *Glob. Planet. Change* 139, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.12.018>
- Toimil, A., Díaz-Simal, P., Losada, I.J., Camus, P., 2018. Estimating the risk of loss of beach recreation value under climate change. *Tour. Manag.* 68, 387–400. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.03.024>
- Toimil, A., Losada, I.J., Camus, P., Díaz-Simal, P., 2017a. Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coast. Eng.* 128, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004>
- Toimil, A., Losada, I.J., Díaz-Simal, P., Izaguirre, C., Camus, P., 2017b. Multi-sectoral, high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding. *Clim. Change* 145, 431–444. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2104-z>
- Universidad de Granada, 2018. Sensibilidad física y biótica de los estuarios peninsulares al cambio global. Instituto Interuniversitario del Sistema Tierra en Andalucía, Universidad de Granada, Granada.
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Bianchi, A., Dottori, F., Feyen, L., 2018. Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. *Nat. Clim. Change* 8, 776–780. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0260-4>
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Feyen, L., 2017. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future* 5, 304–323. <https://doi.org/10.1002/2016EF000505>
- Watson, C.S., White, N.J., Church, J.A., King, M.A., Burgette, R.J., Legresy, B., 2015. Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era. *Nat. Clim. Change* 5, 565–568. <https://doi.org/10.1038/nclimate2635>
- Wigley, T.M.L., 2018. The Paris warming targets: emissions requirements and sea level consequences. *Clim. Change* 147, 31–45. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2119-5>
- Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A., 2014. Coastal systems and low-lying areas, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 361–409.

Capítulo 7

Impactos del cambio climático en áreas urbanas

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que los impactos del cambio climático⁴² pueden ser especialmente importantes en las ciudades (Estrada et al., 2017; Revi et al., 2014), ya que es allí donde se concentra la población, servicios y bienes, infraestructuras críticas y ecosistemas con un papel relevante de regulación y protección. Además, la inercia de los procesos de urbanización en la línea de costa y en zonas inundables o proclives a sufrir impactos climáticos causará un aumento sustancial de los riesgos, unido a un incremento de los costos de prevención y recuperación de daños (Coalition for Urban Transitions, 2019; Defries et al., 2019). Si continúan los patrones actuales de urbanización y no se mejora o dota de mayor capacidad a la infraestructura existente, las áreas urbanas pueden volverse más propensas a sufrir inundaciones y contaminación de los suministros de agua en caso de que la infraestructura de alcantarillado y drenaje no pueda hacer frente a mayores volúmenes o inundaciones repentinas (Defries et al., 2019). De igual manera, el aumento de temperaturas unido al llamado efecto de isla de calor urbana, generará un aumento de los impactos climáticos, tanto en la infraestructura, como en los servicios y en la salud humana (Defries et al., 2019; Estrada et al., 2017; Revi et al., 2014). En la mayoría de los casos, los impactos del cambio climático se consideran factores potencialmente importantes en la toma de decisiones a medio y largo plazo, y se relacionan principalmente con patrones de inversión en desarrollo e infraestructura, sobre todo, con las estrategias de desarrollo socioeconómico a nivel de ciudad (Hunt and Watkiss, 2010). Por ello, el cambio climático es cada vez un criterio más importante en la planificación urbana y muchas ciudades a lo largo del mundo están desarrollando políticas específicas para prepararse ante sus impactos (Araos et al., 2016; Olazabal et al., 2019b).

Sin embargo, la estimación de los impactos del cambio climático es complicada en las ciudades por la dificultad de incorporar los procesos de planificación urbana en los modelos de cálculo (Defries et al., 2019). Junto con las proyecciones socioeconómicas, los procesos de planificación son críticos a la hora de proyectar los futuros impactos y simular el desempeño de las medidas de actuación propuestas. En general, nuestro conocimiento sobre los impactos climáticos, cómo se relacionan éstos entre sí y cómo se conectan, a su vez, con las actuaciones para adaptar los sistemas, es actualmente bastante escaso, sobre todo cuando nos referimos a territorios específicos, y especialmente cuando se habla de la escala local. Por esta razón, las propias ciudades adquieren un papel muy relevante en cuanto a la identificación y valoración (cuantitativa o cualitativa) de impactos climáticos sobre la población, la urbanización y las infraestructuras (Revi et al., 2014). En el proceso de estimación de riesgos e impactos climáticos, las ciudades son actores críticos, ya que tienen acceso a datos espaciales de población y bienes expuestos, como edificios, infraestructura y áreas protegidas (Aerts et al.,

⁴² Entendidos como el resultado (efectos sobre la vida, los medios de vida, la salud, los ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructura) de la interacción de los eventos climáticos con la vulnerabilidad y exposición de un sistema humano o natural (IPCC, 2014).

2014), así como conocimiento de los efectos generados por impactos climáticos pasados y de las vulnerabilidades reflejadas en los diferentes sectores. Este tipo de información, además, es indispensable para evaluar los costes y beneficios de las actuaciones de adaptación propuestas (Abadie et al., 2017; Estrada et al., 2017). Por otra parte, la evaluación cualitativa de los efectos potenciales positivos y negativos del cambio climático a escala local puede ser de gran utilidad para desarrollar árboles de problemas que ayuden a establecer mapas de relaciones causa-efecto que puedan servir como base para la elaboración de estrategias de actuación (Feliu et al., 2015).

En los últimos años se han desarrollado estudios a escala global sobre impactos del cambio climático en ciudades (Abadie et al., 2019; Anderson et al., 2018; Estrada et al., 2017; Hallegatte et al., 2013), pero casi todos se centran en una determinada amenaza climática. La cuantificación de los impactos del cambio climático está más extendida para amenazas como la subida del nivel del mar (Abadie et al., 2019), eventos costeros extremos (Abadie et al., 2017), o los impactos en la salud debido a las temperaturas extremas (Estrada et al., 2017). Pocos estudios hacen evaluaciones que tengan en consideración múltiples amenazas concatenadas o en el mismo periodo de tiempo (Díaz-Sarachaga and Jato-Espino, 2019; Forzieri et al., 2016). La existencia de impactos climáticos intra- e inter- conectados (impactos indirectos y directos en distintos sectores y escalas de gobernanza) constituye una de las razones más importantes para fortalecer la gobernanza de la adaptación climática (Persson, 2019), pero también es una de las razones por las cuales los modelos económicos actuales que estiman los impactos climáticos no reflejan la realidad absoluta (Defries et al., 2019). Se necesita conocer y ser capaz de evaluar los impactos climáticos actuales y en distintos horizontes temporales para establecer medidas de actuación apropiadas en cada momento y para medir el progreso de la adaptación. En este sentido, el IPCC (Revi et al., 2014) argumenta que, para medir y monitorear el éxito en adaptación a escala local, es necesario llevar una evaluación cuantitativa de los impactos del cambio climático y de su evolución.

Europa, en concreto, verá un aumento progresivo y fuerte en la amenaza climática, sobre todo en las regiones del sudoeste (Forzieri et al., 2016). Los puntos más críticos están situados particularmente a lo largo de las costas y en las llanuras aluviales en el sur y el oeste de Europa, donde a menudo se concentra la población y recursos críticos en la economía europea (Forzieri et al., 2016). Un análisis de los resultados del informe de la Red Europea de Observación de la Planificación del Territorio (ESPON et al., 2011), concluye que las ciudades españolas tienen un grado de vulnerabilidad al cambio climático alto o muy alto comparado con otras ciudades europeas (De Gregorio Hurtado et al., 2015; Olazabal et al., 2014). Con más del 75 % de la población nacional viviendo en áreas urbanas, las ciudades españolas afrontan problemas asociados al desarrollo urbano que son agravados por los impactos del cambio climático (Feliu et al., 2015). Es indispensable no solo tener en cuenta los impactos climáticos que afectan de forma directa en las ciudades (por ejemplo, afecciones directas en la salud debido al aumento de temperaturas o los impactos del oleaje extremo y las inundaciones sobre la infraestructura), sino también los indirectos, como la pérdida de ecosistemas que proporcionan servicios básicos en las ciudades. Por ejemplo, se prevé una pérdida de humedales que protegen ciudades o asentamientos industriales de eventos extremos costeros y de la subida del nivel del mar (sería el caso de la desembocadura del Nervión en Bilbao, la ría de Avilés o la ría de Ferrol) (Losada et al., 2014). Esta pérdida de servicios de los ecosistemas daría lugar a una disminución de la resiliencia de estos asentamientos ante el cambio climático. La evidencia sobre la progresiva reducción de los recursos hídricos y la sequía que sufrirá España (CEDEX / MAPAMA, 2017) y el aumento de temperaturas y olas de calor (Tobías et al., 2014), también verá sus efectos en las áreas urbanas, así como en otros sectores clave para el funcionamiento de la ciudad (turismo, transporte, industria y energía, finanzas/seguros, la construcción y los propios procesos urbanos) en los cuales ya se prevén impactos potenciales del cambio climático (De la Colina et al., 2019) que desembocarán en efectos significativos sobre el bienestar humano y sobre el desarrollo ambiental, económico y social.

A nivel nacional, la Agenda Urbana Española (AUE) 2019 (Ministerio de Fomento, 2018) menciona algunos de los impactos climáticos que ya están afectando a las ciudades españolas, y señala que la inclusión de las

previsiones climáticas y de riesgos en el planeamiento territorial y urbanístico será fundamental para afrontar estas amenazas con carácter preventivo, aumentando la resiliencia de los entornos urbanos con una mayor capacidad de anticipación y una reducción de las incertidumbres. En concreto, la AUE menciona entre los principales impactos (1) el incremento de la urbanización y la reducción de la permeabilidad del suelo, que incrementa la probabilidad de inundaciones en los sistemas urbanos, (2) los cambios en el régimen de precipitaciones y la sequía que afectan a las ciudades y pueden crear disfunciones, (3) las olas de calor y el incremento de temperaturas que tanto afecta a las zonas urbanas por sus características urbanísticas, unido al efecto isla de calor, que supone un incremento de la mortalidad y la morbilidad, y (4) el incremento de temperaturas que puede provocar transmisión de enfermedades a través de los alimentos y el agua. En la Tabla 7.1 se apuntan algunos impactos del cambio climático sobre áreas urbanas que recoge de forma algo más exhaustiva la RECC (Red Española de Ciudades por el Clima) en su guía metodológica de 2015.

Tabla 7.1 Impactos del cambio climático en áreas urbanas en España (RECC, 2015).

CAUSAS	IMPACTOS SOBRE ECOSISTEMAS URBANOS
Aumento de las temperaturas	• Incremento del efecto “isla de calor” en los núcleos urbanos • Mayores necesidades de sombra en las horas centrales del verano • Incremento de las necesidades de riego del verde urbano • Importantes afecciones sobre la salud humana. • Mayor evaporación de aguas de estanques, piscinas y embalses • Mayores periodos de inversión térmica • Más contaminación por menor ventilación con inversión térmica
Elevación del nivel del mar	• Inundaciones en áreas urbanas costeras • Pérdida de playas en zonas turísticas
Lluvia torrencial / Sequía	• Cambios en la escorrentía y en la disponibilidad de agua • Desprendimientos de taludes de carreteras urbanas
Lluvia torrencial	• Inundaciones por avenida • Sobrecarga de las infraestructuras de alcantarillado
Sequía	• Riesgos de interrupciones en el suministro eléctrico de origen hidráulico • Problemas de abastecimiento alimentario • Riesgos de erosión
Alteración y extinción de especies	• Incremento de la presencia de determinados parásitos
Incendios forestales	• Riesgos de incendios en áreas urbanas próximas a zonas forestales.

En este contexto, y ante la falta de estudios exhaustivos de referencia sobre impactos climáticos en áreas urbanas españolas, es interesante analizar en concreto para qué impactos climáticos se están preparando las ciudades españolas.

Utilizando como base la información existente en documentos relativos a la planificación local de la adaptación al cambio climático de 11 ciudades españolas (ver Tabla 7.2), se recogen en la siguiente sección un resumen de los impactos climáticos que podrían afectar a las áreas urbanas españolas. Esta documentación incluye los documentos relativos a los propios planes (o estrategias) así como todos los estudios de diagnóstico previos que se hayan usado para su elaboración. Según estudios recientes (Reckien et al., 2018; Sainz de Murieta et al.,

2020), estas ciudades son las únicas capitales de provincia españolas que disponen de planificación de la adaptación climática (a junio de 2019).

A continuación, se presentan los resultados del análisis junto con una discusión detallada del contexto en que estos han sido identificados en el marco de los planes y un análisis de aspectos relevantes a tener en cuenta.

Tabla 7.2 Documentos analizados. Fuente: Elaboración propia.

Ciudades	Título del plan	Año publicación	Vigencia del plan	Referencia
Córdoba	Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: MEDIDAS DE ACTUACIÓN Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: DIAGNÓSTICO II: VULNERABILIDADES Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: DIAGNÓSTICO I: ESCENARIOS CLIMÁTICOS y AMENAZAS	2018	2019-2030	(Ayuntamiento de Córdoba, 2018a) (Ayuntamiento de Córdoba, 2018b) (Ayuntamiento de Córdoba, 2018c)
Guadalajara	Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Guadalajara	2018	2018-2030	(Ayuntamiento de Guadalajara, 2018)
Barcelona	Plan Clima 2018-2030	2018	2018-2030	(Ayuntamiento de Barcelona, 2018)
Girona	Pla d'Acció pel Clima i l'Energia Sostenible de Girona	2017	2017-2030	(Ajuntament de Girona, 2017)
Lleida	Pla d'adaptació al Canvi Climàtic del Municipi de Lleida	2015	2015-2030	(Ajuntament de Lleida, 2015)
Madrid	Plan de calidad del aire y cambio climático. Plan A Análisis de Vulnerabilidad ante el Cambio Climático en la ciudad de Madrid	2017	2017-2030	(Ayuntamiento de Madrid, 2017) (Ayuntamiento de Madrid, 2015)
Murcia	Estrategia de Adaptación al Cambio Climático del Municipio de Murcia a 2030	2018	2018-2030	(Ayuntamiento de Murcia, 2018)
Vitoria-Gasteiz	Plan de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Etapa 1. Informe de resultados de las Fases I y II: Escenarios climáticos y análisis de la vulnerabilidad por sectores. Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Horizonte 2014-2020. Borrador	2011 No publicado	- 2014-2020	(Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2011) (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2014)
Donostia-San Sebastián	Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia-San Sebastián. Entregable 1: Diagnóstico Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia-San Sebastián. Entregable 2: Plan de Adaptación	2017	2017-2030	(Donostiako Udala / Ayuntamiento de San Sebastián, 2017a) (Donostiako Udala / Ayuntamiento de San Sebastián, 2017b)
Valencia	Plan de Adaptación al Cambio Climático de Valencia 2050	2017	2017-2050	(Factor CO2, 2017)
Zaragoza	Estrategia de cambio climático, salud y calidad del aire Zaragoza - ECAZ3.0	2019	2019-2030	(Ayuntamiento de Zaragoza, 2019)

2. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN ÁREAS URBANAS ESPAÑOLAS

Resumen de impactos climáticos esperados

Se han identificado 7 ejes de riesgo (amenazas o peligros climáticas) y 8 áreas o sectores de actuación donde los impactos del cambio climático son o serán relevantes en las próximas décadas, bien debido a su vulnerabilidad, su exposición o su relevancia para la gestión urbana (Tabla 7.3).

Tabla 7.3 Amenazas y sectores amenazados (Fuente: Elaboración propia)

Amenazas identificadas	Sectores o áreas de gestión urbana amenazados
• Aumento del nivel del mar • Oleaje extremo • Precipitación intensa • Disminución de las precipitaciones • Aumento de las temperaturas • Olas de calor • Vendavales	• Urbanización (inc. elementos construidos y procesos urbanos) • Ecosistemas (inc. paisaje) • Salud • Recursos hídricos (inc. infraestructuras) • Agricultura, ganadería y piscicultura (AGP) • Actividades económicas • Energía (inc. infraestructuras) • Sociedad (inc. bienestar, servicios y asistencia)

Asimismo, se han clasificado las ciudades de estudio en 6 climas (ver Tabla 7.4), con el objetivo de que el análisis aquí realizado sea transferible y utilizable en otros contextos climáticos propios de la península española de la manera más sencilla posible, al entender que ciudades bajo el mismo tipo de clima sufrirán impactos climáticos similares.



Autora: M.J. Sanz.

La tabla 7.5 muestra un resumen de los impactos climáticos observados y/o esperados en cada uno de los sectores, según cada amenaza identificada (ver tabla 7.3) y categorizados por clima actual de la ciudad en la que se ha realizado el estudio (tabla 7.4).

Tabla 7.4 Categorización de ciudades según su clima. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

Climas	Ciudades
Clima oceánico costero (COC)	Donostia-San Sebastián
Clima oceánico de transición (COT)	Vitoria-Gasteiz
Clima mediterráneo costero (CMC)	Barcelona, Gerona, Valencia
Clima mediterráneo continentalizado de veranos cálidos (CMCV)	Guadalajara; Lleida, Madrid
Clima mediterráneo cálido de interior (CMCI)	Córdoba
Clima mediterráneo árido y subárido (CMAS)	Murcia; Zaragoza

Se ha de entender que el siguiente listado no es exhaustivo, pero que evidencia la existencia actual o futura de estos impactos en concreto y que, por lo tanto, justifica su estudio en los casos en los que sea apropiado, bien por contexto climático, social, económico, ambiental o geográfico. Cada ciudad aborda la planificación climática según sus necesidades, recursos y capacidades y, por lo tanto, se entiende que estudios futuros podrán ampliar esta información y añadir más y mejor información cuantitativa para su evaluación.

Tabla 7.5 Revisión de impactos derivados del cambio climático identificados en áreas urbanas españolas clasificados según zona climática. (Fuente: Elaboración propia)

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos derivados del cambio climático	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Aumento del nivel del mar	Urbanización	Inundación de edificaciones costeras, redes de infraestructura urbana (principalmente de saneamiento y transporte) y otros elementos constructivos.	●		●			
		Daños a la infraestructura portuaria y aumento del riesgo de fallo de diques al aumentar su calado y los esfuerzos soportados.	●		●			
	Ecosistemas	Erosión.			●			
		Retroceso de la línea de costa.	●		●			
Oleaje extremo	Urbanización	Inundación de edificaciones costeras, redes de infraestructura urbana (principalmente de saneamiento y transporte) y otros elementos constructivos.	●		●			
		Daños a la infraestructura portuaria y aumento del riesgo de fallo de diques al aumentar su calado y los esfuerzos soportados.	●		●			
	Ecosistemas	Erosión.	●		●			
		Retroceso de la línea de costa.	●		●			
Precipitación intensa	Urbanización	Inundaciones fluviales.	●		●	●	●	
		Inundaciones pluviales por saturación y daños en los sistemas de drenaje.	●	●	●	●		●
		Inundación de las redes de infraestructura urbana y otros elementos constructivos.	●	●	●	●		
		Daños y reducción de la habitabilidad de la edificación en mal estado afectada por inundaciones.	●	●	●	●		
		Afectaciones a infraestructuras y edificios asociadas a deslizamientos y erosión por lluvias torrenciales.		●	●		●	●
		Incremento en los gastos de mantenimiento de la red eléctrica y de telecomunicaciones debido a vientos extremos, relámpagos, etc.		●				
		Pérdida de valores recreativos, paisajísticos, estéticos; y cambios en patrones de uso espacio y temporal (ejemplo, circuitos de paseos) debido a las inundaciones.	●	●				
	Ecosistemas	Aumento de deslizamientos, erosión, sedimentación y pérdida de suelos.		●	●			
		Cambios fenológicos y afectaciones a los ecosistemas terrestres y acuáticos por inundaciones y por la contaminación derivada del colapso de los sistemas de depuración de agua.		●	●			
		Pérdida de funcionalidad paisajística, recreativa y educativa de las áreas verdes.		●				
Precipitación intensa	Salud	Daños personales por desbordamientos e inundaciones: ahogamientos, hipotermia, lesiones físicas, accidentes de tráfico, depresiones posteriores al evento, etc.		●	●		●	●
		Incremento de enfermedades diarreicas por la contaminación de fuentes de agua de consumo humano.			●			
		Aumento de las desigualdades en el acceso a salud.		●				

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos derivados del cambio climático	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
		Cambios en los estilos de vida (alimentación, actividad física).		●				
	Recursos hídricos	Contaminación / mala calidad de las aguas por aportaciones de escorrentía o saturación / mal funcionamiento de las redes de saneamiento.		●	●	●	●	
		Mayores necesidades de inversión en el pretratamiento del agua.			●			
		Erosión de las márgenes fluviales, incremento de las subsidencias, colapsos en el terreno y daños a infraestructuras.		●				
	AGP	Daños en infraestructuras y equipamientos.		●				
		Cambios en la producción forestal, ganadera y agrícola.		●				
	Actividades económicas	Afectación de las instalaciones y a la salud del personal trabajador y usuarios debido a las inundaciones y condiciones climáticas extremas.		●				
		Incremento de los gastos de mantenimiento de las instalaciones debidos a vientos extremos, tormentas, etc.		●				
		Retrasos, paralización y aumento del coste de transporte debido a desbordamientos o episodios extremos.		●	●		●	
		Impacto en las industrias extractivas (dificultad en las actividades de extracción).					●	
		Aumento del coste de la cobertura de los seguros debido a las inundaciones por lluvias extremas.		●				
	Energía	Afectaciones a las instalaciones y redes de suministro eléctrico asociadas a la erosión y deslizamientos por lluvias torrenciales y a eventos meteorológicos extremos (golpes de tormenta, caída de árboles...).			●		●	
	Sociedad	Alteración del suministro de servicios y transporte debido a las inundaciones que conllevan las lluvias extremas.		●				
		Aumento del coste de la cobertura de los seguros debido a las inundaciones.		●				
		Deterioro bienestar y aumento de las desigualdades.		●				
		Pérdida de valores culturales e identitarios y cambios en las relaciones sociales.		●				
		Aumento de la demanda de ayuda a grupos vulnerables.		●				
Disminución de precipitaciones	Ecosistemas	Cambios fenológicos en fauna y flora, y cambio y/o pérdida de biodiversidad (reducción de hábitat de especies fluviales, desertificación...).		●	●	●	●	●
		Estrés hídrico de la vegetación, debilitamiento de la masa forestal e incremento de la propagación de enfermedades/plagas.			●			●
		Activación de incendios forestales.		●	●	●	●	
		Aumento de los costes de mantenimiento de la infraestructura verde.					●	
		Modificación/Desaparición de paisajes (terrestres y acuáticos).			●			
		Eutrofización de masas de agua superficiales.						●
	Salud	Afectación a la salud (aumento de la mortalidad y la morbilidad durante sequías relacionadas con temperaturas extremas), sobre todo en la ciudadanía anciana, infantil, o con enfermedades.			●		●	
		Incremento de enfermedades infecciosas traídas en el agua, debidas a la sequía y menor dilución de contaminantes.			●	●	●	
		Reproducción de ciertos vectores infecciosos como los mosquitos debido al aumento del volumen de aguas estancadas y de la temperatura.			●			●

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos derivados del cambio climático	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
		Enfermedades respiratorias y dérmicas debidas a la sequedad y polvo.				●		●
	Recursos hídricos	Disminución de las reservas de agua y aumento de las restricciones.		●	●	●	●	●
		Reducción de cauces superficiales y mayor duración del estiaje de ríos y arroyos.			●			●
		Contaminación de las reservas de agua y perturbaciones en el equilibrio ecológico de los ríos.		●	●	●	●	●
		Intrusión salina por sobreexplotación del acuífero costero.			●			
		Disminución del nivel de agua freática e impacto en la rentabilidad de las explotaciones de saneamiento de agua freática.			●			
		Aumento de la demanda de agua para el mantenimiento de las áreas verdes urbanas.			●	●	●	
	AGP	Pérdida de tierras aptas para cultivo por falta de humedad, salinización y desertificación del suelo.		●	●	●		●
		Disminución del rendimiento y empeoramiento de la calidad de los cultivos.			●			●
		Disminución de la actividad fotosintética, debilitamiento de las especies de cultivo e incremento de la propagación de enfermedades, hongos y plagas por estrés hídrico.			●			●
		Activación de incendios.		●	●			●
		Cambios en la cantidad o en el tipo de especies piscícolas capturadas.		●				
Disminución de precipitaciones	Actividades económicas	Impacto en el sector hotelero y turismo.					●	
		Impacto en el sector industrial por escasez de recursos hídricos.					●	
		Competencia y enfrentamientos entre diferentes colectivos/sectores por la obtención de recursos hidráulicos.			●	●	●	
	Energía	Ineficiencia de la producción hidroeléctrica debida a los cambios de precipitación y temperatura.					●	
		Reducción en la capacidad de producir recursos geotérmicos de baja temperatura por la disminución del caudal de los acuíferos.					●	
		Interrupción de la actividad de centrales eléctricas por la dificultad de refrigeración debida al estrés hídrico.			●			
	Sociedad	Aumento de precios del agua y los alimentos.			●			
Aumento de temperaturas	Urbanización	Disminución del confort y habitabilidad en viviendas y/o adopción de soluciones de mala adaptación.		●	●	●	●	●
		Estrés térmico y reducción del confort térmico en el espacio público.	●	●				
		Deterioro y deformaciones de elementos y materiales de construcción y mobiliario urbano.		●				●
		Afectaciones a las infraestructuras de transporte (por expansividad de arcillas en el terreno, dilatación de carriles ferroviarios, etc.).			●		●	
		Cambios en patrones de uso del espacio y pérdida de valores educativos y de ocio (recreativos, estéticos).		●				
	Ecosistemas	Modificación/pérdida de biodiversidad, desertificación.	●		●	●	●	●
		Aparición de plagas y especies invasoras e incremento de la propagación de enfermedades en la vegetación por el debilitamiento de las especies forestales.			●	●	●	
		Reducción de producción vegetal para generar biomasa.					●	
		Activación de incendios forestales.	●		●	●	●	
		Empeoramiento de la calidad del aire.	●	●				

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos derivados del cambio climático	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
	Salud	Afectación a la salud relacionada con el estrés térmico (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía anciana, infantil, o con enfermedades.		●	●	●	●	●
		Agravamiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias.		●	●	●		●
		Aumento de enfermedades zoonóticas/vectoriales transmitidas por mosquitos (dengue, fiebre amarilla, fiebre del Nilo, chicunguña y fiebre del Zika).		●	●	●		●
		Incremento de la duración y gravedad de las enfermedades alérgicas como el asma, la rinitis, las conjuntivitis alérgicas o alguna dermatitis.		●	●	●		
Aumento de temperaturas	Salud	Daños en la salud derivados del aumento de los patógenos en el agua o los alimentos (legionela, salmonelosis, etc.).			●	●		
		Aumento de la demanda asistencial y de las desigualdades en el acceso a salud.		●				
		Cambios en los estilos de vida (alimentación, actividad física).		●				
	Recursos hídricos	Eutrofización y/o deterioro de la calidad del agua por el aumento de los patógenos derivados del aumento de la temperatura del agua.			●			●
		Incremento en el coste del tratamiento del agua contaminada por el aumento de la temperatura.		●	●			●
		Incremento de la demanda de agua para consumo y para riego de zonas verdes y parques, ejerciendo presión sobre este recurso y su infraestructura.		●		●	●	●
	AGP	Afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.			●	●	●	●
		Estrés hídrico/debilitamiento de las especies de cultivo e incremento de la propagación de enfermedades, hongos y plagas.				●		●
		Aumento de los tiempos de riego en la agricultura de regadío y de los gastos asociados.			●			●
		Cambios en la producción forestal, ganadera y piscícola.		●	●			
		Activación de incendios.						●
	Actividades económicas	Impacto en el sector industrial y comercial por el aumento del consumo energético en la producción (procesos, circuitos, zonas refrigeradas...) y otros factores.	●	●		●		
		Afectación a la salud del personal trabajador debido a las condiciones climáticas extremas.		●				
		Impacto en el sector hotelero y turismo.		●		●	●	
		Afecciones por el aumento de turistas (demanda de agua, energía, infraestructuras, zonas verdes y naturales).		●				
		Reducción de la humedad del suelo, aumento de las necesidades hídricas de la agricultura y de los demás sectores, creando una potencial competencia sobre este.			●			
	Energía	Aumento del consumo energético o modificación de la dinámica de la demanda (picos y medias).		●	●	●	●	●
		Afectaciones a las redes de suministro eléctrico debidas a eventos meteorológicos extremos (inc. incendios forestales).					●	
		Reducción de la capacidad conductiva eléctrica y de la capacidad de generación de energía fotovoltaica por la reducción de la transmisividad atmosférica de la radiación.					●	

Amenazas	Sectores y áreas amenazadas	Impactos derivados del cambio climático	COC	COT	CMC	CMCV	CMCI	CMAS
Aumento de temperaturas	Sociedad	Problemas de suministro de servicios (energía, agua, etc.) en verano debido a los “picos” en la demanda, los incendios...		●				
		Aumento de la demanda de ayuda a grupos vulnerables.		●				
		Cambio en las relaciones sociales y hábitos de ocio, deporte, etc.		●				
		Acentuación de las diferencias sociales (especialmente en el medio rural por el envejecimiento).		●				
Olas de calor	Urbanización	Disminución del confort y habitabilidad en viviendas y/o adopción de soluciones de mala adaptación.	●					●
		Deformaciones de los materiales de construcción.						●
	Ecosistemas	Estrés hídrico de la vegetación y menor crecimiento y supervivencia de vegetación arbórea por la menor disponibilidad de nutrientes en el suelo.	●		●			●
		Alteraciones en la fenología y el crecimiento de organismos.		●				●
		Activación de incendios forestales.	●		●	●		
	Salud	Afectación a la salud relacionada con el estrés por calor (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía anciana, infantil, o con enfermedades.			●	●	●	●
		Agravamiento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias por la contaminación del aire.			●	●	●	●
	AGP	Estrés hídrico/debilitamiento de las especies de cultivo e incremento de la propagación de enfermedades, hongos y plagas.			●			●
		Afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.			●			●
		Activación de incendios sobre las producciones agrícolas.			●	●		●
		Aumento de los tiempos de riego y de los gastos asociados.						●
	Energía	Aumento del consumo energético.			●	●		
		Riesgo de sobrecarga de las centrales eléctricas y redes de distribución, y riesgo de interrupción del abastecimiento debido al aumento de demanda eléctrica para refrigeración.			●			
Vendavales	Urbanización	Afectaciones a las redes de suministro eléctrico y de gas.			●			
		Perturbaciones en el abastecimiento de combustibles por cierre de puertos y competencia sobre el uso de los recursos.			●			
	Sociedad	Incremento en las primas de peligrosidad de seguros y restricciones contractuales en la cobertura contratada.			●			

Impactos sobre los elementos contruidos y los procesos urbanos

Las amenazas más importantes para este sector son el aumento de las temperaturas y de los episodios de olas de calor, así como el incremento de las precipitaciones intensas. Tanto las inundaciones (de origen pluvial o fluvial) como el aumento de las temperaturas provocan una reducción del confort y la habitabilidad de los edificios y el espacio público; el deterioro y debilitamiento de mobiliario urbano y estructuras (incrementado por los potenciales deslizamientos asociados a lluvias torrenciales o por la expansividad de las arcillas en el terreno); o el incremento en los gastos de mantenimiento de las redes de infraestructura debido a eventos extremos. Tal y como mencionan la mayor parte de los documentos analizados, las inundaciones generalmente se derivan de (o son agravadas por) la saturación y daños en los sistemas de drenaje urbano, lo que dificulta una correcta evacuación de las aguas. En el caso de las ciudades costeras y portuarias, se incluyen impactos derivados de la subida del nivel del mar, así como del aumento del oleaje extremo, que suelen estimarse de manera conjunta

(como en el caso de Donostia-San Sebastián o Barcelona), ya que sus efectos son muy semejantes, aunque con diferente grado de intensidad y/o temporalidad. El capítulo 6 hace una revisión en profundidad de los impactos del cambio climático en las costas. Las consecuencias de estas amenazas incluyen la inundación y daños de edificios y de la infraestructura portuaria (Donostia-San Sebastián, Barcelona) o el riesgo de fallo de diques (Valencia). Un análisis más extenso sobre los impactos del cambio climático en zonas costeras se encuentra en el capítulo 6. Por otra parte, también es importante considerar posibles impactos ocasionados por vendavales, como afectaciones a las redes de generación y suministro eléctrico y de gas; o perturbaciones en el abastecimiento de combustibles por el cierre de puertos (Valencia). En ocasiones, los impactos sobre los procesos humanos y sociales asociados a los elementos urbanos pueden llegar a ser significativos. Por ejemplo, los impactos de las inundaciones o el calor excesivo sobre los valores recreativos y paisajísticos de la ciudad, o sobre los patrones de uso del espacio público (Vitoria-Gasteiz).

Impactos sobre los ecosistemas

La disminución de las precipitaciones, combinada con el aumento de temperaturas, podría afectar a la biodiversidad local, debilitando la masa forestal y aumentando el peligro de plagas, enfermedades o incendios, pudiendo incluso llegar a la desaparición de determinados paisajes (terrestres y acuáticos), y a un incremento en los costes de mantenimiento de las áreas verdes urbanas. Las altas temperaturas podrían afectar especies especialmente vulnerables como peces, anfibios y mariposas, y aumentar la propagación de especies plaga como cucarachas y móridos (Barcelona). El aumento de las temperaturas también podría generar un empeoramiento de la calidad del aire (Vitoria-Gasteiz, Murcia, Zaragoza). Además, todos estos efectos se verían potenciados durante las olas de calor. El aumento de las precipitaciones intensas provoca la pérdida de suelos por erosión y deslizamientos, y los ecosistemas acuáticos podrían verse afectados por la contaminación derivada del fallo en los sistemas de depuración de agua. Esto podría desembocar en una pérdida de funcionalidad paisajística, recreativa y educativa de las áreas verdes y cauces fluviales (Vitoria-Gasteiz). El aumento del nivel del mar, combinado con un fuerte oleaje, podría afectar a los ecosistemas y geomorfología costera debido a la erosión y el retroceso de la línea de costa (Valencia, Barcelona) conduciendo a una pérdida de funcionalidad ecosistémica, además de una pérdida de su función de protección de infraestructuras y población.

Impactos sobre la salud

La salud de la población urbana es una de las variables más afectadas por las amenazas climáticas. El capítulo 8 del presente documento, hace una revisión exhaustiva de este sector. Entre los impactos más significativos y más indiscutibles mencionados en la documentación analizada, se encuentran el aumento de la mortalidad y la morbilidad por estrés térmico en la ciudadanía más vulnerable (enfermedades cardiovasculares, respiratorias o alergias), agravado durante episodios de olas de calor. Se alude al efecto combinado del aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones como el causante del incremento de enfermedades vectoriales transmitidas por mosquitos, o de enfermedades infecciosas derivadas del aumento de los patógenos en el agua o los alimentos (legionela, salmonelosis, etc.) (Girona, Lleida, Valencia). Como resultado del aumento de precipitaciones intensas, se identifican daños personales por desbordamientos e inundaciones (desde ahogamientos o lesiones físicas hasta depresiones posteriores a un evento extremo), el incremento de enfermedades diarreicas por la contaminación de fuentes de agua, y el aumento de las desigualdades en el acceso a salud. Como resultado, se identifica un potencial aumento de la demanda asistencial y de servicios sanitarios, así como cambios en los estilos de vida debidos al aumento de temperatura y precipitaciones (Vitoria-Gasteiz).

Impactos sobre los recursos hídricos

La resiliencia y sostenibilidad de los recursos hídricos son uno de los ejes más importantes en la gestión urbana. El capítulo 2 del presente documento hace una revisión exhaustiva de este sector. Uno de los impactos más relevantes es la contaminación y desequilibrio ecológico de las reservas y cauces de agua, ya sea debido a la saturación de las redes de saneamiento (por lluvias intensas), a la reducción de cauces y la resultante eutrofización y aumento de patógenos (por aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones), o a la intrusión salina por sobreexplotación del acuífero costero (Valencia). Esta contaminación implicará asimismo mayores necesidades de tratamiento y, por consiguiente, de los costes asociados. Además, el efecto combinado de la disminución de precipitaciones y aumento de las temperaturas generará un incremento de la demanda de agua para consumo y para riego de zonas verdes (Córdoba, Girona, Guadalajara), ejerciendo presión sobre este recurso y su infraestructura. Las lluvias intensas podrían provocar la erosión de las márgenes fluviales y posibles colapsos en el terreno, así como potenciales daños sobre infraestructuras de contención, distribución y tratamiento (Vitoria-Gasteiz).

Impactos sobre la agricultura, ganadería y piscicultura (AGP)

El capítulo 4 hace una revisión profunda de los impactos del cambio climático en el sector agrario. Aunque su papel económico y social dentro de las áreas urbanas no es, en general, relevante, existen municipios donde particularmente adquieren una importancia notable. Se observa que el cambio climático derivará en afecciones a los ciclos de cultivo y una modificación/reducción del rendimiento y la calidad de los cultivos, así como alteraciones en la producción forestal, ganadera y piscícola (Vitoria-Gasteiz, Valencia). Estos impactos serán ocasionados principalmente por el aumento de las temperaturas y el estrés hídrico derivado de la disminución de precipitaciones, que pueden resultar en una desertificación de los suelos, debilitación de las especies de cultivo y propagación de enfermedades, plagas o incendios (Córdoba). El estrés hídrico implicaría también un aumento de los tiempos de riego y de los gastos asociados. El aumento de precipitaciones intensas podría generar daños en infraestructuras y equipamientos de producción agrícola (Vitoria-Gasteiz).

Impactos sobre otras actividades económicas

Se reconoce un potencial impacto negativo del cambio climático sobre la industria del turismo (Vitoria-Gasteiz, Córdoba, Madrid), debido sobre todo al incremento de temperaturas y olas de calor en zonas ya de por sí de clima cálido, además de por la posibilidad de que aumente la presencia de especies peligrosas como las medusas (Valencia). Por otro lado, un potencial aumento del turismo en invierno podría generar una mayor presión sobre los servicios urbanos (demanda de agua, energía, infraestructuras, etc.) (Vitoria-Gasteiz). El sector industrial podría verse igualmente afectado por el aumento del consumo energético y la escasez de recursos hídricos, ocasionando una competencia y enfrentamientos entre diferentes colectivos o sectores por la obtención de estos recursos (Córdoba, Lleida, Valencia). El aumento de la temperatura también podría afectar a la industria de manera indirecta, por el empeoramiento de la salud del personal trabajador debido a las condiciones climáticas extremas (Vitoria-Gasteiz). En cuanto a los impactos por las precipitaciones intensas, estarían relacionados con los daños que las inundaciones y los episodios extremos podrían ocasionar a las instalaciones (incrementando los gastos de su mantenimiento), al personal trabajador (aumentando del coste de la cobertura de los seguros) o a las líneas de transporte y distribución (elevando sus costes y generando retrasos y paralización de servicios).

Impactos sobre el sector energético

El capítulo 9 recoge los impactos más importantes derivados del cambio climático en el sector energético. En concreto, en las áreas urbanas, se reconoce que el aumento de las temperaturas y episodios de olas de calor

modificarán la dinámica de la demanda energética: aumentará el consumo para refrigeración y se reducirá el consumo destinado a calefacción en climas más cálidos. Episodios de temperaturas extremas pueden provocar picos de consumo que pueden ser relevantes para el dimensionamiento del sistema de generación y transporte de energía. Además, se prevén posibles afectaciones a las redes de suministro por eventos extremos y una menor capacidad conductiva y de generación de energía fotovoltaica (Córdoba); y riesgo de sobrecarga e interrupción del abastecimiento debido al aumento de demanda para refrigeración (Valencia). Por otro lado, la disminución de las precipitaciones podría conllevar la interrupción de la actividad de centrales eléctricas por la dificultad de refrigeración (Valencia); ineficiencia en la producción hidroeléctrica, y una menor capacidad de producir recursos geotérmicos de baja temperatura por la disminución del caudal de los acuíferos (Córdoba). Los impactos derivados de las precipitaciones intensas sobre las instalaciones energéticas y redes de suministro eléctrico están en general asociados a las inundaciones, golpes de tormenta, erosión, deslizamientos o caída de árboles (Córdoba, Valencia).

Impactos sobre la sociedad

Se consideran como parte de los impactos climáticos sobre la sociedad todos aquellos que pueden llevar a una alteración del bienestar, como por ejemplo los cortes del suministro de servicios debido a inundaciones, “picos” en la demanda o incendios; o el deterioro bienestar y aumento de las desigualdades debido al incremento de los problemas de salud o el envejecimiento de las áreas rurales (Vitoria-Gasteiz). Esto puede resultar en un aumento de la demanda de ayuda a grupos vulnerables y una posible pérdida de valores culturales e identitarios por los cambios en las relaciones sociales y los patrones de uso del espacio. La disminución de precipitaciones y la escasez de agua pueden dar lugar a un aumento de los precios del agua y los alimentos (Barcelona, Valencia). Además, los eventos extremos podrían conllevar un aumento del coste de la cobertura de los seguros debido a impactos ocasionados por inundaciones (Vitoria-Gasteiz), vendavales (Valencia), entre otros.

Potenciales impactos positivos del cambio climático

Aunque los impactos generalmente son identificados por las consecuencias negativas sobre la gestión urbana, los ecosistemas y recursos, la planificación y las infraestructuras, las actividades económicas o la población, en muchos casos también se reconocen impactos a los que se les atribuyen efectos tanto positivos como negativos. Por ejemplo, el aumento del turismo puede dar lugar a un aumento de actividad económica, pero también a un aumento en la presión en los recursos debido a la demanda de servicios urbanos (Vitoria-Gasteiz). Por otro lado, diferentes especies pueden darse peor o mejor debido a los cambios climáticos. Por ejemplo, mientras algunas especies hortícolas pueden verse amenazadas por el estrés térmico, otras especies (como los cereales de invierno) pueden experimentar un incremento de la productividad por estimulación biológica (Lleida). Pueden darse además cambios en la producción forestal, ganadera y agrícola, así como en el tipo de especies piscícolas capturadas (Vitoria-Gasteiz), lo cual no necesariamente implica que esas modificaciones tengan efectos negativos, también podrían ser positivos. Otro caso previsible es que, con el incremento generalizado de las temperaturas, se dé una reducción en la demanda energética para calefacción, aunque al mismo tiempo pueda aumentar la demanda de refrigeración. Por último, se observa que las condiciones climáticas extremas proyectadas y su efecto negativo sobre la producción agrícola, sobre todo en épocas estivales, podrían implicar un movimiento migratorio hacia la zona urbana del término municipal (Córdoba). Los resultados de estos flujos migratorios dependerán del contexto urbano específico (despoblación rural o urbana).

3. ASPECTOS IMPORTANTES A CONSIDERAR

No solo es importante identificar los impactos del cambio climático en áreas urbanas, sino también determinar su severidad, magnitud y proyección a corto, medio y largo plazo. Una valoración de la magnitud de los impactos

climáticos a nivel urbano realizada de esta manera sentaría las bases para una priorización de las medidas de actuación según su urgencia, evolución temporal e incertidumbre. Son pocos casos los que presentan una evaluación cuantificada de (algunos) impactos considerados (Zaragoza, Barcelona), siendo en general evaluaciones cualitativas. Aunque existe una carencia general en la evaluación de los impactos futuros en función de los cambios en vulnerabilidad o exposición, en casi todos los casos se desarrollan o proponen una serie de proyecciones climáticas futuras de referencia.

Cuando no existen proyecciones a futuro sobre los impactos del cambio climático, es necesario valorar la posibilidad de que, a corto plazo, el escenario sea bastante más preocupante. En algunos casos, incluso, puede darse la situación de que no se haya evidenciado en la actualidad una situación de empeoramiento respecto a un indicador en particular. Así, por ejemplo, el diagnóstico realizado para Zaragoza indica que el impacto debido al calor sobre la mortalidad ha disminuido en las últimas décadas. Este fenómeno aparentemente positivo no es exclusivo de esta ciudad, sino que se ha observado a nivel de toda España y en muchas otras ciudades del mundo (Díaz et al., 2018). Esto se debe en general a una mejora de los planes de prevención en las últimas décadas, al aumento del aire acondicionado - clásico ejemplo de *maladaptación* (Barnett and O'Neill, 2010; Juhola et al., 2016) debido al aumento del consumo de energía y emisión de calor de las instalaciones actuales que lo acompaña (Davis and Gertler, 2015) -, a la mejora de los servicios sanitarios e infraestructuras y a un potencial cambio de hábitos más adaptados al calor (Ayuntamiento de Zaragoza, 2019).

La existencia de varios condicionantes climáticos adversos al mismo tiempo es considerada en todos los casos como un factor intensificador de los impactos del cambio climático (Forzieri et al., 2016). Así, por ejemplo, una ola de calor en un periodo en el que hay un paulatino aumento de las temperaturas mínimas y máximas puede dar lugar a unos impactos mucho mayores de los esperados. El aumento del nivel del mar y el oleaje deben estudiarse de forma conjunta para tener una idea más certera de los impactos potenciales, ya que sus efectos son similares y se potencian entre sí (Donostia-San Sebastián), aunque su temporalidad es diferente, dado que en un caso ocurren de manera gradual y en el otro de manera repentina y mediante diferentes mecanismos, lo que incidirá significativamente en el tipo de medidas necesarias para hacerles frente. Los usos del suelo de las ciudades, así como el propio diseño urbano (densidad, morfología, orientación, pavimentación, etc.) son de gran importancia en la estimación de las consecuencias del cambio climático, puesto que son uno de los factores intensificadores externos de impacto más importantes en las áreas urbanas. Por una parte, los impactos derivados de las inundaciones son agravados por el alto grado de impermeabilización de los suelos en las ciudades, entre otros factores (Barcelona). Por otro lado, estudios sugieren que la isla de calor urbana aumenta durante condiciones de temperatura más elevadas y especialmente durante los episodios de ola de calor, viéndose además agravada la situación por la falta de humedad superficial en las áreas urbanas y a la baja velocidad del viento asociada con las olas de calor (Li and Bou-Zeid, 2013). En la mayoría de los casos analizados (Vitoria-Gasteiz, Madrid), se presenta la isla de calor como un factor que reducirá el confort térmico en las ciudades y que afectará a la salud humana (derivados del empeoramiento del confort térmico, calidad del aire, calidad del agua y de los alimentos, estado de las infraestructuras etc.), el consumo energético y el consumo de agua a nivel público y privado.

La priorización de las medidas de actuación ha dependido, en general, del nivel de riesgo climático al que están expuestos los sectores en los que se pretende actuar, de la oportunidad que se presente (por ejemplo, al planificar una nueva infraestructura o un nuevo desarrollo urbano) y, por otra parte, de los impactos climáticos indirectos en diferentes sectores y de los vínculos (co-beneficios o dependencias) entre opciones de adaptación (Dawson, 2015; Hunt and Watkiss, 2010). En la práctica, estas conexiones se han intentado establecer considerando el nivel de dependencia funcional o económica que supone un determinado sector para los demás (Murcia, Valencia) o evaluando mapas de impacto (Valencia) o cadenas de impacto (Madrid, Donostia-San Sebastián). Habitualmente, esto conllevaría la identificación de factores intensificadores del impacto, impactos principales y secundarios (o intermedios) (Mendizabal et al., 2018), y puede ser útil como base para los análisis

de vulnerabilidad y riesgo, al permitir conocer en mayor profundidad los impactos en cascada que puedan acontecer a raíz de las conexiones entre sectores y procesos urbanos.

La incertidumbre ante el riesgo climático se ha considerado esencial a la hora de evaluar los impactos del cambio climático, incluyendo en ciudades, y se expresa normalmente como probabilidad asociada a diferentes escenarios de impactos (Feliu et al., 2015). Por ejemplo, Abadie et al. (2019) evalúan el riesgo del aumento del nivel del mar con su incertidumbre asociada en 600 ciudades europeas, entre ellas 36 ciudades españolas, teniendo en cuenta la probabilidad de daños económicos (enfaticando aquellos con baja probabilidad, pero de mayor intensidad) en una línea temporal desde la actualidad hasta 2100. El estudio revela que, de forma general y con baja probabilidad, daños muy significativos pueden ocurrir y que es necesario tener en cuenta las estimaciones de incertidumbre en la toma de decisiones. Dentro de los documentos analizados, algunos subrayan la incertidumbre debido a la falta de información sobre los impactos en determinados sectores (Vitoria-Gasteiz); otros lidian con la incertidumbre mediante la definición de rangos de probabilidad de ocurrencia de determinados impactos (Córdoba); y otros indican que se aplicó el “principio de precaución” (situarse en la peor situación posible) aplicando coeficientes de seguridad (Donostia-San Sebastián, Madrid o Vitoria-Gasteiz).

Dado que el medio urbano concentra una proporción importante de la población, es importante tener en cuenta que el cambio climático exacerbará muchos de los problemas actuales en las ciudades, ya que determinados grupos sociales se verán especialmente afectados debido a su menor capacidad de preparación, afrontamiento y recuperación ante los impactos. Esto incrementará las desigualdades actuales originadas por la pobreza, acceso a recursos y servicios y la calidad ambiental que afectan a grupos marginales y minorías normalmente concentradas en el espacio (Reckien et al., 2017; Shi et al., 2016). Ciudades como Barcelona, Madrid y Zaragoza analizan los impactos derivados del cambio climático sobre grupos vulnerables, pero aún es un área en la que es necesaria una mayor reflexión y trabajo a nivel práctico, y que será necesario integrar con otros programas existentes en las ciudades, como las Agenda Locales 21.

4. REFERENCIAS

- Abadie, L.M., Galarraga, I., Markandya, A., Murieta, E.S. de, 2019. Risk measures and the distribution of damage curves for 600 European coastal cities. *Environ. Res. Lett.* 14, 064021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab185c>
- Abadie, L.M., Galarraga, I., Murieta, E.S. de, 2017. Understanding risks in the light of uncertainty: low-probability, high-impact coastal events in cities. *Environ. Res. Lett.* 12, 014017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5254>
- Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J.W., Emanuel, K., Lin, N., Moel, H. de, Michel-Kerjan, E.O., 2014. Evaluating Flood Resilience Strategies for Coastal Megacities. *Science* 344, 473–475. <https://doi.org/10.1126/science.1248222>
- Ajuntament de Girona, 2017. Pla d'Acció pel Clima i l'Energia Sostenible de Girona.
- Ajuntament de Lleida, 2015. Pla d'adaptació al Canvi Climàtic del Municipi de Lleida.
- Anderson, G.B., Oleson, K.W., Jones, B., Peng, R.D., 2018. Projected trends in high-mortality heatwaves under different scenarios of climate, population, and adaptation in 82 US communities. *Climatic Change* 146, 455–470. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1779-x>
- Araos, M., Berrang-Ford, L., Ford, J.D., Austin, S.E., Biesbroek, R., Lesnikowski, A., 2016. Climate change adaptation planning in large cities: A systematic global assessment. *Environmental Science & Policy* 66, 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.009>
- Ayuntamiento de Barcelona, 2018. Plan Clima 2018-2030.
- Ayuntamiento de Córdoba, 2018a. Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: MEDIDAS DE ACTUACIÓN.
- Ayuntamiento de Córdoba, 2018b. Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: DIAGNÓSTICO II: VULNERABILIDADES.
- Ayuntamiento de Córdoba, 2018c. Plan Estratégico Municipal de Adaptación al Cambio Climático de Córdoba: DIAGNÓSTICO I: ESCENARIOS CLIMÁTICOS y AMENAZAS.
- Ayuntamiento de Guadalajara, 2018. Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Guadalajara.
- Ayuntamiento de Madrid, 2017. Plan de calidad del aire y cambio climático. Plan A.

- Ayuntamiento de Madrid, 2015. Análisis de Vulnerabilidad ante el Cambio Climático en la ciudad de Madrid.
- Ayuntamiento de Murcia, 2018. Estrategia de Adaptación al Cambio Climático del Municipio de Murcia a 2030.
- Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2014. Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Horizonte 2014-2020. Borrador.
- Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2011. Plan de Adaptación al Cambio Climático de Vitoria-Gasteiz. Etapa 1. Informe de resultados de las Fases I y II: Escenarios climáticos y análisis de la vulnerabilidad por sectores.
- Ayuntamiento de Zaragoza, 2019. Estrategia de Cambio Climático, Calidad del Aire y Salud de Zaragoza – ECAZ 3.0.
- Barnett, J., O'Neill, S., 2010. Maladaptation. *Global Environmental Change* 20, 211–213.
- CEDEX / MAPAMA, 2017. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. Oficina de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Gobierno de España., Madrid.
- Chambwera, M., Heal, G., Dubeux, C., Hallegatte, S., Leclerc, L., Markandya, A., McCarl, B.A., Mechler, R., Neumann, J.E., 2014. Economics of adaptation, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 945–977.
- Coalition for Urban Transitions, 2019. Climate Emergency, Urban Opportunity.
- Davis, L.W., Gertler, P.J., 2015. Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. *PNAS* 112, 5962–5967. <https://doi.org/10.1073/pnas.1423558112>
- De Gregorio Hurtado, S., Olazabal, M., Salvia, M., Pietrapertosa, F., Olazabal, E., Geneletti, D., D'Alonzo, V., Di Leo, S., Reckien, D., 2015. Understanding How and Why Cities Engage with Climate Policy: An Analysis of Local Climate Action in Spain and Italy. *TEMA Journal of Land Use, Mobility and Environment* 8, 23–46. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/3649>
- De la Colina, J., Moreno, J., Ruiz, P., Suarez, R., 2019. Informe diagnóstico de riesgos y oportunidades de la adaptación al cambio climático en las ciudades. Forética.
- Defries, R., Edenhofer, O., Halliday, A., Heal, G., Lenton, T., Puma, M., Rising, J., Rockström, J., Ruane, A.C., Schellnhuber, H.J., Satinfot, D., Stern, N., Tedesco, M., Ward, B., 2019. The missing economic risks in assessments of climate change impacts (Policy Brief). Grantham Research Institute for Climate Change and the Environment. London School of Economics, London.
- Díaz, J., Ortiz, C., Falcón, I., Salvador, C., Linares, C., 2018. Short-term effect of tropospheric ozone on daily mortality in Spain. *Atmospheric Environment* 187, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.059>
- Díaz-Sarachaga, J.M., Jato-Espino, D., 2019. Analysis of vulnerability assessment frameworks and methodologies in urban areas. *Nat Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03805-y>
- Donostiako Udala / Ayuntamiento de San Sebastián, 2017a. Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia/San Sebastián. Entregable 1: Diagnóstico.
- Donostiako Udala / Ayuntamiento de San Sebastián, 2017b. Plan de Adaptación al cambio climático de Donostia/San Sebastián. Entregable 2: Plan de Adaptación.
- ESPON, IRPUD, TU Dortmund University, 2011. ESPON Climate: Climate Change and Territorial Effects on Regions and Local Economies. Draft Final Report. ESPON 2013 Programme, Luxembourg.
- Estrada, F., Botzen, W.J.W., Tol, R.S.J., 2017. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *Nature Climate Change* 7, 403–406. <https://doi.org/10.1038/nclimate3301>
- Factor CO2, 2017. Plan de Adaptación al Cambio Climático de Valencia 2050.
- Feliu, E., Garcia, G., Gutierrez, L., Abajo, B., Mendizabal, M., Tapia, C., Alonso, A., 2015. Guía para la elaboración de Planes Locales de Adaptación al Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España, Madrid, España.
- Galarraga, I., Murieta, E.S. de, Markandya, A., Abadie, L.M., 2018. Addendum to 'Understanding risks in the light of uncertainty: low-probability, high-impact coastal events in cities.' *Environ. Res. Lett.* 13, 029401. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa513>
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R.J., Corfee-Morlot, J., 2013. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Clim. Change* 3, 802–806. <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>
- Hunt, A., Watkiss, P., 2010. Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic Change* 104, 13–49. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9975-6>
- IPCC, 2014. Annex II: Glossary [Agard, J., E.L.F. Schipper, J. Birkmann, M. Campos, C. Dubeux, Y. Nojiri, L. Olsson, B. Osman-Elasha, M. Pelling, M.J. Prather, M.G. Rivera-Ferre, O.C. Ruppel, A. Sallenger, K.R. Smith, A.L. St Clair, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, and T.E. Bilir (eds.)], in: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L.,

- Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1757–1776.
- Juhola, S., Glaas, E., Linnér, B.-O., Neset, T.-S., 2016. Redefining maladaptation. *Environmental Science & Policy* 55, Part 1, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.014>
- Li, D., Bou-Zeid, E., 2013. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 52, 2051–2064.
- Losada, I.J., Izaguirre, C., Diaz, P., 2014. Cambio climático en la costa española. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España.
- Mendizabal, M., Zorita, S., Martinez, J.A., Feliu, E., Connelly, A., Carter, J., Gonzalez Vara, M., Ruiz, S., Landajo, J.A., Ellis, M., 2018. D3.3. Policy guideline. RESIN project.
- Ministerio de Fomento, 2018. Agenda urbana española 2019. Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, Agenda Urbana; (ed) Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.
- Olazabal, M., Chiabai, A., Foudi, S., Neumann, M.B., 2018. Emergence of new knowledge for climate change adaptation. *Environmental Science & Policy* 83, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.017>
- Olazabal, M., De Gregorio, S., Olazabal, E., Pietrapertosa, F., Salvia, M., Geneletti, D., D’Alonzo, V., Feliu, E., Leo, S. di, Reckien, D., 2014. How are Italian and Spanish Cities tackling climate change? A local comparative study. Basque Centre for Climate Change (BC3), Bilbao, Spain.
- Olazabal, M., Galarraga, I., Ford, J., Sainz de Murieta, E., Lesnikowski, A., 2019a. Are local climate adaptation policies credible? A conceptual and operational assessment framework. *International Journal of Urban Sustainable Development* 11, 277–296. <https://doi.org/10.1080/19463138.2019.1583234>
- Olazabal, M., Gopegui, M.R. de, Tompkins, E.L., Venner, K., Smith, R., 2019b. A cross-scale worldwide analysis of coastal adaptation planning. *Environ. Res. Lett.* 14, 124056. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5532>
- Persson, Å., 2019. Global adaptation governance: An emerging but contested domain. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 0, e618. <https://doi.org/10.1002/wcc.618>
- RECC, 2015. Medidas para la mitigación y la adaptación al cambio climático en el planeamiento urbano. Guía metodológica. Red Española de Ciudades por el Clima (RECC), sección de Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP) y la Oficina Española de Cambio Climático (Gobierno de España), Madrid, España.
- Reckien, D., Creutzig, F., Fernandez, B., Lwasa, S., Tovar-Restrepo, M., Mcevoy, D., Satterthwaite, D., 2017. Climate change, equity and the Sustainable Development Goals: an urban perspective. *Environment and Urbanization* 29, 159–182. <https://doi.org/10.1177/0956247816677778>
- Reckien, D., Salvia, M., Heidrich, O., Church, J.M., Pietrapertosa, F., De Gregorio-Hurtado, S., D’Alonzo, V., Foley, A., Simoes, S.G., Krkoška Lorencová, E., Orru, H., Orru, K., Wejs, A., Flacke, J., Olazabal, M., Geneletti, D., Feliu, E., Vasilie, S., Nador, C., Krook-Riekkola, A., Matosović, M., Fokaides, P.A., Ioannou, B.I., Flamos, A., Spyridaki, N.-A., Balzan, M.V., Fülöp, O., Paspaldzhiev, I., Grafakos, S., Dawson, R., 2018. How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *Journal of Cleaner Production* 191, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.220>
- Revi, A., Satterthwaite, D.E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R.B.R., Pelling, M., Roberts, D.C., Solecki, W., 2014. Urban areas, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535–612.
- Sainz de Murieta, E., Olazabal, M., Sanz, E., 2020. ¿Están las ciudades españolas adaptándose al cambio climático? *Papeles de Economía Española* 163.
- Shi, L., Chu, E., Anguelovski, I., Aylett, A., Debats, J., Goh, K., Schenk, T., Seto, K.C., Dodman, D., Roberts, D., Roberts, J.T., VanDeveer, S.D., 2016. Roadmap towards justice in urban climate adaptation research. *Nature Climate Change* 6, 131–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2841>
- Tobías, A., Armstrong, B., Gasparrini, A., Diaz, J., 2014. Effects of high summer temperatures on mortality in 50 Spanish cities. *Environmental Health* 13, 48. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-48>
- La información contenida en el capítulo 7 y parte del capítulo 11 se ha publicado en Olazabal, M. y Ruiz de Gopegui, M. 2020. ¿Para qué impactos climáticos se preparan las ciudades españolas? Adaptación al cambio climático. Aportaciones desde la economía, número monográfico de Ekonomiaz, Revista Vasca de Economía, 97: 1-20, pp. 213-239.*

Capítulo 8

Impactos del cambio climático relacionados con la salud

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático influye sobre la salud humana de forma directa, debido a cambios en los patrones meteorológicos de temperatura y precipitaciones, incluyendo los relativos a los eventos extremos como olas de calor, inundaciones y precipitaciones extremas, que afectan directamente a la mortalidad y morbilidad. Por su parte, los impactos indirectos se deben a interacciones entre el clima (temperatura, precipitaciones y eventos extremos), el medioambiente, la producción de alimentos, el uso del agua y el saneamiento, y por sinergias con otros riesgos. Los impactos indirectos incluyen cambios producidos en la calidad y cantidad de agua y alimentos; cambios en la distribución geográfica y temporal de vectores transmisores de enfermedades; la salud mental; efectos sinérgicos, p. ej. temperatura y contaminación del aire; e interacciones con nuevos riesgos emergentes que se verán empeorados por el cambio climático, como la resistencia a antibióticos y nuevos contaminantes emergentes acuáticos.

Además de tener impactos directos sobre la salud, los eventos climatológicos extremos como inundaciones, tormentas, riadas, sequías, etc., pueden generar muy diversos riesgos, como la contaminación del agua para consumo humano o la alteración de sistemas agrícolas y ganaderos por efecto de transmisión de patógenos y vectores. Los cambios en la temperatura y condiciones climáticas favorecen cambios en la distribución geográfica de vectores y su adaptación a diferentes hábitats, con riesgo de crear las condiciones necesarias para la transmisión de enfermedades por vectores de origen subtropical a regiones templadas.

Otros posibles impactos pueden estar relacionados con la frecuencia e intensidad de los incendios forestales como consecuencia de sequías y altas temperaturas, con liberación de partículas en suspensión y otros contaminantes atmosféricos. El crecimiento de plantas, favorecido por el CO₂ junto con el incremento de temperatura, puede producir un aumento en la producción polínica y en la cantidad de alérgenos de los granos de polen, extendiendo además la duración de las estaciones polínicas. Otros impactos están relacionados con un aumento de intensidad de la radiación ultravioleta favorecida por situaciones anticiclónicas. Finalmente, los contaminantes químicos en la atmósfera pueden verse afectados por el cambio climático, como por ejemplo el ozono troposférico, cuyos niveles se ven aumentados por las altas temperaturas.

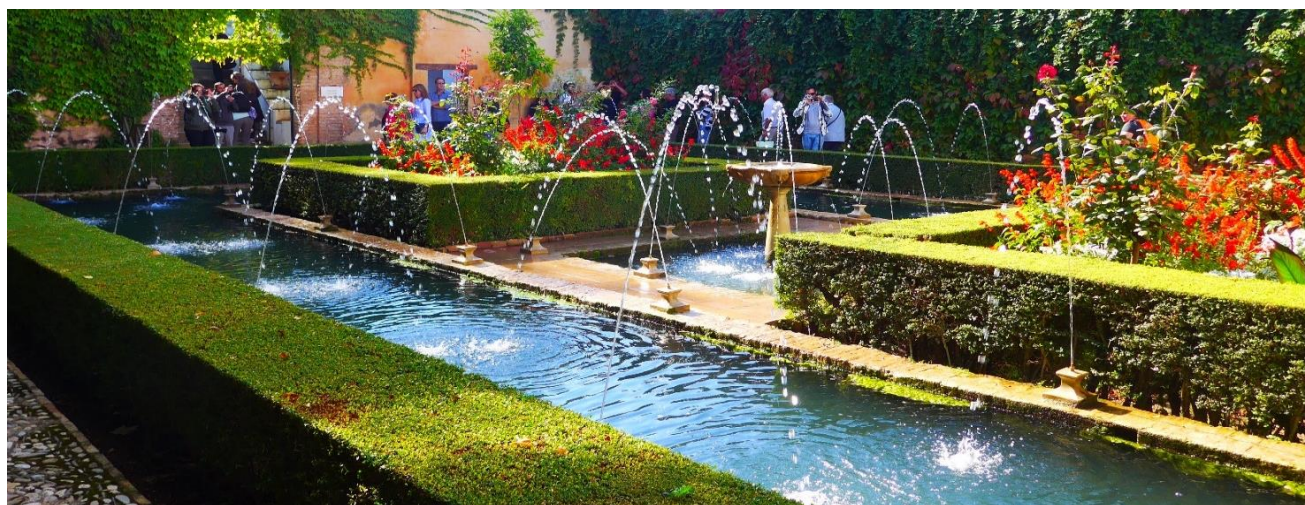
Este capítulo está estructurado de acuerdo a las diferentes tipologías de impactos del cambio climático en la salud. En la primera sección se abarcan los impactos relacionados con el aumento en la frecuencia de temperaturas extremas (olas de calor), sequías y precipitaciones extremas (lluvias torrenciales e inundaciones), temporales de viento (ciclogénesis explosivas) y otros fenómenos no habituales, incluyendo efectos directos e indirectos sobre la salud humana. Posteriormente, se describen las enfermedades transmitidas por agua (p. ej. diarrea) y alimentos (p. ej. salmonela), por roedores y otros vectores (p. ej. dengue), enfermedades relacionadas con el polen (alergias y problemas respiratorios) y las radiaciones ultravioletas. Finalmente, se propone una discusión sobre el problema de los riesgos emergentes que interactúan con los riesgos derivados del cambio climático, resultando en el agravamiento del impacto final.

2. IMPACTOS EN LA SALUD HUMANA ASOCIADOS A EVENTOS EXTREMOS

Para esta sección se ha realizado una revisión de la literatura de los impactos sobre la salud humana debidos al aumento de la frecuencia de eventos meteorológicos extremos en España. Siguiendo la definición de Salomon et al. (2007), se conoce como evento extremo un evento que es raro en un determinado lugar y estación (sale del percentil 10 o 90). Las siguientes secciones discuten los impactos en la salud de cada evento extremo considerado: olas de calor, precipitaciones extremas (inundaciones y lluvias torrenciales), temporales de viento (ciclones), sequías y otros fenómenos no habituales.

Impactos en la salud producidos por cambios de temperatura extrema

Por lo general, una ola de calor es un periodo de tiempo en el que las temperaturas máximas y mínimas se encuentran por encima de los valores climatológicamente “normales” y que se mantienen durante varios días. Sin embargo, la temperatura considerada “normal” en una zona con clima cálido puede ser anómala en una zona con clima frío. En la literatura no existe una definición consensuada de olas de calor. Según la Agencia Estatal de Meteorología AEMET, una ola de calor es “un período de al menos tres días consecutivos en que al menos el 10% de las estaciones meteorológicas consideradas registran temperaturas ambientales por encima del percentil del 95% de su serie de temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto del periodo 1971-2000”. Esta definición especifica un umbral desde un punto vista “climatológico” en base a la temperatura. Sin embargo, hay evidencia de que el impacto sobre la salud puede depender de otros parámetros meteorológicos, como la humedad o el viento. Esto ha llevado a la definición de la temperatura aparente. En el proyecto EuroHEAT, por ejemplo, una ola de calor se definió como un período en el que la temperatura aparente (normalmente considerada como la temperatura equivalente percibida por humanos que es causada por efectos combinados de temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento) máxima y mínima superan el percentil 90 de la distribución mensual durante al menos dos días (WHO, 2009; Programa Cambio Global España 2020/50, 2012). Otros estudios utilizan umbrales definidos con criterios “epidemiológicos” que están basados en el análisis de variables meteorológicas, demográficas y de mortalidad. De esta manera, permiten relacionar el umbral de temperatura con un impacto observado en la salud (Díaz et al., 2015; Albizuri et al, 2019). Definir correctamente este umbral es crucial para lanzar alertas efectivas ante las olas de calor.



Autora: M.J. Sanz

Después de la ola de calor del año 2003, que tuvo un elevado impacto en toda Europa, las autoridades sanitarias europeas empezaron a diseñar Planes de Prevención para reducir los impactos en las poblaciones. Hoy se reconoce que estas medidas son fundamentales para abordar los riesgos para la salud que representan las olas de calor. Los planes de alerta tienen como objetivo proporcionar información a los departamentos de salud, a los servicios sociales y la población en general, así como orientación sobre el ajuste del comportamiento durante episodios peligrosamente calurosos, con particular atención a los grupos vulnerables. Estas alertas se lanzan cuando las temperaturas alcanzan un umbral crítico, por encima del cual se espera que los impactos en la salud empiecen a aumentar de forma significativa. La elección del umbral crítico es crucial para la efectividad del sistema de alerta, pues un umbral demasiado bajo traería pérdidas económicas para la sociedad y disminuiría la receptividad de la población y profesionales de salud. Por esta razón, la definición de temperatura crítica para lanzar las alertas debe basarse en estudios epidemiológicos locales que tengan en cuenta el contexto climático, geográfico y socio-demográfico de la localización (Albizuri et al, 2019).

Las olas de calor pueden acarrear diversos impactos en la salud humana, principalmente aumento de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, como asma y rinitis (D'Amato et al., 2007), y aumento de mortalidad. Otros efectos incluyen insolación, sensación de fatiga, agotamientos y golpes de calor, que en los casos más graves también pueden llegar a ser mortales. Para identificar correctamente los factores de vulnerabilidad en la población, es importante distinguir entre dos tipologías de mortalidad, la mortalidad desplazada (o “efecto cosecha”) y la mortalidad prematura. La mortalidad desplazada se refiere a muertes agudas que ocurren durante o inmediatamente después de una ola de calor. Impacta a personas que tienen ya una baja expectativa de vida a causa de enfermedades crónicas previas y que habrían muerto independientemente de la exposición al calor, entre unos días y algunas semanas más tarde. Este fenómeno se conoce en literatura como “efecto cosecha” (Armstrong et al, 2014). Por su parte, la mortalidad prematura se refiere al exceso de muertes relacionadas con el calor en individuos sanos, que mueren antes debido a la exposición al calor. Esto afecta a diferentes segmentos de la población, especialmente los ancianos, pero también otros grupos como niños, mujeres embarazadas, trabajadores manuales y personas que participan en actividades extenuantes al aire libre cuando hace calor.

En ese contexto, el incremento notable de enfermedades crónicas (no transmisibles), al cual estamos asistiendo en las últimas décadas, incluye enfermedades cardíacas, cerebrales, respiratorias, cáncer, diabetes tipo 2, y representan el 60% de las muertes anuales mundiales y el 46% de la carga mundial de enfermedad en años de vida ajustados por discapacidad (Kjellstrom et al., 2010). Esto, añadido al envejecimiento de la población, aumentará la sensibilidad de las poblaciones a fenómenos como las olas de calor, incrementando los problemas agudos respiratorios y cardiovasculares y el riesgo de mortalidad con intensificación del efecto cosecha y la consecuente sobrecarga para los sistemas sanitarios.

Otros factores de riesgo incluyen la exclusión social, la pobreza, la inmigración, los estilos de vida poco saludables (por ejemplo, sedentarismo), los factores socioeconómicos y las condiciones de la vivienda. Las áreas urbanas son particularmente vulnerables a las olas de calor, por el efecto isla de calor, por la densidad de población y la alta densidad de grupos vulnerables.

Los cambios de temperatura también podrían tener algún efecto positivo sobre la salud. Por ejemplo, los inviernos más suaves contribuirían a reducir el pico de mortalidad invernal, compensando parcialmente el aumento del riesgo durante las estaciones de verano. Por otro lado, sin embargo, se estima que las temperaturas más elevadas tendrán efectos indirectos, contribuyendo por ejemplo al aumento de determinadas enfermedades infecciosas por el agua, la propagación de vectores asociados a las mismas (como mosquitos o garrapatas) y el aumento de determinadas enfermedades de origen alimentario ligadas al incremento de temperatura (p. ej. salmonelosis) (véase secciones 8.3 -8.5).

Existen numerosos trabajos que investigan el efecto de las olas de calor sobre la salud humana. La Tabla 8.1 muestra algunos trabajos de la literatura científica que analizaron el efecto de la temperatura ambiental y las olas de calor en la salud humana en España. Estos estudios estiman el incremento en mortalidad por causas naturales, causas circulatorias y respiratorias, para todos los grupos de edad o para grupos de edad específicos, así como el incremento de altas hospitalarias. Sus resultados demuestran que la actualización de los planes de prevención desempeña un papel importante para reducir el efecto de excesos de temperaturas sobre la salud de la población (Díaz et al, 2015). Algunos estudios muestran que el aumento en los ingresos hospitalarios por olas de calor es menor que el aumento de mortalidad, lo que sugiere que las muertes se producirían rápidamente y sin tiempo a un posible ingreso en los hospitales (Linares y Díaz, 2008).

Además del "exceso de calor o las olas de calor", algunos estudios analizan el "calor moderado" (cuando la temperatura es más alta de la temperatura para la que se observa la "mortalidad mínima", pero antes de alcanzar los valores críticos de temperatura asociados a las olas de calor) y su contribución a la mortalidad total por calor (Gasparrini et al, 2015). Se estima que su influencia en la mortalidad total es alrededor del 50%-60% (Albizuri et al, 2019).

Se resalta también la importancia de realizar estudios adaptados al contexto climático, geográfico y socio-demográfico local en territorios no demasiado extensos, la inclusión en los planes de alerta de sinergias con la contaminación del aire, el análisis de los patrones meteorológicos y otras situaciones adversas para la salud humana, para identificar otras variables en juego (viento, humedad relativa, radiación, presión atmosférica, etc.) (Albizuri et al, 2019). Sin embargo, aunque en la comunidad científica se discuten cada vez más las interacciones entre altas temperaturas y contaminación del aire, hay pocos estudios que analizan el efecto sinérgico en la salud. Los episodios de contaminación atmosférica de ozono comparten gran parte de los factores meteorológicos de las olas de calor y, por lo tanto, frecuentemente son simultáneos (Albizuri et al, 2019). Los impactos de olas de calor son agravados por concentraciones elevadas de contaminantes en el aire y viceversa, los efectos de niveles altos de contaminación del aire empeoran con las altas temperaturas. Este efecto sinérgico tendría un impacto mayor que la suma de los impactos individuales (Culqui et al., 2013). En conclusión, la atribución de efectos sobre la salud de las olas de calor *per se* resulta difícil de medir sin tener en cuenta del efecto conjunto de todas las variables que interactúan entre sí.

Numerosos modelos climáticos predicen que las olas de calor aumentarán en frecuencia, intensidad y duración durante el siglo XXI (IPCC, 2018). En España se prevé un aumento en la intensidad de las olas de calor (Abaurrea et al., 2018; Gaitán et al., 2019) cuyos impactos esperados son un aumento significativo de morbilidad y la mortalidad (Roldán et al., 2016). El modelo de Abaurrea et al. (2018) sugiere que habrá un aumento considerable generalizado por toda España en la ocurrencia de eventos de calor extremo, principalmente en julio y agosto. Los resultados de Roldán et al. (2016) muestran que la mortalidad esperada en ciudades como Zaragoza aumentará un 0,4% debido a las temperaturas extremas.

Considerando la exposición a "exceso de calor" y "calor moderado" conjuntamente, para toda España, en el escenario RCP8.5 se estiman 12.000 muertes adicionales para 2030-2039, 27.000 para 2050-2059, hasta unos 40.000 para 2070-2079 y 43.000 para el final de siglo (2090-2099). Según el escenario RCP4.5, la mortalidad anual oscilará entre 11.000 para 2030-2039 a 20.000 para 2050-2059, y disminuirá a 18.000 para 2090-2099. Mientras que bajo el RCP2.6 más sostenible, la mortalidad anual variará de 10.000 para 2030-2039 a 16.000 para 2050-2059 y luego disminuirá a 10.000 para 2090-2099 (Scazny et al., 2019). Estas bajadas de la mortalidad van asociadas a los supuestos de bajada de emisiones de gases de efecto invernadero de cada escenario. En una escala de décadas, la influencia de las olas de calor se estima alrededor del 40-50% de la carga de calor total (Albizuri et al., 2019), aunque es probable que esta proporción aumente considerablemente con el cambio climático.

Tabla 8.1. Estudios destacados en España que analizan el impacto de las olas de calor y temperatura en la salud humana.
Fuente: Elaboración propia.

Autor(es)	Año	Área de estudio y población objetivo	Objetivo	Variable salud estudiada
Díaz et al.	2015	52 ciudades en España	Estimar los valores de temperaturas umbrales "desencadenantes" para cada una de las 52 capitales de provincia de España, así como los riesgos relativos y atribuibles de mortalidad.	Mortalidad calculada por causas naturales, circulatorias y respiratorias.
Baccini et al.	2008	15 ciudades europeas incluyendo Barcelona y Valencia	Estimar las asociaciones entre la temperatura aparente máxima diaria y muertes diarias durante la estación cálida en 15 ciudades europeas.	Mortalidad por todas las causas, enfermedades y respiratorias
D'Ippoliti et al.	2010	9 ciudades europeas incluyendo Barcelona y Valencia	Estimar el impacto en la mortalidad por género, edad y causas de muerte en Europa durante los veranos 1990-2004, teniendo en cuenta la duración e intensidad de la ola de calor.	Mortalidad diaria durante los días de ola de calor en comparación con los días sin ola de calor en personas mayores de 65 años
Michelozzi et al.	2009	12 ciudades europeas	Evaluar la asociación entre las condiciones climáticas y los efectos agudos sobre la salud, durante las estaciones cálidas en 12 ciudades europeas con condiciones climáticas muy diferentes.	El cambio porcentual en los ingresos hospitalarios por 1 ° C aumenta sobre el percentil 90 de la temperatura aparente máxima.
Culqui et al.	2013	Madrid	Evaluar el impacto de los planes para la vigilancia y control de los efectos de las olas de calor en la mortalidad atribuida al calor.	Mortalidad diaria por todas las causas.
Linares y Díaz	2007	Madrid	Analizar el impacto de las temperaturas extremas en los ingresos hospitalarios para poner en marcha los planes de alerta hospitalaria.	Ingresos hospitalarios circulatorios y respiratorios
Tobias et al.	2012	52 ciudades en España	Evaluar la efectividad de los umbrales oficiales establecidos por el Ministerio de Salud para cada ciudad capital de provincia, cuantificando y comparando los efectos a corto plazo de los días superiores al umbral en la mortalidad diaria total.	Mortalidad por todas las causas.
Linares et al.	2017	Madrid	Analizar factores de riesgo urbanos como olas de calor, el ruido del tráfico, los contaminantes y su impacto a corto plazo en la exacerbación de los síntomas de la demencia, lo que lleva al ingreso de urgencia en el hospital.	Número de ingresos hospitalarios diarios de urgencia relacionados con la demencia.
Chiabai y Sainz de Murieta	2017	País Vasco	Proyecciones de riesgo de mortalidad bajo escenarios climáticos futuros (combinación de modelos epidemiológicos con proyecciones de temperatura y población) y análisis económico de planes de prevención.	Mortalidad por todas las causas.
Albizurri et al. (2019)	2019	País Vasco y área de Bilbao	Estimación mortalidad por calor distinguiendo entre exceso de calor y calor moderado, análisis del efecto sinérgico temperatura-ozono, patrones meteorológicos y situaciones sinópticas (2002-2015).	Mortalidad por todas las causas.

Impactos en la salud producidos por sequías, lluvias torrenciales e inundaciones

Sequías

La sequía se produce cuando la disponibilidad de agua se sitúa por debajo de lo habitual de un área geográfica debido a una falta de lluvias durante un período prolongado de tiempo. Según el Observatorio DKV de salud y medio ambiente en España (2016) el efecto de las sequías se produce en cuatro grandes grupos (ecosistemas, consumo humano, uso agrario y uso industrial) que afectarían, a su vez, la salud humana:

- Ecosistemas: El impacto de las sequías en los ecosistemas puede provocar un aumento en la probabilidad de incendios forestales, lo que se relaciona con impactos en la salud debidos a lesiones, traumatismos y quemaduras. En sinergia con la contaminación atmosférica, se ha observado un aumento de enfermedades respiratorias y cardio-cerebrovasculares.
- Por otro lado, cambios en hábitats y ecosistemas, como los producidos en la cubierta vegetal del suelo, reducción de la biodiversidad, pérdida de otros servicios ecosistémicos de aprovisionamiento (pesca, productos silvestres, recursos) y aumento de vectores y reservorios de patógenos, pueden provocar un aumento considerable de enfermedades infecciosas. Especialmente aquellas transmitidas por vectores, como artrópodos debido a posibles estancamientos de agua como consecuencia de la sequía.
- Consumo humano: Las restricciones en el uso de agua potable en épocas de sequía pueden llevar a un aumento en la carga química y de patógenos en las aguas, con un aumento de enfermedades infecciosas transmitidas por el agua (p. ej. tracoma, dermatitis de contacto).
- Agrícola: Una disminución de la capacidad de producción agrícola y ganadera conlleva un aumento en la pobreza y desigualdad en la salud, económica y de género. Esto, a su vez, provoca un aumento de malnutrición; carencias o excesos de micronutrientes; sobrepeso y obesidad; y enfermedades no transmisibles relacionadas con la alimentación (cardiopatías, diabetes y algunos cánceres).
- Industrial: La limitación de actividades industriales (generación de energía eléctrica hidroeléctrica o refrigeración de plantas industriales) provoca un aumento de la pobreza y desigualdad en salud, económica y de género que, de ser generalizadas a nivel regional o estatal, pueden llevar a un aumento de malnutrición (mayor morbilidad y mortalidad).

Mientras en la revisión bibliográfica realizada en este informe se han encontrado numerosos estudios en España que relacionan directamente el efecto de olas de calor, aumento de temperaturas medias o contaminación atmosférica en la salud, el número de estudios que relacionan directamente el efecto de las sequías en la salud es considerablemente menor. La mayor parte de trabajos que evalúan los impactos de la sequía analizaron los efectos en la agricultura. El estudio de Berbel y Esteban (2019) compara las principales reformas en la legislación de los recursos hídricos y analiza los principales logros y fracasos en la agricultura y otros sectores en España, California y la cuenca del río Murray-Darling en Australia.



Autora: M.J. Sanz

En cuanto a trabajos que hayan abordado el efecto de la sequía en la salud humana, recientemente se ha publicado un trabajo en Galicia en el que Salvador et al. (2019) analizaron los períodos de sequía utilizando el Índice de Evapotranspiración-Precipitación Estandarizado (*SPEI*, por sus siglas en inglés) y lo relacionaron con la mortalidad diaria. Se encontró un efecto significativo entre la sequía y la mortalidad en todas las provincias

gallegas, excepto en Pontevedra, y demostraron que el efecto de la sequía era mayor en el interior que en la costa.

Lluvias torrenciales e inundaciones

En España, en los últimos 50 años, los efectos más dramáticos de los eventos extremos en cuanto a daños socioeconómicos se han producido con lluvias torrenciales (Cámara 2006; Programa Cambio Global España 2020/50, 2012). Aunque sus efectos se han intensificado en la vertiente mediterránea, han sucedido en toda la península. Los impactos potenciales en salud de las lluvias torrenciales y posteriores inundaciones los podemos clasificar en (Menne et al., 2008; Hajat et al., 2003; Programa Cambio Global España 2020/50, 2012):

- Impacto inmediato: directo (ahogamiento, lesiones, hipotermia, mordeduras de animales) e indirecto (asociados con la evacuación de los pacientes, pérdida de trabajadores de la salud, pérdidas de las infraestructuras de salud, incluyendo los medicamentos esenciales y suministros, daños a la captación del agua para consumo humano y saneamiento y a las propiedades, con la consecuencia de pérdida de residencia y posible desplazamiento).
- A medio plazo: heridas infectadas, complicaciones de las lesiones, intoxicaciones, problemas de salud mental, enfermedades diarreicas, enfermedades transmitidas por vectores y roedores, infecciones respiratorias, de la piel y ojos. También incluyen daños a los cultivos y sistemas ganaderos por efecto de transmisión de patógenos y vectores (con posibles alteraciones o interrupción del suministro de alimentos).
- A largo plazo: enfermedades crónicas, discapacidad, problemas de salud mental y enfermedades relacionadas con la pobreza.

Existen varios trabajos que cuantifican el efecto en la salud como consecuencia de las lluvias torrenciales e inundaciones. Olcina Cantos (2009) realizó una síntesis de los peligros climáticos más importantes en España y de las pérdidas por inundaciones en el período 1987-2001 e hizo una estimación de las pérdidas por inundaciones para el período 2004-2033. En su trabajo mostró que las provincias del litoral mediterráneo tienden a tener mayores pérdidas por inundaciones que otros lugares de la península. Arcos et al. (2006) evaluaron la mortalidad y la morbilidad atribuida a las lluvias torrenciales en España entre 1950 y 2005. Los autores concluyeron que la frecuencia de desastres en España había aumentado a lo largo del período estudiado y que suelen ser el doble en el segundo semestre del año, con una gran variabilidad geográfica. Entre los diferentes tipos de desastres, las inundaciones son las que han tenido el mayor impacto en la mortalidad y heridos entre 1950 y 2005.

Foudi et al. (2015) desarrollaron una evaluación espacial integrada del riesgo de inundación para los sectores residencial, no residencial, agrícola y ambiental en la ciudad de Zaragoza y municipios aguas abajo del río Ebro. El riesgo de mortalidad y lesiones se estimó teniendo en cuenta la tipología de la inundación (velocidad del agua y profundidad) y la vulnerabilidad de la población (edad, estado de salud, características del área de residencia). El estudio encontró algunos impactos relacionado con la salud mental (trastornos por estrés postraumático y por ansiedad de riesgos futuros).

Impactos en la salud producidos por temporales de viento y otros fenómenos no habituales

Temporales de viento

Según el Programa Cambio Global España 2020/50 (2012), los efectos derivados de los temporales de viento tienen una importancia socioeconómica relativa pero considerablemente menor que los derivados de las precipitaciones o temperaturas. Este informe diferencia entre dos tipos de episodios de temporal de viento en España, los episodios costeros y los continentales. Los episodios costeros involucran un temporal marítimo y son situaciones que afectan sobre todo a la zona costera, afectando a puertos, playas y calles o edificaciones con proximidad al mar. En cuanto a los efectos directos continentales, aunque en España no se registran huracanes

y los tornados son raros o de importancia limitada, sí son frecuentes los temporales de viento “moderadamente” fuertes que causan innumerables destrozos en el mobiliario público y privado. Suelen afectar a mucha gente, pero generalmente en un grado bajo, siendo casos excepcionales las afecciones graves. Los efectos potenciales inmediatos en la salud son las muertes directas por accidentes y traumatismos y ahogamientos en temporales costeros. Indirectamente y en casos extremos, podrían plantearse problemas asistenciales por interrupción de las vías de comunicación o por saturación del sistema asistencial debido a un número elevado de heridos concentrado en un corto intervalo de tiempo y espacio. Además, las acciones de reconstrucción pueden provocar numerosos traumatismos. Como en las anteriormente descritas situaciones extremas, se pueden producir descompensaciones agudas de enfermedades crónicas ligadas al estrés ocasionado por la catástrofe o por la imposibilidad de recurrir a los sistemas asistenciales. Esto hace que las consecuencias materiales de la catástrofe y las dificultades para poner remedio tienen por sí mismas un impacto importante sobre la salud, especialmente la mental.

Otros fenómenos no habituales

Existen otros fenómenos no habituales como las tormentas de granizo, los aludes, los deslizamientos o rayos, cuya frecuencia o probabilidad de ocurrencia podría verse aumentada como consecuencia del cambio climático. Estos suelen provocar un daño socioeconómico y para la salud menor que los fenómenos anteriormente descritos.

Las tormentas de granizo tienen impactos principalmente en la agricultura, en la que puntualmente pueden llegar a causar un daño muy grande si se producen en los meses anteriores a la cosecha. En menor medida, también pueden tener efectos dañinos sobre bienes muebles e inmuebles y más raramente sobre la salud de algún individuo. Los efectos de los aludes se restringen a sectores de alta montaña. Los aludes pueden llegar a provocar desgracias y matar a montañistas, escaladores o esquiadores, o incluso a población local. Otra consecuencia de ello es también la repentina fusión de grandes cantidades de nieve, lo que conlleva a crecidas de agua repentinas en los ríos, con probables problemas de avenidas e inundaciones. Los deslizamientos suelen estar relacionados con episodios de lluvias abundantes y por efecto de la gravedad pueden movilizarse las capas más superficiales del terreno y acabar resbalando por encima de los materiales subyacentes (Programa Cambio Global España 2020/50, 2012).

3. ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR EL AGUA

La salud se ha visto afectada en diferentes maneras por efecto de la exposición a cambios en las precipitaciones y la disponibilidad y calidad del agua, por aumento de contaminación de aguas, por proliferación de microorganismos tóxicos, por desequilibrios en el ecosistema y cambios en la biodiversidad.

Debido al cambio climático, se prevé que la intensificación de las alteraciones sobre el ciclo hidrológico pueda provocar un fuerte impacto en la calidad del agua y, por tanto, en la salud humana, de aquellos que no tengan acceso o de quienes, teniendo acceso, no cuenten con sistemas de tratamiento adecuados. En España pueden esperarse posibles efectos sanitarios en el futuro, aunque podrían ser paliados gracias a la tecnología actual y futuras mejoras. El nivel de calidad de los abastecimientos y saneamientos alcanzado en España ha hecho que aún no se despierte el interés necesario para investigar los posibles efectos sanitarios relacionados con el agua y el cambio climático (Programa Cambio Global España 2020/50, 2012). Sin embargo, se han identificado algunos problemas indirectos, como el aumento potencial de la contaminación de las aguas por mayor concentración de contaminantes, las proliferaciones de microorganismos nocivos o tóxicos, los desequilibrios ecológicos con alteración de la biodiversidad y aparición de especies invasoras, y otros problemas derivados de periodos de sequía anormalmente intensos o duraderos.

Los cambios en la frecuencia e intensidad de precipitaciones y temperatura pueden provocar brotes de enfermedades transmitidas por el agua y movilizar diferentes patógenos afectando a la incidencia de diarrea y otras enfermedades infecciosas. Los riesgos de enfermedades infecciosas transmitidas por agua, como la diarrea (*Campylobacter jejuni*, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., *Yersinia enterocolitica*), el cólera (*Vibrio cholerae*), la disentería (*Shigella* spp.), la fiebre tifoidea (*Salmonella typhi*) y la poliomielitis (Poliovirus), se clasifican en riesgos relacionados al agua de consumo humano y riesgos relacionados a la exposición en zonas recreativas por actividades como el baño. Un estudio en España sugiere un papel importante de las altas temperaturas en el aumento de las hospitalizaciones por gastroenteritis, según el análisis de 50 provincias entre 1997 y 2013 (Morral-Puigmal et al, 2018).

Cambios en la temperatura y la escorrentía también tienen efectos sobre la contaminación microbiológica y química de las aguas recreativas, costeras y superficiales, sobre todo en el área del Mediterráneo, donde España es uno de los países afectados. Más concretamente, el informe del Programa Cambio Global España 2020/50 (2012) señala que las cianobacterias pueden constituir un riesgo para la salud pública por su capacidad tóxica, produciendo hepatotoxicidad, neurotoxicidad y dermatotoxicidad para el ser humano. El informe señala que en España se identifican principalmente cianobacterias hepatotóxicas, aunque en los últimos años se empiezan a observar cianobacterias neurotóxicas, más comunes hasta ahora en el norte europeo. Mientras que para el agua de boca hay un control más minucioso y generalizado, en el caso de aguas recreativas los controles son solo puntuales.

4. ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR ALIMENTOS

Las enfermedades transmitidas por alimentos pueden ser causadas por agentes biológicos, los cuales están constituidos por microorganismos infecciosos como bacterias, virus y parásitos, o bien las toxinas que producen estos organismos y que quedan activas en los alimentos. El clima modifica los patrones de dispersión y transmisión de estos agentes biológicos. El informe del Programa Cambio Global España 2020/50 (2012) señala que uno de los efectos indirectos del cambio climático en España estará asociado a un impacto sobre enfermedades transmitidas por los alimentos y se prevé que pueda tener un efecto directo sobre la salud pública.

Las bacterias patógenas son una de las principales causas de infecciones de origen alimentario. En España, entre el 40% y el 60% de los brotes causados por agentes infecciosos alimentarios están relacionados con la salmonela, que tiene un comportamiento estacional.

El proyecto PESETA analizó la influencia de las temperaturas sobre la transmisión de la infección de *Salmonella* en Europa, la cual era responsable de un 35% aproximativamente de todos los casos de intoxicaciones alimentarias registrados en Holanda, Inglaterra, Polonia, Suiza y España (Kovats et al., 2004). Según Watkiss et al. (2009), en el proyecto PESETA, los casos de salmonela aumentan entre un 5% y un 10% por cada grado de aumento de las temperaturas semanales, por encima de un umbral de alrededor de 5 °C (con factores clave que son la preparación y el almacenamiento inadecuados de los alimentos antes del consumo). La campylobacteriosis, causada principalmente por la bacteria *Campylobacter*, es una de las principales enfermedades asociada a gastroenteritis, relacionada principalmente con el consumo de carne de pollo. En cuanto a la literatura científica, no se han encontrado casi trabajos que relacionen las enfermedades transmitidas por alimentos con el cambio climático. Destaca el trabajo de Morral-Puigmal et al. (2018), que relaciona aumentos en la temperatura ambiente en España con hospitalizaciones por gastroenteritis clasificadas como transmitidas por alimentos o idiopáticas, según el análisis en 50 provincias entre 1997 y 2013. Los autores además asocian estos aumentos de hospitalizaciones con el cambio climático, ya que se espera un aumento de las temperaturas.

En cuanto a los parásitos, la criptosporidiosis es la enfermedad transmitida por el agua potable más significativa en España. Aun así, los datos epidemiológicos en España son escasos y los casos registrados están asociados a brotes localizados.

5. ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR VECTORES

Existen varios trabajos científicos que han relacionado el cambio climático con el aumento de algunas enfermedades transmitidas por vectores. Morillas-Márquez (2010) afirmó que la contribución del desarrollo socioeconómico, urbanización, uso del suelo, migración o globalización a la transmisión de enfermedades infecciosas es en algunos casos más importante que el cambio climático. Portillo et al. (2018) realizaron una revisión de las diferentes afecciones transmitidas por artrópodos vectores, haciendo un especial hincapié en el riesgo existente para contraerlas en España en función de diferentes parámetros, como la presencia del artrópodo y la posible circulación de los agentes causales. En el estudio de Iriso Calle et al. (2017) se analizan los escenarios que se prevén que podrían incrementar la incidencia de enfermedades transmitidas por mosquitos, flebótomos, garrapatas, otros artrópodos y roedores. Otros estudios han analizado el cambio climático en España y el riesgo de enfermedades infecciosas relacionadas con artrópodos y roedores (López-Vélez et al., 2005), y riesgos relacionados con la leishmaniosis (Gálvez et al., 2011).

El aumento del paludismo importado, y de otras virosis como el dengue o el virus chikungunya, las migraciones de reservorios animales y la llegada y expansión de vectores tropicales como *Aedes albopictus* (comúnmente conocido como mosquito tigre) ejemplifican algunos efectos de estos cambios globales en España (Programa Cambio Global España 2020/50, 2012). La presencia de *A. albopictus* se remonta a 1990 en Italia, para posteriormente expandirse por toda Europa, especialmente en la zona mediterránea. En España, el mosquito tigre está bien establecido en Cataluña, Levante, en la zona costera de Murcia y Andalucía. También se ha detectado en Gipuzkoa, y en otras zonas no costeras como Aragón o la Comunidad de Madrid (Portillo et al., 2018). A pesar de esta expansión, se espera que su distribución disminuya en gran medida en las regiones donde se prevé que el clima se vuelva más seco, como en algunas áreas de Portugal y España (Caminade et al. 2012). Algunas áreas costeras aisladas en el sur de España pueden ver crecer el riesgo de dengue a niveles significativamente altos (Messina et al, 2019).

Aunque la malaria fue erradicada oficialmente en España en 1964, actualmente hay muchos casos de infecciones importadas registradas cada año y el cambio climático podría crear condiciones ambientales favorables para la transmisión de esta enfermedad en escenarios futuros (Bueno Marí y Jiménez Peydró, 2008). Así, en un ambiente más cálido, se espera también que la distribución de algunas especies de garrapatas, como el vector de fiebre hemorrágica de Crimea-Congo, se extienda a nuevas áreas que anteriormente estaban libres del vector (Semenza y Suk, 2018). La epidemiología del vector de la fiebre hemorrágica de Crimea-Congo en el Mediterráneo parece estar claramente asociada con el cambio climático, especialmente en regiones con poca lluvia (Semenza y Suk, 2018). Algunas de las principales enfermedades transmitidas por garrapatas con alto riesgo para la salud pública en España incluyen: infección por *Rickettsia*, anaplasmosis humana, borreliosis de Lyme, fiebre hemorrágica de Crimea-Congo, encefalitis transmitida por garrapatas, infección por el virus Dhor, infección por el virus TBE y babesiosis humana, entre otros (Portillo et al, 2018).

Se han identificado algunos patrones climáticos que influyen en la expansión de la fiebre del Nilo Occidental, ya detectada en España, como son los veranos anormalmente secos y calurosos, acompañados de inviernos suaves (Pérez et al., 2011),

En lo que concierne al chikungunya, que vio una rápida expansión en todo el mundo, los modelos generalmente proyectan un clima idóneo para su transmisión, aunque a nivel moderado, especialmente en Francia, España, Alemania e Italia (Nsoesie et al., 2016).

6. ENFERMEDADES RELACIONADAS CON CAMBIOS EN LA PRODUCCIÓN POLÍNICA

Los aeroalérgenos, como el polen y las esporas de hongos, son las dos principales afecciones alérgicas asociadas con la rinitis alérgica y el asma. Los impactos del cambio climático en las enfermedades alérgicas respiratorias a través de polen y esporas de hongos podrían ser uno de los principales efectos indirectos del cambio climático en la salud pública. El incremento de las temperaturas podría ocasionar un aumento en la producción polínica y en la cantidad de alérgenos de los granos de polen o, al menos, concentrar la producción en un período menor de tiempo, lo que podría ocasionar una concentración muy elevada y de corta duración de polen.

Luján Núñez (2010) analizó las tendencias de Índice de polen anual (IPA) para los principales tipos polínicos alergénicos en siete estaciones de la Red PalinoCAM durante el periodo 1994-2009. Los autores encontraron que el polen de ciprés aumentó en cuatro de las siete estaciones del periodo analizado, la cantidad anual de polen de olivo, plátano y gramíneas permaneció estable en todos los casos, y las urticáceas mostraron una tendencia negativa. Otros estudios descubrieron una variabilidad similar en las tendencias del índice de polen anual, aunque en general hallaron un aumento en el polen de procedencia arbórea y una disminución en el procedente de las plantas herbáceas (Programa Cambio Global España 2020/50, 2012).

García-Mozo et al. (2010) estudiaron el inicio, el día pico y la severidad de la estación polínica de las gramíneas en Andalucía durante el periodo 1982-2008. Los resultados mostraron un adelanto en el inicio y en el día pico de la estación polínica y un aumento en el índice anual de polen y en la severidad de la estación (nº días que se superan los 25 granos de polen/m³ polen). El Programa Cambio Global España 2020/50 (2012) afirma que, a día de hoy, no hay claras evidencias de que se hayan producido cambios significativos en la diversidad del espectro polínico nacional, ni de la aparición de tipos polínicos hasta ahora ausentes en la atmósfera de España.

7. ENFERMEDADES RELACIONADAS CON EL AUMENTO DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La exposición prolongada a la radiación UV solar puede producir efectos agudos y crónicos en la piel, los ojos y el sistema inmunitario. Estos se clasifican en tres grandes problemas de salud: los efectos sobre la vista, los cánceres de piel y las afectaciones sobre el sistema inmunológico (Programa Cambio Global España 2020/50, 2012). Con el cambio climático, diversas variables que modifican las radiaciones UV pueden verse modificadas, como aerosoles, nubes, contaminación atmosférica, superficie de albedo, etc. Esto puede llevar a variaciones a escala regional con efectos en la salud humana. Aunque existen numerosos trabajos en la literatura científica que relacionan las radiaciones UV y sus impactos en la salud, no se encontraron trabajos que relacionaban las radiaciones UV y el cambio climático con la salud humana en España.

8. SALUD MENTAL

El cambio climático, los eventos extremos y los brotes relacionados con enfermedades infecciosas causan diferentes problemas en la salud mental de la población como aumento de ansiedad, y trastornos crónicos y graves, como depresión y estrés postraumático, además de un aumento de comportamiento agresivo y violencia doméstica.

La exposición al calor extremo puede conducir a un mayor uso de alcohol para lidiar con el estrés, un aumento de admisiones hospitalarias y urgencias para personas con problemas o antecedentes de salud mental o psiquiátricos y un aumento de suicidios. La salud mental también puede verse afectada por otros impactos del cambio climático, como la escasez de alimentos o los problemas de calidad de los alimentos, los posibles

aumentos de enfermedades transmitidas por insectos y la contaminación del aire en sinergia con el calor extremo. Finalmente, muchos posibles impactos a largo plazo del cambio climático, como la migración de la población, la escasez de alimentos, la pérdida de empleo y la pérdida de apoyo social, también tendrán enormes consecuencias para la salud mental. Los grupos vulnerables (edad avanzada, población enferma y pobreza) son los que se verán más impactados, aumentando su dependencia del sistema de salud y de los servicios en general, que a su vez se encontrarán afectados por interrupciones o disminución en la disponibilidad o accesibilidad.

Las personas con problemas de salud mental tienen más probabilidades de verse afectadas por eventos climáticos extremos por varias razones. Los medicamentos psiquiátricos pueden interferir con la capacidad de una persona para regular el calor y su conciencia de que su temperatura corporal está aumentando, lo que está asociado con lesiones y muerte. Las personas que viven con enfermedades mentales también tienen más probabilidades de vivir en la pobreza o tener trastornos relacionados con el uso de medicamentos, lo que les dificulta enfrentarse o adaptarse a los cambios. Además, las personas con enfermedades mentales graves tienen más probabilidades de depender de las infraestructuras, acceso a servicios y las cadenas de suministro de medicamentos, que a menudo se ven afectadas después de un desastre.

9. ENFERMEDADES RELACIONADAS CON NUEVOS RIESGOS EMERGENTES

Resistencia a antibióticos

La resistencia a los antibióticos en las bacterias se desarrolla debido al uso no selectivo de los mismos. Pero hay otros factores que pueden contribuir a este problema y la investigación más reciente sugiere que las altas temperaturas locales están asociadas a una mayor incidencia de infecciones resistentes (Rodríguez-Verdugo et al., 2020). Unas diferencias de temperatura de 10 ° C se asociaron a un aumento del 2.2%–4.2% en la incidencia de infecciones resistentes en los Estados Unidos (MacFadden et al., 2018). En concreto, la temperatura es un factor clave que afecta la supervivencia de las bacterias en presencia de antibióticos (impactando la evolución y mantenimiento de mutaciones de resistencia), así que es imprescindible entender los vínculos entre los cambios de temperatura y la creación de la resistencia a los antibióticos.

Todo esto significa que el aumento de las temperaturas globales podría influir en las tasas de resistencia a los antibióticos, lo que significa que las predicciones actuales de resistencia a los antibióticos que no tengan en cuenta este impacto estarían subestimando significativamente el problema.

Alrededor de 3.000 personas mueren cada año en España como consecuencia de infecciones hospitalarias causadas por bacterias resistentes, lo que supone un coste añadido de alrededor de 150 millones de euros anuales (PRAN 2019-2021). Las causas de estas resistencias se encuentran, entre otras, en el uso excesivo de antibióticos, tanto en personas como en el ganado. No obstante, la venta de antibióticos en España con fines veterinarios ha registrado una reducción del 32,4 % entre 2014 y 2017. Con respecto al consumo humano, a pesar de que el total de antibióticos se redujo en España un 7,2 % entre los años 2015 y 2018, España continúa entre los países que más antibióticos consumen de la UE.

Para dar una idea de la gravedad del problema, en toda Europa para el 2015 se ha estimado una mortalidad de alrededor de 33.000 atribuible a infecciones por bacterias resistentes a los antibióticos. Esto corresponde a 170 años de vida ajustados por discapacidad (AVAD o DALY por sus siglas en inglés, una medida de los años perdidos debido a la enfermedad o muerte) por cada 100.000 habitantes, lo que es comparable a la carga combinada de las tres principales enfermedades infecciosas: gripe, tuberculosis y VIH que corresponde a 183 años de vida ajustados por discapacidad (Cassini et al, 2019).

En términos económicos, el Banco Mundial advirtió que la resistencia a los antibióticos podría causar tanto daño a la economía como la crisis financiera de 2008 (WHO, 2017). La resistencia a los antibióticos y el cambio climático son dos de los mayores desafíos a los cuales se enfrenta la humanidad en las próximas décadas (Blair, 2018).

Nuevos contaminantes en el agua

Hay sustancias contaminantes emergentes que no se controlan ni se regulan habitualmente y que representan una nueva amenaza para la salud y el medioambiente. Se trata de productos farmacéuticos, hormonas, pesticidas, productos para el cuidado personal, compuestos disgregantes endocrinos, drogas ilícitas, productos químicos, productos industriales y domésticos, metales, tensioactivos, aditivos industriales, solventes, nano-materiales y micro-plásticos, entre muchos otros.

Esto representa un nuevo desafío con amenazas potencialmente graves para la salud humana y los ecosistemas, con serios riesgos para el agua potable (WHO, 2012) y resistencia a los antibióticos (WHO, 2014). Existen algunos estudios que han analizado la exposición a productos farmacéuticos y los efectos ecotoxicológicos asociados en diferentes especies animales (Aus der Beek et al., 2015; Sumpter, 2010). El cambio climático puede exacerbar sus impactos. Por ejemplo, durante las sequías estos contaminantes pueden concentrarse en los ríos, o durante las inundaciones, pueden retirarse del suelo y propagarse (Richardson et al, 2017).

Muchos de ellos se descargan continuamente en el medioambiente e incluso en cantidades muy bajas, pudiendo causar toxicidad crónica, alteración endocrina en humanos y vida silvestre acuática y el desarrollo de resistencias a los patógenos bacterianos.

Se han encontrado alrededor de 600 productos farmacéuticos diferentes en el medio ambiente acuático (Aus der Beek et al., 2015). Así, existe una prioridad urgente para evaluar los impactos en la salud de:

- Drogas farmacéuticas e ilícitas (humanas y animales) en aguas residuales y aguas superficiales, por propagación de la resistencia a los antibióticos y alteración del comportamiento de la fauna acuática.
- Sustancias químicas bioacumulables y tóxicas que resisten la degradación y persisten en el medio ambiente durante largos períodos.
- Subproductos de desinfección que generan los agentes de tratamiento químico durante el proceso de desinfección del agua.
- Sustancias de Perfluoroalkyl y Polyfluoroalkyl, un grupo de compuestos químicos solubles en agua que se han utilizado ampliamente durante los últimos 60 años (producen numerosos problemas de salud, afectando el crecimiento, aprendizaje y comportamiento de los niños, infertilidad, interferencia con hormonas, colesterol, efectos en el sistema inmune y cáncer).
- Micro- y nano-plásticos en el medioambiente, para los cuales hay una prioridad urgente de evaluar los impactos en la salud humana y del ecosistema.
- Nano-partículas liberadas por los materiales de construcción para los cuales no existen regulaciones relacionadas para su detección.

La mayoría de estos contaminantes emergentes no están regulados. El conocimiento científico sobre los riesgos potenciales para la salud humana y del ecosistema es aún muy escaso, así como datos sobre su presencia en los recursos hídricos y las aguas residuales, y cómo se acumulan en el medio ambiente. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de fortalecer el conocimiento científico y adoptar enfoques tecnológicos y políticos apropiados para monitorear los contaminantes emergentes en los recursos hídricos y aguas residuales, evaluar los riesgos potenciales para la salud humana y ambiental, prevenir y controlar su derrame en las aguas y el medio ambiente en general.

10. REFERENCIAS

- Abaurrea, J., Asín, J., Cebrián, A.C., 2018. Modelling the occurrence of heat waves in maximum and minimum temperatures over Spain and projections for the period 2031-60. *Global and Planetary Change* 161: 244-260.
- Albizuri, A., Alonso, L., Chiabai, A., Gangoiti-Bengo, G., García de Jalón, S., Neumann, M., Sáez de Cámara-Oleaga, E., Rodríguez – García, A., Sanz, M.J., Spadaro, J.V., 2019. Olas de Calor e Impactos sobre la Salud humana, OASIS). Informe técnico. IHOBE.
- Arcos, P., Pérez-Berrocal, J., Castro, R., Cadavieco, B., 2006. Mortalidad y morbilidad por desastres en España. *Gac. Sanit.* 20(6): 481-4.
- Armstrong, B., Gasparrini, A., Hajat, S., 2014. Estimating mortality displacement during and after heat waves. *American Journal of Epidemiology* 179(12):1405-6; doi:10.1093/aje/kwu08.
- Aus der Beek, T., Weber, F.-A., Bergmann, A., et al., 2015. Pharmaceuticals in the Environment: Global Occurrence and Potential Cooperative Action under the Strategic Approach to International Chemicals Management (SAICM). German Federal Environmental Agency, Dessau-Roßlau, Germany
- Baccini, M., Biggeri, A., Accetta, G., Kosatsky, T., Katsouyanni, K., Analitis, A., Anderson, H.R., Bisanti, L., D'Ippoliti, D., Danova, J., Forsberg, B., Medina, S., Paldy, A., Rabczenko, D., Schindler, C., Michelozzi, P., 2008. Heat effects on mortality in 15 European cities. *Epidemiology*. 19(5):711-9.
- Bandara, P., Carpenter, D., 2018, www.thelancet.com/planetary-health Vol 2 December 2018.
- Berbel, J., Esteban, E., 2019. Droughts as a catalyst for water policy change. Analysis of Spain, Australia (MDB), and California. *Global Environmental Change* 58: 101969.
- Blair, JMA, 2018. A climate for antibiotic resistance. *Nature Clim Change* 8, 460–461.
- Bueno Marí, R., Jiménez Peydró, R., 2008. Malaria in Spain: entomological aspects and future outlook. *Rev Esp Salud Publica*. 82(5): 467-79.
- Cámara, E., 2006. Variables meteorológicas y salud. Madrid: Instituto de Salud Pública.
- Caminade, C., Medlock, J.M., Ducheyne, E. et al., 2012. Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: recent trends and future scenarios. *J Roy Soc Interface*, 9:2708–17.
- Cassini, A., Högberg, L.D., Plachouras, D., Quattrocchi, A., Hoxha, A., Simonsen, G.S., Colomb-Cotinat, M., Kretzschmar, M.E., Devleesschauwer, B., Cecchini, M., Ouakrim, D.A., Oliveira, T.C., Struelens, M.J., Suetens, C., Monnet, D.L., Burden of AMR Collaborative Group, 2019. Attributable deaths and disability-adjusted life-years caused by infections with antibiotic-resistant bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: a population-level modelling analysis. *The Lancet Infectious Diseases*, 19(1), 56-66.
- Chiabai, A., Sainz de Murieta, E., 2017. Evaluación del impacto de las temperaturas extremas sobre la salud en Euskadi bajo condiciones de cambio climático. Informe técnico. IHOBE.
- Culqui, D.R., Díaz, J., Simón, F., Linares, C., 2013. Análisis del impacto de las olas de calor sobre la mortalidad de la ciudad de Madrid durante el período 1990-2009. *Rev. Esp. Salud Publica*. 87 (3).
- D'Amato, G.L., Cecchi, S., Bonini, C., Nunes, I., Annesi-Maesano, H., Behrendt, G., Liccardi, T., Popov, P., van Cauwenberge, 2007. Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy* 62: 976-90.
- Díaz, J., Carmona, R., Mirón, I.J., Ortiz, C., León, I., Linares, C., 2015. Geographical variation in relative risks associated with heat: Update of Spain's Heat Wave Prevention Plan. *Environment International* 85:273-283.
- D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., de'Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., Kirchmayer, U., Analitis, A., Medina-Ramón, M., Paldy, A., Atkinson, R., Kovats, S., Bisanti, L., Schneider, A., Lefranc, A., Iñiguez, C., Perucci, C.A., 2010. The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT Project. *Environmental Health* 9:37.
- Foudi, S., Osés-Eraso, N., Tamayo, I., 2015. Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza. *Land Use Policy* 42: 278–292.
- Gaitán, E., Monjo, R., Pórtoles, J., Pino-Otina, M.R., 2019. Projection of temperatures and heat and cold waves for Aragón (Spain) using a two-step statistical downscaling of CMIP5 model outputs. *Science of The Total Environment* 650 (2): 2778-2795.
- Gálvez, R., Descalzo, M.A., Guerrero, I., et al., 2011. Mapping the current distribution and predicted spread of the leishmaniosis sand fly vector in the Madrid region (Spain) based on environmental variables and expected climate change. *Vector Borne Zoonotic Dis.* 11(7): 799-806.
- García-Mozo, H., Galán, C., Alcázar, P., Díaz de la Guardia, C., Nieto-Lugilde, D., Recio, M., Hidalgo, P., González-Minero, F., Ruiz, L., Domínguez-Vilches, E., 2010. Trends in grass pollen season in southern Spain. *Aerobiologia*. 26: 157-69.
- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobias, A., Tong, S., Rocklöv, J., Forsberg, B., Leone, M., De Sario, M., Bell, M., Leon, Guo, Y.L., Wu, C., Kan, H., Yi, S.M., Coelho, M., Hilario, P., Saldiva, N., Honda, Y., Kim, H.,

- Armstrong, B., 2015. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet* 386 (9991): 369–375.
- Hajat S, Ebi KL, Kovats S, Menne B, Edwards S, Haines A, 2003. The human health consequences of flooding in Europe and the implications for public health: a review of the evidence. *Applied Environmental Science and Public Health* 1:13-21.
- Iriso Calle A, Bueno Marí R, De las Heras E, Lucientes J, Molina R, 2017. Cambio climático en España y su influencia en las enfermedades de transmisión vectorial. *Rev. salud ambient.* 17(1):70-86.
- Kjellstrom, T., Butler, A.J., Lucas, R.M. et al., 2010. Public health impact of global heating due to climate change: potential effects on chronic non-communicable diseases. *Int J Public Health* 55, 97–103.
- Kovats, R.S., Edwards, S., Hajat, S., Armstrong, B., Ebi, K.L., Menne, B., 2004. The effect of temperature on food poisoning: time series analysis in 10 European countries. *Epidemiology and Infection* 132: 443-453.
- Linares, C., Culqui, D., Carmona, R., Ortiz, C., Díaz, J., 2017. Short-term association between environmental factors and hospital admissions due to dementia in Madrid. *Environ Res.* 152:214-220.
- Linares, C., Díaz, J., 2008. Impact of high temperatures on hospital admissions: comparative analysis with previous studies about mortality (Madrid). *European Journal of Public Health* 18 (3): 317-322.
- López-Vélez, R., Molina, R., 2005. Cambio climático en España y riesgo de enfermedades infecciosas y parasitarias transmitidas por artrópodos y roedores. *Rev. Esp. Salud Pública* 79(2): 177-190.
- Luján Núñez, C., Gutiérrez Bustillo, A.M., Cervigón Morales, P., 2010. Pollen season severity variations in the region of Madrid, Spain (1994-2009). The 9th International Congress on Aerobiology “Expanding Aerobiology” Buenos Aires (Argentina). Abstracts p. 78.
- MacFadden, D.R., McGough, S.F., Fisman, D. et al., 2018. Antibiotic resistance increases with local temperature. *Nature Clim Change* 8, 510–514.
- Menne, B., et al., 2008. Protecting Health in Europe from Climate Change. WHO.
- Messina, J.P., Brady, O.J., Golding, N. et al., 2019. The current and future global distribution and population at risk of dengue. *Nat Microbiol* 4, 1508–1515.
- Michelozzi, P., Accetta, G., De Sario, M., D'Ippoliti, D., Marino, C., Baccini, M., Biggeri, A., Anderson, H.R., Katsouyanni, K., Ballester, F., Bisanti, L., Cadum, E., Forsberg, B., Forastiere, F., Goodman, P.G., Hojs, A., Kirchmayer, U., Medina, S., Paldy, A., Schindler, C., Sunyer, J., Perucci, C.A., 2009. PHEWE Collaborative Group. High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities. *Am J Respir Crit Care Med.* 1;179(5):383-9.
- Morillas-Márquez, F., Martín-Sánchez, J., Díaz-Sáez, V., Barón-López, S., Morales-Yuste, M., Alves de Lima, F., Cesárea, M., 2010. Climate change and infectious diseases in Europe: leishmaniasis and its vectors in Spain. *The Lancet Infectious Diseases* 10 (4): 216-217.
- Morral-Puigmal, C., Martínez-Solanas, È., Villanueva, C.M., Basagaña, X., 2018. Weather and gastrointestinal disease in Spain: A retrospective time series regression study. *Environment International* 121 (1): 649-657.
- Nsoesie, E.O., Kraemer MUG, Golding, N. et al., 2016. Global distribution and environmental suitability for chikungunya virus, 1952 to 2015. *Euro Surveill*; 21p :30234.
- Observatorio DKV de salud y medio ambiente en España, 2016. Cambio climático y salud. Actuando frente al cambio climático para mejorar la salud de las personas y del planeta. Número 06.
- Olcina Cantos, J., 2009. Cambio climático y riesgos climáticos en España. *Investigaciones Geográficas.* N. 49 (mayo-ag. 2009). ISSN 0213-4691: 197-220.
- Pérez Ruiz, M., Sanbonmatsu Gámez, S., Jiménez Clavero, M.A., 2011. Infección por virus West Nile. *Enferm Infecc Microbiol Clin.* 29(5) :21-26
- Plan Nacional Frente a la Resistencia a los Antibióticos 2019-2021, Gobierno de España, Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social.
- Portillo, A., Ruiz-Arrondo, I., Oteo, J.A., 2018. Arthropods as vectors of transmissible diseases in Spain Artrópodos vectores en España y sus enfermedades transmisibles. *Medicina Clínica* 151 (11): 450-459. www.istas.ccoo.es.
- Richardson, S.D., Kimura, S.Y., 2017. Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions, *Environmental Technology & Innovation*, Volume 8, Pages 40-56, ISSN 2352-1864.
- Rodríguez-Verdugo, A., Lozano-Huntelman, N., Cruz-Loya, M., Savage, V., Yeh, P., 2020. Compounding Effects of Climate Warming and Antibiotic Resistance. *iScience.* 2020;23(4):101024.
- Roldán, E., Gómez, M., Pino, M.R., Pórtol, J., Linares, C., Díaz, J., 2016. The effect of climate-change-related heat waves on mortality in Spain: uncertainties in health on a local scale. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 30: 831–839.

- Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., et al., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (IPCC 2007) Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- Salvador, C., Nieto, R., Linares, C., Díaz, J., Gimeno, L., 2019. Effects on daily mortality of droughts in Galicia (NW Spain) from 1983 to 2013. *Science of The Total Environment* 662: 121-133.
- Semenza, J.C., Suk, J.E., 2018. Vector-borne diseases and climate change: a European perspective. *FEMS Microbiol Lett.* 365(2): fnx244.
- Sumpter, J.P., 2010. Pharmaceuticals in the environment: moving from a problem to a solution. In: Kümmerer, K., Hempel, M. (Eds.), *Green and Sustainable Pharmacy*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Tobias, A., Armstrong, B., Zuza, I., Gasparrini, A., Linares, C., Diaz, J., 2012. Mortality on extreme heat days using official thresholds in Spain: a multi-city time series analysis. *BMC Public Health* 12:133.
- Watkiss, P., Horrocks, L.A., Pye, S., Searl, A., Hunt, A., 2009. Impacts of climate change in human health in Europe. PESETA-Human health study.
- WHO, 2017. A global health guardian: climate change, air pollution and antimicrobial resistance. <https://www.who.int/publications/10-year-review/en/>
- WHO, 2014. *Antimicrobial Resistance: Global Report on Surveillance*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- WHO, 2012. *Pharmaceuticals in Drinking Water*. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- WHO, 2009. *Improving public health responses to extreme weather/heat-waves – EuroHEAT Technical summary*. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark.

Capítulo 9

Impactos del cambio climático en la energía

1. INTRODUCCIÓN

El sector energético español atraviesa una etapa de transformación constante, buscando la reducción de la dependencia energética exterior, la mejora del medio ambiente, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la competitividad. Una característica del sector es que la dependencia energética de España respecto al exterior es todavía muy elevada, 73% en 2017, continuando por encima de la media europea. Esto es debido a la preponderancia de combustibles fósiles en su mix energético que han de ser importados en su totalidad, dado que la producción nacional es casi nula⁴³. En términos de energía primaria, en los años anteriores a 2015 destaca la caída del peso de los productos petrolíferos para continuar después con un cierto estancamiento que, junto a la participación al alza de las fuentes energéticas renovables y del gas natural, ha supuesto un incremento de la diversificación energética.

El potencial de producción autóctona con energía renovable, junto al grado de diversificación energético y la reducción de la demanda energética pueden, no obstante, reducir la vulnerabilidad asociada a la dependencia energética de España. Según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) la dependencia se reduciría al 61% en 2030, impulsada especialmente por la transformación del sector transporte y del sector eléctrico. Como se recoge en “La Energía en España 2017” (MITECO), continúa destacando la presencia de las energías renovables en la estructura de la generación eléctrica que en los últimos años continúa creciendo y supone ya más de un tercio de la generación eléctrica total.

2. IMPACTOS EN EL SECTOR ENERGÉTICO

Al analizar los datos de impactos físicos (capítulo 1), se intuye que los posibles cambios más significativos se encuentran vinculados al agua como recurso energético, especialmente por los cambios esperados en las precipitaciones, escorrentía y las temperaturas. El otro efecto del cambio climático podría estar relacionado con la generación eólica y solar, a tenor de las proyecciones que maneja la AEMET, y tendría un impacto comparativamente mucho menor a los anteriores (Girardi, Romero y Linares, 2015).

La generación eléctrica en España representó en 2018 un 17,8% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, estas oscilan notablemente en función de la climatología anual. Así, el descenso del 13,3% de las emisiones en la generación eléctrica en 2018, respecto al año anterior se debió principalmente al aumento de la generación hidráulica (+84,9% respecto a 2017) en un año hidrológicamente muy húmedo, y el aumento del 3,5% en la producción de origen eólico. Por su parte, en 2017, el aumento del 16,9% de las emisiones en la generación eléctrica respecto al 2016 fue debido a un marcado descenso en la generación hidráulica que se

⁴³ Plan Nacional de Energía y Clima 2021-2030. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>

redujo a la mitad (-49,0%) en un año hidrológicamente muy seco. Todo ello indica que la generación eléctrica renovable en España es muy vulnerable a los ciclos de sequía. En la tabla 9.1 se indican una serie de riesgos derivados del cambio climático para el sistema energético español y algunas de las medidas previstas para abordarlos.

Tabla 9.1. Impactos potenciales del cambio climático en el sistema energético y posibles medidas adaptativas. Fuente: Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Fuente: https://www.miteco.gob.es/images/es/pniecCompleto_tcm30-508410.pdf.

Componente	Amenazas clave	Medidas PNACC-2
Suministro de energía primaria	- Reducción de la producción hidroeléctrica como consecuencia de la disminución de los caudales de los ríos. - Reducción de la productividad de los cultivos agrícolas y forestales orientados a la producción de biomasa debido a una menor disponibilidad de agua - Daños a las infraestructuras de suministro energéticas derivados de eventos extremos.	Estimación del impacto del cambio climático en los potenciales de producción de energías renovables. Integración de las proyecciones relativas al potencial hidroeléctrico en la planificación de la transición energética. Integración de las proyecciones relativas al potencial de producción de biomasa en la planificación de la transición energética Identificación de infraestructuras altamente vulnerables e impulso a programas específicos de adaptación
Generación de electricidad	- Menor eficiencia en las plantas termoeléctricas por disminución de los caudales y aumento de la temperatura del agua de refrigeración - Cortes de agua para refrigeración de centrales térmicas.	Estimación de los impactos potenciales asociados al cambio del clima y análisis de medidas de adaptación.
Transporte, almacenamiento y distribución	- Reducción de la eficiencia de las líneas de transporte y distribución eléctrica debido al calor - Daños a las infraestructuras de los sistemas eléctricos, gasistas o derivados del petróleo como consecuencia de eventos extremos - Vulnerabilidad de terminales de GNL, gas convencional y refinerías situadas en áreas costeras, debido a tormentas, tempestades e incremento del nivel del mar. - Reducción del producible disponible para el bombeo mixto. - Disminución del rendimiento de las baterías por incremento de la temperatura ambiente.	Análisis del impacto del cambio climático en la funcionalidad y resiliencia de las redes de transporte y distribución de electricidad y definición de medidas de adaptación. Identificación de infraestructuras energéticas altamente vulnerables a los eventos extremos e impulso a programas específicos de adaptación
Demanda de energía eléctrica	- Incremento de los picos de demanda de electricidad asociado a necesidades de refrigeración	Estimación del impacto del cambio climático en la demanda de electricidad

Los riesgos sobre el sistema energético presentados en la Tabla 9.1 evidencian la estrecha relación que hay entre la adaptación del sistema energético y las políticas de gestión adaptativa relativas a una serie de recursos o sectores económicos vulnerables ante el cambio climático, como son el agua, el sector forestal, las costas o las infraestructuras de transporte.

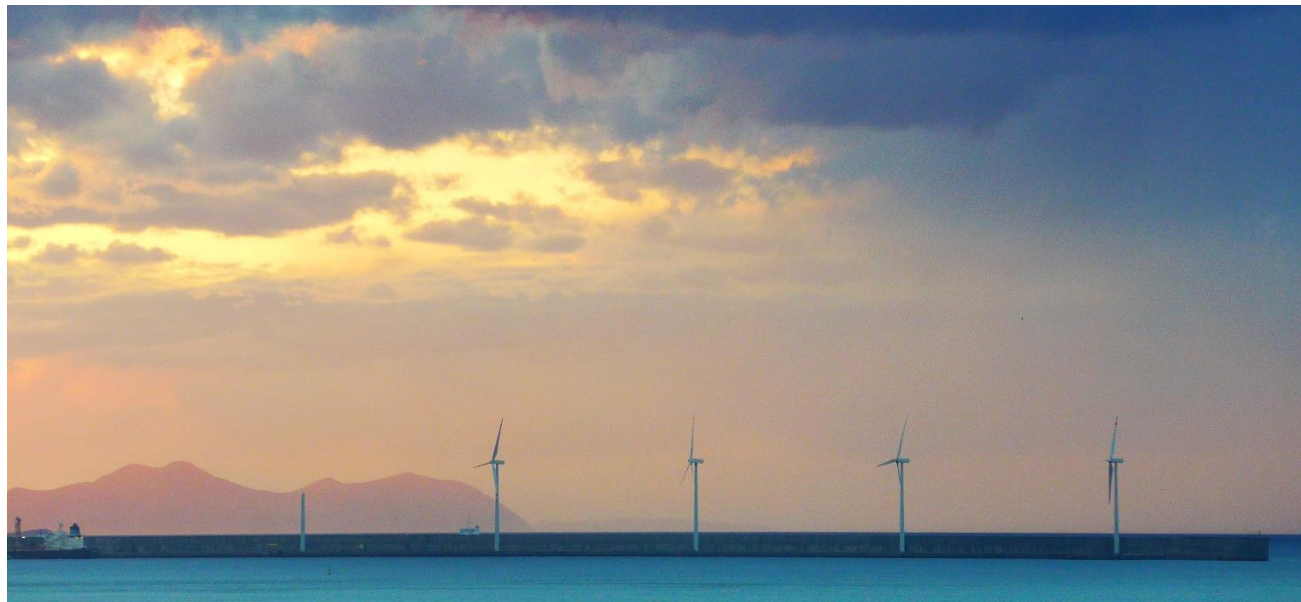
Tabla 9.2. Ejemplos de interrelaciones entre el sistema energético y algunos ámbitos de trabajo del PNACC 2021-30. Fuente: Plan Nacional de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 (https://www.miteco.gob.es/images/es/pnieccompleto_tcm30-508410.pdf)

Componente	Relaciones
Agua	- El régimen de caudales fluviales condiciona la producción hidroeléctrica. - El agua es un recurso clave en procesos de refrigeración de las plantas térmicas y nucleares. - El agua es un recurso utilizado en la producción solar termoeléctrica en el ciclo termodinámico, así como para la limpieza de los espejos. - El cultivo de biocombustibles requiere el uso de agua. - El agua es necesaria en el proceso de obtención de hidrógeno. - La industria extractiva y minería utiliza agua. - Se experimenta un incremento de la temperatura del agua por la descarga de caudales procedentes de la refrigeración de centrales térmicas.
Sector forestal	- La principal fuente de producción de biomasa es el sector forestal, cuyo rendimiento depende estrechamente de una buena adecuación de las masas forestales a las condiciones climáticas.
Costas	- Una parte de las infraestructuras energéticas estratégicas se ubican en zonas costeras, susceptibles de sufrir los impactos de la subida del nivel del mar y los eventos extremos.
Transporte	- Las infraestructuras portuarias, cuya operatividad está condicionada por factores relacionados con el tiempo y el clima, desempeñan un papel esencial en la importación de productos energéticos (combustibles fósiles y biocombustibles). Infraestructuras susceptibles de sufrir los impactos de la subida del nivel del mar y los eventos extremos.
Tierra	- Uso de la tierra para tecnologías renovables, tales como solar fotovoltaica, cultivos energéticos para producción de biocombustibles, eólica. - Minería a cielo abierto y cerrado para la obtención de combustibles fósiles. - Perforaciones y uso del subsuelo para la extracción de hidrocarburos.

La generación de energía hidroeléctrica es la que puede verse más afectada por el cambio climático. En el trabajo de Girardi, Romero y Linares (2015) “Informe de Adaptación al Cambio Climático del Sector Energético Español. Análisis de la influencia del cambio climático en la oferta y la demanda de energía” sobre el impacto del cambio climático en la disponibilidad y el uso de agua para fines energéticos, desagregados por demarcaciones hidrográficas para el escenario con estrés hídrico comparado con el de referencia (sin límite), se observa que hay cuatro demarcaciones hidrográficas (Guadalquivir, Guadalete, Sur y Segura) que, en el escenario con restricciones debidas al estrés hídrico fruto del cambio climático, carecen de agua para usos energéticos, trasladando por tanto ese impacto al sistema eléctrico.

Aunque el impacto más significativo del cambio climático en nuestro país vendría por el lado de los nexos agua-energía, también existen otros impactos principalmente relacionados con la modificación en el potencial eólico y solar que podría ser más significativo si se cumple con la senda de implantación de potencia eléctrica renovable necesaria para cumplir con los objetivos del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima y el objetivo de neutralidad climática a 2050. Aun así, Crook et al. (2011) estimaron la variación en la potencia fotovoltaica en España según dos modelos (HadGEM1 y HadCM3) y obtuvieron un impacto bajo (no más de 5% al final del

siglo). Lo que se explica porque, mientras que un aumento de la temperatura disminuye la eficiencia de los paneles, una mejora de la irradiancia (debido principalmente a la reducción media de la cubierta de nubes) la aumenta. Así mismo, el nexo energía-uso de la tierra puede ser relevante en la medida que se opte por el uso de la biomasa como fuente de energía en el futuro, aunque las energías renovables como la solar fotovoltaica y la eólica también requieren de una ocupación del espacio.



Autora: M.J. Sanz

Para obtener una imagen completa de cómo el cambio climático puede afectar el sistema energético español, sería necesario contemplar todas las posibles influencias, no solo la debida al agua, sino también por la evolución de la disponibilidad del resto de recursos renovables y por los riesgos sobre las infraestructuras energéticas. Solaun y Cerdá (2019) en “Impactos del cambio climático en la generación de energía renovable y en la demanda de electricidad” detallan un listado de los impactos del cambio climático sobre las energías renovables y la demanda con ejemplos concretos de algunas regiones de España.

3. REFERENCIAS

- Crook, J.A., Jones, L.A., Forster, P.M., Crook, R., 2011. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3101-3109.
- Guirardi, J., Romero, J.C., Linares, P., 2015. Informe de adaptación al cambio climático del sector energético español. Preparado por el IIT para la Oficina Española de Cambio Climático/Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Noviembre de 2015
- MAPAMA, 2017. Séptima Comunicación Nacional de España. Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Diciembre de 2017. NIPO: 013-17-272-9.
- MITECO, 2019. La Energía en España 2017, <https://energia.gob.es/balances/Balances/Paginas/Balances.aspx>
- MITECO, 2018. Plan Nacional de Energía y Clima 2021-2030. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.aspx>
- MITECO, 2015. La Energía en España 2013 <https://energia.gob.es/balances/Balances/Paginas/Balances.aspx>

Capítulo 10

Impactos del cambio climático en otros sectores: transporte y turismo

1. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL TRANSPORTE

El sector del transporte deberá considerar los posibles impactos del cambio climático sobre las infraestructuras y los sistemas de explotación. Las infraestructuras y operaciones de transporte están diseñadas para ser resistentes a algunos eventos climáticos extremos. Sin embargo, el aumento en la frecuencia y magnitud de los eventos extremos debido al cambio climático representará una amenaza para el sector del transporte y su infraestructura.

Características de las principales redes de transporte en España

La infraestructura de transporte terrestre está constituida por la red vial y la red ferroviaria. La red vial española tiene un total de 165.624 km, de los que 26.404,61 km corresponden a la Red de Carreteras del Estado (RCE). Además, las vías interurbanas suponen unos 361.517 km adicionales. La RCE, a pesar de suponer solo el 16,5% de la longitud total de carreteras de España, soporta más de la mitad del volumen total de tráfico y alrededor de dos tercios del tráfico de vehículos pesados. En la RCE hay: 11.535,50 km de autopistas y autovías; 484,57 km de vías de doble calzada; y 14.384,54 km de carreteras convencionales. Por su parte, la red ferroviaria española, gestionada por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif), comprende un total de 15.301 km, de los cuales 3.402 km son de alta velocidad. Finalmente, las redes de transporte no terrestre a nivel estatal son las redes de puertos y aeropuertos del Estado. La red de puertos de titularidad estatal está compuesta por 46 puertos de interés general gestionados por 28 Autoridades Portuarias coordinadas por el Organismo Público de Puertos del Estado (siendo Sevilla el único puerto de interior). La red aeroportuaria, por su parte, está constituida por 45 aeropuertos y 2 helipuertos gestionados por AENA Aeropuertos.

Impactos del cambio climático

Las evaluaciones generales realizadas hasta el momento indican que el sector del transporte no se vería muy afectado por una subida de las temperaturas del orden de magnitud previsto de forma directa. Sin embargo, sí podría verse afectado por un cambio en la estructura de las precipitaciones, en el régimen de los vientos, incremento de los incendios o en la frecuencia de fenómenos como las nieblas. En el año 2012, el CEDEX, (Centro de Estudios de Puertos y Costas, del Ministerio de Fomento) y el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente realizaron un análisis preliminar de cuáles podrían ser las necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España (Ministerio de Fomento - MAGRAMA, 2013), cuyos resultados constituyen la base documental de esta sección junto con algunos estudios posteriores.

En dicho informe se han valorado los posibles impactos en las distintas fases de la vida de las infraestructuras: planificación, diseño, construcción y operación. En sus conclusiones recoge que se esperan impactos positivos en las operaciones de las redes de transporte terrestres y aérea debido a las proyecciones de disminución de nevadas y heladas diarias, lo que afectaría de forma positiva al mantenimiento y mejora de las condiciones de explotación (disminución de operaciones de vialidad invernal). En las infraestructuras portuarias, la subida del nivel del mar podría mejorar las condiciones de operación de algunos puertos que actualmente presentan problemas por calados ajustados.

En el caso de la planificación de las infraestructuras, la incidencia del cambio climático parece ser menor que la que se produce sobre el diseño o las operaciones, aunque en modos como el portuario o el aéreo, la alteración de las condiciones climáticas locales puede afectar de manera importante. Por otra parte, en cuanto a la demanda de nuevas infraestructuras, el informe concluye que no parece que el cambio climático vaya a tener una incidencia significativa.

En cuanto a los impactos negativos, en la red vial los impactos con mayor repercusión se producirán sobre taludes y firmes. Los taludes se verán afectados principalmente por el aumento de la intensidad de las precipitaciones extremas de corta duración, combinado con un incremento de las condiciones de aridez. En el caso de los firmes, pueden verse afectados por el aumento de las temperaturas máximas, incrementado el riesgo de aparición de roderas y fisuras.

En la red ferroviaria se prevé que los mayores impactos negativos se deban a las precipitaciones intensas por erosión de los taludes y posibles deslizamientos de laderas, así como a los daños que afecten a la estabilidad de los puentes. También se pueden producir daños por el incremento de amplitud de las oscilaciones térmicas (en los carriles y sujeciones) y, eventualmente, por el incremento de las rachas de viento (caídas de objetos en las vías e impacto en las pantallas acústicas, en particular en las líneas de alta velocidad) o por tormentas eléctricas (sobrecarga en la catenaria). Igualmente, se prevé un incremento de incendios en el margen de las vías debido al incremento de temperatura y al aumento de las sequías, con las consiguientes afecciones al tráfico ferroviario.

La magnitud del cambio en la vulnerabilidad de la red estatal de transporte terrestre en 30 años a causa del cambio climático es, en promedio, inferior a la vulnerabilidad que ya tienen en la actualidad gran parte de sus secciones (CEDEX - MAGRAMA, 2013). No obstante, la explotación de la red estatal de transporte terrestre es particularmente sensible a las nevadas y al riesgo de incendio.

El CEDEX (2013a) plantea una reflexión sobre cómo se espera que el cambio climático afecte a las interacciones entre infraestructuras y medio ambiente, en particular sobre la biodiversidad. En la misma, se indica no solo los efectos sobre las especies, poblaciones y comunidades, sino también se tiene en cuenta el territorio en su conjunto y en especial las redes de espacios protegidos (principalmente la Red Natura 2000), poniendo atención particular en garantizar la conectividad de los hábitats. Por otra parte, en la evaluación de planes y programas se propone valorar los efectos de las infraestructuras de transporte sobre la biodiversidad en el contexto del cambio climático, utilizando una serie de indicadores con dos grandes objetivos (CEDEX, 2013b): valoración del impacto de las infraestructuras sobre los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas en los escenarios de cambio climático; y la evaluación de la vulnerabilidad de los hábitats y taxones afectados por las infraestructuras en un contexto de cambio climático. Asimismo, se hace una reflexión sobre cómo incorporar estos objetivos en las evaluaciones de impacto ambiental.

En 2018, teniendo en cuenta las redes de transporte más importantes de carácter estatal (carreteras, ferroviaria, aeropuertos y puertos) el CEDEX elaboró un nuevo informe con la intención de identificar qué partes de la red actual de infraestructuras del transporte de titularidad estatal pueden presentar una mayor afectación por los efectos del clima y precisar de una atención preferente para su adaptación a ellos (CEDEX, 2018).

En lo que concierne a la red portuaria, una subida del nivel del mar y la modificación en el régimen de lluvias, vientos, oleaje, etc., podría tener numerosos impactos (CEDEX, 2018). Las conclusiones del estudio sobre los puertos (Gomis y Fanjul, 2016) parecen indicar que los cambios previstos en el régimen de oleaje no van a ser los impactos más significativos, residiendo su impacto fundamental en el hecho de venir encabalgados sobre un nivel medio del mar significativamente más alto que en la actualidad. Con la escala considerada en el estudio, su aumento supone en la práctica un cambio en la batimetría y, por tanto, los cambios en la penetración del oleaje en las dársenas y los posibles cambios en la agitación interior deberían ser objeto de estudios a escala local. Aunque los cambios proyectados para el oleaje exterior muestran en general ligeras disminuciones, posibles cambios en su orientación podrían dar lugar a aumentos de la agitación interior, dependiendo de la orientación de la bocana de cada puerto. Aparte de los cambios en la agitación y atendiendo a las encuestas de vulnerabilidad respondidas por las Autoridades Portuarias, parece claro que el mayor impacto sobre los puertos va a ser el previsible aumento en la frecuencia de rebase. La subida del nivel medio del mar por sí misma va a tener poco impacto y, en algunos casos, este será positivo, como el aumento de calado de las bocanas y muelles. En condiciones de oleaje, sin embargo, y aunque este no cambie mucho en el futuro, sí que aumentará significativamente la frecuencia del rebase de diques y, por tanto, disminuirá la operatividad de los puertos.



Autora: M.J. Sanz

En el caso de la red aeroportuaria (CEDEX, 2018), la mayor incidencia de nieblas, heladas o vientos extremos podría afectar a la operatividad del aeropuerto y en el futuro hacer necesario introducir modificaciones en las obras de infraestructura, como nuevas orientaciones de algunas pistas de aterrizaje y despegue. El aumento de las temperaturas podría incrementar el riesgo de incendio en las operaciones de repostaje, reducir las condiciones de confort del personal de las pistas o del exterior, acelerar el deterioro de los materiales bituminosos de las pistas o incluso impedir el despegue de los aviones más pesados. El impacto de las precipitaciones intensas se prevé menor, pero podría afectar a la capacidad de desagüe de las pistas al saturar los sistemas de drenaje.

Tabla 10.1. Posibles impactos en las infraestructuras de transporte debido al cambio climático. Fuente: Extraído de CEDEX (Ministerio de Fomento) - MAGRAMA (2013) y Gomis y Fanjul (2016)

Infraestructura	Impacto negativo	Impacto positivo
Carreteras	Daños y erosión en puentes, taludes y firmes por el aumento de la intensidad de las precipitaciones extremas de corta duración. Erosión de taludes en terraplén por avenidas extraordinarias Inundación de los firmes por insuficiencia de capacidad de drenaje. Incremento de las condiciones de aridez y las temperaturas máximas pueden dañar los firmes, por ejemplo, la aparición de roderas. Afectación de las condiciones de viabilidad por incendios al margen de la vía.	Las proyecciones de disminución de nevadas y heladas afectarían de forma positiva al mantenimiento y mejora de las condiciones de explotación.
Infraestructuras Ferroviarias	Erosión de los taludes y posibles deslizamientos de laderas, y daños en los puentes que afecten su estabilidad por las precipitaciones intensas. Daños en la estructura y sistema de drenaje producidos por las lluvias extremas. Daños en los carriles y sujeciones de la vía por la subida de la temperatura y mayor amplitud de las oscilaciones térmicas. La posible mayor frecuencia de incendios (provocada por olas de calor y sequías) y las lluvias torrenciales podrían afectar al tráfico ferroviario aumentando los retrasos y cancelaciones. Daños en la catenaria por sobretensiones de tormentas eléctricas y aumento de las rachas de viento. Caídas de objetos en las vías, impacto en las pantallas acústicas, en particular para las líneas de alta velocidad por el incremento de las rachas de viento.	Las proyecciones de disminución de nevadas y heladas afectarían de forma positiva al mantenimiento y mejora de las condiciones de explotación.
Puertos	Subida del nivel freático de muelles y explanadas que podría afectar al funcionamiento de redes y servicios subterráneos, así como a la calidad de los terrenos y a las condiciones sanitarias del entorno. Mayor riesgo de fallos y roturas de diques como consecuencia de la subida del nivel del mar que origina un mayor calado y exposición al oleaje. Aumento de la frecuencia del rebase de diques en condiciones de oleaje debido a la subida del nivel del mar, y por tanto posible disminución de la operatividad de los puertos.	La subida del nivel del mar podría mejorar las operaciones de algunos puertos con falta de calado.
Aeropuertos	El posible aumento de niebla y viento podría afectar a las operaciones en pista, aunque hay gran incertidumbre por las escasas proyecciones. Aumento de la probabilidad de incendio en las operaciones de repostaje, mayor deterioro de los materiales bituminosos de las pistas, impedir despegues de aviones más pesados y menor confort del personal de pista por el aumento de las temperaturas. Posibilidad de saturación de los sistemas de drenaje de las pistas con el incremento de la intensidad de las precipitaciones	La reducción de heladas y las nevadas podrían mejorar la gestión aeroportuaria reduciendo retrasos y cancelaciones de vuelos.

2. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL TURISMO

Contexto

El turismo en España constituye un importante sector económico, fuertemente internacionalizado. En 2017, España registró la llegada de 81,9 millones de turistas internacionales, el segundo país después de Francia (por delante de EE. UU. y China) y el peso del Producto Interior Bruto (PIB) asociado a turismo alcanzó el 11,7%

en 2017 (INE, 2019). Según la OMT, el sistema turístico está formado por cuatro elementos básicos: el espacio geográfico, la demanda, la oferta y los agentes (figura 10.1).

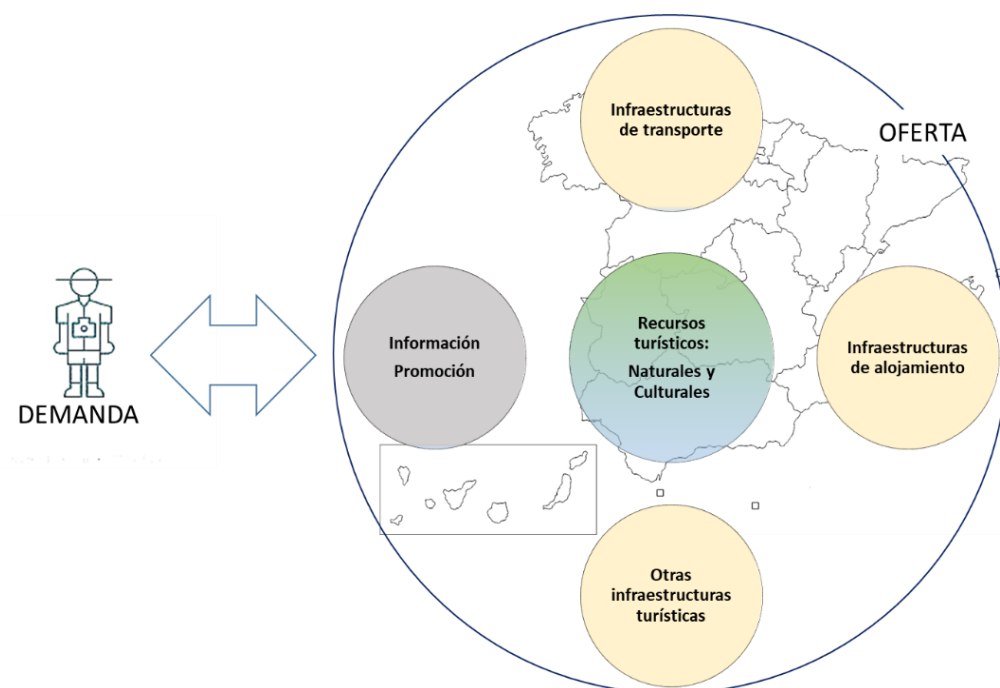


Figura 10.1. El sistema turístico y sus elementos.

La sensibilidad del turismo al clima es muy elevada en España, ya que sus buenas condiciones climatológicas, sobre todo en el litoral mediterráneo, suponen un factor de influencia decisivo sobre las zonas geográficas de atracción, los calendarios de actividad, las infraestructuras turísticas y su funcionamiento y las condiciones de disfrute y bienestar de los turistas.

A efectos de las acciones y planes estatales, en 2007 se aprobó el Plan de Turismo Español - Horizonte 2020, que presenta la estrategia estatal en materia turística para el horizonte temporal hasta 2020, y que reconoce la necesidad de que el sector se adapte al cambio climático. Así, el Plan del Turismo Español 2008-2012, siguiendo la estructura de ejes y objetivos fijados en el Plan del Turismo Español Horizonte 2020, destaca el desarrollo de una serie de indicadores del cambio climático en el sector turístico, así como la evaluación de los costes y beneficios de las medidas de adaptación en el sector. En la actualidad, se encuentra vigente el Plan Nacional e Integral del Turismo 2012-2015 (PNIT) que, si bien entre sus medidas no contempla explícitamente la adaptación al cambio climático, propone una serie de actuaciones en el ámbito de la mitigación.

Impactos esperados del cambio climático en el turismo

Un reciente estudio global sobre la vulnerabilidad del turismo al cambio climático (Scott, Hall y Gössling, 2019) utilizando un índice basado en 27 indicadores agrupados en 6 tipos (activos turísticos, costes de operación, demanda, disuasivos del país anfitrión, capacidad adaptativa del sector y del país) sitúan a España entre los estados más vulnerables de la Unión Europea, junto con Portugal, Italia, los países Bálticos y de Europa del Este. La publicación del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente sobre cambio climático y turismo (Gómez-Royuela, 2016) constituye la síntesis más reciente y completa disponible. En la misma se indica que las características de los impactos en la oferta y la demanda turística son diferentes.

Impactos en la oferta turística

En el caso de la oferta, los impactos se derivan de los efectos sobre los recursos turísticos, que pueden ser naturales o culturales, y las infraestructuras turísticas (alojamiento, transporte, infraestructuras turísticas específicas) (figura 10.1).

Tabla 10.2. Impactos del cambio climático en la oferta del sector turístico en España. Basado en la recopilación de Gómez-Royuela, (2016)

Recurso/infraestructura	Impacto	Referencias
Costas y medio marino	Posible incidencia en las infraestructuras turísticas costeras (playas, paseos marítimos, alojamientos etc) del aumento del nivel del mar y oleaje. Temperatura del mar y su posible incidencia en las atracciones para el buceo. El retroceso de zonas de playa con el cambio climático puede tener implicaciones negativas en determinados sectores económicos y zonas habitadas en las costas españolas.	Ver capítulo 6, capítulo 10 sección 1 Fundació ENT, 2017
Recursos hídricos	Las actividades lúdicas relacionadas con los recursos hídricos como (ríos, embalses, lagos, aguas termales, y toda forma de agua natural o artificial) pueden verse afectadas por los cambios en el régimen hídrico. La reducción de la disponibilidad de los recursos hídricos podría comprometer la viabilidad económica en muchos espacios turísticos actuales, tales como las zonas del Mediterráneo y las de Baleares o Canarias cuyas cuencas hidrográficas son pequeñas y reciben escasas e irregulares precipitaciones y a la vez atraen a un gran número de turistas.	Ver capítulo 2 Gómez-Martín, 2005
Montañas	El rápido retroceso de los glaciares que puede llegar a desaparecer, los cambios importantes en la cantidad y la frecuencia de las nevadas, o los cambios en la cantidad y la distribución de la biodiversidad son algunos ejemplos que demuestran la sensibilidad de los ecosistemas de montaña, lo que puede resultar en una pérdida de atractivo de estos paisajes para las actividades lúdicas.	Ver capítulo 3 y capítulo 2
Espacios naturales protegidos	Pérdida de biodiversidad y deterioro o decaimiento de los ecosistemas, incremento de los incendios y la desertificación.	Ver capítulo 3
Patrimonio	No existen estudios en nuestro país. Pero se infiere en base a estudios internacionales que las inundaciones y los cambios en las precipitaciones (húmeda o sequedad) podrían afectar a los yacimientos arqueológicos del subsuelo, pinturas rupestres, frescos, edificios y cascos históricos, etc.	UNESCO, 2007 IPCC, 2014
Estaciones de esquí*	La incidencia del cambio climático en las reservas nivales podría reducir su espesor y duración, hasta tal punto de que muchas de estas estaciones podrían dejar de ser viables a pesar de la producción de nieve artificial. Y la necesidad de generación de nieve artificial puede impactar negativamente los caudales de ríos de montaña. Las estaciones españolas por debajo de los 2.000 metros podrían desaparecer o reconvertirse hacia otras modalidades turísticas por falta o escasez de nieve** Las estaciones que presentan cotas de altitud más baja presentan un mayor grado de vulnerabilidad al cambio climático. Zonas como la Cordillera Cantábrica presentan señales de mayor vulnerabilidad en contraste con zonas como el Pirineo Catalán o el Sistema Penibético que presentan mejores resultados. En el Pirineo:	IPCC, 2014 ECCE, 2005 Fundació ENT, 2016

Recurso/infraestructura	Impacto	Referencias
	Considerando todas las estaciones del Pirineo (España y Francia) un escenario de 4°C dejaría como viables*** sólo el 7% de las estaciones, mientras con un escenario de 2°C sólo un 44% (y podrían ser viables hasta un 85% si se utilizan medios artificiales). En lo que respecta a la reducción de la temporada, en las estaciones más resilientes (más elevadas, con orientación norte o próximas al atlántico) esta podría reducirse hasta un 15%, en las demás hasta un 38%. En las estaciones de Andorra con un escenario de 4°C de subida sufrirían importantes reducciones puntuales de la temporada que no serían paliables con la nieve artificial con una reducción de visitantes de hasta el 15%.	Pons et al. 2014 Pons et al. 2012
Alojamiento	La dependencia de los deportes de nieve puede incidir en la viabilidad económica de algunos establecimientos debido al cierres o reducción de la temporada de esquí, eventos extremos y sus daños, subida del nivel del mar, escasez de agua, pérdida de valores estéticos del paisaje (por incendios, sequías) etc.	Gómez-Royuela, 2016
Transporte		capítulo 10, sección 2

*La mayor parte de estudios se han realizado en el Pirineo.

**La mayor parte de estaciones españolas están por debajo de los 2000 m.s.m.

*** Se considera que una estación de esquí sería viable con más de 30 cm de nieve durante más de 100 días.

Impactos en la demanda turística

Es muy probable que las tres exigencias genéricas del turista (disfrute, confort y seguridad) se puedan ver alteradas en los escenarios climáticos que se predicen para el futuro (Capítulo 1). En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2014) se menciona que las condiciones climáticas de las regiones mediterráneas para la práctica de actividades turísticas al aire libre se podrían deteriorar principalmente a partir de 2050 en verano, pero a la vez podrían mejorar en primavera y otoño. Esto podría provocar que la temporada alta de los destinos de sol y playa españoles se desplazara fuera de los meses de julio y agosto tradicionales, alargando así la temporada turística. Aunque, por otra parte, los países del norte de Europa continental, Finlandia, sur de Escandinavia y Sur de Inglaterra podrían experimentar una mejora de las condiciones climáticas en los meses de verano apreciable a partir de 2070, y estos países son los de mayor procedencia turistas para nuestro país. Aunque, hay que tener en cuenta que además de los factores climáticos, los factores demográficos pueden ser incluso más relevantes que los factores climáticos (bajada y envejecimiento de la población de estos países de origen).



En el informe ECCE (2005) se indicaban algunas de las posibles repercusiones del cambio climático en la demanda turística nacional e internacional (Tabla 10.3)

Autora: M.J. Sanz

Tabla 10.3. Impactos que podría tener el cambio climático en la demanda turística. Extraído de ECCE (2005). Fuente: Extraído de ECCE (2005) en Gómez-Royuela, (2016)

Nacional	Internacional
Reducción de la estancia media en temporada alta en zonas de turismo de sol y playa. Incremento de los flujos turísticos a zonas costeras del norte. Incremento del turismo de interior, pero disminución de la demanda a aquellos recursos naturales más deteriorados por el cambio climático. Reducción de la demanda doméstica por el incremento de los viajes al norte de Europa por las mejores condiciones climáticas.	Incremento de los viajes hacia las costas del norte de España. Incremento del turismo doméstico en origen reduciéndose los flujos turísticos hacia nuestro país. Alargamiento de la temporada turística más allá de los meses de verano.

En lo que respecta a estudios que incluyen proyecciones sobre los efectos del cambio climático sobre la demanda turística con posterioridad al ECCE (2005), Gómez-Royuela, (2016) ha realizado una síntesis de los estudios que utilizan entre otros métodos el índice de confort climático turístico (TCI) (Tabla 10.4).

Tabla 10.4. Estudios sobre los efectos del cambio climático en la demanda turística en España. Adaptado de Gómez-Royuela, (2016).

Referencia	Ámbito	Variables	Variables climáticas	Resultados
Amelung y Moreno 2009	EU	Pernotaciones y en el gasto medio por pernoctación.	Viento, precipitación y luz solar, temperatura	En verano, determinadas partes de España podrían sufrir descensos en el TCI de hasta 10 puntos repercutiendo en la idoneidad para la práctica de actividades turísticas (+ 2,5 y 3,9°C). Reducción de la estacionalidad en los meses de verano, excepto en la zona costera sur entre España y Portugal, que en un escenario de subida de 3,9°C experimentaría un incremento en la duración de la temporada turística.
Hein 2007	5 regiones españolas	Predisposición a viajar	Temperatura, precipitación, presión de vapor y nubosidad	Reducción de visitantes extranjeros en un 20% en 2080 con respecto a los valores de 2004.
Moreno 2010	Nacional (sol, playa)	Predisposición a viajar	Temperatura y precipitación	A finales de siglo más del 30% del territorio tendría condiciones desfavorables para la práctica de turismo de interior en verano y las condiciones se volverían excelentes para el turismo de naturaleza en la cordillera Cantábrica y Galicia.
Moreno & Amelung 2009	Europeo (sol, playa)	Predisposición a viajar	Viento, precipitación, luz solar, sensación térmica	Descenso significativo de la idoneidad para el sol y playa en la costa sur española y condiciones excelentes en el norte.

Además de los estudios mencionados en la tabla 10.4, Bujosa y Rosselló (2011), focalizándose en la demanda turística en las ciudades costeras, contemplando una subida de las temperaturas de 1°C y utilizando un modelo de elección discreta para múltiples destinos, encuentran que la mayoría de las provincias costeras de Mediterráneo serían las más perjudicadas, ya que la predisposición de los turistas a visitar estos destinos disminuiría tanto en temporada alta como en todas las temporadas con una subida de 1°C de temperatura. Sin embargo, en las provincias del Norte, tanto del Mediterráneo como del Cantábrico, tendría una repercusión positiva para la demanda turística. Hein, Metzger y Moreno (2009) llegan a conclusiones similares, y señalan que la afluencia de turistas en nuestro país podría descender un 14% hacia 2060 (respecto a 2004), más importante en la estación estival debido a la pérdida de condiciones de confort climático en el litoral mediterráneo. Indican que para paliar estas pérdidas se podría considerar una desestacionalización de la temporada turística alta. Asimismo, Bujosa, Riera y Torres (2015) pronostican que las provincias costeras del sur de España (como Cádiz, Huelva y Granada) serán menos deseables que las ubicadas en el norte (como A Coruña, Gipuzkoa, Cantabria y Lugo), ya que con temperaturas superiores a los 39°C los destinos turísticos se convierten en menos atractivos.

Bigano, Hamilton y Tol (2008) han analizado los efectos del cambio climático en la actividad turística de la cuenca del Mediterráneo estimando una pérdida de llegada de turistas, para el horizonte 2100, en todos los países ribereños de la cuenca mediterránea, que en el caso de España podrían compensarse parcialmente por el incremento de turismo doméstico.

Impactos económicos, proyecto PESETA II

En el contexto del proyecto PESETA II (2013) se realizó una evaluación monetaria de los componentes de la demanda turística relacionados con el clima como factor decisivo en la elección del destino turístico. Dentro de los resultados más señalados de este estudio podemos destacar sobre España: una pérdida en el PIB que se estimaría en 0,73% (tomando como referencia 2010) en el caso de no adaptación; si se altera la época vacacional, las pérdidas en el PIB español serían aún mayores (0,86%), sin considerar una posible bajada de los precios en el sector; si sólo se cambia la duración de las vacaciones, las pérdidas en el PIB español serían del orden del 0,67%, lo que es más probable porque es más difícil el ajuste de las vacaciones a otras épocas del año.

Todos los escenarios considerados en este capítulo no contemplan los impactos de la pandemia originada por la COVID-19 en el año 2020. Y habrá que ver al final del año 2020 y en los años venideros cómo el turismo se recupera de los impactos de la pandemia, y en qué medida los impactos del cambio climático pueden interaccionar con la recuperación y transformación del sector.

3. REFERENCIAS

- ADIF, 2019. Declaración sobre la red 2020. http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/DR-20_V0_DocCompl.pdf
- Amelung, B., Moreno, A., 2009. Impacts of climate change in tourism in Europe. PESETA-Tourism study. Joint Research Centre/ Institute for Prospective Technological studies (European Commission).
- Amelung, B., Moreno, A., 2012. Costing the impact of climate change on tourism in Europe: results of the PESETA project. *Clim. Change*, 112, pp. 83-100. Joint Research Centre/ Institute for Prospective Technological studies (European Commission).
- Bigano, A., Hamilton, J.M., Tol, R.S.J., 2008. Climate change and tourism in the Mediterranean, *Working Paper FNU-157*. Research Unit Sustainable and Global Change. Hamburg University. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/24130111_Climate_Change_and_Tourism_in_the_Mediterranean
- Bujosa, A., Rosselló, J., 2011. Cambio climático y estacionalidad turística en España: Un análisis del turismo doméstico de costa. *Estudios de Economía Aplicada*. Vol. 29-3. Págs. 863-880.
- Bujosa, A., Riera, A., Torres, C.M., 2015. Valuing tourism demand attributes to guide climate change adaptation measures efficiently: The case of the Spanish domestic travel market. *Tourism Management*, 47: 233-239.
- CEDEX - MAGRAMA, 2013. Necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España. Informe Final. Septiembre 2013. 59 pp.

- CEDEX, 2013a. La biodiversidad en la evaluación ambiental de infraestructuras de transporte en el contexto del cambio climático. INFORME A4-T116. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. CEDEX: 51-309-5-001. 29 pp.
- CEDEX, 2013b. La biodiversidad en la evaluación ambiental de infraestructuras de transporte en el contexto del cambio climático. INFORME A4-T117. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. CEDEX: 51-309-5-001. 28 pp.
- CEDEX, 2018. Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cambio climáticos. INFORME FINAL, junio de 2018. 61 pp.
- ECCE, 2005. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE - INFORME FINAL. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. I.S.B.N.: 84-8320-303-0.
- Fundació ENT, 2017. Adaptación al Cambio Climático de Zonas Urbanas Costeras con Elevada Densidad de Población e Interés Turístico y Cultural en España. Estudio financiado por MAPAMA/ Fundación Biodiversidad, 108 pp.
- Fundació ENT, 2016. Costes y beneficios de la adaptación al cambio climático en el sector del turismo de nieve en España. Estudio financiado por MAPAMA/ Fundación Biodiversidad, 108 pp.
- Gómez-Royuela, M., 2016. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector turístico. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. M-33862-2016, Madrid. 82 pp.
- Gomis, D., Alvarez-Fanjul, E., 2016. Vulnerabilidad de los puertos españoles ante el cambio climático. Vol. 1: Tendencias de variables físicas oceánicas y atmosféricas durante las últimas décadas y proyecciones para el siglo XXI. Organismo Público Puertos del Estado. M-43202-2016. 281 pp.
- Hein, L., 2007. The Impact of Climate Change of Tourism in Spain. CICERO Center for International Climate and Environmental Research, Working Paper 2007:02. 10 pp.
- Hein, M., Metzger, J., Moreno, A., 2009. Potential impacts of climate change on tourism; a case study for Spain. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1: 170–178.
- INE (2019). España en cifras, 2019. Instituto Nacional de Estadística de España. https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2019/.
- IPCC, 2014. Fifth Assessment Report: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Mijangos-Linaza, J., 2010. Libro verde del transporte y cambio climático. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Comisión de Transportes. ISBN: 978-84-380-0443-2, Madrid.
- Moreno, A., 2010. Evaluación de la Vulnerabilidad del Turismo de Interior frente a los Impactos del Cambio Climático. International Centre for Integrated Assessment and Sustainable Development, University of Maastricht. 147 pp.
- Moreno, A., Amelung, B., 2009. Climate Change and Tourist Comfort on Europe's Beaches in Summer: A Reassessment. *Coastal Management*, 37: 550-568.
- Pons, M., López-Moreno, J. I., Esteban, P., Macià, S., Gavalda, J., García, C., Rosas, M., Jover, E., 2014. Influencia del cambio climático en el turismo de nieve del Pirineo. Experiencia del proyecto de investigación NIVOPYR. *Pirineos*, 169, e006.
- Pons-Pons, M., Johnson, P.-A., Rosas-Casals, M., Sureda B., Jover, È., 2012. Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. *Clim Res* 54:197-207. ERHIN, 2008. Control general de los glaciares del pirineo español. Año hidrológico 2007-2008. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino. 21.803.697/0411.
- Scott, D., Hall, C.M., Gössling, S., 2019. Global tourism vulnerability to climate change. *Annals of Tourism Research*, 77: 49-61.

Capítulo 11

Riesgos para los sectores e interrelaciones

1. INTRODUCCIÓN

Los capítulos precedentes recogen un sumario de los impactos observados y esperados según los estudios disponibles hasta el momento para España⁴⁴. Este esfuerzo de síntesis es difícil debido a la dispersión de la información, y no responde a una evaluación sistemática de los impactos según unos escenarios comunes. En el futuro, utilizando los escenarios para España proporcionados a través de la iniciativa Escenarios-PNACC, bajo la coordinación de AEMET, y que se actualizarán teniendo en cuenta los escenarios y modelos globales del próximo Informe de Evaluación del IPCC (AR6), sería recomendable hacer un análisis de impactos y riesgos contemplando su magnitud y el uso de escenarios y proyecciones armonizados en todos los sectores, cálculos de incertidumbres, y la consideración de la interdependencia entre sectores a nivel de impactos, así como de las posibles medidas de adaptación. Por el momento, en este capítulo se han identificado una serie de riesgos, de acuerdo a la información existente sobre los impactos del cambio climático en los diferentes documentos disponibles, que se ha acompañado de una valoración muy sencilla de la urgencia, con el objetivo de priorizar las actuaciones para minimizar los riesgos.

En el marco de la evaluación de los impactos del cambio climático, el término riesgo suele utilizarse para hacer referencia al potencial de consecuencias adversas de un peligro relacionado con el clima, en la vida, los medios de subsistencia, la salud y el bienestar, los ecosistemas y las especies, los bienes económicos, sociales y culturales, los servicios (incluidos los servicios ecosistémicos), y la infraestructura. Los riesgos se derivan de la interacción de la vulnerabilidad (del sistema afectado), la exposición a lo largo del tiempo (al peligro), así como el peligro (relacionado con el clima) y la probabilidad de que ocurra (IPCC, 2018, 89). Por lo general, para la determinación del riesgo es importante incluir la probabilidad de que un suceso ocurra en una escala temporal. Sin embargo, no todos los impactos descritos en la literatura disponible han sido modelizados, ni incluyen una descripción de la probabilidad de ocurrencia según escenarios más recientes (Amblar et al., 2017, ver capítulo 1) para España.

Es importante destacar que el presente Informe se ha centrado en los impactos y riesgos derivados del cambio climático, pero no en los derivados de las políticas y medida de adaptación, que serían objeto de otro trabajo más extenso. Así, la evaluación del nivel de acción para incrementar la capacidad adaptativa no se ha podido recoger de manera homogénea a lo largo del informe. Tampoco se ha recogido la vulnerabilidad de los sectores a factores no-climáticos, otro componente a considerar en la valoración del riesgo a los impactos del cambio

⁴⁴ Muchos de estos trabajos se encuentran accesibles a través de AdapteCCA <https://www.adaptecca.es/> aunque, en ocasiones, se ha considerado información de otras fuentes (artículos recientes, etc.)

climático. Por otro lado, destacar también que, para poder definir los riesgos de forma comparable e integrada, sería muy útil contar con una modelización para los diferentes sectores a escala regional, tomando como referencia escenarios comunes de corto, medio y largo plazo.

2. RIESGOS IDENTIFICADOS

Para la identificación de los riesgos incluidos en la tabla 11.1 se ha utilizado una definición de riesgo, que ya ha sido manejada en otros estudios de este tipo, donde, debido a la imposibilidad de asignar una probabilidad a todos los impactos, se define riesgo como “el potencial de consecuencias donde algo de valor está en juego y donde el resultado es incierto”⁴⁵.

Tabla 11.1. Lista preliminar de riesgos individuales identificados por sectores.

Nº	Riesgos identificados
<i>Recursos hídricos</i>	
# 1	Riesgo de reducción de los caudales de los ríos o de cambios en sus patrones estacionales
# 2	Riesgo de cambio de distribución y biodiversidad de las comunidades acuáticas en masas de agua dulce.
# 3	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos para uso doméstico y en el sector servicios.
# 4	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos para usos agrícolas e industriales.
# 5	Riesgo de incremento de inundaciones fluviales y pluviales.
# 6	Riesgo de incremento de la eutrofización y/o deterioro de la calidad del agua.
# 7	Riesgo de subsidencia en el terreno que afecte a edificios e infraestructuras por la menor recarga de acuíferos.
# 8	Riesgo de mayor colmatación de embalses.
# 9	Riesgo de impactos en piscifactorías de agua dulce.
<i>Ecosistemas terrestres</i>	
# 10	Riesgo de aumento de la superficie de zonas áridas y semiáridas por desertificación.
# 11	Riesgo de degradación y pérdida de suelo por el incremento de la erosión, disminución de la materia orgánica y cambios/empobrecimiento de biodiversidad en las comunidades edáficas.
# 12	Riesgo de incremento de incendios forestales por causas naturales y no naturales por incremento/acumulación de combustible y condiciones más favorables para la ignición.
# 13	Riesgo de disminución de la productividad e incremento de la mortandad de especies arbóreas en los bosques por los cambios de variables climáticas (precipitación y temperatura) y el incremento de la incidencia de plagas y enfermedades.
# 14	Riesgo de disminución o fragmentación de los hábitats de algunas especies vegetales, altitudinales y longitudinales (bosques, ecosistemas de montaña, etc.).
# 15	Riesgo de disminución de la biodiversidad, incluyendo desaparición de especies endémicas, cambios en las migraciones de aves.
# 16	Riesgo de entrada y expansión de especies exóticas e invasivas en los ecosistemas terrestres y de agua dulce.
# 17	Riesgos derivados de los cambios en la fenología de las especies vegetales (aparición de hojas y fructificación) y que pueden provocar el desacoplamiento entre los ciclos biológicos de especies interdependientes incluyendo especies animales.
<i>Agricultura y ganadería</i>	
# 18	Riesgo del incremento de las afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.
# 19	Riesgo de pérdida de las zonas óptimas para la producción agrícola de cultivos por cambios en la precipitación y temperatura.

⁴⁵ “The potential for consequences where something of value is at stake and where the outcome is uncertain” (Adaptation Sub-Comitee, 2017)

Nº	Riesgos identificados
# 20	Riesgo de disminución del rendimiento de especies herbáceas, en especial de regadío por limitaciones en el riego.
# 21	Riesgo de pérdida de la calidad de los productos agrarios (por ejemplo, pérdida de la calidad del vino por aumento de la temperatura).
# 22	Riesgo de pérdida de competitividad en el mercado de los productos de estación temprana por subida de temperatura invernal en otros lugares.
# 23	Riesgo de pérdidas de producción ganadera, bienestar animal e incluso mortalidad por subida de temperatura, por olas de calor y descenso de precipitaciones.
# 24	Riesgo de sobreexplotación de pastos por disminución de la producción de hierba asociada al ascenso de las temperaturas estivales y bajada en las precipitaciones.
# 25	Riesgo de incremento de la mortalidad de abejas por aumento de fenómenos extremos que puede derivar en un decaimiento de los servicios de polinización (p.ej. resultando en pérdidas de producción agrícola).
# 26	Riesgo de aumento de plagas, patógenos y cambios en la distribución de vectores, incluidos los de zoonosis.
# 27	Riesgo de abandono de sistemas pastoreados por fallos en la viabilidad derivados de subidas de precios de otros cultivos.
# 28	Riesgo de pérdida de explotaciones por pérdidas de producción y aumento de precio de insumos.
<i>Medio Marino</i>	
# 29	Riesgo para el equilibrio ecológico de los hábitats y comunidades marinas por el aumento de la temperatura media del agua en todas sus capas y el efecto de la acidificación y la pérdida de oxígeno, que seguirá causando desplazamientos biogeográficos de especies, nuevas interacciones entre especies y pérdidas de hábitats, en las tres demarcaciones marinas españolas: Atlántico, Mediterráneo y Canarias.
# 30	Riesgo para la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos de los océanos, alterando recursos marinos importantes para los servicios de provisión, regulación y culturales debido a los cambios en distribución, abundancia y fenología de especies marinas en las tres demarcaciones.
# 31	Riesgo de disminución de la productividad marina, de las capturas máximas potenciales y de la pesca debido a la estratificación de aguas superficiales y los cambios biofísicos en los océanos.
# 32	Riesgos en el funcionamiento de los ecosistemas marinos, en la actividad pesquera y en la acuicultura por un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos en el mar (oleaje, temporal, intrusión del nivel del mar), afectando a la flota artesanal, industrial y a las instalaciones de acuicultura.
# 33	Riesgos en la estabilidad de los ecosistemas marinos y en las especies importantes para la pesca por aumento de olas de calor en todas las demarcaciones, y con riesgo más elevado en el Mediterráneo donde se han producido mortalidades masivas de organismos (gorgonias, esponjas, moluscos).
# 34	Riesgo de especies nuevas y/o invasoras que puedan integrarse en la actividad pesquera nacional, el consumo y los mercados, creando nuevas oportunidades, pero causando posible impacto ecológico.
# 35	Riesgo para la acuicultura por aumento de episodios de fitoplancton tóxico, cambios en el crecimiento y fenología debidos al aumento de temperatura, al aumento de intensidad y frecuencia de eventos extremos y a la acidificación.
# 36	Riesgo de pérdida de valor histórico, cultural e identitario asociados a la pesca artesanal y el marisqueo, que están siendo afectadas por el cambio climático.
# 37	Riesgo para la pesca industrial por el desplazamiento de stocks de especies objetivo a aguas en las que no hay establecidos acuerdos de acceso o cuotas, y por una gestión no adaptativa.
<i>Costas</i>	
# 38	Riesgo de pérdida de ecosistemas costeros, playas, dunas y humedales por la subida del mar, con el consecuente retroceso de la línea de costa y erosión. En cuanto a los sistemas sumergidos, como las praderas de posidonia, el principal riesgo proviene del aumento de temperatura.
# 39	Riesgo de pérdida de cuota de mercado en el sector turismo en las zonas de costa debido a la exposición fenómenos extremos y disminución de confort térmico, incluyendo también con los que tienen que ver con la degradación ambiental, como la erosión y retroceso de playas.
# 40	Riesgos para la agricultura en zonas costeras debido a inundación e intrusión salina.

Nº	Riesgos identificados
# 41	Riesgo en las viviendas, infraestructuras y servicios en las zonas urbanas, asociados especialmente a la subida del nivel del mar y los eventos extremos costeros, aunque también se debe considerar el riesgo de intrusión salina en ríos y acuíferos o la subida del nivel freático. Estos riesgos también pueden afectar a elementos del patrimonio histórico y cultural ubicado en el litoral
# 42	Las infraestructuras industriales, energéticas y de transporte localizadas en la costa deberán hacer frente a los mismos riesgos que los asentamientos urbanos (inundaciones costeras por aumento del nivel del mar y eventos meteorológicos extremos, erosión, intrusión salina)
<i>Medio urbano</i>	
# 43	Riesgos de inundación y daños por deslizamientos y erosión en edificaciones y redes de infraestructura urbana (principalmente de saneamiento, drenaje y transporte) y otros elementos constructivos
# 44	Riesgo de desabastecimiento en servicios especialmente de agua y energía
# 45	Riesgo de deterioro y aumento de los costes de mantenimiento de la infraestructura verde en el medio urbano, incluyendo incendios forestales.
# 46	Riesgo de pérdida de funcionalidad paisajística, recreativa y educativa de las áreas verdes en el tejido urbano
# 47	Riesgo de pérdida y deterioro de confort y habitabilidad en viviendas y/o adopción de soluciones de mala adaptación.
# 48	Riesgo de pérdida de valores culturales e identitarios y cambios en las relaciones sociales.
# 49	Riesgo de estrés térmico y reducción del confort térmico en el espacio público.
# 50	Riesgo de deterioro y deformaciones por cambios de temperatura en elementos y materiales de construcción y mobiliario urbano.
# 51	Riesgo de pérdida o alteraciones en la actividad económica urbana, debido a interrupciones en el transporte y cambios en la demanda.
# 52	Riesgo de pérdida de primas de seguros, cambios en la contratación y afectaciones a servicios urbanos.
<i>Salud humana</i>	
# 53	Riesgo para la salud relacionado con el estrés por calor (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía envejecida, infantil, o con enfermedades preexistentes.
# 54	Riesgo de falta de abastecimiento y calidad de agua insuficiente para consumo doméstico y en sectores agrícola, industrial y servicios.
# 55	Daños personales por desbordamientos e inundaciones, temporales de viento y otros eventos extremos.
# 56	Riesgo de aumento de enfermedades zoonóticas/vectoriales transmitidas por mosquitos (p. ej. dengue, fiebre amarilla, fiebre del Nilo y fiebre del Zika).
# 57	Riesgo de aumento de enfermedades infecciosas transmitidas por agua y alimentos.
# 58	Riesgo de incremento de la duración y gravedad de las enfermedades alérgicas asociadas al polen como el asma, la rinitis, las conjuntivitis alérgicas o alguna dermatitis.
# 59	Riesgo de incremento de enfermedades asociadas al empeoramiento de la calidad del aire.
# 60	Riesgo de aumento o agravamiento de problemas de salud mental.
<i>Energía</i>	
# 61	Riesgo de reducción en la producción de energía hidroeléctrica debida a los cambios de precipitación y temperatura.
# 62	Riesgo de reducción del disponible hidráulico para centrales que emplean el agua como refrigerante
# 63	Aumento del consumo energético o modificación de la dinámica de la demanda (picos y medias).
# 64	Riesgo de daños a las infraestructuras energéticas por inundaciones costeras.
# 65	Riesgo de afectación de las redes de suministro eléctrico debidas a eventos meteorológicos extremos
<i>Transporte</i>	
# 66	Riesgo de disminución de la operatividad de los puertos por el aumento de la frecuencia de rebase, fallos y roturas de diques, subida del nivel freático de los muelles como consecuencia de la mayor exposición y debido a la subida del nivel del mar.
# 67	Riesgo de daños y erosión en taludes, firmes de carretera y puentes por el aumento de la frecuencia de eventos extremos.

Nº	Riesgos identificados
# 68	Riesgo de daños en la infraestructura ferroviaria (sobre tensión de las catenarias por tormentas eléctricas, en las vías por subida de la temperatura, saturación de sistemas de drenaje, erosión de taludes y deslizamientos).
# 69	Riesgo de interrupción del tráfico ferroviario por caídas de objetos en las vías e impacto en las pantallas acústicas debido al incremento de las rachas de viento, en particular para las líneas de alta velocidad.
# 70	Riesgo de disminución de operatividad de los aeropuertos por aumento de nieblas y viento, incendios en las operaciones de repostaje, dificultad de despegue de aviones pesados y saturación de los sistemas de drenaje por el aumento de eventos extremos.
<i>Turismo</i>	
# 71	Riesgo de reducción de la estancia media en temporada alta en zonas de turismo de sol y playa, por olas de calor y eventos extremos.
# 72	Riesgo de disminución del turismo por la desaparición o degradación de recursos turísticos (playas, parajes naturales, etc.).
# 73	Riesgo de reducción e incluso desaparición del turismo de nieve.

La lista de riesgos que se recogen en la tabla 11.1 puede considerarse un primer paso, que puede ayudar a diseñar nuevos estudios y a tomar algunas decisiones sobre las prioridades de adaptación en algunos sectores, así como establecer un diálogo con los actores en los diferentes ámbitos. Así, se podría llevar a una revisión y mejora de las mismas, además de la inclusión de riesgos sobre los que no se tienen evidencias todavía. Asimismo, estudios más detallados podrían ayudar a recabar más información sobre sectores que no se han tratado, tales como la identificación de riesgos para la seguridad nacional, para el sistema de seguros, las interrupciones en la producción y comercialización de materias primas y en los productos elaborados (sector industrial), entre otros; y profundizar más en las interrelaciones entre los diferentes sectores.

Hay algunos aspectos importantes a tener en cuenta a la hora de considerar los riesgos, los factores intensificadores, los efectos en cascada y las incertidumbres asociadas a los riesgos. La existencia de varios condicionantes climáticos adversos al mismo tiempo es considerada en todos los casos como un factor intensificador de los impactos del cambio climático (Forzieri et al., 2016). Así, por ejemplo, la disminución de las precipitaciones es un factor que agrava el efecto del aumento de las temperaturas en múltiples impactos, como el empeoramiento de la calidad del aire, el debilitamiento de la vegetación y aumento de peligro de plagas, enfermedades o incendios, etc. La incertidumbre ante el riesgo climático es esencial a la hora de evaluar los impactos del cambio climático y se expresa normalmente como probabilidad asociada a diferentes escenarios de impactos, aunque la incertidumbre puede tener diferentes orígenes, aparte de la falta de datos o de precisión de los modelos, como la ambigüedad en el uso de los conceptos, y la propia complejidad de los sistemas, que nos dificulta conocer los efectos precisos de cada acción sobre el sistema (Markandya, 2014), en este caso, los impactos.

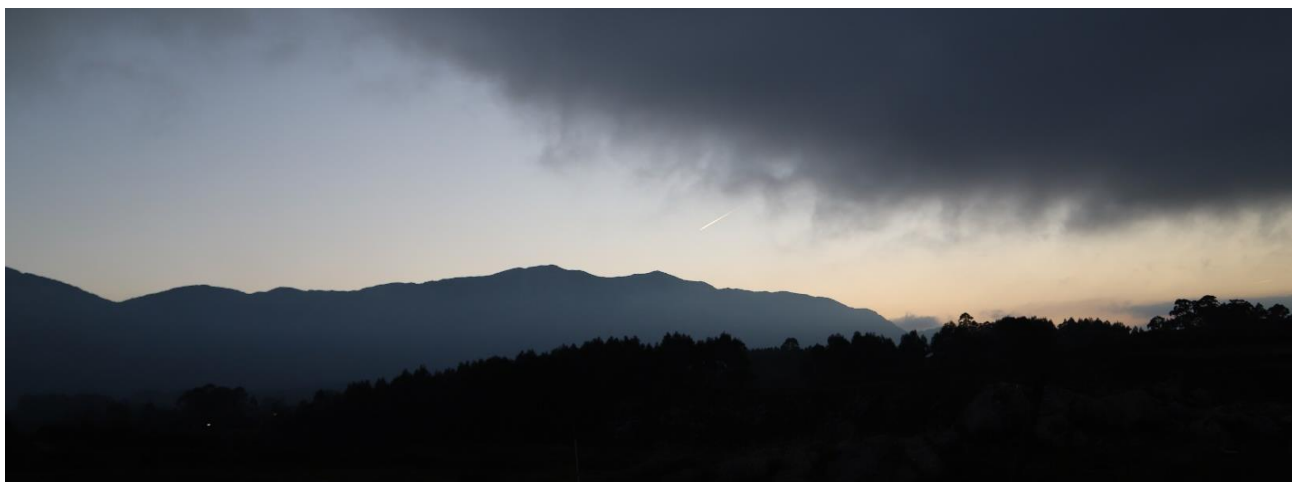
Por último, es importante tener en cuenta que el cambio climático exacerbará muchos de los problemas actuales, ya que determinados grupos sociales se verán especialmente afectados debido a su menor capacidad de preparación, afrontamiento y recuperación ante los impactos. Esto incrementará las desigualdades actuales originadas por la pobreza, acceso a recursos y servicios y la calidad ambiental que afectan a grupos marginales y minorías normalmente concentradas en el espacio (Reckien et al., 2017; Shi et al., 2016), como es el caso de las ciudades más grandes. Hay por tanto que prestar atención a los impactos distributivos derivados de los planes de actuación (cuánto riesgo reducen y en qué horizonte temporal, qué costos tienen y a qué grupos benefician más). Es fundamental, por tanto, facilitar la participación a través de dinámicas iterativas para caracterizar los impactos y comunicar las evaluaciones de riesgos climáticos realizadas con las partes interesadas, de forma que se retroalimente el proceso y se prioricen resultados beneficiosos para los grupos más desfavorecidos y vulnerables (Anguelovski et al., 2016).

3. PRIORIZACIÓN DE LOS RIESGOS IDENTIFICADOS ENTRE LOS SECTORES

La priorización de las medidas de actuación depende, en general, del nivel de riesgo climático al que están expuestos los sectores en los que se pretende actuar, de la oportunidad que se presente (por ejemplo, al planificar una nueva infraestructura) y, por otra parte, de los impactos climáticos indirectos en diferentes sectores y de los vínculos (co-beneficios o dependencias) entre opciones de adaptación (Dawson, 2015; Hunt and Watkiss, 2010). El papel de estas conexiones puede resultar significativo, de ahí que su evaluación (cuantitativa o cualitativa) sea relevante y en muchos casos crítica para la toma de decisiones.

Teniendo en cuenta las limitaciones descritas anteriormente, y basándonos en la información recopilada sobre los impactos del cambio climático hasta el momento y los esperados en el futuro, junto con la información sobre vulnerabilidad y medidas de adaptación identificadas en algunos casos a partir de los estudios disponibles en los anteriores capítulos, la tabla 11.2 pretende hacer una síntesis en clave de urgencia. Se entiende urgencia como el nivel de prioridad para el abordaje de cada riesgo en el momento actual.

Basándonos en la aproximación utilizada en otros estudios (UK, 2017) se han definido dos categorías de urgencia (más urgente y menos urgente). En la figura 11.1 se describe cómo se atribuye la categoría de urgencia a cada uno de los riesgos. Esta recomendación se basa en las necesidades de acciones de monitorización, los déficits de investigación y la necesidad de implementación de medidas de adaptación ya planificadas o nuevas medidas detectadas en el proceso de elaboración de este informe, dentro de las limitaciones de la información de la que se ha dispuesto y la limitación temporal.



Autora: M.J. Sanz

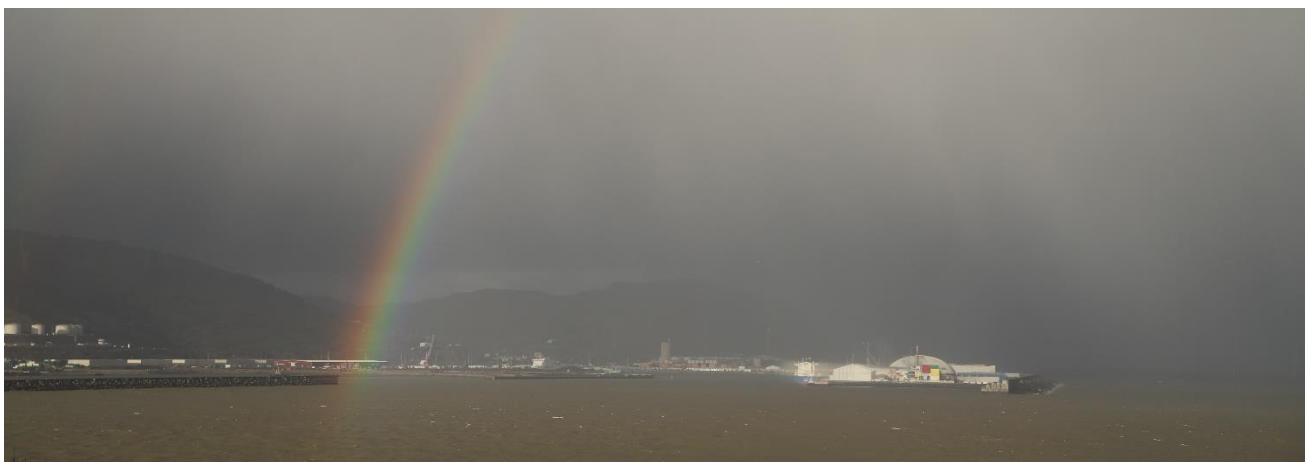
Esta valoración se presenta en la tabla incluida en el Anexo III, donde se justifica la valoración según el juicio de los autores de acuerdo a la atribución de la figura 11.1., y se debe considerar preliminar e indicativa. Debería servir para lanzar un proceso de valoración más profundo y sistemático del riesgo y de la urgencia y prioridad de las acciones de adaptación en el contexto del nuevo PNACC que facilite su implementación.

En cuanto a los riesgos más urgentes, es en las ciudades en las que se ha encontrado una necesidad de actuaciones urgentes en los sectores de recursos hídricos, costas y producción de energía. Aunque no estén recogidas en el informe como capítulo aparte, se entiende que las poblaciones rurales se verán afectadas por riesgos similares a las poblaciones urbanas, sobre todo en lo referente a servicios, abastecimientos e infraestructuras. Además, el riesgo de debilitamiento del sector agrario en general, y la pérdida de explotaciones en particular, afectan negativamente al tejido socioeconómico del medio rural aumentando la despoblación. Todas estas apreciaciones son preliminares y requerían un análisis más profundo.

Categoría/prioridad	Necesidad	Elementos para la justificación de la asignación de la categoría
MENOS URGENTE	Continuar monitoreando el riesgo	Sería deseable monitorizar en el futuro la aparición y evolución de los impactos y el nivel de riesgo asociados para decidir si es necesario tomar nuevas medidas.
	Continuar las acciones iniciadas	Las actividades en curso o planeadas parecen apropiadas, pero deben mantenerse, incluyendo planes de incrementar o cambiar lo las actividades ya en curso.
MÁS URGENTE	Prioridad de investigación	Sería necesario acumular más evidencias científicas o reducir el grado de incertidumbre de las evidencias que ya se tienen para poder evaluar la necesidad de nuevas actuaciones
	Más acción necesaria a corto plazo	Sería necesario un mayor énfasis en este riesgo y medidas adicionales a las ya planeadas.

Figura 11.1. Descripción de las categorías de urgencia y bases para su atribución a cada uno de los riesgos identificados en la tabla 11.1.

Dado que los riesgos identificados en cada uno de los sectores pueden afectar a otros sectores, en el Anexo III se indican qué otros sectores pueden estar relacionados con un riesgo en particular. Esto es importante a la hora de optimizar los recursos necesarios para la implementación y la reducción del riesgo. Así, en el capítulo 9 se presentan las interrelaciones del sector energía y otros sectores relacionados como el sector forestal (por el interés del uso de la biomasa como fuente de energía renovable), costas (por la existencia de plantas generadoras de energía en zonas costeras vulnerables), los recursos hídricos (por la importancia de la energía hidroeléctrica como fuente de energía renovable). Estos análisis deberían realizarse en profundidad para todos los sectores.



Autora: M.J. Sanz

URGENTE

1	Riesgo de reducción de los caudales de los ríos o de cambios en sus patrones estacionales
2	Riesgo de cambio de distribución y biodiversidad de las comunidades acuáticas en masas de agua dulce.
3	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos para uso doméstico y en el sector servicios.
4	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos, por incremento la intensidad y frecuencia de las sequías, para usos agrícolas e industriales.
5	Riesgo de incremento de inundaciones fluviales y pluviales.
6	Riesgo de incremento de la eutrofización y/o deterioro de la calidad del agua.
10	Riesgo de aumento de la superficie de zonas áridas y semiáridas por desertificación.
11	Riesgo de degradación y pérdida de suelo por el incremento de la erosión, disminución de la materia orgánica y cambios/empobrecimiento de biodiversidad en las comunidades edáficas.
12	Riesgo de incremento de incendios forestales por causas naturales y no naturales por incremento/acumulación de combustible y condiciones más favorables para la ignición.
17	Riesgos derivados de los cambios en la fenología de las especies vegetales (aparición de hojas y fructificación) y que pueden provocar el desacoplamiento entre los ciclos biológicos de especies interdependientes incluyendo especies animales.
18	Riesgo del incremento de las afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.
20	Riesgo de disminución del rendimiento de especies herbáceas, en especial de regadío, por limitaciones en el riego.
28	Riesgo de pérdida de explotaciones por pérdidas de producción y aumento de precio de insumos.
29	Riesgo para el equilibrio ecológico de los hábitats y comunidades marinas por el aumento de la temperatura media del agua en todas sus capas y el efecto de la acidificación y la pérdida de oxígeno, que segura causando desplazamientos biogeográficos de especies, nuevas interacciones entre especies y pérdidas de hábitats, en las tres demarcaciones marinas españolas: Atlántico, Mediterráneo y Canarias.
33	Riesgos en la estabilidad de los ecosistemas marinos y en las especies importantes para la pesca por aumento de olas de calor en todas las demarcaciones, y con riesgo más elevado en el Mediterráneo donde se han producido mortalidades masivas de organismos (gorgonias, esponjas, moluscos).
37	Riesgo para la pesca industrial por el desplazamiento de stocks de especies objetivo a aguas en las que no hay establecidos acuerdos de acceso o cuotas, y por una gestión no adaptativa.
41	Riesgo en las viviendas, infraestructuras y servicios en las zonas urbanas, asociados especialmente a la subida del nivel del mar y los eventos extremos costeros, aunque también se debe considerar el riesgo de intrusión salina en ríos y acuíferos o la subida del nivel freático. Estos riesgos también pueden afectar a elementos del patrimonio histórico y cultural ubicado en el litoral
42	Las infraestructuras industriales, energéticas y de transporte localizadas en la costa deberán hacer frente a los mismos riesgos que los asentamientos urbanos (inundaciones costeras por aumento del nivel del mar y eventos meteorológicos extremos, erosión, intrusión salina)
43	Riesgos de inundación y daños por deslizamientos y erosión en edificaciones y redes de infraestructura urbana (principalmente de saneamiento, drenaje y transporte) y otros elementos constructivos
44	Riesgo de desabastecimiento en servicios especialmente de agua y energía
45	Riesgo de deterioro y aumento de los costes de mantenimiento de la infraestructura verde en el medio urbano, incluyendo incendios forestales.
47	Riesgo de pérdida y deterioro de confort y habitabilidad en viviendas y/o adopción de soluciones de mala adaptación
49	Riesgo de estrés térmico y reducción del confort térmico en el espacio público.
50	Riesgo de deterioro y deformaciones por cambios de temperatura en elementos y materiales de construcción y mobiliario urbano.
52	Riesgo de pérdida de primas de seguros, cambios en la contratación y afectaciones a servicios urbanos.
53	Riesgo para la salud relacionado con el estrés por calor (aumento de la mortalidad y la morbilidad), sobre todo en la ciudadanía envejecida, infantil, o con enfermedades preexistentes.
55	Daños personales por desbordamientos e inundaciones, temporales de viento y otros eventos extremos.
56	Riesgo de aumento de enfermedades zoonóticas/vectoriales transmitidas por mosquitos (p. ej. dengue, fiebre amarilla, fiebre del Nilo y fiebre del Zika).
59	Riesgo de incremento de enfermedades asociadas a el empeoramiento de la calidad del aire.
61	Riesgo de reducción en la producción de energía hidroeléctrica debida a los cambios de precipitación y temperatura.
64	Riesgo de daños a las infraestructuras energéticas por inundaciones costeras.
66	Riesgo de disminución de la operatividad de los puertos por el aumento de la frecuencia de rebase, fallos y roturas de diques, subida del nivel freático de los muelles como consecuencia de la mayor exposición y debido a la subida del nivel del mar.
67	Riesgo de daños y erosión en taludes, firmes de carretera y puentes por el aumento de la frecuencia de eventos extremos.
73	Riesgo de reducción e incluso desaparición del turismo de nieve.

R. hídricos	M. marino	Salud	Turismo
E. terrestres	Costas	Energía	
Agríc. Y ganad.	A. urbanas	Transporte	SECTORES

Figura 11.2. Categorías de urgencia (más urgente, menos urgente) asignadas a los riesgos identificados en la tabla 11.1.

MENOS URGENTE

7	Riesgo de subsistencia en el terreno que afecte a edificios e infraestructuras por la menor recarga de acuíferos.
8	Riesgo de mayor contaminación de embalses.
9	Riesgo de impactos en piscifactorías de agua dulce.
10	Riesgo de disminución de la productividad e incremento de la mortandad de especies arbóreas en los bosques por los cambios de variables climáticas (precipitación y temperatura) y el incremento de la incidencia de plagas y enfermedades.
11	Riesgo de disminución o fragmentación de los hábitats de algunas especies vegetales, altitudinales y longitudinales (bosques, ecosistemas de montaña, etc.).
12	Riesgo de disminución de la biodiversidad, incluyendo desaparición de especies endémicas, cambios en las migraciones de aves.
13	Riesgo de entrada y expansión de especies exóticas e invasivas en los ecosistemas terrestres y de agua dulce.
14	Riesgo de pérdida de las zonas óptimas para la producción agrícola de cultivos por cambios en la precipitación y temperatura.
15	Riesgo de pérdida de la calidad de los productos agrarios (por ejemplo, pérdida de la calidad del vino por aumento de la temperatura).
16	Riesgo de pérdida de competitividad en el mercado de los productos de estación temprana por subida de temperatura invernal en otros lugares.
17	Riesgo de pérdidas de producción ganadera, bienestar animal e incluso mortalidad por subida de temperatura, olas de calor y descenso de precipitaciones.
18	Riesgo de sobreexplotación de pastos por disminución de la producción de hierba asociada al ascenso de las temperaturas estivales y bajada en las precipitaciones.
19	Riesgo de incremento de la mortalidad de abejas por aumento de fenómenos extremos que puede derivar en un decaimiento de los servicios de polinización (p.ej. resultando en pérdidas de producción agrícola).
20	Riesgo de aumento de plagas, patógenos y cambios en la distribución de vectores, incluidos los de zoonosis.
21	Riesgo de abandono de sistemas pastoreados por fallos en la viabilidad derivados de subidas de precios de otros cultivos.
22	Riesgo para la capacidad de provisión de servicios ecosistémicos de los océanos, alterando recursos marinos importantes para los servicios de provisión, regulación y culturales debido a los cambios en distribución, abundancia y fenología de especies marinas en las tres demarcaciones.
23	Riesgo de disminución de la productividad marina, de las capturas máximas potenciales y de la pesca debido a la estratificación de aguas superficiales y los cambios biofísicos en los océanos.
24	Riesgos en el funcionamiento de los ecosistemas marinos, en la actividad pesquera y en la acuicultura por un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos en el mar (oleaje, temporal, intrusión del nivel del mar), afectando a la flota artesanal, industrial y a las instalaciones de acuicultura.
25	Riesgo de especies nuevas y/o invasoras que puedan integrarse en la actividad pesquera nacional, el consumo y los mercados, creando nuevas oportunidades, pero causando posible impacto ecológico.
26	Riesgo para la acuicultura por aumento de episodios de fitoplancton tóxico, cambios en el crecimiento y fenología debidos al aumento de temperatura, al aumento de intensidad y frecuencia de eventos extremos y a la acidificación.
27	Riesgo de pérdida de valor histórico, cultural e identitario asociados a la pesca artesanal y el marisqueo, que están siendo afectadas por el cambio climático.
28	Riesgo de pérdida de ecosistemas costeros: playas, dunas y humedales por la subida del mar, con el consecuente retroceso de la línea de costa y erosión. En cuanto a los sistemas sumergidos, como las praderas de posidonia, el principal riesgo proviene del aumento de temperatura.
29	Riesgo de pérdida de cuota de mercado en el sector turismo en las zonas de costa debido a la exposición fenómenos extremos y disminución de confort térmico, incluyendo también con los que tienen que ver con la degradación ambiental, como la erosión y retroceso de playas.
30	Riesgos para la agricultura en zonas costeras debido a inundación e intrusión salina.
31	Riesgo de pérdida de funcionalidad paisajística, recreativa y educativa de las áreas verdes en el tejido urbano
32	Riesgo de pérdida de valores culturales e identitarios y cambios en las relaciones sociales.
33	Riesgo de pérdida o alteraciones en la actividad económica urbana, debido a interrupciones en el transporte y cambios en la demanda.
34	Riesgo de falta de abastecimiento y calidad de agua insuficiente para consumo doméstico y en sectores agrícola, industrial y servicios.
35	Riesgo de aumento de enfermedades infecciosas transmitidas por agua y alimentos.
36	Riesgo de incremento de la duración y gravedad de las enfermedades alérgicas asociadas al polen como el asma, la rinitis, las conjuntivitis alérgicas o alguna dermatitis.
37	Riesgo de aumento o agravamiento de problemas de salud mental.
38	Riesgo de reducción del disponible hidráulico para centrales que emplean el agua como refrigerante
39	Aumento del consumo energético o modificación de la dinámica de la demanda (picos y medias).
40	Riesgo de afectación de las redes de suministro eléctrico debidas a eventos meteorológicos extremos (activación de incendios forestales).
41	Riesgo de daños en la infraestructura ferroviaria (sobre tensión de las catenarias por tormentas eléctricas, en las vías por subida de la temperatura, saturación de sistemas de drenaje y deslizamientos)
42	Riesgo de interrupción del tráfico ferroviario por caídas de objetos en las vías e impacto en las pantallas acústicas debido al incremento de las rachas de viento, en particular para las líneas de alta velocidad.
43	Riesgo de disminución de operatividad de los aeropuertos por aumento de nieblas y viento, incendios en las operaciones de repostaje, dificultad de despegue de aviones pesados y saturación de los sistemas de drenaje por el aumento de eventos extremos.
44	Riesgo de reducción de la estancia media en temporada alta en zonas de turismo de sol y playa, por olas de calor y eventos extremos.
45	Riesgo de disminución del turismo por la desaparición o degradación de recursos turísticos (playas, parajes naturales, etc.).

Figura 11.2. (cont.) Categorías de urgencia (más urgente, menos urgente) asignadas a los riesgos identificados en la tabla 11.1.

4. REFERENCIAS

- Anguelovski, I., Shi, L., Chu, E., Gallagher, D., Goh, K., Lamb, Z., Reeve, K., Teicher, H., 2016. Equity Impacts of Urban Land Use Planning for Climate Adaptation: Critical Perspectives from the Global North and South. *Journal of Planning Education and Research* 36, 333–348. <https://doi.org/10.1177/0739456X16645166>
- Dawson, R.J., 2015. Handling Interdependencies in Climate Change Risk Assessment. *Climate* 3, 1079–1096. <https://doi.org/10.3390/cli3041079>
- Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voudoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R., Cid, A., 2016. Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change* 137, 105–119. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1661-x>
- Hunt, A., Watkiss, P., 2010. Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature. *Climatic Change* 104, 13–49. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9975-6>
- IPCC, 2018. Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].
- Markandya, A., 2014. Incorporating Climate Change into Adaptation Programmes and Project Appraisal: Strategies for uncertainty, in: Markandya, A., Galarraga, I., Sainz de Murieta, E. (Eds.), *Routledge Handbook of the Economics of Climate Change Adaptation*. Routledge, pp. 97–119.
- Reckien, D., Creutzig, F., Fernandez, B., Lwasa, S., Tovar-Restrepo, M., Mcevoy, D., Satterthwaite, D., 2017. Climate change, equity and the Sustainable Development Goals: an urban perspective. *Environment and Urbanization* 29, 159–182. <https://doi.org/10.1177/0956247816677778>
- Shi, L., Chu, E., Anguelovski, I., Aylett, A., Debats, J., Goh, K., Schenk, T., Seto, K.C., Dodman, D., Roberts, D., Roberts, J.T., VanDeveer, S.D., 2016. Roadmap towards justice in urban climate adaptation research. *Nature Climate Change* 6, 131–137. <https://doi.org/10.1038/nclimate2841>
- UK, 2017. UK Climate Change Risk Assessment 2017 Evidence Report. Committee on Climate Change. [Disponible en <https://www.theccc.org.uk/tackling-climate-change/preparing-for-climate-change/uk-climate-change-risk-assessment-2017/>]

Capítulo 12

Conclusiones

El presente Informe presenta un análisis y síntesis de los impactos observados y futuros en diversos sectores socioeconómicos y sistemas naturales prioritarios para las políticas de adaptación al cambio climático en España. Este análisis se ha basado en la información disponible hasta la fecha, en su gran mayoría incluida en la plataforma AdapteCCa, y algunos estudios en publicaciones científicas. Asimismo, se han identificado una serie de riesgos a partir de la información existente sobre los impactos del cambio climático, que debe considerarse preliminar y como un primer paso que puede ayudar a diseñar futuros estudios y tomar algunas decisiones sobre las prioridades en algunos sectores. Las conclusiones generales extraídas se incluyen a continuación.

Escenarios de cambio climático

En los últimos escenarios de cambio climático elaborados para España por AEMET se proyectan aumentos en la escala anual de las temperaturas máximas de entre 2 °C y 6,4 °C hacia finales de siglo (dependiendo del RCP utilizado), más acusados en verano, y con incrementos mayores en el interior y menores en el norte y noroeste peninsular. Se espera un aumento con la misma tendencia para las temperaturas mínimas, aunque menos acusado que para las máximas, y una disminución del número anual de días de helada. Asimismo, se espera un incremento de los días cálidos y que las olas de calor se alarguen. En lo que respecta a las precipitaciones, se espera una reducción de la media en la España peninsular para los últimos veinte años del siglo.

Asimismo, se proyectan en el futuro ligeros cambios en la velocidad del viento generalizados en toda la península, aunque inciertos, y algunos estudios indican un incremento de ciertos fenómenos extremos como los medicanes (ciclones tropicales en el mediterráneo).

Impactos del cambio climático

Las evidencias de los impactos del cambio climático y la identificación de potenciales riesgos se pueden encontrar en todos los sectores considerados.

Recursos hídricos

Los sistemas hidrogeológicos de la península y las islas han sufrido grandes cambios en las últimas décadas con ríos que se han secado; humedales que han desaparecido, dejando sus baldes convertidos en tierras de cultivo; y acuíferos intensamente explotados durante años, entre otros. La actividad humana ha causado la mayor parte de estos impactos, que pueden verse empeorados con el cambio climático, con efectos retardados en la cantidad y calidad del agua subterránea. En cuanto al impacto del cambio climático en los recursos hídricos, en general, se observa una variabilidad significativa en las previsiones de las principales variables hidrológicas según el modelo climático utilizado, pero es previsible una tendencia general de descenso de la humedad y aumento de la evapotranspiración potencial. Se espera un aumento generalizado en la intensidad y magnitud de las sequías meteorológicas e hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, debido a los efectos combinados de la reducción de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración.

Estos cambios se traducen en proyecciones de escorrentía y recarga subterránea decrecientes, y por tanto una reducción de la aportación hídrica a los ríos para todos los escenarios de cambio climático considerados. Ya se ha observado una reducción del caudal de los principales ríos de la península ibérica durante la segunda mitad del siglo XX, con una tendencia a la baja de los caudales anuales, más pronunciada en los meses de primavera e invierno. Este hecho se puede atribuir a varias causas, incluyendo los cambios en el patrón de lluvias estacionales y otros factores no climáticos importantes, como el aumento de la demanda de agua y las estrategias actuales de gestión del agua. Algunos estudios indican que los cambios en las variables climáticas explican muchas de las tendencias observadas en el noroeste de Europa, mientras que para el suroeste de Europa las perturbaciones humanas deben tenerse en cuenta para explicar mejor las tendencias temporales y espaciales.

El incremento de las temperaturas, la previsible disminución de la precipitación anual, el cambio en la estacionalidad o la intensidad de las precipitaciones, así como el aumento del nivel del mar pueden producir alteraciones en los procesos del ciclo hidrológico en su fase subterránea. Esto puede conllevar la salinización de acuíferos e intrusión salina, así como la contaminación de acuíferos por mayor número de eventos extremos que podrían aumentar la carga contaminante en los mismos.

También un cambio en el régimen nival puede afectar la recarga de acuíferos, por ejemplo, en zonas de los Pirineos y Sierra Nevada que reciben nevadas importantes. Y las mayores temperaturas podrían producir un aumento de la frecuencia e intensidad de inundaciones asociadas a episodios de deshielo más rápidos.

El aumento de la intermitencia de los flujos de agua o los cambios estacionales pueden destruir algunos hábitats. Asimismo, el aumento de la evapotranspiración potencial puede afectar a los ecosistemas asociados a las aguas subterráneas p.ej. humedales, manantiales. Los humedales han disminuido de forma significativa en el siglo pasado con una tendencia que aún continúa, y donde el cambio climático se ha convertido en una presión adicional, especialmente en regiones como la mediterránea. Muchas especies acuáticas son muy sensibles a la temperatura del agua. Así, el aumento de la temperatura media del agua y la recurrencia de olas de calor, junto con la disminución de los flujos de agua, podría terminar reduciendo los nichos actuales de muchas especies de agua dulce.

En general, incluso en los escenarios de bajas emisiones, se prevén considerables repercusiones en el ciclo hidrológico, cuya consecuencia será la disminución de la disponibilidad de agua y su calidad.

Los recursos hídricos están íntimamente relacionados con todos los sectores económicos, especialmente aquellos que son más críticos para nuestra economía. Por lo tanto, los cambios en su disponibilidad y calidad podrían generar vulnerabilidad a nivel sistémico con posibilidad de efectos de cascada y de codependencia. Es importante resaltar la vulnerabilidad del sistema por el actual uso de los recursos hídricos que está altamente regulado y con un uso muy intensivo en ciertas áreas. Esta elevada vulnerabilidad debería ser considerada para adoptar un enfoque sistémico en las respuestas de adaptación.

Desertificación y suelos

Las proyecciones sobre cambio climático en España apuntan, entre otras cosas, hacia una creciente aridez y un aumento de las temperaturas. Aun cuando no se produjeran incrementos cuantitativamente importantes de las pérdidas de suelo, el incremento previsto de la aridez apunta a un aumento del riesgo de **desertificación**. Además, España es uno de los tres países de la Unión Europea con mayor riesgo de incendios.

En lo que respecta a los **suelos**, la disminución de la precipitación media o el aumento de fenómenos extremos (como sequías, inundaciones o fuego, entre otros) pueden provocar un incremento peligroso de la erosión sobre todo en aquellos suelos sujetos a alta intensidad de manejo (p. ej. matarrasas, agricultura intensiva). Se espera una disminución de la materia orgánica en los suelos ya pobres en carbono orgánico, en particular en suelos mediterráneos. La actividad, composición y estructura de las comunidades bióticas pueden verse afectadas en general de forma negativa, provocando grandes cambios en la composición que afecten de manera sustancial a

su capacidad de proveer los nutrientes y los servicios que mejoren la recuperación del estrato vegetal. Sin embargo, pueden observarse efectos positivos de forma puntual, porque estas condiciones favorecen suelos dominados por especies fúngicas, cuya naturaleza química estimula la hidrofobicidad. Los ciclos del N y C pueden verse alterados. Se ha visto que la presencia de costras biológicas en los suelos semiáridos y áridos los hacen más resilientes, aunque el incremento de temperatura puede inducir a la reducción de las mismas.

Ecosistemas terrestres

El funcionamiento de los **ecosistemas terrestres** y sus componentes se verá afectado de diversas formas. En las especies forestales se han observado ya cambios fenológicos, el aumento o desplazamiento del periodo de permanencia de la hoja en especies caducifolias y cambios en los periodos de floración y fructificación. Estas alteraciones pueden llevar a cambios de comportamiento en las especies migratorias, muchas aves migratorias ya están adelantado su llegada a la Península, o en especies locales, determinados insectos adelantando la emergencia de los adultos.

En algunas especies forestales la defoliación se ha incrementado y el crecimiento y las tasas de mortalidad se están viendo afectadas negativamente. Estos fenómenos en muchos casos están también condicionados por la gestión de estos ecosistemas, que puede aumentar o disminuir su vulnerabilidad. Se han observado cambios de distribución de algunas especies, como la ascensión altitudinal del haya en el Montseny o el piorno serrano y el enebro en la Sierra de Guadarrama. Asimismo, se han visto alteradas las interacciones bióticas, como la distribución e intensidad de las plagas y enfermedades en las especies de coníferas (la procesionaria del pino, las plantas hemiparásitas, o las infecciones por hongos). Algunos de estos incrementos de mortandad en pinares se han relacionado con el incremento de las sequías. Es muy probable pues que la resiliencia de estos bosques pueda verse reducida en el futuro si se producen sequías recurrentes. En otros casos, se han identificado complejos fenómenos de decaimiento, en los que el cambio climático puede estar jugando un papel junto con otros factores (por ejemplo, el abandono de la gestión o la entrada de patógenos exóticos). Tal es el caso del decaimiento observado en los encinares.

Los ecosistemas de montaña y las poblaciones situadas en los límites meridionales de distribución y cotas altitudinales inferiores pueden presentar una alta vulnerabilidad, así como especies de reptiles y anfibios. Es decir, especies viviendo en ecosistemas “islas”, donde no pueden migrar, o viviendo en los márgenes de sus áreas de distribución, donde pequeños cambios climáticos pueden generar grandes impactos en la salud y capacidad de supervivencia de estas especies.

Agricultura y ganadería

Los principales impactos del cambio climático en la **agricultura y la ganadería** son los cambios fenológicos asociados al desplazamiento de las estaciones, el aumento del estrés hídrico, los daños por calor y por eventos extremos. Así, se espera un descenso en la producción tanto de cultivos herbáceos como leñosos, siendo mayor en los cultivos de secano. El efecto de la posible limitación de los recursos hídricos para los cultivos de regadío dependerá de los requerimientos de cada tipo de cultivo y de la disponibilidad de dichos recursos en cada región. Ya hay evidencias constatadas del cambio fenológico en algunas especies frutales de hueso y en los cítricos en España debido al avance de las temperaturas primaverales y la falta de días fríos. Asimismo, los viticultores han constatado un adelanto de la fecha de maduración de la uva y se han reducido los daños por heladas. Estos cambios tienen efectos en la calidad de las cosechas o en la competitividad del cultivo de estación temprana. Se esperan afecciones a la distribución de patógenos y enfermedades zoonóticas, pues se extienden los hábitats para especies de otras latitudes. Los cambios en la fauna auxiliar y los polinizadores también pueden ser muy relevantes, incluyendo impactos en el sector apícola.

El incremento de la matorralización de las últimas décadas en los pastos de montaña supraforestales, debido a la disminución de la carga ganadera, aumenta la vulnerabilidad de estos sistemas a los incendios, que se prevén

más recurrentes debido a los efectos del cambio climático. En la ganadería intensiva se espera que los impactos más importantes sean indirectos, es decir, los derivados del incremento de los costes de agua, alimentación, alojamiento, transporte o destrucción de infraestructuras debido a eventos extremos. Por su parte, la extensiva y mixta se verán afectadas de manera directa por la limitación del acceso al agua y la exposición al estrés por calor, sobre todo en pastos donde no hay suficiente arbolado para producir sombra. Los impactos del cambio climático en los suelos son también de relevantes para este sector, dada la importancia de la calidad y salud de mismo para la producción agrícola.

Con respecto a la explotación, todos estos cambios exigirán medidas adaptativas que agravarán la vulnerabilidad de la agricultura y la ganadería españolas. Por ese motivo, es fundamental integrar las estrategias de adaptación al cambio climático con estrategias para reducir la vulnerabilidad a largo plazo, teniendo en cuenta el carácter esencialmente local del proceso adaptativo. Por ello, es necesario el estudio de los impactos a nivel regional, por tipo de cultivo y especie ganadera, así como por sistema de explotación; además de la inclusión de indicadores o evidencias del cambio. La inclusión de los mismos agricultores y ganaderos como observadores e informantes clave en combinación con observaciones científicas puede aportar una valiosa fuente de información, como se ha demostrado en algunos estudios.

Medio marino

En el **medio marino**, los impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas, así como en la pesca y acuicultura, son cada vez mejor conocidos y se deben fundamentalmente al aumento de temperatura, la acidificación y la pérdida de oxígeno. Así, se observan cambios en la distribución y abundancia de especies de flora y fauna marina, cambios fenológicos, establecimiento de especies invasoras y disminución del potencial pesquero y acuícola, principalmente. Estos cambios a nivel de especie influyen en la composición e interacciones dentro de las comunidades biológicas, y en la estructura, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas, con implicaciones para los servicios ecosistémicos marinos, la pesca y la acuicultura. Estos impactos se han venido documentando para las regiones Mediterránea, Canaria y Atlántica peninsular, con cada vez más evidencia de especies que cambian sus rangos de distribución, abundancia, presencia y migraciones. Así, los ecosistemas marinos y las comunidades humanas que dependen de ellos serán más vulnerables al cambio climático cuando además estén expuestos a otras presiones e impactos, como la contaminación, presión urbana o la sobrepesca. La magnitud acumulada de estas presiones, junto al cambio climático, están aumentando el riesgo de extinción de especies marinas a tasas sin precedentes.

Costas

El cambio climático representa una amenaza importante para las **costas** en España, aunque se trata de uno de los sectores mejor estudiados y que cuenta con su propia estrategia de adaptación. Entre los factores de cambio más importantes se encuentran el ascenso del nivel del mar, los eventos extremos, como las mareas meteorológicas, los cambios en el oleaje y los cambios en la temperatura del agua, pero también diversos factores antropogénicos, como la ocupación de la costa, que aumentan la exposición ante los riesgos climáticos. El cambio climático está agravando ya muchos de estos procesos y seguirá haciéndolo en el futuro. Como consecuencia de ello, y en ausencia de políticas de adaptación, se espera que aumenten las inundaciones costeras y la erosión, que afectarán tanto a los sistemas naturales como humanos, así como los daños materiales, ecológicos y económicos asociados.

Medio urbano

Los retos de las **ciudades** frente al cambio climático son muchos y diversos. Los núcleos urbanos concentran población e infraestructuras críticas, a la par que conocimiento y bienes sociales y culturales. Además de ser vulnerables al cambio climático por estas razones, también las ciudades están altamente expuestas y son propensas a sufrir impactos por sus características intrínsecas (p. ej. pavimentación) o por su localización en el

territorio (p. ej., a lo largo de las costas y ríos). En los planes urbanos de adaptación al cambio climático en España se identifican 7 ejes de riesgo: aumento del nivel del mar, oleaje extremo, precipitación intensa, disminución de las precipitaciones, aumento de las temperaturas, olas de calor y vendavales) y diversos sectores afectados (urbanización, ecosistemas, salud, sectores económicos, etc.) que dependen en gran medida de la zona geográfica donde se encuentren estas ciudades. Actualmente, el grado de desarrollo y detalle de las evaluaciones de riesgo y vulnerabilidad en las ciudades es bastante bajo, probablemente por la falta de recursos (humanos, económicos y de tiempo) o por la falta de capacidades (técnicas u organizativas). En mayor o menor medida, en los procesos de diagnóstico se llegan a identificar los impactos de forma cualitativa o semicuantitativa, pero en general no ofrecen una visión sobre la temporalidad o magnitud de los mismos, si bien generalmente depende de la concentración y distribución de infraestructuras, bienes y de población, así como de su proyección en el futuro.

Del presente análisis se observa la necesidad de seguir trabajando para generar conocimiento cualitativo y cuantitativo en torno a los impactos del cambio climático en las áreas urbanas, tanto en lo relativo a su magnitud como a su temporalidad y probabilidad de ocurrencia. Especial atención debe ponerse sobre los grupos más vulnerables y en las zonas dentro de la ciudad más expuestas o menos preparadas. Es importante tener en cuenta que el cambio climático exacerbará muchos de los problemas actuales en las ciudades, ya que determinados grupos sociales se verán especialmente afectados debido a su menor capacidad de preparación, respuesta y recuperación ante los impactos. Esta información es fundamental a la hora de planificar la inversión en adaptación de forma eficiente y eficaz, teniendo en cuenta los riesgos climáticos más probables, pero sin olvidar la incertidumbre, en particular de aquellos eventos menos probables pero que más daños puedan generar. Por último, aunque los impactos son generalmente reconocidos por las consecuencias negativas sobre la gestión urbana, los ecosistemas y recursos, la planificación y las infraestructuras, las actividades económicas o la población, en muchos casos también se identifican impactos con efectos positivos. Esta dualidad, por tanto, debe tenerse en cuenta a la hora de evaluar los costes y beneficios de la adaptación urbana.

Salud humana

El cambio climático en España representa una amenaza para la **salud humana**, con impactos directos e indirectos. Entre los primeros, son especialmente relevantes en España los riesgos asociados a las temperaturas excesivas y a las inundaciones, y se asocian con muertes y lesiones, morbilidad y mortalidad por causas cardiovasculares y respiratorias, estrés térmico y agravamiento de enfermedades crónicas. El cambio climático también afecta a la salud humana indirectamente a través de la sinergia con la contaminación medioambiental (aire, polen o radiaciones ultravioletas), impactando sobre los ecosistemas y sobre los sistemas sociales. Los impactos en los ecosistemas provocan cambios en la distribución geográfica y temporal de vectores, amplificados por la globalización y los viajes aéreos que contribuyen a la dispersión de patógenos y vectores de manera internacional. En España, los riesgos emergentes incluyen enfermedades transmitidas por garrapatas (p. ej. Lyme y la fiebre hemorrágica de Crimea-Congo entre otras), enfermedades transmitidas por mosquitos en regiones húmedas (p. ej. tigre asiático que transmite dengue, chikungunya y zika). Los patógenos transmitidos por los alimentos y el agua son sensibles al cambio climático, por ejemplo, por el crecimiento bacteriano mediado por la temperatura o mediante la contaminación del agua por inundaciones. Riesgos de enfermedades transmitidas por agua o alimentos incluyen la transmisión de *Cryptosporidium*, *Vibrio*, salmonela y *Campylobacter*. Además, las cianobacterias hepatotóxicas en aguas de recreo y superficiales pueden constituir un riesgo adicional para la salud pública en futuros escenarios en España. Otros impactos indirectos se manifiestan a través de los impactos del cambio climático sobre aspectos sociales, como por ejemplo la seguridad alimentaria, la capacidad laboral, el impacto sobre el sistema sanitario y el desplazamiento de la población. Hay que tener en cuenta que todos estos impactos pueden llevar asociados problemas de salud mental.

Entre los factores que agravan la vulnerabilidad frente al impacto del cambio climático en la salud se incluyen la presencia de enfermedades previas, la exclusión y desconexión social, la pobreza, los estilos de vida poco saludables y otros factores socioeconómicos y demográficos. Las áreas urbanas son particularmente sensibles por la densidad de población y alta densidad de grupos vulnerables. Existen factores de vulnerabilidad emergente, como la resistencia a antibióticos, los nuevos contaminantes emergentes en aguas y sus posibles interacciones con el cambio climático y la creciente incidencia de enfermedades generadas por el estilo de vida sedentario (estas últimas ya definidas por la OMS como una epidemia invisible). Todos estos riesgos en salud interactúan entre sí, reduciendo la resiliencia global de la población frente al cambio climático, y se prevé que impacten en la futura salud pública.

Energía

La **generación de energía** hidroeléctrica es la fuente de energía que puede verse más afectada por el cambio climático debido a la menor disponibilidad de agua. Asimismo, los eventos meteorológicos extremos pueden afectar a las infraestructuras energéticas, especialmente las situadas en las zonas costeras, y generar riesgos añadidos sobre el sistema. También existen otros riesgos relacionados con la modificación futura del potencial eólico y solar, aunque las proyecciones existentes tienen una elevada incertidumbre. Si bien el impacto más significativo del cambio climático en nuestro país vendría por el lado del nexo entre agua y energía, también existen otros riesgos relacionados con el nexo entre energía y uso de la tierra, que pueden ser más relevantes a medida que aumente el uso de la biomasa como fuente de energía en el futuro, cuyo potencial puede verse afectado por el cambio climático. Finalmente, el mix energético futuro, con una mayor presencia de energías renovables, aumenta la resiliencia del sistema, al reducir los niveles de dependencia energética, y es una medida de adaptación, ya que se reducen los efectos negativos relacionados con el consumo intensivo de agua por parte de las centrales térmicas. Sin embargo, las instalaciones que utilizan fuentes renovables también generan otros impactos indirectos, ya que competirán con otros usos del suelo.

Infraestructuras y transporte

En cuanto a **las infraestructuras y redes de transporte**, se prevén impactos negativos en las redes troncales de transporte terrestre (red vial y ferroviaria), especialmente debidos a los fenómenos climáticos extremos como las precipitaciones torrenciales; aunque también se pueden experimentar impactos positivos si disminuyen las nevadas y heladas. Se ha estimado que la magnitud del cambio de vulnerabilidad de la red estatal de transporte terrestre a 30 años a causa del cambio climático es, en promedio, inferior a la vulnerabilidad que ya tienen en la actualidad gran parte de sus secciones. Las redes portuarias y aeroportuarias también pueden verse afectadas de forma negativa, en especial por eventos extremos en las costas los primeros, y por cambios en el régimen de vientos los segundos, pudiendo aparecer también impactos positivos en este caso.

Turismo

El **sector turístico** puede verse afectado por el cambio climático tanto por los impactos en la oferta como en la demanda. La subida de las temperaturas en las provincias costeras de Mediterráneo, especialmente en el sur, puede disminuir la predisposición de los turistas a visitar estos destinos. Aunque esto también podría provocar que la temporada alta de los destinos de sol y playa españoles se desplazara fuera de los meses de julio y agosto tradicionales. La incidencia de eventos extremos en las costas puede también incidir negativamente en el turismo de playa y deportes acuáticos. El turismo relacionado con los deportes de invierno es el que se está viendo ya más afectado, especialmente en el caso de las estaciones de esquí a cotas más bajas por la falta de nieve, situación que es previsible que se agrave incluso con escenarios climáticos más moderados.

Riesgos identificados y necesidades de estudio

Hay que destacar que, en la actualidad, se dispone de mayor conocimiento que hace dos décadas sobre los impactos y las medidas de adaptación que serían necesarias en muchos de los sectores considerados. En general,

todos los sectores abordados presentan impactos que serán negativos (puntualmente podrían presentarse efectos positivos), lo que nos lleva a concluir que en todos ellos se debe tener en cuenta la necesidad de medidas de adaptación.

Se ha identificado un conjunto de **73 riesgos** a partir de la información existente sobre los impactos del cambio climático en los diferentes estudios disponibles. La lista de riesgos identificados debe considerarse preliminar y como un primer paso que puede ayudar a diseñar nuevos estudios y tomar algunas decisiones sobre las prioridades en algunos sectores. Asimismo, puede servir como base para desarrollar un diálogo con la participación de los actores en los diferentes ámbitos, lo que podría llevar a una revisión y mejora de la misma, y permitir una agregación coherente con las interrelaciones sectoriales.

Teniendo en cuenta las limitaciones descritas, y basándonos en la información recopilada sobre los impactos del cambio climático hasta el momento, se ha hecho una valoración en clave de urgencia (más urgente, menos urgente), entendiendo urgencia como la necesidad de abordaje de cada riesgo en el momento actual (necesidad de nuevas medidas o investigación relacionada con la búsqueda de nuevas medidas). Sin embargo, sería recomendable la realización de estudios más completos para abordar la adaptación en los diferentes sectores, teniendo en cuenta las interrelaciones que pueden existir entre ellos y la interacción con las medidas de mitigación que se están contemplando. Para ello, y para evitar la falta de comparabilidad de los resultados y la fragmentación del conocimiento, se deberían utilizar como base en todos los estudios sectoriales los escenarios más actualizados para España y las regionalizaciones acordes con estos. En el caso de las proyecciones de los impactos en cada uno de los sectores sería aconsejable la definición o selección de sendas compartidas (posibles visiones del futuro para alcanzar los objetivos de España), que generen series de variables climáticas y socioeconómicas que se utilicen en la evaluación de los impactos en todos los sectores. No por ello deja de ser necesario profundizar en el entendimiento de los procesos climáticos, biofísicos, económicos y sociales subyacentes que condicionan la vulnerabilidad y la respuesta al cambio climático.

Anexo I

Glosario

Acidificación: Proceso por el cual la concentración de pH en el océano disminuye globalmente debido a un incremento en la absorción de CO₂ de origen antrópico. Entre el 20% y el 30% del CO₂ antropogénico emitido desde la era pre-industrial, ha sido absorbido por el océano (IPCC, 2019). El proceso de *acidificación* incluye un conjunto de cambios químicos, el incremento de carbono inorgánico disuelto total, la presión parcial de CO₂ y la disminución de carbonato cálcico en estados de saturación (aragonito y calcita) (Kapsenberg et al., 2017).

Acuicultura: Cría de organismos acuáticos, comprendidos peces, moluscos, crustáceos y plantas. La cría supone la intervención humana para incrementar la producción; por ejemplo: concentrar poblaciones de peces, alimentarlos o protegerlos de los depredadores (FAO, 2003). La acuicultura marina se refiere a la cría de especies marinas tanto en instalaciones terrestres como en el medio marino.

Adaptación: Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos (IPCC, 2014).

Aeroalérgenos: Alérgenos más comúnmente asociados a enfermedades atópicas son los inhalados.

Afloramiento: Ascenso de masas de agua en los océanos desde niveles más profundos a niveles más superficiales, siendo esta agua más fría y rica en sales nutrientes (nitratos, fosfatos y silicatos). Estas aguas sustituyen al agua superficial, más cálida y generalmente más pobre en nutrientes, que ha sido desplazada por la acción del viento. Si éste fenómeno tiene lugar cerca de la costa se llama *afloramiento costero* y si se produce en mar abierto se conoce como *afloramiento oceánico* (IEO, 2011).

Alérgeno: Sustancia que puede inducir una reacción de hipersensibilidad (alérgica) en personas susceptibles que han estado en contacto previamente con él (Knox, 1975).

Altas hospitalarias: Documento oficial emitido por un médico de un centro hospitalario al finalizar el proceso asistencial.

Amplitud mareal: diferencia de la altura del nivel del mar entre bajamar y pleamar (Bird, 2008).

Antrópico/a: Producido o modificado por la actividad humana (RAE, 2020) (ver Factores Antropogénicos).

Bentónico: (ver Organismos Bentónicos).

Biofouling: Proceso de colonización biológica (como animales sésiles o plantas) sobre superficies mojadas (como infraestructuras de maricultura, hélices o casco de embarcaciones) que llevan a cabo una función mecánica causando deficiencias estructurales y/o funcionales (Babarro et al., 2018).

Caladeros: Zonas marítimas donde los pescadores tienden pescar por la existencia de condiciones favorables que facilitan la abundancia de pesca, es decir, existe una gran cantidad de peces.

Calcificación: Proceso biológico en el cual el calcio se acumula en el tejido corporal de determinados organismos, haciendo que dicho tejido se endurezca. Los corales, crustáceos y moluscos son organismos calcificadores marinos cuya calcificación se está viendo reducida por la acidificación del océano.

Calidad del aire: Presencia en mayor o menor medida de contaminantes en la atmósfera que puedan ser nocivos para la salud humana, para el medio ambiente en su conjunto y para otros bienes de cualquier naturaleza (AEMET, 2018).

Capa de mezcla oceánica: Es una capa donde se homogeneizan algunos rangos de profundidad debido a una turbulencia activa. Suele tener decenas de metros de profundidad y es una capa donde la temperatura, la salinidad y la densidad son bastante uniformes (Kantha y Clayson, 2002). La capa de mezcla superficial es la capa donde esta turbulencia es generada por vientos, enfriamiento, o procesos como la evaporación.

Capacidad de carga: en este caso referida a las playas, es la cantidad y tipo de visitantes que pueden alojarse dentro de un área de servicios sin consecuencias sociales inaceptables y sin un impacto negativo en los recursos (López-Dóriga et al., 2019).

Cardiopatías: Tipo de enfermedad que afecta el corazón o los vasos sanguíneos.

Co-gestión o gestión colaborativa: se refiere típicamente a la co-gestión de recursos comunes, como pueden ser las pesquerías o los bosques. Estos recursos compartidos son de interés colectivo por lo que el poder y la responsabilidad sobre los mismos se reparte entre el estado y una comunidad de usuarios del recurso, generalmente a nivel local (Carlsson y Berkes, 2005).

Criosfera: se refiere a todas las regiones situadas encima y debajo de la superficie terrestre y oceánica en las que el agua se halla en estado sólido, como en los hielos marinos, los hielos lacustres, los hielos fluviales, la capa de nieve, los glaciares y los mantos de hielo, así como el terreno congelado (incluido el permafrost) (IPCC, 2013).

Diapausa: estado fisiológico de inactividad. Es una estrategia común en insectos para sobrevivir en condiciones ambientales desfavorables y predecibles, como temperaturas extremas, sequía o carencia de alimento. En climas templados, ocurre sobretodo al llegar el invierno y cuando está vinculado a desencadenantes ambientales estos suelen ser cambios en el fotoperiodo o en las temperaturas.

Ectotermo: organismo que no es capaz de generar calor interno, por ejemplo, reptiles, anfibios, peces o insectos. Como consecuencia, sus nichos ecológicos dependen de la temperatura ambiental. Por este motivo se espera que la distribución de ciertas especies de insectos se amplíe con una subida de temperaturas generalizada.

Efecto cascado: Proceso que tiene lugar de forma escalonada, desde un evento inicial a una conclusión aparentemente inevitable.

Enfermedades cardiovasculares: Conjunto de trastornos del corazón y de los vasos sanguíneos. Se clasifican en: hipertensión arterial (presión alta), cardiopatía coronaria (infarto de miocardio), enfermedad cerebrovascular (apoplejía), enfermedad vascular periférica, insuficiencia cardíaca, cardiopatía reumática, cardiopatía congénita y miocardiopatías (OMS, 2020).

Enfermedades infecciosas: Enfermedades causadas por microorganismos patógenos como las bacterias, los virus, los parásitos o los hongos. Estas enfermedades pueden transmitirse, directa o indirectamente, de una persona a otra. Las zoonosis son enfermedades infecciosas en los animales que pueden ser transmitidas al hombre (OMS, 2020).

Enfermedades respiratorias: Aquellas que afectan a las vías respiratorias, incluidas las vías nasales, los bronquios y los pulmones. Incluyen desde infecciones agudas como la neumonía y la bronquitis a enfermedades crónicas como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (OMS, 2020).

Escenario de emisión: Representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero, aerosoles), basada en un conjunto coherente de supuestos sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico y la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos (IPCC, 2013). Los escenarios de emisiones que utiliza el IPCC actualmente se denominan trayectorias de concentración representativas (más conocidas por sus siglas en inglés, RCPs).

Escenarios socioeconómicos: Las sendas socioeconómicas compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) se desarrollaron para complementar los RCPs con diversos desafíos socioeconómicos para la adaptación y la mitigación. Con base en cinco narrativas, los SSP describen futuros socioeconómicos alternativos en ausencia de una intervención de política climática, que comprende el desarrollo sostenible (SSP1), la rivalidad regional (SSP3), la desigualdad (SSP4), el desarrollo de combustibles fósiles (SSP5) y un desarrollo intermedio desarrollo del camino (SSP2). La combinación de escenarios socioeconómicos basados en SSP y proyecciones climáticas basadas en RCPs proporciona un marco integrador para la estimación del impacto climático y el análisis de políticas (IPCC, 2019b).

Estudio epidemiológico: Actividad analítica realizada de modo sistemática con el fin de generar conocimientos sobre las causas que originan las enfermedades humanas. Permiten establecer la relación entre las causas de la enfermedad y la influencia de éstas sobre el surgimiento de la enfermedad.

Especie invasora: Las especies invasoras son animales, plantas u otros organismos que se desarrollan fuera de su área de distribución natural, en hábitats que no les son propios o con una abundancia inusual, produciendo alteraciones en la riqueza y diversidad de los ecosistemas.

Estratificación oceánica: Formación de capas horizontales de agua, con niveles limitados de intercambio entre ellas.

Eventos extremos: Fenómenos meteorológicos raros en determinado lugar y época del año. La rareza normal de un fenómeno meteorológico extremo sería igual o superior a los percentiles 10° ó 90° de la estimación de la función de densidad de probabilidad observada, aunque las definiciones de raro son diversas y, por definición, las características de un fenómeno meteorológico extremo pueden variar de un lugar a otro (IPCC, 2019b).

Expansión térmica: En referencia al nivel del mar, aumento de volumen (y disminución de densidad) causado por el calentamiento del agua. El calentamiento del océano conlleva un aumento de volumen y, por consiguiente, un aumento del nivel del mar (IPCC, 2013).

Exposición: La presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos medioambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2018).

Factores antropogénicos de cambio: aquellos derivados de la actividad humana que originan cambios en el sistema costero como son el desarrollo socioeconómico, el desvío de caudales de agua dulce o la retención de sedimentos (Losada et al., 2014).

Factores climáticos de cambio: aquellos factores de origen climático cuyos cambios producen efectos en el sistema costero como son el nivel del mar, el oleaje, los niveles extremos del mar, el viento o las tormentas (Losada et al., 2014).

Fenología: se refiere a la temporalidad de los eventos biológicos recurrentes, como migraciones o ciclos de reproducción (Espinoza-Avalos, 2005), es decir, a la relación entre los factores climáticos y los ciclos de los seres vivos.

Impacto: (consecuencias, resultados) (impacts (consequences, outcomes) Consecuencias de los riesgos materializados en los sistemas humanos y naturales, donde los riesgos provienen de las interacciones entre los peligros relacionados con el clima (incluidos los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos), la exposición y la vulnerabilidad. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud y bienestar, ecosistemas y especies, bienes económicos, sociales y culturales, servicios (incluidos los servicios ecosistémicos) e infraestructuras. También pueden denominarse consecuencias o resultados, y pueden ser adversos o beneficiosos (IPCC, 2018)

Incertidumbre: Expresión del grado en el que un valor es desconocido (Losada et al., 2014).

Informes de Evaluación del IPCC: Se trata de informes producidos por el IPCC que proporcionan una actualización del conocimiento sobre los aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos del cambio climático. El informe más reciente es el Quinto Informe (AR5 por sus siglas en inglés) fue publicado en 2014. Los informes constan de tres sub-informes elaborados por otros tantos grupos de trabajo: Grupo I, Base de ciencia física; Grupo II, Impactos adaptación y vulnerabilidad; Grupo III, Mitigación del cambio climático.

Invertebrados: todos aquellos animales (reino *Animalia*) que carecen de columna vertebral o notocorda, y de esqueleto interno articulado (por ejemplo, insectos, moluscos y artrópodos). Ver *vertebrados*.

Inundación: Desbordamiento por encima de los confines normales de un arroyo u otro cuerpo de agua, como el mar, o la acumulación de agua por encima de zonas que normalmente no están sumergidas (IPCC, 2014).

Intrusión agua salobre: Desplazamiento de agua dulce superficial o subterránea debido a la irrupción de agua salada, que tiene mayor densidad. Suele producirse en áreas costeras y estuarios, como consecuencia de una menor influencia de los procesos terrestres (p. ej., una disminución de la es-correntía y de la correspondiente recarga de agua subterránea, o una detracción excesiva de agua de los acuíferos), o a una mayor influencia de los procesos marinos (p. ej., la elevación relativa del nivel del mar) (IPCC, 2014).

IPCC: El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (más conocido por sus siglas en inglés, IPCC) fue creado en 1988 para facilitar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta (IPCC, 2020).

Lesiones: Daño o detrimento corporal causado por una herida, un golpe o una enfermedad.

Macroalgas: Tipo de algas marinas de tamaño macroscópico y, en general, multicelulares.

Mareas meteorológicas: Aumento episódico de la altura del mar en un determinado lugar causado por condiciones meteorológicas extremas (presión atmosférica baja y/o vientos fuertes). Se define como la diferencia entre el nivel de la marea alcanzado y el esperado en un lugar y momento dados (IPCC, 2013).

Meridionalización: Tendencia de los organismos termófilos marinos a expandir o mover su área de distribución a regiones más templadas donde antes estaban ausentes o eran muy raros. Este fenómeno tiene lugar en organismos de afinidad subtropical típicos de las costas meridionales del Mar Mediterráneo.

Morbilidad: El estado de ser sintomático o no saludable para una enfermedad o afección. Suele estimarse utilizando la prevalencia o incidencia. La prevalencia describe la proporción de la población con un síntoma o calidad dada. Se calcula dividiendo el número de individuos afectados por el número total de individuos dentro de una población específica. Generalmente se presenta como una relación o como un porcentaje. La incidencia, por otro lado, muestra la frecuencia con la que los individuos dentro de una población específica desarrollan un síntoma o calidad dada. Se calcula dividiendo el número de nuevos casos dentro de un período específico designado por el número de individuos dentro de la población. Al hacer este cálculo, es esencial recordar restar el número de individuos que ya están afectados por el número total de individuos dentro de una población (Hernandez y Kim, 2020).

Mortalidad: Está relacionada con el número de muertes causadas por el evento de salud bajo investigación. Se puede comunicar como una tasa o como un número absoluto. La mortalidad generalmente se representa como una tasa por cada 1000 individuos, también llamada tasa de mortalidad. El cálculo para esta tasa es dividir el número de muertes en un momento dado para una población dada por la población total. Para mantener estos valores concisos y facilitar la comparación con otros eventos de salud, este número se puede multiplicar por 1000 para reflejar la tasa "por 1000" de la población objetivo (Hernandez y Kim, 2020).

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Objetivos globales adoptados por los Estados Miembros de las Naciones Unidas en el año 2015, que articulan una estrategia internacional negociada para respaldar el bienestar social y ambiental. Los ODS reconocen tres pilares interconectados de sostenibilidad: Sociedad, Economía y Biosfera (el sistema ambiental global). Los ODS se componen de 17 objetivos divididos en 169 metas (Nash et al., 2020).

Organismos bentónicos: Conjunto de especies marinas que viven en relación con el fondo marino, ya sea para fijarse sobre él, escavar nidos, desplazarse sobre su superficie, o bien para nadar en sus inmediaciones sin alejarse de él (Velasco et al., 2013).

Organismos pelágicos: Especies marinas que viven en aguas medias o cerca de la superficie. Se agrupan en dos categorías: 1) necton: formado por peces, tortugas, cetáceos, cefalópodos, organismos capaces de contrarrestar con sus movimientos las corrientes marinas; y 2) plancton: formado por organismos de pequeño tamaño o microscópicos que pueden ser vegetales fitoplancton o animales zooplancton. Estos organismos no pueden vencer a las corrientes marinas y usualmente son arrastrados por ellas.

Patógeno: Término utilizado para describir un microorganismo o agente infeccioso, como un virus, bacteria, protozoo, prión, viroide u hongo (Alberts et al., 2002).

Periodo de retorno: intervalo medio de tiempo, generalmente expresado en años, al cabo de los cuales se igualará o superará un suceso de una determinada magnitud (Losada et al., 2014).

Pelágico: (ver Organismos Pelágicos)

Peligro: Ocurrencia potencial de una tendencia o suceso físico de origen natural o humano que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, provisión de servicios, ecosistemas y recursos ambientales (IPCC, 2018).

Población inmunodeprimida: Aquellos grupos de la población con un sistema inmunológico que funciona por debajo del índice de normalidad. Debido a que los mecanismos de defensa son limitados en pacientes inmunodeprimidos son susceptibles a infecciones por microorganismos que no causan enfermedad en personas saludables (MedlinePlus, 2020).

Producción polínica: Es la producción de polen, que es una sustancia fina en polvo, típicamente amarilla, que consiste en granos microscópicos descargados de la parte masculina de una flor o de un cono masculino.

Procesos antropogénicos: Resultante de la actividad de los seres humanos o producto de ésta (IPCC, 2014).

Proyecciones: ver escenarios de emisión.

Radiaciones ultravioletas: Rayos invisibles que forman parte de la energía que proviene del sol. La radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra está compuesta por dos tipos de rayos, llamados UVA y UVB. Puede causar daños en la piel, envejecimiento prematuro, melanoma y otros tipos de cáncer de piel. También puede causar problemas con los ojos y el sistema inmunitario. Los especialistas en piel recomiendan que las personas usen protectores solares que protejan la piel de ambos tipos de radiación ultravioleta (Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., 2020).

Reclutamiento de especies: Término utilizado en dinámica de poblaciones para referirse al proceso de incorporación de nuevos individuos a una población.

Resiliencia: La resiliencia es la capacidad que posee un sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse mientras experimenta cambios, de tal modo que retenga la misma función, estructura, identidad y retroalimentaciones esenciales. Cuanto más resiliente es un sistema, mayores perturbaciones puede absorber sin cambiar a otro régimen alternativo (Folke et al., 2010; Walker et al., 2004).

Riesgo: Potencial de que se produzcan consecuencias adversas por las cuales algo de valor está en peligro y en las cuales un desenlace o la magnitud del desenlace son inciertos. En el marco de la evaluación de los impactos del clima, el término riesgo suele utilizarse para hacer referencia al potencial de consecuencias adversas de un peligro relacionado con el clima, o de las respuestas de adaptación o mitigación a dicho peligro, en la vida, los medios de subsistencia, la salud y el bienestar, los ecosistemas y las especies, los bienes económicos, sociales y culturales, los servicios (incluidos los servicios ecosistémicos), y la infraestructura. Los riesgos se derivan de la interacción de la vulnerabilidad (del sistema afectado), la exposición a lo largo del tiempo (al peligro), así como el peligro (relacionado con el clima) y la probabilidad de que ocurra (IPCC, 2018).

Salmonelosis: Enfermedad bacteriana frecuente que afecta el aparato intestinal. La bacteria de la salmonela generalmente vive en los intestinos de animales y humanos y se libera mediante las heces. Los humanos se infectan con mayor frecuencia mediante el agua o alimentos contaminados. En general, las personas que tienen una infección por salmonela no tienen síntomas. Otras manifiestan diarrea, fiebre y calambres abdominales dentro de las 8 a 72 horas. La mayoría de las personas sanas se recuperan dentro de unos pocos días sin tratamiento específico. En algunos casos, la diarrea asociada con la infección por salmonela puede deshidratar al punto de requerir atención médica. También pueden presentarse complicaciones que ponen en riesgo la vida si la infección se propaga más allá de los intestinos. El riesgo de adquirir la infección por salmonela es mayor si viajas a países con condiciones de higiene deficientes (Mayo Foundation for Medical Education and Research, 2020).

Seguridad alimentaria: En la Cumbre Mundial sobre la Alimentación de 1996 la seguridad alimentaria se definió como la situación cuando todas las personas tienen, en todo momento, acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfacen sus necesidades energéticas diarias y preferencias alimentarias para llevar una vida activa y sana (FAO, 2011).

Servicios ecosistémicos: servicios y beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (*Millennium Ecosystem Assessment* en inglés) clasifica los servicios ecosistémicos en cuatro grandes grupos: servicios de aprovisionamiento (por ejemplo, alimento y madera), servicios de regulación (por ejemplo, clima y prevención de inundación), servicios culturales (por ejemplo, recreación y disfrute estético) y servicios de soporte (por ejemplo, formación de tierra y ciclos de nutrientes). Estos últimos son necesarios para la producción del resto de servicios (Paetzold et al., 2010).

Sistemas de gobernanza policéntricos: La gobernanza se define como el ejercicio de la deliberación y de toma de decisiones entre grupos de personas que conforman varias fuentes de autoridad para actuar. Este ejercicio puede ser practicado por una gran variedad de formas organizativas o actores (p. ej. departamentos burocráticos, comunidades que gestionan el territorio, organizaciones sin ánimo de lucro). En sistemas policéntricos, cada unidad de gobernanza tiene independencia y dominio de autoridad dentro de un área geográfica específica. Además, cada unidad puede vincularse con

otras horizontalmente en lo que respecta a asuntos comunes y a la vez estar anidada dentro de unidades de gobernanza más amplias verticalmente (Biggs et al., 2012).

Subsidencia: Movimiento descendente de la superficie terrestre inducido por factores antropogénicos (p. ej. extracción de agua subterránea) que provoca la compactación de sedimentos o deformación de la secuencia sedimentaria u oxidación de material orgánico, lo que conduce a un aumento relativo del nivel del mar (IPCC, 2019b).

Traumatismos: Lesiones externas o internas del organismo que se pueden producir por una lesión exterior o interior (UCM, 2014).

Trayectorias de Concentración Representativas: Escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre. La palabra *representativa* significa que cada trayectoria de representación ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo. La palabra *trayectoria* hace hincapié en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión (IPCC, 2013).

RCP 2.6: Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 W m^{-2} antes de 2100 y posteriormente disminuye (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100).

RCP 4.5 y RCP 6.0: Dos trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente a $4,5 \text{ W m}^{-2}$ y 6 W m^{-2} después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las concentraciones después de 2150).

RCP 8.5: Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores superiores a $8,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto de que sean constantes las emisiones después de 2100 y sean constantes las concentraciones después de 2250).

Varroa: es un género de ácaros que se alimentan de la hemolinfa de las larvas y las pupas de las abejas melíferas. Las abejas obreras limpiadoras no son capaces de eliminarla de las celdas donde se encuentran las larvas, de manera que completan sus ciclos reproductivos dentro de las colmenas llegando a parasitarlas por completo y se extienden a otras a través de las abejas adultas. Los individuos parasitados tienen problemas de desarrollo y sufren enfermedades transmitidas por el parásito, llegando incluso a morir. El parásito afecta a la supervivencia de la misma colmena y es considerada una de las plagas más dañinas a nivel mundial.

Vectores: Cualquier agente que transporta y transmite un agente infeccioso a otro organismo vivo (Roberts et al., 2008). La mayoría de los agentes considerados vectores son organismos, parásitos o microbios intermedios, pero también podría ser un medio inanimado de infección como partículas de polvo. En enfermedades humanas, un ejemplo clásico es el mosquito *Anopheles* que porta al *Plasmodium* sin que le cause problemas pero que genera malaria en los seres humanos tras la infección por la picadura.

Vertebrados: Los vertebrados son un subfilo muy diverso de cordados que comprende a los animales con espina dorsal o columna vertebral, por ejemplo: peces, aves y mamíferos. Ver *invertebrados*.

Vulnerabilidad: estado de susceptibilidad del ecosistema o sistema socio-ecológico de estudio a las perturbaciones del cambio climático. Está compuesto de tres elementos generales: exposición al impacto, sensibilidad al impacto y capacidad adaptativa al impacto (Cinner et al., 2013).

Xilema: tejido vegetal lignificado que transporta agua, sales minerales y otros nutrientes desde la raíz hasta las hojas de las plantas.

Zoonosis: cualquier enfermedad infecciosa que se transmite de los animales a los humanos. La mayoría de los brotes de enfermedades infecciosas en los últimos años son del tipo zoonosis (malária, Ébola, COVID19, etc.). Pueden ser generadas por diversos agentes patógenos, como virus, bacterias, hongos, etc.

REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), 2018. Meteoglosario Visual. Disponible en: https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/360_calidad-del-aire.
- Alberts B, Johnson A, Lewis J, et al., 2002. Introduction to Pathogens. Molecular Biology of the Cell (4th ed.). Garland Science.
- Babarro, J.M.F., Padin, X.A., Filgueira, R., El Morabet, H., Portabales, M.A.L., 2018. The impact of the sea anemone *Actinothoe sphyrodeta* on *Mytilus galloprovincialis* mussel cultivation (Galicia, Spain). *Biofouling* 34, 1138–1149. <https://doi.org/10.1080/08927014.2018.1547818>
- Bird, E., 2008. Coastal geomorphology: an introduction, 2nd ed. ed. Wiley, Chichester (UK).
- Carlsson, L., Berkes, F., 2005. Co-management: Concepts and methodological implications. *J. Environ. Manage.* 75, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.008>
- Cinner, J.E., Huchery, C., Darling, E.S., Humphries, A.T., Graham, N.A.J., Hicks, C.C., Marshall, N., McClanahan, T.R., 2013. Evaluating social and ecological vulnerability of coral reef fisheries to climate change. *PLoS One* 8, e74321. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074321>
- Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., 2020. Institutos Nacionales de Salud. Instituto Nacional del Cáncer. Disponible en: <https://www.cancer.gov/publications/dictionaries/cancer-terms/def/ultraviolet-radiation>.
- Espinoza-Avalos, J., 2005. Fenología de macroalgas marinas Phenology of marine macroalgae. *Hidrobiología* 15, 109–122.
- FAO, 2003. Acuicultura: principales conceptos y definiciones. Retrieved from: <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/aquaculture-defs.htm>.
- Folke, C., Carpenter, S.R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., Rockström, J., 2010. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecol. Soc.* 15, 20. <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>
- Hernandez JBR, Kim PY, 2020. Epidemiology Morbidity and Mortality. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.
- IEO, 2011. Índice de Afloramiento. Retrieved from: <http://www.indicedeafloramiento.ieo.es/afloramiento.html>.
- IPCC, 2020. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). URL <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/> (accessed 4.16.20).
- IPCC, 2019a. Technical Summary [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], in: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- IPCC, 2019b. Glossary, in: Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N. (Eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In press.
- IPCC, 2018. Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].
- IPCC, 2014. Annex II: Glossary, in: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1757–1776.
- IPCC, 2013. Annex III: Glossary, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (USA).

- Kantha, L., Clayson, C. a, 2002. Ocean Mixed Layer. *Encycl. Atmos. Sci.* 291–298.
- Kapsenberg, L., Alliouane, S., Gazeau, F., Mousseau, L., Gattuso, J.P., 2017. Coastal ocean acidification and increasing total alkalinity in the northwestern Mediterranean Sea. *Ocean Sci.* 13, 411–426. <https://doi.org/10.5194/os-13-411-2017>
- Knox RP, 1975. Pollen and allergy. *Studies in Biology*. Edward Arnold. Publ. London, 107.
- López-Dóriga, U., Jiménez, J.A., Valdemoro, H.I., Nicholls, R.J., 2019. Impact of sea-level rise on the tourist-carrying capacity of Catalan beaches. *Ocean Coast. Manag.* 170, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.028>
- Losada, I.J., Izaguirre, C., Díaz, P., 2014. Cambio climático en la costa española. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
- Mayo Foundation for Medical Education and Research, 2020. Disponible en: <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/salmonella/symptoms-causes/syc-20355329>.
- MedlinePlus ,2020. MedlinePlus. Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos. Disponible en: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000093.htm>.
- Nash, K.L., Blythe, J.L., Cvitanovic, C., Fulton, E.A., Halpern, B.S., Milner-Gulland, E.J., Addison, P.F.E., Pecl, G.T., Watson, R.A., Blanchard, J.L., 2020. To Achieve a Sustainable Blue Future, Progress Assessments Must Include Interdependencies between the Sustainable Development Goals. *One Earth* 2, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.01.008>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011. Una introducción a los conceptos básicos de la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/3/al936s/al936s00.pdf>.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), .2020 Organización Mundial de la Salud. Disponible en: https://www.who.int/topics/infectious_diseases/es/.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2020. Organización Mundial de la Salud. Disponible en: https://www.who.int/topics/respiratory_tract_diseases/es/.
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2020. Organización Mundial de la Salud. Disponible en: https://www.who.int/cardiovascular_diseases/about_cvd/es/.
- Paetzold, A., Warren, P.H., Maltby, L.L., 2010. A framework for assessing ecological quality based on ecosystem services. *Ecol. Complex.* 7, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.11.003>
- RAE, 2020. Diccionario de la lengua española [WWW Document]. «Diccionario Leng. Esp. - Ed. Tricentenario. URL <https://dle.rae.es/antrópico> (accessed 4.16.20).
- Roberts L.S., Janovy J., Schmidt G.D., 2008. *Foundations of Parasitology*. 8th Edición. McGraw Hill. ISBN 978-0-07-302827-9.
- Universidad Complutense de Madrid (UCM), 2014. Documento de apuntes de la Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/420-2014-03-20-02%20Contusion.pdf>.
- Velasco, E.M., Amezcua, M.A., Punzón, A., 2013. *Especies de interés pesquero en Galicia, Asturias y Cantabria*. Instituto Español de Oceanografía, IEO.
- Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A., 2004. Resilience, Adaptability and Transformability in Social–ecological Systems. *Ecol. Soc.* 9, 5.

Anexo II

Marco normativo de la adaptación al cambio climático en el contexto multilateral, europeo, nacional, autonómico y local

La adaptación es uno de los dos pilares fundamentales de la lucha contra el cambio climático. La adaptación se aborda desde los diferentes niveles de gobernanza en relación a los temas ambientales. Así, desde la escala global a la nacional, regional y local se desarrollan marcos normativos que enmarcan las obligaciones y directrices de la acción frente al cambio climático en materia de adaptación.

Marco multilateral: La adaptación y la Convención Marco para el Cambio Climático (CMNUCC) de las Naciones Unidas y su Acuerdo de París

La adaptación está presente en el texto de la CMNUCC (Cuadro AI.1), aunque recibió una menor atención que la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (mitigación) los primeros años de andadura de la CMNUCC. Sin embargo, en los últimos años, debido a las evidencias crecientes, ha cobrado una mayor relevancia. Así, con la publicación del Tercer Informe de Evaluación de IPCC (IPCC, 2007), la adaptación ganó prominencia en las negociaciones y desde la Decimotercera Conferencia de la Partes de la CMNUCC celebrada en Bali (COP13), en la que se propuso la creación del Fondo de Adaptación, se ha ido reforzando su consideración en todas las decisiones acordadas hasta incluirse en el Acuerdo de París como uno de los 3 objetivos del mismo, junto con la mitigación y la necesidad de que los flujos de financiación sean coherentes con un desarrollo bajo en carbono y resiliente a los impactos del clima.

Cuadro AI.1

La adaptación en la CMNUCC

La Convención se refiere a la adaptación en varios artículos:

- En su Artículo 2, el último El objetivo del Convenio es estabilizar las “concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evitaría antropogénico peligrosa interferencia con el sistema climático.
- En sus compromisos bajo el Artículo 4.1 (b), todas las Partes deben "Formular, implementar, publicar y actualizar periódicamente nacional y, donde programas regionales apropiados que contienen medidas para ... facilitar adaptación adecuada al cambio climático”.
- El Artículo 4.1 (e) llama a las Partes a "cooperar prepararse para adaptarse a los impactos del cambio climático; desarrollar y elaborar planes integrados...”.
- El Artículo 4.1 (f) requiere que las Partes “tengan en cuenta las consideraciones sobre el cambio climático, en la medida de lo posible, en sus políticas sociales, económicas y ambientales relevantes y acciones " y "empleen métodos apropiados, por ejemplo, evaluaciones de impacto, formuladas y determinadas a nivel nacional ", con miras a minimizando los efectos adversos que los proyectos o medidas de adaptación podrían tener sobre el economía, salud pública o calidad del medio ambiente.
- El Artículo 4.4 requiere que las Partes del Anexo II "ayuden a las Partes que son países en desarrollo que son particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático en costear la adaptación a esos efectos adversos ”.
- El Artículo 4.8 de la Convención hace un llamado a las Partes para que consideren plenamente, en implementando sus compromisos, a "qué acciones son necesarias bajo la Convención, incluidas las acciones relacionadas con la financiación, los seguros y la transferencia de tecnología, para satisfacer las necesidades y preocupaciones específicas de los países en desarrollo que surgen de los efectos adversos del cambio climático y / o el impacto de la implementación de medidas de respuesta ”.

Por lo tanto, con la adopción del Acuerdo de París, en diciembre de 2015, en sus Artículos 2 y 7 se reafirma que la adaptación es un objetivo y un reto global que deberá afrontarse desde distintas dimensiones (local, regional, nacional, internacional). El objetivo global en materia de adaptación persigue aumentar la capacidad adaptativa, reducir la vulnerabilidad y mejorar la resiliencia frente a los impactos del cambio climático; reconoce la importancia de evitar, minimizar y hacer frente a las pérdidas y daños asociados a los efectos adversos del cambio climático, incluidos fenómenos extremos y graduales; y el papel del desarrollo sostenible en la reducción del riesgo de los mismos.

Marco europeo

La Comisión Europea por su parte, comenzó la consideración de la adaptación al cambio climático a partir del año 2007, a la par que la Cumbre de Bali, con una serie de recomendaciones recogidas en el Libro Verde de la Comisión Europea de adaptación al cambio climático en Europa. Dos años después, en 2009 se lanzó el “Libro Blanco de la Comisión Europea sobre Adaptación al cambio climático: Hacia un marco europeo de actuación”, que se estructuraba en torno a cuatro pilares de acción: Refuerzo de la base de conocimiento; Integración de la adaptación en todas las políticas de la UE; Instrumentos (financieros y de otro tipo) para asegurar la efectividad de la adaptación; y Cooperación internacional y dimensión exterior de la adaptación.

La Comisión Europea adoptó la estrategia de adaptación de la UE en abril de 2013. Complementando las actividades de los Estados miembros, la estrategia apoya la acción promoviendo una mayor coordinación y el intercambio de información entre los Estados miembros, y asegurando que las consideraciones de adaptación se aborden en todas las políticas pertinentes de la UE. El papel de la UE puede ser particularmente apropiado cuando los impactos del cambio climático trascienden las fronteras de los estados individuales, como en las cuencas de los ríos, y cuando los impactos varían considerablemente entre las regiones. El papel de la UE puede ser especialmente útil para aumentar la solidaridad entre los Estados miembros y garantizar que las regiones desfavorecidas y las más afectadas por el cambio climático sean capaces de tomar las medidas necesarias para adaptarse.

En 2018, la Comisión Europea ha completado una evaluación en profundidad de esta Estrategia. Los documentos relevantes son el Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo relativo a la aplicación de la estrategia de adaptación al cambio climático de la UE (COM/2018/738 final) y la Evaluación de la Estrategia Europea de Adaptación al Cambio Climático (Commission Staff Working Document, SWD/2018/461 final, versión extendida en inglés). El Pacto Verde Europeo (2020) contempla la creación de una nueva Estrategia Europea de Adaptación al cambio climático, renovada y más ambiciosa, de cara a su elaboración se ha publicado un documento preliminar⁴⁶.

Marco nacional

A nivel español, el hito principal en cuestión de adaptación al cambio climático ha sido la elaboración del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC-1)⁴⁷ y su primer programa de trabajo aprobados en 2006⁴⁸. El PNACC es el marco de referencia para la coordinación entre las Administraciones Públicas en las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en España. El Plan, elaborado por la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), fue adoptado por el Consejo de Ministros en el año 2006 después de un amplio proceso de consulta pública y participación con los principales órganos de coordinación a nivel nacional en materia de cambio climático (la Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático, al Consejo Nacional del Clima, el Grupo Interministerial de Cambio Climático y la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente). El objetivo último del PNACC-1 es lograr la integración de medidas de adaptación al cambio climático basadas en el mejor conocimiento disponible en todas las políticas sectoriales y de gestión de los recursos naturales que sean vulnerables al cambio climático, para contribuir al desarrollo sostenible a lo largo del siglo XXI. La elaboración del plan vino precedida por la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático a través del Proyecto ECCE (ECCE, 2005). El PNACC-1 estableció cuatro ejes de actuación, siendo el primero la pieza clave sobre la que pivotan todos los demás: la evaluación de los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad al cambio climático para cada sector priorizado. Entre los sectores y sistemas contemplados en el PNACC-1, se destacan: Biodiversidad; Recursos hídricos; Bosques; Sector agrícola; Zonas costeras; Caza y pesca continental; Zonas de montaña; Suelo; Pesca y ecosistemas marinos; Transporte; Salud humana; Industria y Energía; Turismo; Finanzas – Seguros; Urbanismo; Construcción.

El PNACC-1 se ha desarrollado a través de 3 programas de trabajo, que han permitido priorizar y estructurar las actividades en él contenidas, y su seguimiento se ha llevado a cabo a través de Informes de informes de progreso. A lo largo de 2018

⁴⁶ Adaptation to Climate Change Blueprint for a new, more ambitious EU strategy
https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/consultations/docs/0037/blueprint_en.pdf

⁴⁷ https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-daptacion/pna_v3_tcm7-12445_tcm30-70393.pdf

⁴⁸ https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/1_prog_trabajo_tcm30-70399.pdf

y 2019, la Oficina Española de Cambio Climático ha desarrollado una evaluación global de este primer Plan, con el objeto de reconocer los avances logrados, los retos pendientes y las lecciones aprendidas hasta la fecha. Durante este proceso de evaluación, se han emprendido diversas actividades en el contexto del Proyecto LIFE SHARA⁴⁹, habiéndose publicado el Informe de Evaluación del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático⁵⁰ en 2019.

En el momento de la finalización de este Informe, se ha aprobado el segundo Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático para el periodo 2021-2030 (PNACC-2)⁵¹, como continuación del trabajo del PNACC-1 y tras un largo proceso participativo. De nuevo, como instrumento de planificación básico para promover la acción coordinada y coherente frente a los efectos del cambio climático en España. Sin perjuicio de las competencias que correspondan a las diversas Administraciones Públicas, el PNACC define objetivos, criterios, ámbitos de trabajo y líneas de acción para fomentar la adaptación y la resiliencia frente al cambio del clima.

El PNACC-2 explicita una serie de **principios orientadores** que deberán guiar las políticas y medidas en materia de adaptación. Entre ellos la consideración de las dimensiones social y territorial, el fundamento en la mejor ciencia y conocimiento disponibles, la transversalidad y la integración en los diferentes campos de la gestión pública o la cooperación institucional. Además, se enfatiza la necesidad de considerar una serie de principios básicos de carácter universal como el respeto a los derechos humanos y la justicia intergeneracional.

Asimismo, este segundo plan identifica 4 **componentes estratégicos** que facilitan la definición y desarrollo de iniciativas eficaces en materia de adaptación: la generación de conocimiento, la integración de la adaptación en planes, programas y normativa sectorial, la movilización de actores y el seguimiento y la evaluación.

Con objeto de facilitar la integración de las actuaciones de adaptación en los distintos campos de la gestión pública y privada, el PNACC-2 define 18 **ámbitos de trabajo**, concretando objetivos y líneas de acción para cada uno de ellos. Entre estos ámbitos de trabajo se encuentran: el clima y los escenarios climáticos; la salud humana; el agua y los recursos hídricos; el patrimonio natural, la biodiversidad y las áreas protegidas; la agricultura, ganadería, pesca, acuicultura y alimentación; las costas y el medio marino y el sector forestal, desertificación, caza y pesca continental. A ellos se suman: la ciudad, el urbanismo y la edificación; el patrimonio cultural; la energía; la movilidad y el transporte; la industria y los servicios; el turismo; el sistema financiero y la actividad aseguradora; la reducción del riesgo de desastres; la investigación e innovación; la educación y la sociedad y la paz, seguridad y cohesión social.

El plan refuerza, de forma notable, los instrumentos de información y seguimiento de las políticas públicas de adaptación incluyendo: informes sobre riesgos climáticos y, por primera vez, una colección inicial de 30 indicadores, que van a aportar una visión dinámica de los efectos derivados del cambio climático y los progresos obtenidos en materia de adaptación.

El plan contempla la dimensión tecnocientífica, pero también la dimensión social de los riesgos, dado que no hay solución única para afrontar los diversos riesgos; es la sociedad la que debe valorar los niveles de riesgo con los que quiere convivir y las soluciones para gestionarlos. Por eso se aportan herramientas para integrar ambas dimensiones, como las de información, capacitación y participación. Adicionalmente, también en el momento de la finalización de este informe, el Proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética (LCCTE) se encuentra en fase de tramitación parlamentaria. En este texto la adaptación a los impactos del cambio climático pasa, por primera vez, a tener reconocimiento en una Ley. Así, se establecen objetivos para fomentar la resiliencia y la adaptación frente al cambio climático, y se señala que el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático se desarrollará mediante Programas de Trabajo que se aplicarán en periodos de cinco años y cuyos resultados serán revisados periódicamente. El Proyecto de Ley recoge además que, en el marco del PNACC, se establecerán la definición de un sistema de indicadores de impactos del cambio climático en España y medidas de adaptación, que facilite un seguimiento y evaluación de las políticas públicas que se hacen en esta materia, y la necesidad de elaborar informes de riesgos. Se incluye la integración de los riesgos derivados del cambio climático en la planificación y gestión de políticas sectoriales, como la hidrológica, la de costa, la territorial y urbanística, la de desarrollo urbano, la de

⁴⁹ Sensibilización y conocimiento para la adaptación al cambio climático, <http://lifeshara.es/>

⁵⁰ https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/informeevaluacion_pnacc_tcm30-499212.pdf

⁵¹ https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pnacc-2021-2030_tcm30-512163.pdf

edificación e infraestructuras del transporte y en la ordenación de los usos del suelo. Así mismo, se prevén medidas para la protección de la biodiversidad y sus hábitats frente al cambio climático y disposiciones relativas a la política forestal y desarrollo rural.

Marcos autonómicos y locales

Las Comunidades Autónomas, en el ejercicio de sus competencias, mantienen unos marcos estratégicos, planes y/o programas en materia de adaptación al cambio climático (tabla AI.1), que desarrollan a través de numerosas iniciativas y acciones. En el ámbito local, la Red Española de Ciudades por el Clima, perteneciente a la Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP) aglutina a más de un centenar de poblaciones españolas comprometidas con el medio ambiente y el cambio climático para intercambiar conocimientos y experiencias en la materia. Además, constituye un instrumento de apoyo técnico para los Gobiernos Locales españoles, ofreciéndoles herramientas que les permitan alcanzar un modelo de desarrollo sostenible. Muchas ciudades españolas ya disponen de planes de adaptación y/o estrategias municipales de cambio climático (ver capítulo 7 del presente informe donde se han analizado varios ejemplos).

Tabla AI.1. Instrumentos desarrollados por las Comunidades Autónomas en los que se abordan aspectos/acciones sobre la adaptación⁵².

Comunidad Autónoma	Marco/Plan/Programa	Año
Andalucía	Estrategia Andaluza de Cambio Climático Programa Andaluz de Adaptación al Cambio Climático Ley 8/2018, de 8 de octubre, de medidas frente al cambio climático y para la transición hacia un nuevo modelo energético en Andalucía (BOJA n.º 199, de 15 de octubre) bajo la que se incluirá Plan Andaluz de Acción por el Clima (en elaboración) que contendrá, entre otros, un Programa de Adaptación	2002 2010 2018
Aragón	Estrategia Aragonesa de Cambio Climático y Energías Limpias (EACCEL). Documento de planificación estratégica que contempla líneas de actuación en mitigación y adaptación a tres niveles: autonómico, local e individual/empresarial Plan de Acción del Gobierno de Aragón frente al Cambio Climático y de Energías Limpias. Documento de planificación de actuaciones concretas del Gobierno de Aragón en materia de mitigación y adaptación	2009 2009
Asturias	Programa sobre Adaptación al Cambio Climático en la Costa del Principado de Asturias	Pendiente
Baleares	Estrategia Balear de Cambio Climático 2013-2020	2013
Canarias	Estrategia Canaria de Lucha contra el Cambio Climático	2009
Cantabria	Estrategia de Acción frente al Cambio Climático en Cantabria 2017 - 2030	2018
Castilla y León	Estrategia Regional de Cambio Climático 2009-2012-2020. Plan de Actuaciones Transversales Programa 4. Adaptación al Cambio Climático	2009
Castilla La Mancha	Estrategia Regional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático 2010-2012-2020 (ERMACC)	2011
Cataluña	Estrategia Catalana de Adaptación al Cambio Climático 2013-2020 (ESCACC) Tercer informe del Cambio Climático de Cataluña Ley de Cambio Climático de Cataluña	2012 2017 2017
C. Valenciana	Estrategia Valenciana ante el Cambio Climático 2013-2020	2013
Extremadura	Estrategia de Cambio Climático de Extremadura 2013-2020	2014
Galicia	Actuaciones en materia de observación e investigación del clima, generación de informes	2012, 2016
Madrid	Estrategia de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Comunidad de Madrid. Plan Azul+ (2013-2020)	2013
Murcia	Estrategia de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático de la Región de Murcia	Pendiente
Navarra	Hoja de ruta de Cambio Climático 2020-2030-2050	2018
País Vasco	Estrategia KLIMA 2050	2015
Rioja, La	Estrategia Regional de Adaptación al Cambio Climático	Pendiente

⁵² Para información actualizada consultar la plataforma AdapteCCa o las páginas web de cada Administración.

Anexo III

Tabla de atribución de riesgos por sector y relación con otros sectores

Riesgos individuales identificados		Nivel de prioridad										Sector principal sombreado con la prioridad de acción indicada, con un (●) se indica la relación con otros sectores																																																																																																																																	
		Más urgente		Menos urgente																																																																																																																																									
Sector	Número																																																																																																																																												
Recursos hídricos	1	Riesgo de reducción de los caudales de los ríos o de cambios en sus patrones estacionales										Recursos hídricos										Agricultura										Medio Marino										Costas										Medio Urbano										Salud										Energía										Infraestructuras transporte										Turismo																																																	
	2	Riesgo de cambio de distribución y biodiversidad de las comunidades acuáticas en masas de agua dulce.																																																																																																																																											
	3	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos para uso doméstico y en el sector servicios.																																																																																																																																											
	4	Riesgo de reducción de la disponibilidad de recursos hídricos, por incremento la intensidad y frecuencia de las sequías, para usos agrícolas e industriales.																				●																																																																																																																							
	5	Riesgo de incremento de inundaciones fluviales y pluviales.																				●																																																																																																																							
	6	Riesgo de incremento de la eutrofización y/o deterioro de la calidad del agua.																																																																																																																																											
	7	Riesgo de subsidencia en el terreno que afecte a edificios e infraestructuras por la menor recarga de acuíferos.																																																																																																																																											
	8	Riesgo de mayor colmatación de embalses.																																																																																																																																											
	9	Riesgo de impactos en piscifactorías de agua dulce.																																																																																																																																											
	10	Riesgo de aumento de la superficie de zonas áridas y semiáridas por desertificación.																				●																																																																																																																							
Ecossistemas terrestres	11	Riesgo de degradación y pérdida de suelo por el incremento de la erosión, disminución de la materia orgánica y cambios/empobrecimiento de biodiversidad en las comunidades edáficas.																				●																																																																																																																							
	12	Riesgo de incremento de incendios forestales por causas naturales y no naturales por incremento/acumulación de combustible y condiciones más favorables para la ignición.																				●																																																																																																																							
		Riesgo de disminución de la productividad e incremento de la mortandad de especies arbóreas en los bosques por los cambios de variables climáticas (precipitación y temperatura) y el incremento de la incidencia de plagas y enfermedades.																				●																																																																																																																							
	13	Incremento de la incidencia de plagas y enfermedades.																																																																																																																																											
	14	Riesgo de disminución o fragmentación de los hábitats de algunas especies vegetales, altitudinales y longitudinales (bosques, ecosistemas de montaña, etc.).																																																																																																																																											
	15	Riesgo de disminución de la biodiversidad, incluyendo desaparición de especies endémicas, cambios en las migraciones de aves.																																																																																																																																											
Agricultura y ganadería	16	Riesgo de entrada y expansión de especies exóticas e invasivas en los ecosistemas terrestres y de agua dulce.																																																																																																																																											
		Riesgos derivados de los cambios en la fenología de las especies vegetales (aparición de hojas y fructificación) y que pueden provocar el desacoplamiento entre los ciclos biológicos de especies interdependientes incluyendo especies animales.																																																																																																																																											
	17	Especies interdependientes incluyendo especies animales.																				●																																																																																																																							
	18	Riesgo del incremento de las afecciones a los ciclos de cultivo y modificación/reducción en la producción a consecuencia de la variación de la estacionalidad de la actividad hortícola.																				●																																																																																																																							
	19	Riesgo de pérdida de las zonas óptimas para la producción agrícola de cultivos por cambios en la precipitación y temperatura.																				●																																																																																																																							
	20	Riesgo de disminución del rendimiento de especies herbáceas, en especial de regadío, por limitaciones en el riego.																				●																																																																																																																							
	21	Riesgo de pérdida de la calidad de los productos agrarios (por ejemplo, pérdida de la calidad del vino por aumento de la temperatura).																				●																																																																																																																							
	22	Riesgo de pérdida de competitividad en el mercado de los productos de estación temprana por subida de temperatura invernal en otros lugares.																				●																																																																																																																							
	23	Riesgo de pérdidas de producción ganadera, bienestar animal e incluso mortalidad por subida de temperatura, olas de calor y descenso de precipitaciones.																				●																																																																																																																							
	24	Riesgo de sobreexplotación de pastos por disminución de la producción de hierba asociada al ascenso de las temperaturas estivales y bajada en las precipitaciones.																				●																																																																																																																							
25	Riesgo de incremento de la mortalidad de abejas por aumento de fenómenos extremos que puede derivar en un decaimiento de los servicios de polinización (p.ej. resultando en pérdidas de producción agrícola).																				●																																																																																																																								
26	Riesgo de aumento de plagas, patógenos y cambios en la distribución de vectores, incluidos los de zoonosis.																																																																																																																																												
27	Riesgo de abandono de sistemas pastoreados por fallos en la viabilidad derivados de subidas de precios de otros cultivos.																				●																																																																																																																								
28	Riesgo de pérdida de explotaciones por pérdidas de producción y aumento de precio de insumos.																				●																																																																																																																								

Riesgos individuales identificados		Recursos hídricos	Ecosistemas terrestres	Agricultura	Medio Marino	Costas	Medio Urbano	Salud	Energía	Infraestructuras transporte	Turismo
Medio marino	Número										
		Riesgo para el equilibrio ecológico de los hábitats y comunidades marinas por el aumento de la temperatura media del agua en todas sus capas y el efecto de la acidificación y la pérdida de oxígeno, que seguirá causando desplazamientos biogeográficos de especies, nuevas interacciones entre especies y pérdidas de hábitats, en las tres demarcaciones marinas españolas: Atlántico, Mediterráneo y Canarias.									
	29										
	30										
	31										
	32										
	33										
	34										
	35										
	36										
Costas	37										
	38										
	39										
	40										
	41										
	42										
	43										
	44										
	45										
	46										
Medio urbano	47										
	48										
	49										
	50										
	51										
	52										

Riesgos individuales identificados												
Sector	Número		Recursos hídricos	Ecossistemas terrestres	Agricultura	Medio Marino	Costas	Medio Urbano	Salud	Energía	Infraestructuras transporte	Turismo
Salud	53	Riesgo para la salud relacionado con el estrés por calor (aumento de la mortalidad y la movilidad), sobre todo en la ciudadanía envejecida, infantil, o con enfermedades preexistentes.										
	54	Riesgo de falta de abastecimiento y calidad de agua insuficiente para consumo doméstico y en sectores agrícola, industrial y servicios.	●		●			●				
	55	Daños personales por desbordamientos e inundaciones, temporales de viento y otros eventos extremos.	●			●	●					●
	56	Riesgo de aumento de enfermedades zoonóticas/vectoriales transmitidas por mosquitos (p. ej. dengue, fiebre amarilla, fiebre del Nilo y Fiebre del Zika).			●							●
	57	Riesgo de aumento de enfermedades infecciosas transmitidas por agua y alimentos.	●		●							●
	58	Riesgo de incremento de la duración y gravedad de las enfermedades alérgicas asociadas al polen como el asma, la rinitis, las conjuntivitis alérgicas o alguna dermatitis.										
	59	Riesgo de incremento de enfermedades asociadas a el empeoramiento de la calidad del aire.										
	60	Riesgo de aumento o agravamiento de problemas de salud mental										
	61	Riesgo de reducción en la producción de energía hidroeléctrica debida a los cambios de precipitación y temperatura.	●					●				
	62	Riesgo de reducción del disponible hidráulico para centrales que emplean el agua como refrigerante	●									
Energía	63	Aumento del consumo energético o modificación de la dinámica de la demanda (picos y medias).						●				●
	64	Riesgo de daños a las infraestructuras energéticas por inundaciones costeras.									●	
	65	Riesgo de afectación de las redes de suministro eléctrico debidas a eventos meteorológicos extremos (activación de incendios forestales).						●				●
		Riesgo de disminución de la operatividad de los puertos por el aumento de la frecuencia de rebase, fallos y roturas de diques, subida del nivel freático de los muelles como consecuencia de la mayor exposición y debido a la subida del nivel del mar.						●				
Tresp.	67	Riesgo de daños y erosión en taludes, firmes de carretera y puentes por el aumento de la frecuencia de eventos extremos.										
		Riesgo de daños en la infraestructura ferroviaria (sobre tensión de las catenarias por tormentas eléctricas, en las vías por subida de la temperatura, saturación de sistemas de drenaje, erosión de taludes y deslizamientos)										
	68											
	69	Riesgo de interrupción del tráfico ferroviario por caídas de objetos en las vías e impacto en las pantallas acústicas debido al incremento de las rachas de viento, en particular para las líneas de alta velocidad.										
		Riesgo de disminución de operatividad de los aeropuertos por aumento de nieblas y viento, incendios en las operaciones de repostaje, dificultad de despegue de aviones pesados y saturación de los sistemas de drenaje por el aumento de eventos extremos.										
Turs.	70											
	71	Riesgo de reducción de la estancia media en temporada alta en zonas de turismo de sol y playa, por olas de calor y eventos extremos.										
	72	Riesgo de disminución del turismo por la desaparición o degradación de recursos turísticos (playas, parajes naturales, etc.).										
	73	Riesgo de reducción e incluso desaparición del turismo de nieve.										

Publicación elaborada en el marco del Plan
Nacional de Adaptación al Cambio Climático
(PNACC)

