

Vídeo presentación del autor de su capítulo



## Capítulo primero

### Enfoque científico del cambio climático

Pedro Linares e Íñigo Losada

#### Resumen

En este capítulo se ofrece una visión general sobre el estado del arte del conocimiento científico del cambio climático. Sobre la base de trabajo que realiza el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) analiza el concepto del cambio climático, sus causas, atribuciones y evidencias, así como el análisis de sus consecuencias. Este análisis se plantea en un marco general del riesgo que se considera el marco ideal para analizar también los riesgos que el cambio climático proyecta sobre la seguridad, la defensa y las Fuerzas Armadas.

#### Palabras clave

Cambio climático, IPCC, gases de efecto invernadero.

#### Abstract

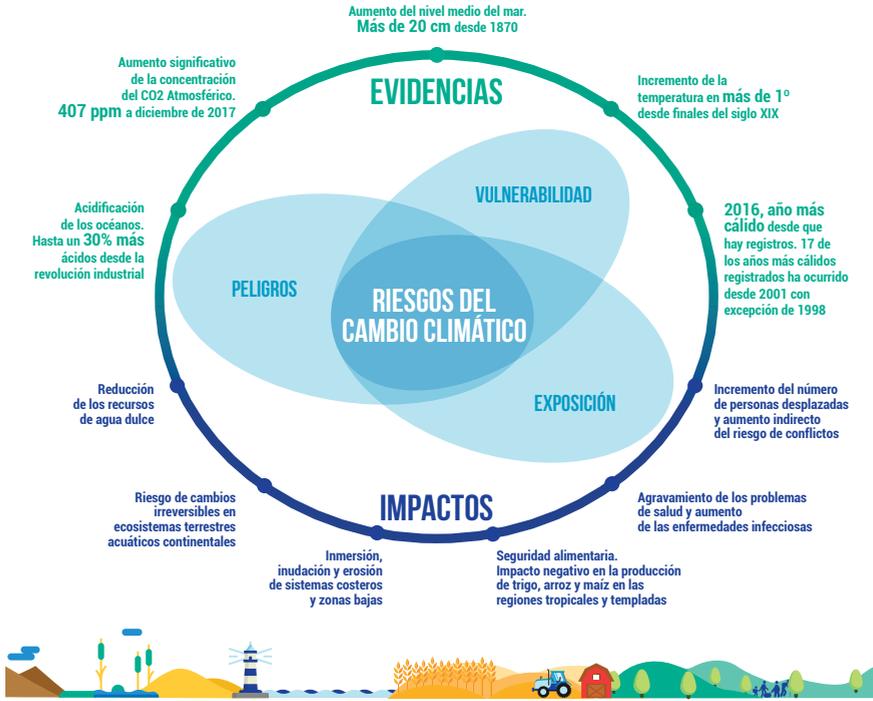
*This chapter provides an overview of the state of the art of the scientific knowledge about climate change. Based on the work done by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), it analyzes the concept of climate change, its causes, attributions and evidences, as well as its consequences. This analysis is placed within a general risk framework, which is considered*

*the best to analyze the risks that climate change poses to security, defense, and the Armed Forces.*

**Keywords**

*Climate change, IPCC, greenhouse gases.*

## ENFOQUE CIENTÍFICO DEL CAMBIO CLIMÁTICO



## ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO



MEJORA EN LA EVALUACIÓN DE LOS FENÓMENOS



REDUCCIÓN SUSTANCIAL DE EMISIONES EN LAS PRÓXIMAS DÉCADAS



MEJORA EN EL AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA



NECESIDAD DE RESPUESTAS INTEGRADAS QUE VINCULEN LA ADAPTACIÓN Y LA MITIGACIÓN CON OTROS OBJETIVOS SOCIALES



PLANIFICACIÓN INTEGRADA



ELABORACIÓN DE NORMAS Y PLANES ESPECÍFICOS DE ADAPTACIÓN



Versión digital

## Introducción

En el presente capítulo se hace un resumen del enfoque científico del cambio climático. Es decir, se presenta una síntesis del conocimiento que la ciencia tiene sobre el cambio climático y su incidencia sobre los sistemas naturales y socioeconómicos, como base de partida para entender la relación existente entre cambio climático, seguridad, defensa y las Fuerzas Armadas.

Gran parte de la información proviene del informe de síntesis de los informes de los tres grupos de trabajo (GT) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y corresponden al quinto ciclo (AR5) elaborado por dicho Grupo o Panel desde su creación a principios de los 90. Esta fuente, es sin lugar a duda, la más rigurosa en términos científicos y además ha sido sometida al escrutinio de evaluadores y gobiernos de más de 190 países. Esta información de partida se ha acompañado con algunos de los avances publicados recientemente y con información específica para España.

El IPCC es el principal órgano internacional para la evaluación del cambio climático. Fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988 para ofrecer una visión científica del estado actual de los conocimientos sobre el cambio climático y sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas.

El IPCC es un órgano científico y, como tal proporciona evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. Pero también es un órgano intergubernamental, y pueden formar parte de él todos los países miembros de las Naciones Unidas y de la OMM. Actualmente, 195 países son miembros del IPCC.

El IPCC se organiza en tres grupos de trabajo y un grupo especial (véase la figura 1). El GT I se ocupa de las bases físicas del cambio climático; el GT II,

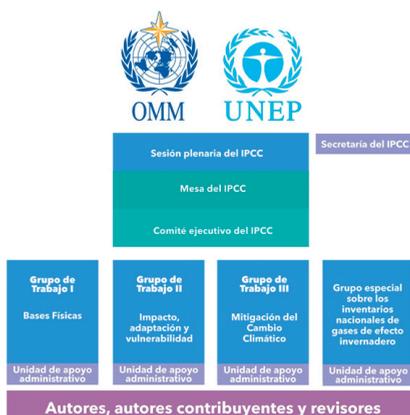


Figura 1. Estructura del IPCC

del impacto del cambio climático y de la adaptación y, finalmente, el GT III aborda la mitigación del cambio climático. Asimismo, existe un grupo adicional especial dedicado a los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Su objetivo es formular y perfeccionar una metodología para el cálculo y notificación de las emisiones y las absorciones nacionales de gases de efecto invernadero.

Miles de científicos de todo el mundo contribuyen a la labor del IPCC con carácter voluntario como autores, autores contribuyentes y revisores.

Desde su creación, el IPCC ha preparado cinco informes de evaluación. Cada nuevo informe recoge los avances de la ciencia con respecto al informe anterior y también establece en qué áreas es necesaria nueva investigación. Recientemente, se ha presentado el 5º informe (AR5 por su acrónimo en inglés), en el que se hace especial hincapié en la evaluación de los aspectos socioeconómicos del cambio climático y sus consecuencias para el desarrollo sostenible, los aspectos regionales, la gestión de riesgos y la elaboración de una respuesta mediante la adaptación y la mitigación, mostrando además más de 100 evidencias de los impactos producidos por el cambio climático. El sexto ciclo (AR6) acaba de comenzar su proceso y se espera que vea la luz en 2020.

### **Descripción breve del fenómeno del cambio climático**

#### ***El cambio climático y sus causas***

El cambio climático se refiere a los cambios en el estado del clima que pueden identificarse, a través de cambios en el tiempo, de los valores promedio y/o en la variabilidad de sus propiedades. Estos cambios persisten durante periodos largos de tiempo, típicamente décadas o periodos más largos.

El cambio climático puede ser originado por procesos naturales internos o por forzamientos externos tales como la modulación en los ciclos solares o erupciones volcánicas o por cambios inducidos por el hombre de forma persistente en la composición de la atmósfera o en los usos del suelo. En este sentido, es necesario hacer constar que la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) define en su artículo 1 el cambio climático como «cambios en el clima directamente o indirectamente atribuibles a la actividad del hombre que alteran la composición de la atmósfera global y que se superponen a la variabilidad natural observable en periodos de tiempo equivalentes». Por tanto, UNFCCC distingue claramente, por un lado, el cambio climático atribuible al hombre que incluye, entre otros, lo que habitualmente se conoce como el calentamiento global y, por otro, la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

En este sentido, de acuerdo con el AR5, el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios

observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado.

En términos de la explicación física del problema, existe un acuerdo general en la comunidad científica, de que la causa fundamental del calentamiento global es el resultado de la expansión del efecto invernadero, que es un proceso en el que la radiación térmica emitida por la Tierra queda atrapada en la atmósfera debido a la presencia de un conjunto de gases conocidos como gases de efecto invernadero (GEI). La radiación solar atraviesa la atmósfera y calienta la superficie terrestre. Parte de este calor es irradiado de nuevo hacia el exterior. Gran parte de este calor es absorbido por las moléculas de los GEI e irradiado en todas direcciones produciendo un calentamiento de la superficie de la Tierra y de la parte baja de la atmósfera. Una de las características de estos gases es que permanecen activos en la atmósfera durante mucho tiempo por lo que se les suele denominar gases de larga permanencia. Entre estos gases se encuentran: el vapor de agua, el metano, el óxido nitroso, el dióxido de carbono y los clorofluorocarbonos (CFC).

El vapor de agua es el más abundante, destacando su retroalimentación con el clima. A medida que la Tierra se calienta aumenta el vapor de agua y consecuentemente la probabilidad de nubosidad y precipitación. El dióxido de carbono es una componente menor de la atmósfera, pero es muy importante dado que su liberación a la atmósfera es producto de procesos naturales tales como la respiración o las erupciones volcánicas, pero también producto de las actividades humanas tales como la deforestación, el cambio en los usos del suelo o la combustión de combustibles fósiles.

El hombre ha contribuido a incrementar la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera en más de un tercio desde que comenzara la Revolución Industrial. Este es, sin duda, el GEI de larga permanencia que más está contribuyendo al cambio climático. El metano es un hidrocarburo resultado también de procesos naturales y actividades humanas, entre las que se incluye la descomposición de residuos en vertederos, la agricultura, y muy especialmente el cultivo de arroz, así como la digestión de rumiantes o la gestión del estiércol en ganadería. El óxido nitroso está también muy vinculado a las actividades agrícolas, especialmente al uso de fertilizantes comerciales y orgánicos, la combustión de combustibles fósiles o de biomasa. Finalmente, los CFC son compuestos sintéticos de origen industrial con diferentes aplicaciones. Aunque también son considerados GEI, su emisión está actualmente bastante controlada gracias a convenios internacionales para evitar su contribución a la destrucción de la capa de ozono.

El último informe del IPCC, establece que la influencia humana en el sistema climático es clara, y además demuestra que las emisiones antropogénicas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia.

Entre otras conclusiones, el informe establece que las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico, y actualmente son mayores que nunca. Esto ha dado lugar a que se hayan alcanzado unas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso nunca anteriormente registradas, al menos, en los últimos 800.000 años. Los efectos de las emisiones, así como de otros factores antropogénicos, se han detectado en todo el sistema climático y es sumamente probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX.

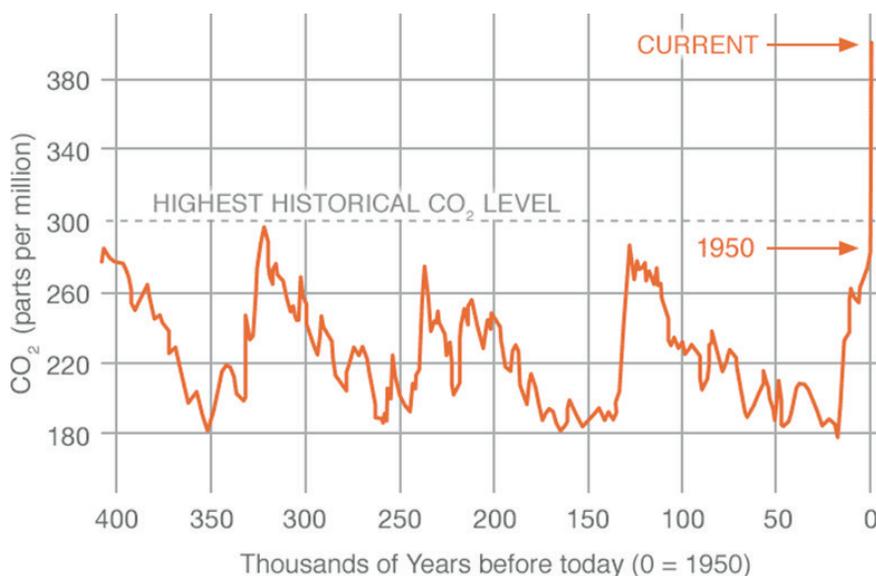


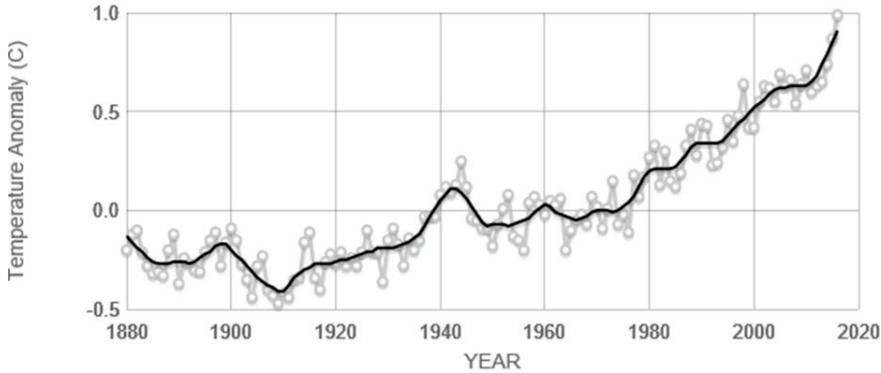
Figura 2: Fuente: NASA. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en partes por millón durante los últimos 400.000 años

### *Evidencias e impactos observados*

En los últimos decenios, los cambios del clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. Los impactos se deben al cambio climático observado, independientemente de su causa, lo que indica la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos al cambio del clima.

Uno de los impactos más importantes observado es el incremento de la temperatura en superficie media global. La figura 3 muestra los cambios en la temperatura con respecto a la media del periodo base 1951-1958. Como puede observarse, hasta 2016, se ha producido un incremento de 0,99°C, y más de un grado desde finales del siglo XIX. Cabe destacar que 17 de los años más calientes registrados en el registro de 136 años han ocurrido des-

de 2001, con la excepción de 1998. 2016 ha sido el año más caliente registrado hasta el momento. (Fuente: NASA/GISS).



Source: climate.nasa.gov

Figura 3. Fuente: NASA. Evolución de la anomalía de temperatura (diferencia con respecto al periodo de referencia 1951-1958) observada entre 1880 y 2017

Otro indicador del cambio climático es el aumento del nivel medio del mar, causado principalmente por dos factores vinculados al calentamiento global: el incremento de agua en las cuencas oceánicas debido a la pérdida de masas de hielo en glaciares y casquetes polares y la expansión volumétrica del agua del mar debido al incremento de temperatura en el mismo.

Desde 1993 en el que da comienzo la toma de medidas vía satélite, el nivel medio del mar ha aumentado 84,8 mm (a 7/2017) con una tasa de 3,4 mm/año (Fuente: NASA).

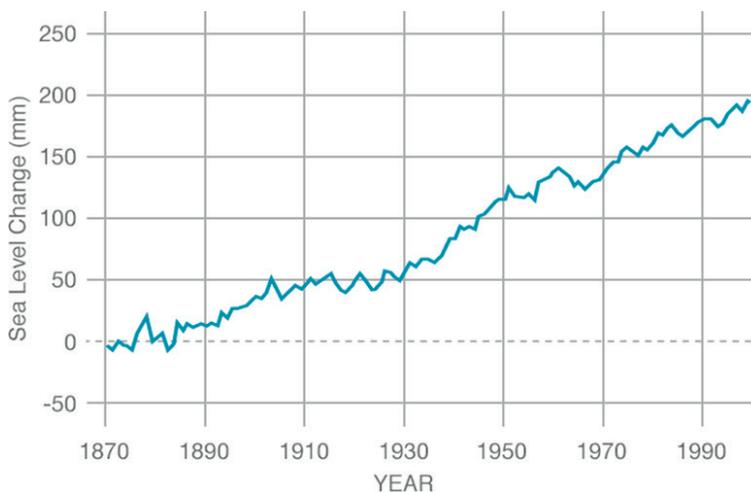


Figura 4: Fuente NASA/CSIRO: Evolución en mm del nivel medio del mar global entre 1870 y la actualidad obtenida a partir de mareógrafos en la costa

La figura 4 muestra la reconstrucción del aumento del nivel medio del mar a partir de mareógrafos en la costa, lo que permite obtener una serie más larga. Como puede observarse, el ascenso del nivel medio del mar desde 1870 muestra una cierta variabilidad, pero con una clara tendencia de largo plazo que ha supuesto un ascenso del nivel de 20 cm entre 1870 y la actualidad.

Tanto en el caso de la temperatura como del nivel del mar, el indicador representado es el resultado de una media espacial global. Por lo que es necesario considerar que en diferentes zonas geográficas del mundo el valor de los incrementos/descensos de temperatura y nivel del mar han alcanzado valores muy diferentes.

Pero el cambio climático no solo afecta a los valores medios. Desde aproximadamente 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Algunos de estos cambios se han vinculado a la influencia antrópica, como por ejemplo, la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y el mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones.

Este efecto es sencillo de entender si, por ejemplo, pensamos en que el desplazamiento de los valores medios de la temperatura hacia la derecha o la izquierda de su distribución estadística, conlleva un aumento del número de los eventos extremos o de su intensidad. Esto, por tanto, modifica el número y la intensidad de olas de frío o calor en una región determinada.

Asimismo, el nivel del mar total en la costa, constituido por la suma del nivel medio del mar y otras componentes de corto plazo, se ve incrementado por efecto del aumento del nivel medio, dando lugar a un incremento en la frecuencia de eventos extremos de inundación.

Pero además de sobre las variables físicas, el cambio climático ha inducido importantes impactos sobre los sistemas naturales y socioeconómicos que se han venido observando y documentando durante la última década. Por ejemplo, se ha observado que en muchas regiones, los cambios en las precipitaciones o la pérdida de la capa nival y el hielo están alterando los sistemas hidrológicos, lo que afecta a los recursos hídricos en términos de cantidad. Asimismo, existen evidencias observadas de que muchas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas han modificado sus áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático en curso.

Asimismo, esta última década se han identificado impactos sobre el sistema socioeconómico que también se han atribuido al cambio climático.

La figura 5, publicada en el SPM del último informe del IPCC, AR5, recoge un número sustancialmente alto de impactos identificados en las últimas décadas que son atribuibles al cambio climático mediante evidencia científica

sustentada por publicaciones. Los símbolos indican categorías de impactos atribuidos al cambio climático, la relativa contribución del cambio climático (grande o pequeña) al impacto observado y el nivel de confianza en la atribución.

Entre los impactos derivados de los fenómenos extremos asociados al clima (por ejemplo: olas de calor, sequías, inundaciones e incendios forestales) figuran la alteración de ecosistemas, la desorganización de la producción de alimentos y el suministro de agua, daños a la infraestructura y los asentamientos, morbilidad y mortalidad, y consecuencias para la salud mental y el bienestar humano. El mayor calentamiento se produce en latitudes más altas que en los trópicos, donde el patrón de cambios en la precipitación es muy complejo. De entre los impactos observados, un gran número es el resultado de la combinación de cambios en la temperatura y en la precipitación. Esto ocurre por ejemplo en África, donde se está produciendo el deshielo de los glaciares situados al este del continente, se está reduciendo la descarga fluvial en los ríos de la zona oeste, y están aumentando los incendios en el Kilimanjaro, entre otros.

El aumento del nivel medio del mar es especialmente preocupante en las islas estado (SIDS), donde se está produciendo el deterioro de vegetación costera, la degradación de aguas subterráneas como causa de la intrusión salina, y están aumentando tanto la inundación como la erosión costera.

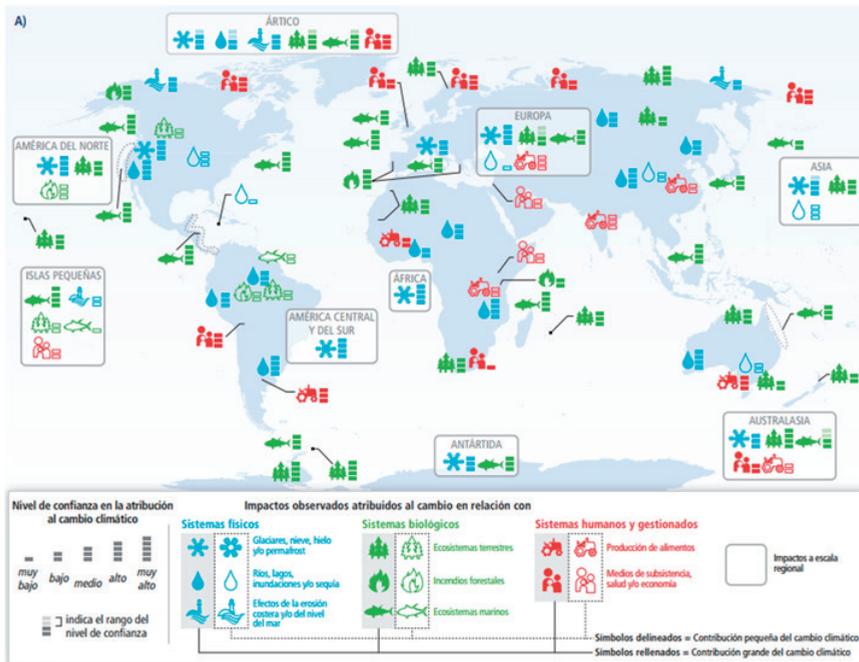


Figura 5. Patrones globales de los impactos del cambio climático observados (IPCC, 2014)

Algunos de los impactos detectados en el continente europeo son los cambios en los extremos de precipitación, las alteraciones en la distribución de especies, y los efectos que el calentamiento está produciendo en la salud y el estilo de vida de la población de la región norte del continente.

En su conjunto, la figura 5 muestra un patrón de cambio climático heterogéneo a través de todo el planeta. Además, algunos sistemas naturales y humanos (y las regiones en las que se encuentran) son más vulnerables al cambio climático que otros.

Es necesario destacar que los registros observados son de naturaleza muy heterogénea dado que en los países con rentas más bajas se reportan menos impactos que en los países más ricos, lo que no significa que sufran menores impactos. También se dispone de un menor número de observaciones en áreas remotas, como en el océano profundo o zonas montañosas con población dispersa y desiertos.

### Los riesgos del cambio climático

Para poder entender los riesgos derivados del cambio climático y su posible evolución futura es necesario fijar un marco conceptual que nos permita analizar el riesgo y sus consecuencias a partir de sus componentes. Para ello, el IPCC introdujo en el AR5 y anteriormente en el Informe Especial sobre Eventos Extremos (SREX) el marco descrito en la figura 6 que integra la aproximación seguida en el análisis de riesgos de desastres con la correspondiente al cambio climático.

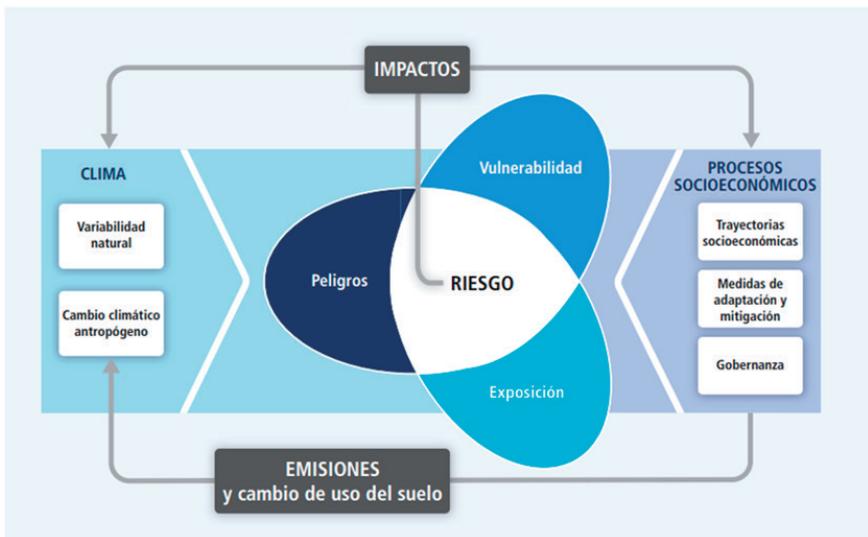


Figura 6. Marco general para el análisis de los riesgos derivados del cambio climático (IPCC, 2014)

Este esquema permite el análisis de los riesgos derivados del cambio climático para impactos múltiples o individuales y su aplicación en diferentes sectores estratégicos como agua, energía, seguridad, defensa, infraestructuras o en ámbitos naturales como ecosistemas, cuencas fluviales o en la costa. Asimismo, permite visualizar los efectos sinérgicos que tiene sobre el riesgo los cambios en los forzamientos climáticos, con los que se producen en la exposición o la vulnerabilidad. Finalmente, ofrece la oportunidad de identificar soluciones actuando sobre cada una de las componentes del riesgo individualmente o mediante acciones conjuntas de mitigación y/o adaptación que permitan reducir el riesgo.

Así, por ejemplo, de cara a los impactos de inundación, el aumento del nivel medio del mar representa un aumento de la peligrosidad y consiguientemente del riesgo sobre nuestras bases navales dado que contribuye a aumentar la probabilidad de eventos que superen las cotas de diseño de las infraestructuras navales existentes. Sin embargo, este riesgo será aún mayor si las infraestructuras, equipamientos, instalaciones o activos se despliegan y desarrollan en zonas bajas, poco protegidas o se incrementa el número de activos (aumento de la exposición). Asimismo, si los activos existentes o futuros no se mantienen adecuadamente o no se toman medidas para aumentar su resiliencia frente a la inundación, se produce un aumento de la vulnerabilidad. Cada uno de estos efectos, de forma individualizada, produce un aumento del riesgo frente al cambio climático, pero su acción conjunta lo incrementa aún más. En este caso, mientras que el aumento del nivel del mar solo puede afrontarse mediante la mitigación, la reducción de la exposición o de la vulnerabilidad puede abordarse mediante la adaptación.

Asimismo, si las operaciones de las fuerzas armadas van a producirse en regiones geográficas en las que se proyecta un incremento de las temperaturas medias y de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos (olas de calor), la reducción de los riesgos sobre nuestras unidades desplegadas en la región solo puede afrontarse mediante medidas que reduzcan la exposición y vulnerabilidad de las mismas frente a las temperaturas extremas, dado que el incremento de temperatura solo puede combatirse mediante la mitigación.

Por tanto, para entender los potenciales efectos del cambio climático sobre la seguridad y la defensa, es necesario analizar detalladamente cómo cada una de las componentes del riesgo puede evolucionar en el tiempo y cómo pueden afectar, tanto a los activos como a las operaciones vinculadas a estos sectores.

La idoneidad de enmarcar las consecuencias del cambio climático sobre la defensa y seguridad en el marco del riesgo, nos lleva a considerar necesario incluir, en este punto, un conjunto de definiciones que servirán para conceptualizar la aproximación a los riesgos derivados del cambio climático (adaptado de IPCC, 2014).

*Peligrosidad:* acaecimiento potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, 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, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales.

*Exposición:* la presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.

*Vulnerabilidad:* propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.

*Impactos:* efectos en los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos, y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos, incluidas las inundaciones, las sequías y la elevación del nivel del mar, son un subconjunto de los impactos denominados impactos físicos.

*Riesgo:* potencial de consecuencias en que algo de valor está en peligro con un desenlace incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales sucesos o tendencias. Los riesgos resultan de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro (véase la figura 6).

Por su trascendencia en la articulación de posibles soluciones para reducir los riesgos se introduce también aquí dos conceptos importantes como son la adaptación y resiliencia.

*Adaptación:* proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar 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.

*Resiliencia:* capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.

Analizar los riesgos derivados que el cambio climático puede traer en el futuro sobre cualquier sector o ámbito geográfico, pasa por determinar la evolución de cada una de las componentes del riesgo, es decir, por lo que se denominan proyecciones. En la siguiente sección se analiza el conocimiento científico sobre las proyecciones, fundamentalmente, de las contribuciones de la peligrosidad al riesgo.

### Proyecciones de cambio climático *Los modelos climáticos*

En este apartado se analiza, principalmente, las proyecciones de la peligrosidad. Como se observa en la figura 6, la peligrosidad está totalmente condicionada por el clima, concretamente por su variabilidad natural y especialmente por el cambio climático que a su vez está condicionado por las trayectorias socioeconómicas del futuro y su incidencia, por ejemplo, sobre los usos del suelo, la política energética o los acuerdos de reducción de GEI que se alcancen y se implementen durante las próximas décadas.

La emisión continua de gases de efecto invernadero causará un mayor calentamiento y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático, lo que hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas y consecuentemente en los sectores de interés para la defensa y la seguridad.

Por tanto, las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> determinarán en gran medida el calentamiento global a finales del siglo XXI y posteriormente. Esto ha conducido desde los años 90 a la generación de proyecciones de las emisiones de gases de efecto invernadero que presentan un amplio margen de variación, en función del desarrollo socioeconómico y la política climática que suelen representarse mediante diferentes escenarios. Estas proyecciones de GEI son el forzamiento esencial de los modelos generales de circulación (GCM por sus siglas en inglés) que nos permiten obtener proyecciones de las variables climáticas fundamentales para diferentes horizontes temporales. La mejora continua en nuestro conocimiento de los procesos fundamentales y en nuestras capacidades de modelados ha permitido llegar a una nueva generación de GCM que ha superado notablemente la calidad de las proyecciones con las que se cuenta en la actualidad, reduciendo sensiblemente las incertidumbres existentes con anterioridad. No obstante, es necesario hacer constar que las proyecciones climáticas son el producto del modelado numérico y, por tanto, no están exentas de incertidumbre.

Los GCM son la base sobre los que se desarrollan modelos regionales de circulación (RCM por sus siglas en inglés) que mejoran la resolución espacial de los modelos iniciales e integran nuevos procesos característicos de las regiones en los que son implementados, mejorando considerablemente la calidad de las proyecciones. Son generalmente, los resultados de estos modelos los que sirven de base para proyectar posteriormente impactos y

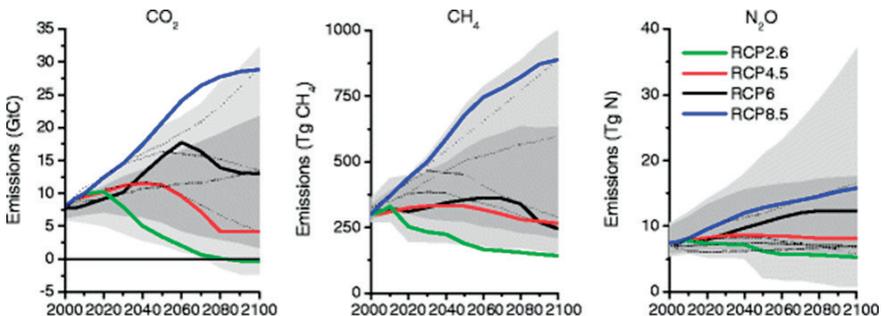
riesgos del cambio climático. Sin embargo, ni existen RCM para todas las regiones del planeta, ni tienen la misma calidad, ni cubren todas las variables necesarias para dar cobertura a las necesidades de la comunidad de impactos. Es esta, por tanto, una fuente importante de incertidumbre a la hora de evaluar los riesgos derivados del cambio climático.

### *Descripción de los RCP. Proyecciones de indicadores de cambio climático*

Para entender con qué criterio se han generado las proyecciones futuras de cambio climático es necesario introducir el concepto de las sendas representativas de concentración o RCP (Representative Concentration Pathways) por su nombre en inglés. A diferencia de los escenarios de emisiones considerados en los informes anteriores del IPCC, los RCP representan cuatro sendas o trayectorias de las posibles concentraciones de gases de efecto invernadero que son las empleadas por la comunidad que investiga en cambio climático. Describen cuatro posibles futuros climáticos que dependen de cuál sea la política de emisiones en los años venideros. Los cuatro RCP, denominados RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5, reciben su acrónimo en función del valor de los forzamientos radiativos esperados en 2100, con respecto a la era pre-industrial, es decir (+2,6; +4,5, +6, +8,5 W/m<sup>2</sup>, respectivamente).

Los RCP representan un amplio espectro de opciones con respecto a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (figura 7). Así, por ejemplo, el RCP2.6 asume que el máximo de las emisiones globales anuales de los GEI se producirá entre 2010 y 2020, con una importante reducción posterior. Este escenario sería compatible con una implementación inmediata de los términos del Acuerdo de París, posible pero poco probable. El pico de las emisiones correspondientes al RCP4.5 se produce en 2040 con un descenso posterior y el RCP8 tiene su máximo en 2080. Sin embargo, el RCP8.5 considera que las emisiones continuarán incrementándose durante todo el siglo XXI, correspondiendo al escenario más desfavorable.

El área gris corresponde a los percentiles 98 % y 90 % (gris claro y oscuro, respectivamente) obtenidos con base en la literatura. Las líneas punteadas



corresponden a cuatro de los escenarios de emisiones considerados en informes anteriores del IPCC (van Vuuren *et al.*, 2011).

Como puede observarse en la figura 8, con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, el RCP8.5 muestra una tendencia que corresponde a la cota superior que figura en la literatura (aumento rápido de las concentraciones). Los RCP6 y RCP4.5 muestran una estabilización de la concentración de CO<sub>2</sub> (cercana a la media de la literatura). Finalmente, el RCP2.6 tiene un pico de concentración de CO<sub>2</sub> en torno a 2050 seguido de una ligera disminución a final de siglo. En cuanto a las concentraciones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, el orden en el cual los RCP están situados, es el resultado directo del nivel de la política climática adoptada. Las tendencias en las concentraciones de CH<sub>4</sub> son más pronunciadas dada la corta vida del compuesto. Los RCP2.6 y RCP4.5 muestran un pico de emisión antes de mitad de siglo. Con respecto a la concentración de N<sub>2</sub>O, los escenarios se mantienen en el mismo orden, aunque en este caso las emisiones para el RCP4.5 permanecen estables y las correspondientes al RCP6 aumentan con el tiempo.

En todos los escenarios de emisiones evaluados, las proyecciones señalan que la temperatura en superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI. Es muy probable que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y duren más, y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes en muchas regiones. El océano se seguirá calentando y acidificando, y el nivel medio global del mar continuará elevándose.

Estas conclusiones se extraen del modelado realizado con modelos GCM y RCM en el marco del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) que comenzó en 1995 y en el que se agrupan más de 30 GCM de diferentes instituciones del mundo para realizar el modelado del clima, permitiendo la comparación de datos de la era pre-industrial con diferentes proyecciones futuras. Durante el periodo 2010-2014 se completó la fase CMIP5 que sirvió de base para todas las proyecciones incluidas en el AR5 así como para la mayor parte de la investigación que sobre diferentes aspectos del cambio climático se ha realizado en los últimos años. En la actualidad está en marcha la sexta fase, CMIP6, cuyos resultados se espera vean la luz en 2020.

Entre los resultados más importantes sobre proyecciones elaborados para el AR5 cabe destacar las que se resumen en la tabla siguiente:

Emission scenario	Representative Concentration Pathway (RCP)	2100 CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	Temperature Increase (°C) 2081-2100	Mean sea level rise (m)					
				2046-2065	2100	Scenario	2200	2300	2500
Low	2,6	421	1,0 (0,3-1,7)	0,24 (0,17-0,32)	0,44 (0,28-0,61)	Low	0,35-0,72	0,41-0,85	0,50-1,02
Medium low	4,5	538	1,8 (1,1-2,6)	0,26 (0,19-0,33)	0,53 (0,36-0,71)	Medium	0,26-1,09	0,27-1,51	0,18-2,32

Emission scenario	Representative Concentration Pathway (RCP)	2100 CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	Temperature Increase (°C)	Mean sea level rise (m)					
				2081-2100	2046-2065	2100	Scenario	2200	2300
Medium high	6,0	670	2,2 (1,4-3,1)	0,25 (0,18-0,32)	0,55 (0,38-0,73)	High	0,58-2,03	0,92-3,59	1,51-6,63
High	8,5	936	3,7 (2,6-4,8)	0,29 (0,22-0,38)	0,74 (0,52-0,98)				

**Tabla 1. Proyecciones de temperatura y nivel medio del mar para diferentes RCP y periodos temporales (IPCC, 2013).**

La tabla 1 es muy ilustrativa dado que muestra diferentes aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de analizar los riesgos derivados del cambio climático en el futuro. En primer lugar, muestra cómo los diferentes escenarios de emisiones y RCP asociados están vinculados a diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en 2100. Obsérvese que la última medición de CO<sub>2</sub> en la atmósfera realizada por la NASA, indica que hemos alcanzado 406,94 ppm (09/2017). Como referencia cabe mencionar que en septiembre de 2013 el valor observado fue de 396,76 ppm. Por tanto, podemos concluir que estamos muy cercanos a alcanzar los valores del RCP2.6. Este RCP conduce a un aumento de la temperatura de entre 0,3°C y 1,7°C (1° de valor media). Nótese que, en esta tabla, las proyecciones se muestran como la diferencia entre el periodo reseñado (por ejemplo, 2081-2100) y el de control, que en este caso corresponde a 1986-2005. Los valores que arrojan estas proyecciones son el resultado de un ensemble (promedio de varios modelos) entre varias ejecuciones y modelos climáticos. Esta información se expresa en función del valor medio y los percentiles del 5 % y del 95 % de la distribución (representados entre corchetes) de los casos simulados.

Asimismo, la tabla reproduce las proyecciones de aumento del nivel medio del mar. Este aumento es una respuesta a la expansión volumétrica del océano debido al calentamiento de sus aguas al que hay que sumar las contribuciones de los volúmenes de agua provenientes de las pérdidas de hielo en glaciares y de masas de hielo en el continente (p.e. Groenlandia). Obsérvese que hay pocas diferencias entre los distintos RCP hasta mitad de siglo con valores medios entre 0,24 y 0,29 m y una variación de los percentiles correspondientes entre 0,17 y 0,38 m. En 2100, el RCP más desfavorable sugiere un aumento del nivel medio del mar global de 0,74 m de media (los percentiles del 5 % y del 95 % corresponden a 0,52 m y 0,98 m, respectivamente). Es a fin de siglo cuando se evidencia claramente las diferencias entre políticas de mitigación.

En esta tabla, se incluye también por primera vez proyecciones de muy largo plazo (2300-2500). Aunque con gran incertidumbre asociada, es importante para poner de manifiesto un aspecto relevante. Debido a la inercia térmica del océano, el nivel medio del mar continuaría subiendo, y podría llegar a superar los 6 m en el caso más pesimista. Es decir, aunque a día de hoy se

tomara la decisión de llegar a una situación de cero emisiones, el nivel medio del mar seguiría subiendo durante cientos de años.

Si bien gran parte de la comunidad científica trabaja con estas proyecciones de aumento del nivel medio del mar, de cara a analizar los riesgos son poco conservadoras. El IPCC busca reducir al máximo las incertidumbres más que intentar considerar todos los escenarios posibles por poco probables que resulten, algo inherente a la gestión del riesgo. Por ello, en el AR5 se incluyen exclusivamente las proyecciones del nivel medio del mar obtenidas a partir de simulaciones de modelos GCM y aunque se citan, no se recogen los valores que pronostican otros modelos llamados semi-empíricos que se han venido publicado en la última década (Rahmstorf, 2007). Todos estos modelos coinciden en pronosticar a fin de siglo aumentos del nivel del mar entre 1,5 m y 2,5 m, por tanto, muy superiores a los establecidos por el IPCC. Este aspecto es algo muy discutido por la comunidad que analiza impactos y riesgos, pues la selección de las proyecciones de la temperatura o nivel del mar puede dar lugar a valores de riesgo y, por tanto, a objetivos de adaptación muy diferentes.

El otro aspecto relevante a considerar es que en esta sección se han discutido las proyecciones de indicadores de cambio climático (temperatura y nivel del mar) que se calculan como una media global. Es evidente que, a efectos del análisis de impactos, riesgos o que la búsqueda de soluciones requiere proyecciones de ámbito local o al menos regional puesto que la variabilidad espacial del comportamiento de las variables climáticas es muy importante.

### *Proyecciones regionales. El atlas del IPCC*

El sistema climático puede ser global en extensión, pero sus manifestaciones (por ejemplo, a través de procesos atmosféricos, circulación oceánica, zonas bioclimáticas, tiempo diario y tendencias climáticas a largo plazo) son regionales, o incluso locales, en su ocurrencia, carácter e implicaciones. A este respecto, el IPCC ha elaborado como parte del AR5 un atlas de proyecciones globales y regionales (IPCC, 2013). Este atlas presenta una serie de figuras que muestran los patrones de cambio climático globales y regionales y que han sido generadas como parte del CMIP5. Se presentan mapas de cambios en la temperatura del aire y cambios relativos en la precipitación (expresados como porcentaje de la precipitación media) para diferentes estaciones, para todo el globo y para una serie de regiones sub-continetales. Los resultados hacen referencia a cambios promedio para periodos de 20 años en el corto plazo (2016-2035), el medio plazo (2046-2065) y el largo plazo (2081-2100) relativas al periodo de referencia 1986-2005. Como ejemplo, se muestran los resultados en la región del sur de Europa/Mediterráneo.

La temperatura es una de las variables geofísicas más estudiadas y un claro indicador del calentamiento global. Tal y como muestran las figuras 8 y 9 (en

ambas, panel superior izquierdo) la temperatura del aire ha aumentado durante el siglo XX y seguirá aumentando a lo largo del siglo XXI. En el invierno del sur de Europa las proyecciones muestran aumentos en la temperatura de entre 2°C y 4°C a fin de siglo, para los RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente. En lo que respecta a la estación estival, las proyecciones de aumento a 2100 son mayores, con incrementos de 3°C (RCP4.5) a 7°C (RCP8.5). Los mapas

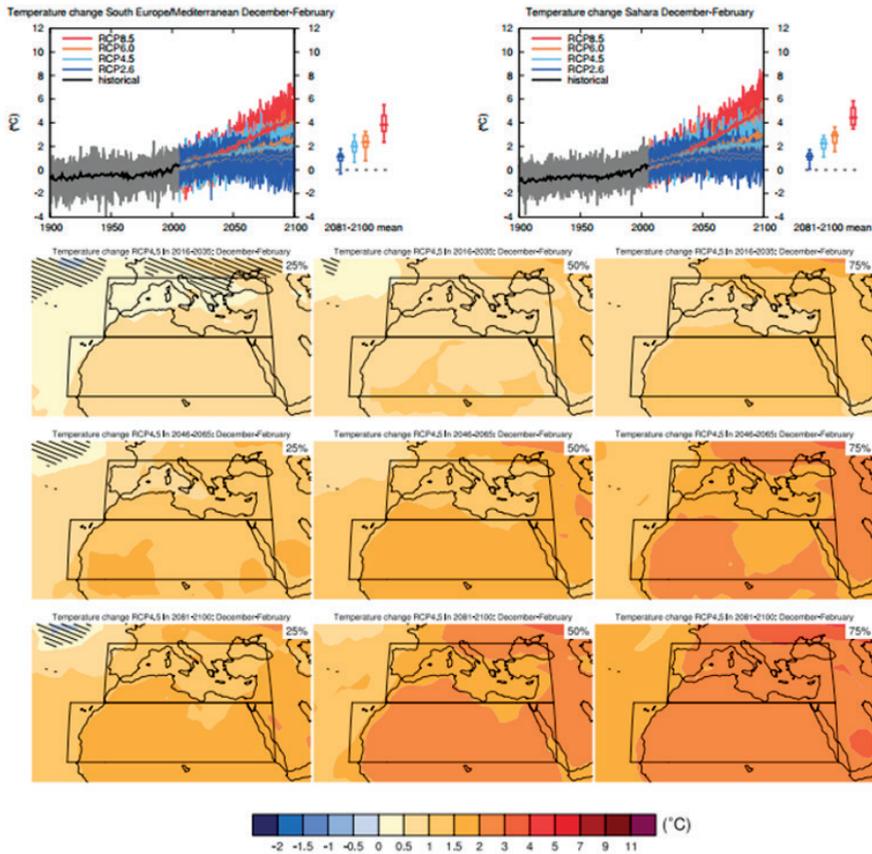


Figura 8. (Arriba a la izquierda) Series temporales de cambios en la temperatura relativos a 1986–2005 promediados en los puntos de la rejilla localizados en tierra en la región del sur de Europa/Mediterráneo (30°N a 45°N, 10°W a 40°E) de diciembre a febrero. (Arriba a la derecha) Lo mismo para puntos de la rejilla localizados en tierra en el Sahara (15°N a 30°N, 20°W a 40°E). Las líneas finas denotan un miembro del ensemble por modelo, las líneas gruesas la media de los modelos del CMIP5. Se muestran los percentiles del 5 %, 25 %, 50 % (mediana), 75 % y 95 % de la distribución de los cambios medios para 2081–2100 y para los cuatro RCP. (Abajo) Mapas de cambio en la temperatura en 2016–2035, 2046–2065 y 2081–2100 con respecto a 1986–2005 para el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los percentiles del 25 %, 50 % y 75 % de la distribución del ensemble del CMIP5; esto incluye la variabilidad natural y la dispersión de los modelos. El sombreado indica las áreas en las que las diferencias del promedio de 20 años de los de los percentiles son menores que la desviación estándar de la variabilidad natural actual estimada por los modelos de las diferencias del promedio de 20 años (IPCC, 2013)

espaciales (véanse los paneles inferiores de las figuras 9 y 10) permiten observar la variabilidad de esos cambios en toda la región. En España, se proyectan cambios de aumento de entre 2°C y 4°C en verano para el periodo 2081-2100 (RCP4.5). En el invierno, los aumentos proyectados son menores, pero en todos los casos considerados, a partir de 2050, están por encima de 1°C.

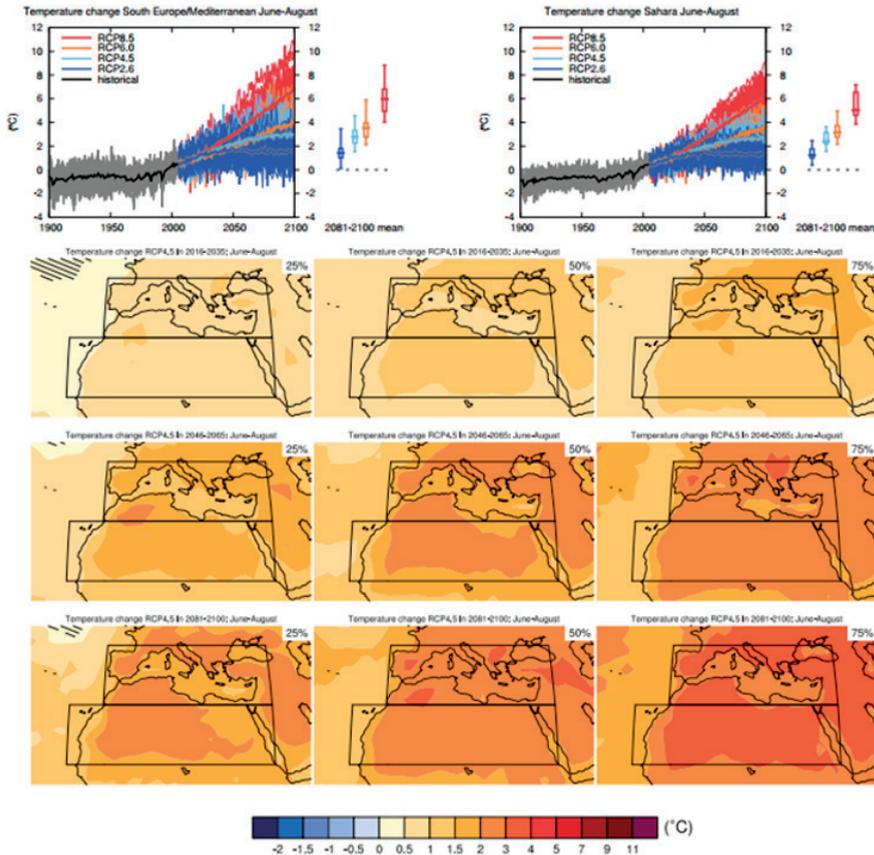


Figura 9. (Arriba a la izquierda) Series temporales de cambios en la temperatura relativos a 1986-2005 promediados en los puntos de la rejilla localizados en tierra en la región del sur de Europa/Mediterráneo (30°N a 45°N, 10°W a 40°E) de junio a agosto. (Arriba a la derecha) Lo mismo para puntos de la rejilla localizados en tierra en el Sahara (15°N a 30°N, 20°W a 40°E). Las líneas finas denotan un miembro del ensemble por modelo, las líneas gruesas la media de los modelos del CMIP5. Se muestran los percentiles del 5 %, 25 %, 50 % (mediana), 75 % y 95 % de la distribución de los cambios medios para 2081-2100 y para los cuatro RCP. (Abajo) Mapas de cambio en la temperatura en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto a 1986-2005 para el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los percentiles del 25 %, 50 % y 75 % de la distribución del ensemble del CMIP5; esto incluye la variabilidad natural y la dispersión de los modelos. El sombreado indica las áreas en las que las diferencias del promedio de 20 años de los de los percentiles son menores que la desviación estándar de la variabilidad natural actual estimada por los modelos de las diferencias del promedio de 20 años (IPCC, 2013)

En las figuras 10 y 11 (panel superior izquierdo) se representa la serie temporal de los cambios en la precipitación relativa (porcentaje de cambio sobre la media) en los puntos de tierra de la rejilla que representa la región del sur de Europa/Mediterráneo (30°N-45°N, 10°O-40°E), para los periodos octubre-marzo (época de lluvias) y abril-septiembre (época estival). Se puede ver como en ambos casos los cambios muestran una ligera

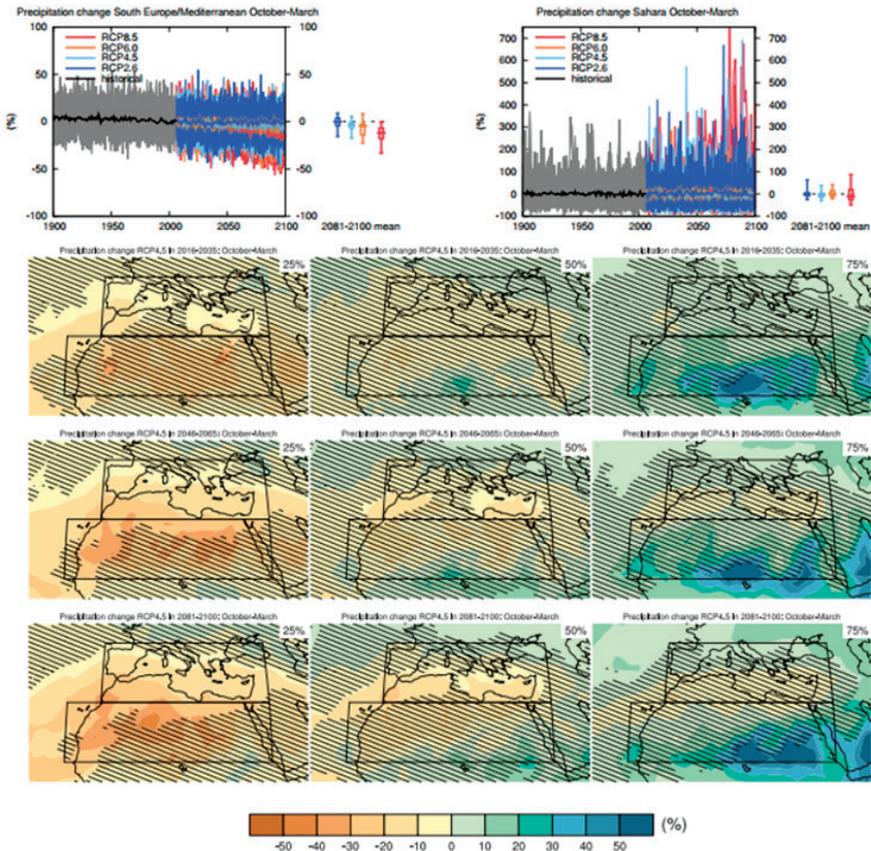


Figura 10. (Arriba a la izquierda) Series temporales de cambios en la precipitación relativos a 1986-2005 promediados en los puntos de la rejilla localizados en tierra en la región del sur de Europa/Mediterráneo (30°N a 45°N, 10°W a 40°E) de octubre a marzo. (Arriba a la derecha) Lo mismo para puntos de la rejilla localizados en tierra en el Sahara (15°N a 30°N, 20°W a 40°E). Las líneas finas denotan un miembro del ensemble por modelo, las líneas gruesas la media de los modelos del CMIP5. Se muestran los percentiles del 5 %, 25 %, 50 % (mediana), 75 % y 95 % de la distribución de los cambios medios para 2081-2100 y para los cuatro RCP. (Abajo) Mapas de cambio en la precipitación en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto a 1986-2005 para el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los percentiles del 25 %, 50 % y 75 % de la distribución del ensemble del CMIP5; esto incluye la variabilidad natural y la dispersión de los modelos. El sombreado indica las áreas en las que las diferencias del promedio de 20 años de los de los percentiles son menores que la desviación estándar de la variabilidad natural actual estimada por los modelos de las diferencias del promedio de 20 años (IPCC, 2013)

reducción de las precipitaciones. Hasta mediados de siglo las proyecciones de los 4 RCP son muy similares, difiriendo más a finales de siglo, donde, en el periodo octubre-marzo y para el RCP8.5, la proyección es de un 12 % menos de precipitación. En el periodo abril-septiembre, por contra, estos cambios alcanzan el 20 %. En lo que respecta a los mapas espaciales (véase panel inferior en figuras 11 y 12), se puede ver cómo, para

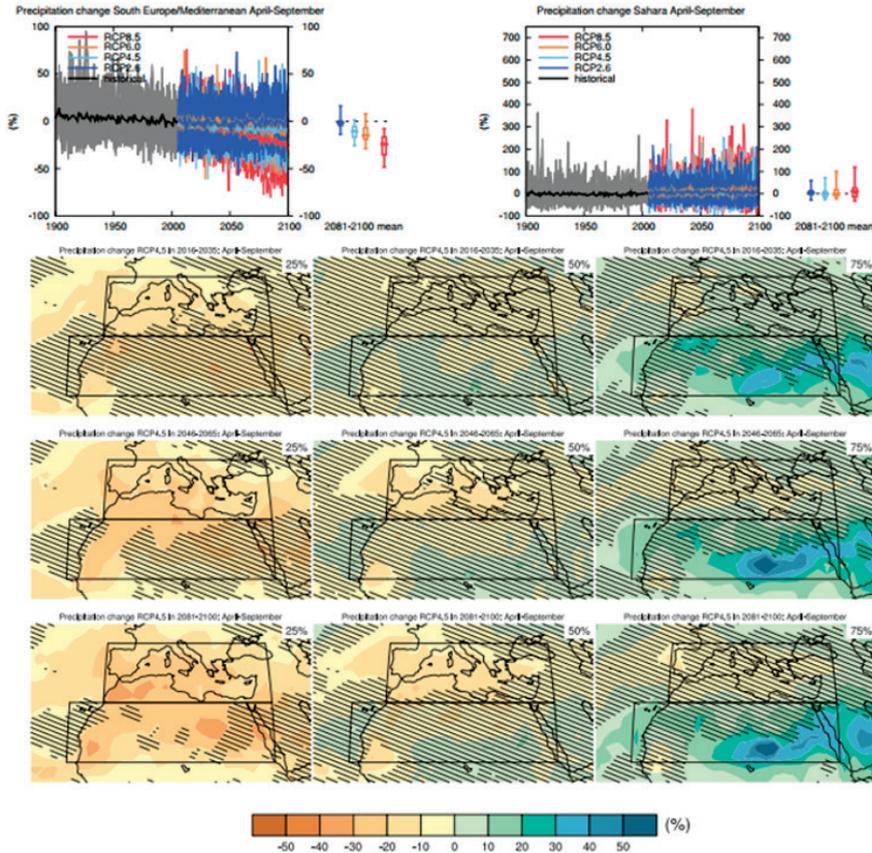


Figura 11. (Arriba a la izquierda) Series temporales de cambios en la precipitación relativos a 1986-2005 promediados en los puntos de la rejilla localizados en tierra en la región del sur de Europa/Mediterráneo (30°N a 45°N, 10°W a 40°E) de abril a septiembre. (Arriba a la derecha) Lo mismo para puntos de la rejilla localizados en tierra en el Sahara (15°N a 30°N, 20°W a 40°E). Las líneas finas denotan un miembro del ensemble por modelo, las líneas gruesas la media de los modelos del CMIP5. Se muestran los percentiles del 5 %, 25 %, 50 % (mediana), 75 % y 95 % de la distribución de los cambios medios para 2081-2100 y para los cuatro RCP. (Abajo) Mapas de cambio en la precipitación en 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100 con respecto a 1986-2005 para el escenario RCP4.5. Para cada punto, se muestran los percentiles del 25 %, 50 % y 75 % de la distribución del ensemble del CMIP5; esto incluye la variabilidad natural y la dispersión de los modelos. El sombreado indica las áreas en las que las diferencias del promedio de 20 años de los percentiles son menores que la desviación estándar de la variabilidad natural actual estimada por los modelos de las diferencias del promedio de 20 años (IPCC, 2013)

los percentiles del 25 % y del 50 %, en España se espera una reducción generalizada de la precipitación. Esta reducción es algo más acusada en el periodo estival (abril-septiembre) y en todos los percentiles estudiados, con reducciones de entre un 20 % y un 30 % en algunas zonas para periodo 2081-2100. En la época de lluvias (octubre-marzo), se espera a fin de siglo una reducción de la precipitación en torno al 10 % para los percentiles del 25 % y 50 % de la distribución, y un ligero aumento (entre 0 % y 10 %) para el percentil 75 %.

Obsérvese que el atlas ofrece únicamente información sobre cambios en la temperatura atmosférica y en la precipitación. Los GCM y RCM ofrecen mucha otra información de variables climáticas atmosféricas, sin embargo, cabe destacar que, a día de hoy no dan información sobre variables marinas por lo que se requieren modelados adicionales.

En la figura 12 se presentan proyecciones sobre cambios en el oleaje (altura de ola significativa) por estaciones, para fin de siglo con respecto al periodo base (1979-2005) obtenidos como un ensemble de 30 modelos GCM, para el RCP8.5.

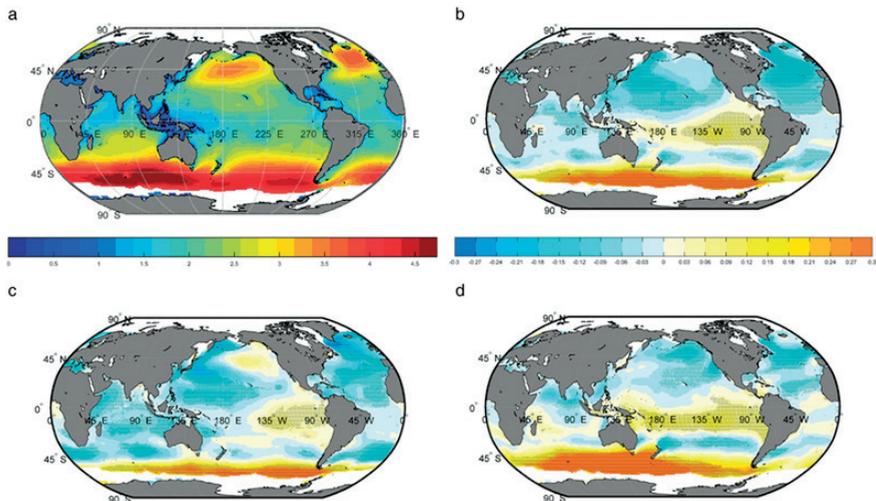


Figura 12. Fuente: Camus et al. (2017) (a) Altura de ola significativa media anual (m) para el periodo 1979–2005. (b–d). Cambios proyectados en valores anuales, en las estaciones EFM, JAS para el periodo 2070–2100 con respecto a (1979–2005) para el RCP8.5

Los resultados muestran que el incremento en la altura de ola se proyecta fundamentalmente en el hemisferio sur.

La figura 13 muestra las proyecciones de nivel del mar relativo (RLSR) para el periodo 2070-2100 para el RCP4.5. Es necesario destacar que la proyección incluye el efecto de la subsidencia o el rebote isostático en la costa

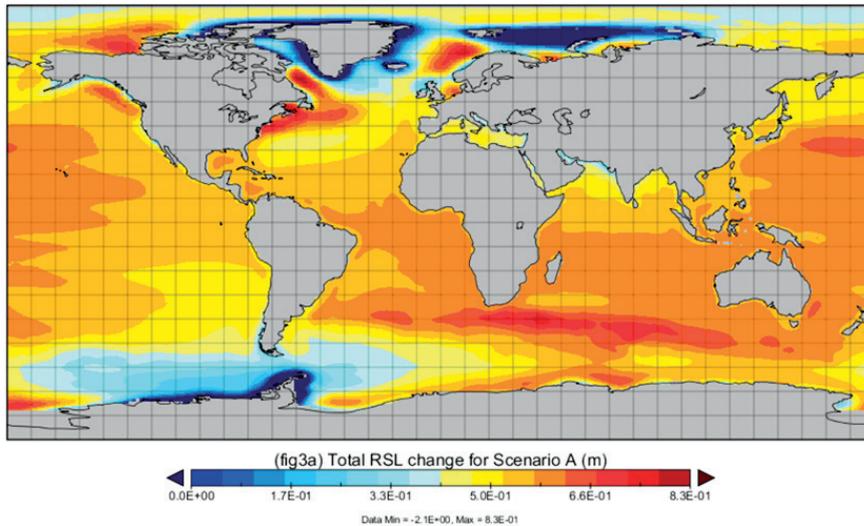


Figura 13. Volumen de derechos negociados anualmente en ETS. Fuente: Comisión Europea

puesto que lo que importa en términos de la determinación de impactos es el valor de la cota del nivel del mar con respecto a la costa. Obsérvese la gran variabilidad a lo largo de los océanos del mundo con valores de incremento de más de 80 cm y depresiones del nivel de hasta 20 cm en las zonas cercanas al Ártico y Antártida.

### *Proyecciones climáticas para España*

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) proporciona información tanto numérica como gráfica relativa a las proyecciones de cambio climático para el siglo XXI, regionalizadas para toda España y correspondientes a diferentes escenarios de emisiones. Estas proyecciones son esenciales para la evaluación de impactos y riesgos derivados del cambio climático.

Los resultados están referidos a diferentes escenarios de emisión (RCP), diferentes modelos climáticos globales y diferentes modelos regionales, y constituyen la más reciente fuente de proyecciones regionalizadas de cambio climático disponible en el contexto europeo. La utilización de conjuntos de evoluciones (ensemble/multi-modelo) permite estimar las incertidumbres asociadas, tanto con la evolución proporcionada por los modelos globales, como por la regionalización calculada con los modelos regionales anidados.

A continuación, se muestran como ejemplo los mapas de proyecciones de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, para dos periodos del siglo XXI: 2046-2061, 2081-2100, regionalizados con diferentes técnicas.

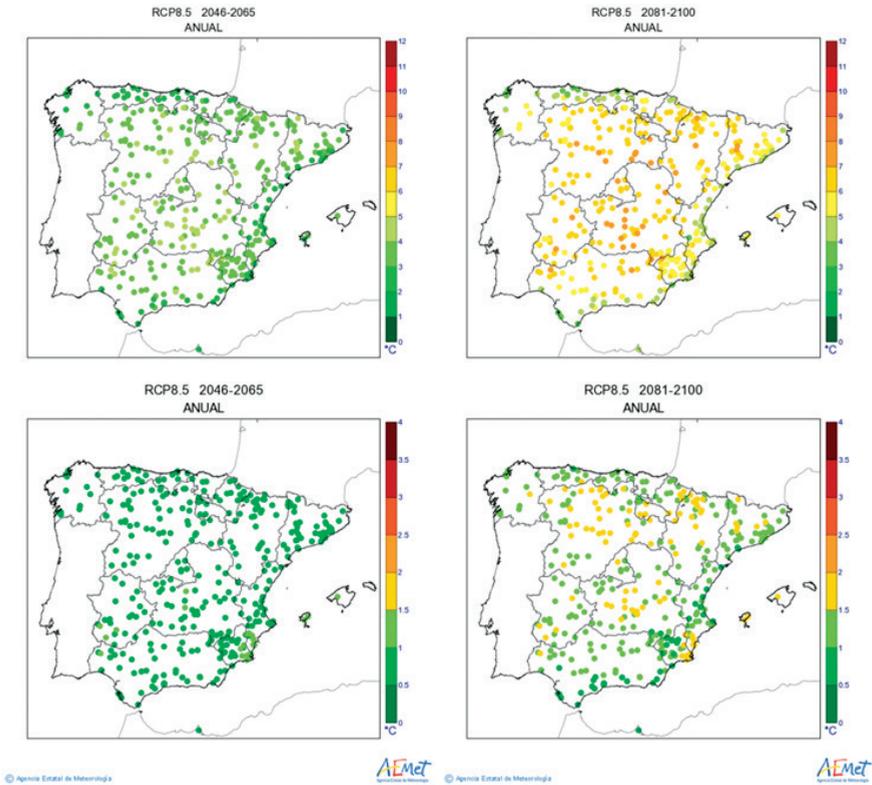


Figura 14. Cambios en la temperatura máxima anual media (paneles superiores) e incertidumbre (paneles inferiores) para el RCP8.5, respecto al periodo de control 1961-2000 (AEMET)

La figura 15 muestra las proyecciones de cambio de la temperatura máxima anual media y su incertidumbre (obtenida como dos veces la desviación estándar) a lo largo del siglo XXI para el RCP8.5. Los resultados muestran un aumento de la temperatura de entre 1°C y 5°C a mitad de siglo, y de hasta 8°C a final de siglo. Estos aumentos son mayores en la zona centro del país y mucho menos acusados en la costa, especialmente en las regiones de Asturias y Cantabria. Como se puede observar, la incertidumbre es mayor donde mayor es el cambio y a medida que nos alejamos en el tiempo, llegando a los 2° a fin de siglo.

La figura 16 muestra las proyecciones de cambio de la temperatura mínima anual media y su incertidumbre (obtenida como dos veces la desviación estándar) a lo largo del siglo XXI para el RCP8.5. Aunque el patrón de cambio es parecido al observado en la temperatura máxima, la variabilidad espacial es menor. El aumento de la temperatura mínima a mitad de siglo se encuentra entre los 2°C y los 5°C en todo el país. A final de siglo, los incrementos son

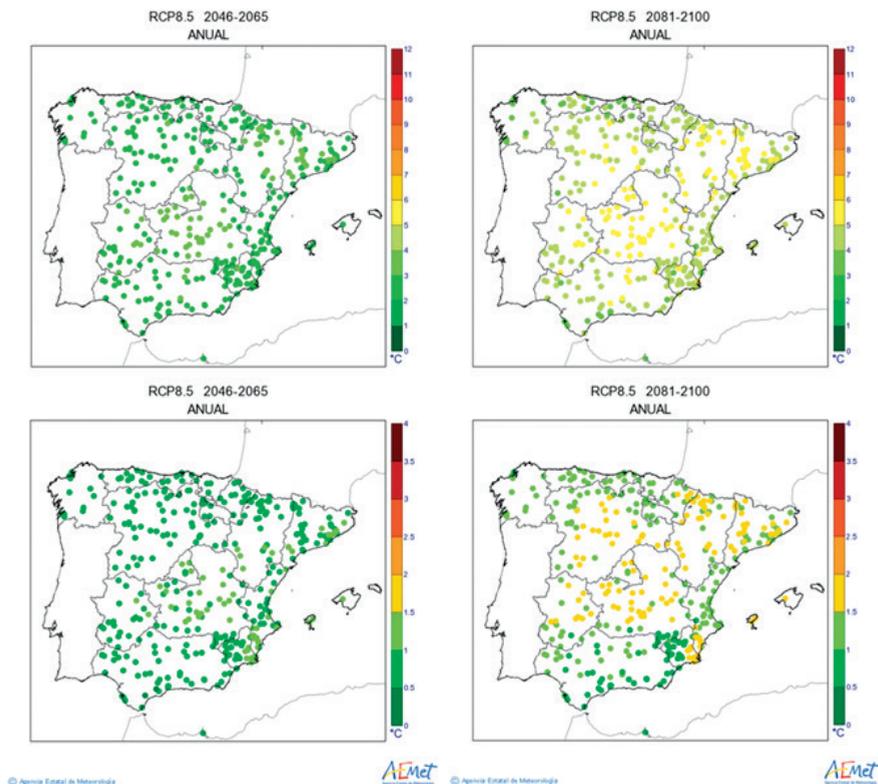


Figura 15. Cambios en la temperatura mínima anual media (paneles superiores) e incertidumbre (paneles inferiores) para el RCP8.5, respecto al periodo de control 1961-2000 (AEMET)

de hasta 6 grados, siendo Castilla La Mancha la región en la que se van a producir los mayores aumentos.

La figura 17 muestra las proyecciones de cambio de la precipitación anual media acumulada y su incertidumbre (obtenida como dos veces la desviación estándar) a lo largo del siglo XXI para el RCP8.5. A mitad de siglo, la precipitación va a reducirse hasta 40 mm en la franja costera de Andalucía y Murcia, y hasta 30 mm en la región del cantábrico. Por otro lado, aumentará hasta 10 mm en la zona centro-norte del país, y hasta 40 mm en localizaciones puntuales de Cataluña y Aragón. A final de siglo, los decrementos en la precipitación serán más acusados, de hasta más de 50 mm en el sur del país. Los aumentos en la zona centro-norte serán algo mayores, llegando a alcanzar los 40 mm en algunas zonas, especialmente en Cataluña y Aragón.

La mayor parte de estas proyecciones se elaboraron en el marco del Plan Nacional de Adaptación (PNACC). Uno de los instrumentos fundamentales

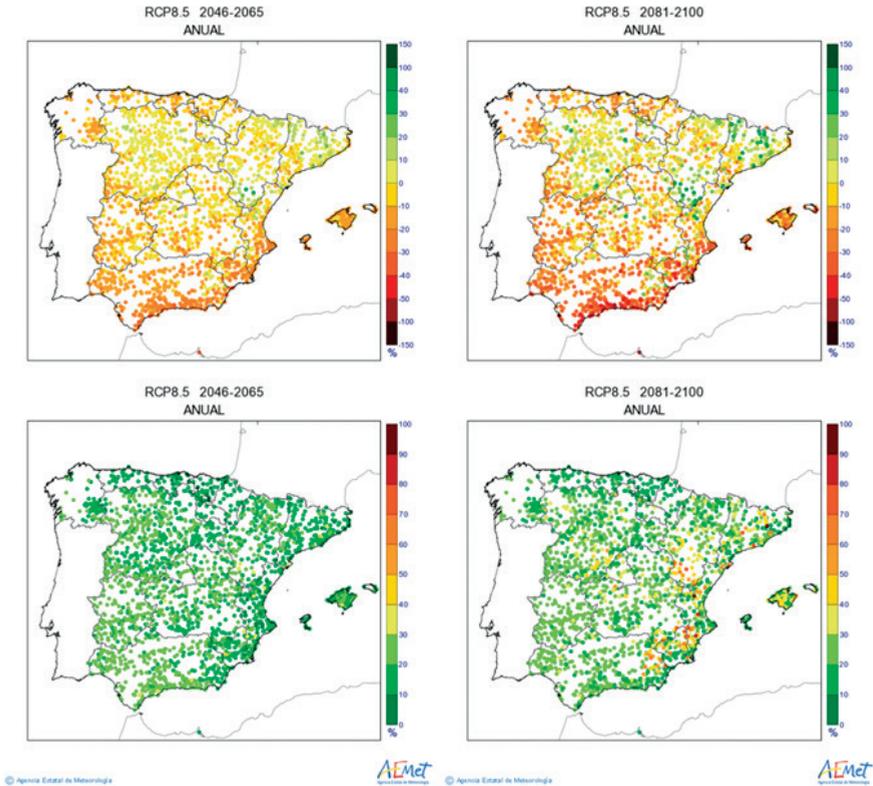


Figura 16. Cambios en la precipitación anual media acumulada (paneles superiores) e incertidumbre (paneles inferiores) para el RCP8.5, respecto al periodo de control 1961-2000 (AEMET)

de difusión de dicho plan es AdapteCCA.es (<http://www.adaptecca.es>), una plataforma de intercambio y consulta de información sobre adaptación al cambio climático en España. En ella se pueden encontrar toda la información disponible sobre proyecciones regionalizadas de cambio climático elaboradas por la AEMET y algunas CCAA.

Para la costa española, MAGRAMA y MINECO financiaron conjuntamente el proyecto «Cambio Climático en la Costa Española» (C3E) desarrollado por IHCantabria de la Universidad de Cantabria. Uno de los resultados de este proyecto fue el visor C3E (<http://www.c3e.ihcantabria.com>) en el que se recogen proyecciones climáticas para las variables de la dinámica marina en la costa española.

### *Las otras componentes del riesgo: exposición y vulnerabilidad*

Como ya se ha descrito anteriormente, además de la peligrosidad, existen otros factores de naturaleza no climática que influyen en el nivel de riesgo,

como son la exposición y la vulnerabilidad. Ambas son dinámicas, varían en el tiempo y en el espacio, y dependen de factores económicos, sociales, geográficos, demográficos, culturales, institucionales y ambientales.

La exposición representa la población, los activos y las actividades en riesgo potencial o que pueden sufrir daño a causa de un impacto. Tiene dimensiones físicas (edificios e infraestructura), sociales (personas y comunidades) y económicas (flujos de actividad). Por ello, está altamente condicionada por la planificación territorial, el desarrollo económico y la superpoblación en las ciudades.

La vulnerabilidad hace referencia a la susceptibilidad o sensibilidad de los sistemas a sufrir daños, y está relacionada con conceptos como resiliencia, fragilidad y adaptabilidad. Depende en gran medida de la naturaleza del impacto en cuestión, pero también de las características de la población (por ejemplo, en términos de edad y nivel cultural), de los edificios (por ejemplo, en cuanto al tipo de cimentación y los materiales), de los ecosistemas (por ejemplo, en lo que respecta a su capacidad adaptativa) y del resto de receptores de ese impacto.

En el análisis de riesgos asociados al cambio climático se consideran algunos de estos factores como: la proyección de la población, los procesos migratorios, los cambios en la planificación territorial o proyecciones en la demanda alimentaria o energética. Sin embargo, como las anteriores, estas no están carentes de incertidumbre por lo que es necesario analizar el riesgo ante diferentes escenarios.

### **Impactos y riesgos de los escenarios futuros del cambio climático**

Hay un acuerdo general entre la comunidad científica de que el cambio climático agravará los riesgos existentes y creará nuevos riesgos para los sistemas naturales y humanos. Sin embargo, las características intrínsecas al riesgo hacen que estos se distribuyan de forma dispar y son generalmente mayores para las personas y comunidades desfavorecidas (alta vulnerabilidad) de los países sea cual sea el nivel de desarrollo de estos.

Otro aspecto en el que existe acuerdo es en que muchos de los impactos asociados al cambio climático que empiezan ahora a observarse y que se producirán en un futuro cercano, continuarán durante siglos, incluso si se detienen las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. En este sentido, es necesario recalcar que los riesgos de cambios abruptos o irreversibles aumentan a medida que aumenta la magnitud del calentamiento.

El AR5 recoge en su «Resumen para responsables de políticas» un conjunto de riesgos sectoriales entre los que se destacan los siguientes. Es necesario mencionar que dichas conclusiones se formulan en términos del lenguaje que usa el IPCC para describir las incertidumbres. No se incluye dichas

formulaciones en el resumen siguiente, pero pueden ser consultadas en la referencia anterior.

*Recursos de agua dulce.* Las proyecciones durante el siglo XXI indican que se reducirán los recursos renovables de aguas superficiales y aguas subterráneas de forma sustancial en la mayoría de las regiones secas subtropicales, con lo que se intensificará la competencia por el agua entre los sectores.

*Ecosistemas terrestres y agua dulce.* En este siglo, las magnitudes y tasas del cambio climático asociadas a escenarios de emisiones entre medias y altas supondrán un alto riesgo de cambio abrupto e irreversible a escala regional en la composición, estructura y función de los ecosistemas terrestres y acuáticos continentales, incluidos los humedales.

*Sistemas costeros y zonas bajas.* Habida cuenta de la elevación del nivel del mar proyectado a lo largo del siglo XXI y posteriormente, los sistemas costeros y las zonas bajas experimentarán cada vez más impactos adversos como inmersión, inundación costera y erosión costera.

*Seguridad alimentaria.* En relación con los principales cultivos (trigo, arroz y maíz) en las regiones tropicales y templadas, las proyecciones señalan que el cambio climático sin adaptación tendrá un impacto negativo en la producción con aumentos de la temperatura local de 2°C o más por encima de los niveles de finales del siglo XX, aunque puede haber localidades individuales que resulten beneficiadas de este aumento.

*Zonas urbanas y rurales.* Muchos riesgos globales del cambio climático se concentran en las zonas urbanas. Las medidas que hacen que aumente la resiliencia y se posibilite el desarrollo sostenible pueden acelerar la adaptación con éxito al cambio climático a nivel mundial. Se prevé que los impactos rurales más importantes en el futuro ocurran a corto plazo y posteriormente en relación con la disponibilidad y el suministro de agua, la seguridad alimentaria y los ingresos agrícolas, especialmente en relación con cambios de las zonas de producción de cultivos alimentarios y no alimentarios en todo el mundo.

*Sectores y servicios económicos clave.* Para la mayoría de los sectores económicos, las proyecciones indican que los impactos de motores como los cambios en la población, la estructura de edad, los ingresos, la tecnología, los precios relativos, el modo de vida, la reglamentación y la gobernanza serán mayores que los impactos del cambio climático.

*Salud.* Hasta mediados de siglo, el impacto del cambio climático proyectado afectará a la salud humana principalmente por la agravación de los problemas de salud ya existentes (nivel de confianza muy alto). A lo largo del siglo XXI, se prevé que el cambio climático ocasione un incremento de mala salud en muchas regiones y especialmente en los países en desarrollo de bajos ingresos, en comparación con el nivel de referencia sin cambio climático.

**Seguridad humana.** Las proyecciones indican que el cambio climático a lo largo del siglo XXI hará que aumenten las personas desplazadas.

El cambio climático puede hacer que aumenten indirectamente los riesgos de conflictos violentos en la forma de guerra civil y violencia entre grupos al aumentar la intensidad de los motores que, según una amplia documentación, impulsan dichos conflictos como son la pobreza y las crisis económicas. Se prevé que los impactos del cambio climático en la infraestructura esencial y la integridad territorial de muchos Estados influyan en las políticas de seguridad nacional.

Asimismo, el informe recoge un resumen sobre los que identifica como riesgos clave regionales. En la figura 17 se recoge un ejemplo para América Central y del Sur.

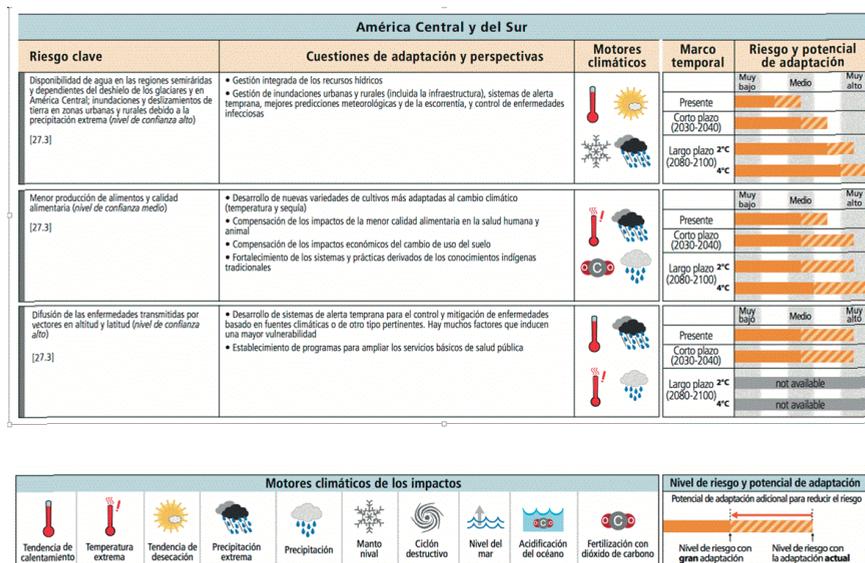


Figura 17. Riesgos clave del cambio climático y potencial de reducción de los riesgos mediante la adaptación y mitigación para América Central y del Sur. Cada riesgo clave se representa con un valor entre muy bajo y muy alto para tres marcos temporales: el presente, el corto plazo (2030-2040), y el largo plazo (2080-2100). Los motores climáticos de los impactos se indican mediante iconos. Fuente (IPCC, 2014)

### El nexo agua-energía-alimentación

Como se ha podido observar en las secciones previas, el cambio climático presenta riesgos para todos los sectores de actividad económica. Pero es conveniente señalar que estos riesgos se entrelazan además entre sí, a través de las conexiones que relacionan dichos sectores, pudiendo dar lugar a mecanismos de realimentación, generalmente positivos, que amplifican los efectos del cambio climático en dichos sectores.

Así, una de las áreas en las que este fenómeno se presenta de forma particularmente intensa es el conocido como nexo agua-energía-alimentación. Este nexo puede ilustrarse mediante la siguiente figura.

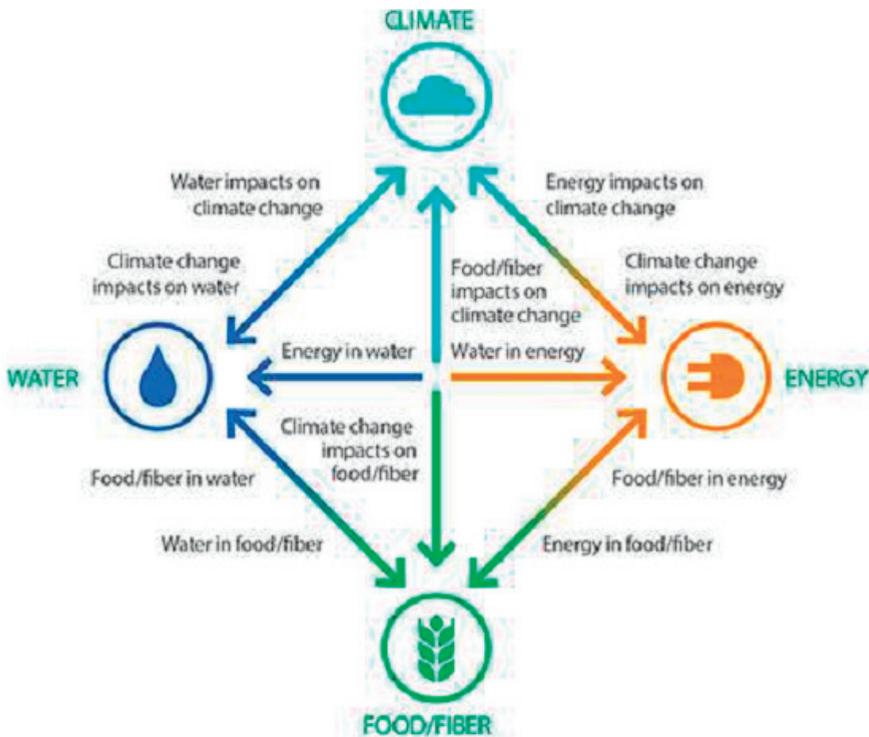


Figura 18. El nexo agua-energía-clima-alimentación. Fuente (WBCSD, 2013)

Como se puede observar en ella, el agua es necesaria para la producción de energía y para la producción de alimentos. A su vez, la energía es necesaria para el aprovisionamiento de agua potable, y también para la producción de alimentos. Finalmente, las tierras agrícolas pueden ser necesarias para la producción de energía (biomasa), y los bosques también afectan la disponibilidad de agua. Y en todos estos elementos influye el cambio climático, restringiendo el volumen de agua disponible, alterando la demanda de energía y también su producción, y condicionando la productividad agrícola. La relevancia de este nexo viene avalada por las numerosas publicaciones al respecto, tanto académicas como institucionales, y que pueden encontrarse resumidas en Khan *et al* (2017a).

En España, existen pocos estudios que analicen este nexo. Citamos a continuación y resumimos los tres que conocemos:

Mayor (2016), en su tesis doctoral, estudia el nexo agua-energía-alimentación para la cuenca del Duero. Para ello cuantifica los flujos de agua, energía

y producción agraria que conectan estos sectores, y analiza la coordinación de las políticas e instituciones sectoriales. La autora concluye que es necesario un mayor grado de coordinación para la planificación de estos sectores.

Por su parte, Willaarts *et al* (2016) amplían el análisis del nexo agua-energía-territorio para España, con carácter general, y evalúan las implicaciones de los escenarios energéticos futuros respecto al uso de agua y de suelo o al cambio climático (aunque sin tener en cuenta las realimentaciones entre estos sectores). El estudio también evalúa de forma retrospectiva en qué medida la intensificación de la agricultura en la última década ha modificado el uso de los recursos naturales (tierra, agua y energía) y a reducir los impactos ambientales, concluyendo que la evolución ha sido positiva, salvo en términos energéticos, que han aumentado.

Finalmente, Zarrar Khan, en su tesis doctoral desarrollada en la Universidad Pontificia Comillas (Khan *et al*, 2016 y 2017b), ha desarrollado un modelo integrado agua-energía que permite evaluar el impacto de distintas políticas hidrológicas o energéticas en ambos sectores de forma conjunta. En sus trabajos, Khan demuestra el valor de la planificación conjunta de ambos sectores, que permite reducir el consumo de agua y de energía y los costes económicos; así como el interés de tener en cuenta *ex-ante* los efectos del cambio climático para la planificación hidrológica y energética.

En conjunto, todos los estudios analizados subrayan la necesidad de tener en cuenta la interacción entre estos sectores, estratégicos para nuestro país, a la hora de evaluar el impacto del cambio climático. Así, cualquier estrategia de adaptación frente a los mismos debería realizarse de forma conjunta, algo que por otra parte requiere la colaboración entre distintas instituciones a escala sectorial y territorial.

### **Estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático**

Tal y como se mencionó en la descripción del análisis de riesgos del cambio climático, la adaptación y la mitigación son estrategias complementarias para reducir y manejar los riesgos del cambio climático. Mientras que la adaptación actúa sobre la exposición y la vulnerabilidad, la mitigación está íntimamente ligada a la peligrosidad, pero también a los cambios en los usos del suelo, tecnológicos y trayectorias socioeconómicas que a su vez están ligadas a la exposición y vulnerabilidad.

Existe un acuerdo general en la comunidad científica de que, si en las próximas décadas se reducen sustancialmente las emisiones, se pueden lograr disminuciones en los riesgos climáticos a lo largo del siglo XXI y posteriormente. Asimismo, se considera que una reducción de las emisiones contribuirá a que las trayectorias de desarrollo sostenible sean resilientes al clima.

Lo que también es claro es que, si no se introducen nuevos esfuerzos de mitigación al margen de los que existen en la actualidad, tal y como se pide

en el Acuerdo de París, a finales del siglo XXI el calentamiento provocará un riesgo alto a muy alto de impactos graves, generalizados e irreversibles a nivel mundial. Esto aun asumiendo que se sigan importantes estrategias de adaptación en las diferentes regiones y sectores del mundo.

Para alcanzar el objetivo de reducción del calentamiento por debajo de los 2°C en relación con los niveles preindustriales o incluso menos, se requerirían reducciones notables de las emisiones durante los próximos decenios y emisiones próximas a cero de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero a finales de siglo.

La falta de estrategias de mitigación que limiten de forma importante las emisiones, requiere la implementación de estrategias de adaptación eficientes y sostenibles. No obstante, aunque la estrategia de mitigación más exigente fuese implantada de forma inmediata, no estaremos exentos de la introducción de medidas de adaptación.

Los expertos reconocen que existen opciones de adaptación en todos los sectores (agua, seguridad, costas, infraestructuras, etc.) pero su contexto de aplicación y potencial para disminuir los riesgos relacionados con el clima es diferente entre los distintos sectores y regiones. Por tanto, las medidas de adaptación deben plantearse a nivel local/regional y contando con proyectos específicos para cada sector implicado, pero de forma integrada. En la mayor parte de los casos, la adaptación conlleva importantes co-beneficios, sinergias y contrapartidas para la reducción de otros riesgos, para una mejora notable de la sostenibilidad y de la calidad de vida de los ciudadanos. Cuanto mayor sea la magnitud del cambio climático mayores serán los desafíos para muchas de las opciones de adaptación existiendo situaciones para las cuáles las medidas de adaptación no son viables por su ineficiencia, coste o falta de sostenibilidad.

Muchas opciones de adaptación y mitigación pueden contribuir a afrontar el cambio climático, pero ninguna de ellas basta por sí sola. Para que la implementación de las opciones sea efectiva, se necesitan políticas y cooperación en todas las escalas; y para fortalecerla, se requieren respuestas integradas que vinculen la adaptación y la mitigación con otros objetivos sociales (IPCC, 2013).

### *Mitigación del cambio climático en España*

La estrategia de mitigación del cambio climático para España, actualmente en fase de elaboración en el marco de la Ley de Cambio Climático y Transición Energética, viene fundamentalmente determinada por los objetivos de nivel superior establecidos por la Comisión Europea (y a su vez por el Acuerdo de París). Así, se han establecido unos objetivos de descarbonización a 2050 de la economía muy ambiciosos: entre un 80 y un 95 % de reducción con respecto a las emisiones de 1990, lo que supone un total de entre 14 y

58 MtCO<sub>2</sub>eq, que pueden compararse con las emisiones de 2015, que alcanzaron las 340 Mt brutas.

Esto básicamente supone la descarbonización completa del sector eléctrico, que por tanto deberá estar basado completamente en fuentes sin emisiones de CO<sub>2</sub> (renovables, hidráulica o nuclear)<sup>1</sup>. El transporte o la climatización de edificios también deben eliminar casi completamente las fuentes emisoras de CO<sub>2</sub>, algo que puede lograrse, entre otros, mediante la electrificación de estos usos finales, así como mediante la gestión de la demanda. Más compleja es la reducción de emisiones en la industria, por cuanto sus consumos térmicos pueden no ser fáciles de electrificar, y además cuenta con emisiones directamente asociadas a sus procesos químicos, no energéticos (fundamentalmente por la producción de cemento y de fertilizantes). En estos casos el CCS puede ser una opción necesaria. Por último, restarían las emisiones de GEI procedentes de la agricultura y de los residuos, también difíciles de eliminar por completo, sobre todo las primeras.

El alcance de los cambios requeridos en el sector energético e industrial vendrá determinado fundamentalmente por la exigencia del nivel de emisiones impuesto, así como por el crecimiento de la demanda energética e industrial. Así, el escenario de reducción del 80 % permite que todavía los combustibles fósiles puedan seguir teniendo una cierta participación en el mix energético español, siempre que la demanda se reduzca gracias a la eficiencia energética. En cambio, si la demanda crece como en las épocas pre-2008, o si el objetivo de reducción se restringe al 95 %, los combustibles fósiles solo podrán tener una contribución testimonial, debiendo ser el resto del suministro energético proporcionado por energías libres de CO<sub>2</sub>.

A este respecto, un elemento crítico es la disponibilidad o no de tecnologías nucleares (tanto por razones técnicas como de aceptación social), así como el potencial de energías renovables con el que se cuente. En escenarios de alta demanda y bajo potencial de renovables, la energía nuclear, u otra tecnología sin emisiones de CO<sub>2</sub>, podría ser necesaria para lograr reducir las emisiones hasta los límites requeridos. Otro aspecto también crítico es la gestionabilidad del sistema energético con una alta penetración de energías renovables variables, que puede requerir un importante volumen de energía de respaldo (bien mediante almacenamiento, o mediante tecnologías despachables, tanto fósiles como renovables). Finalmente, el coste económico de cada una de las sendas de descarbonización vendrá determinado por la evolución tecnológica de las distintas fuentes energéticas, así como por la capacidad de

---

<sup>1</sup> A este respecto es de interés señalar que las tecnologías de captura y secuestro de carbono (CCS), que podrían utilizarse para permitir el uso de combustibles fósiles, presentan numerosas incertidumbres sobre su viabilidad técnica, no solo en lo que respecta a la captura, sino, sobre todo, al almacenamiento permanente del CO<sub>2</sub> capturado. Además, estas tecnologías no garantizan la captura del 100 % del CO<sub>2</sub> emitido, por lo que no serían compatibles con una descarbonización completa del sector eléctrico.

reducir la intensidad energética de la economía, algo también esencial para mejorar la seguridad de suministro.

Por último, es importante señalar que estas sendas de descarbonización deben venir dirigidas por políticas adecuadas. Si bien el avance tecnológico esperado de las energías renovables puede lograr la descarbonización del sector eléctrico en gran medida sin apoyos públicos, no es el caso de otros sectores, para los que harán falta señales apropiadas (fundamentalmente un precio para el CO<sub>2</sub>, así como estándares o políticas de información).

### *Adaptación al cambio climático en España*

Como se ha citado anteriormente, la adaptación puede hacer que los riesgos de impactos del cambio climático disminuyan, pero su eficacia es limitada, especialmente cuando el cambio climático alcanza mayor magnitud o se produce a un ritmo importante.

Desde 2004, la adaptación al cambio climático ha sido un objetivo prioritario para España. En 2006 se aprobó el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), tras un amplio proceso que implicó a los principales órganos de coordinación en materia de cambio climático en España: la Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático (CCPCC) y el Consejo Nacional del Clima (CNC), y el Consejo de Ministros tomó conocimiento del mismo el 6 de octubre de 2006.

El PNACC es un 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 PNACC se ejecuta mediante programas de trabajo, que definen de forma concreta las actividades a llevar a cabo. El primer programa de trabajo del PNACC, adoptado en el mismo momento de la aprobación del Plan, identificó ya entre sus 4 líneas prioritarias la evaluación del impacto del cambio climático en las zonas costeras. El segundo programa de trabajo fue adoptado en julio de 2009, en el que se asumió e incorporó todos los trabajos que comenzaron a desarrollarse con el primer programa de trabajo.

El tercer programa de trabajo 2014-2020, contiene entre los ámbitos de trabajo y líneas de actividad priorizadas para diferentes territorios geográficos, las zonas costeras e incluye el desarrollo de la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española que ha sido aprobada en el *BOE* en julio de 2017.

Pero hay otros sectores que también han sido o están siendo analizados. Bosques, biodiversidad, agricultura, son algunos de ellos. Uno de los sectores estratégicos es también el sector energético.

El cambio climático afectará al sector energético por distintas vías, tal como se muestra en la figura 19.

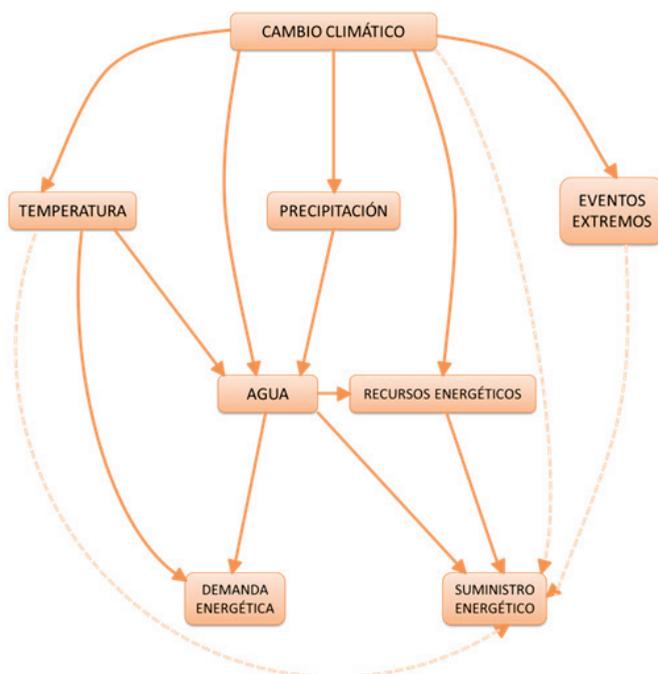


Figura 19. Vías por las que el cambio climático afecta al sector energético. Fuente: Elaboración propia

Para España, respecto al suministro energético, se espera para 2050 una reducción en la capacidad de producción de energía hidroeléctrica (aproximadamente un 10 %) y eólica (entre un 15 y un 40 %). La fotovoltaica podría aumentar un 5 % su producción. En cuanto a la demanda, se espera también un aumento de la demanda de refrigeración (un 15 %), y una reducción de la demanda de calefacción.

Para hacer frente a estos cambios, las medidas propuestas por los expertos (ver Girardi *et al.*, 2015) incluyen la mejora en la evaluación de los fenómenos, la planificación conjunta, la mejora en el ahorro y eficiencia energética, y la elaboración de normas y planes específicos de adaptación.

## Resumen y conclusiones

En este capítulo se ofrece una visión general sobre el estado del arte del conocimiento científico del cambio climático. Sobre la base de trabajo que realiza el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) analiza el concepto del cambio climático, sus causas, atribuciones y evidencias, así como el análisis de sus consecuencias. Este análisis se plantea en un marco general del riesgo que se considera el marco ideal para analizar también los riesgos que el cambio climático proyecta sobre la seguridad, la defensa y las Fuerzas Armadas.

La información demuestra que en un marco de incertidumbre se cuenta con las bases de datos, metodología y herramientas necesarias para poder hacer una evaluación de los riesgos que el cambio climático puede generar para la defensa y posibilita identificar qué aspectos regionales y sectoriales son los que tendrán mayor incidencia sobre la misma.

### Referencias

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). [www.aemet.es](http://www.aemet.es) (último acceso: octubre de 2017).
- CAMUS, P.; LOSADA, I. J.; IZAGUIRRE, C.; ESPEJO, A.; MENÉNDEZ, M.; PÉREZ, J. (2017). «Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. Earth's Future», *AGU*, 5, pp. 918-933.
- IPCC, 2013. «Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections», [VAN OLDENBORGH, G. J.; COLLINS, M.; ARBLASTER, J.; CHRISTENSEN, J. H.; MAROTZKE, J.; POWER, S. B.; RUMMUKAINEN, M. and ZHOU, T. (eds.)]. In: «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», [STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V. and MIDGLEY, P. M. (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014. «Summary for policymakers». 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», [FIELD, C.B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; M. CHATTERJEE, K.; EBI, L.; ESTRADA, Y. O.; Genova, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R. and WHITE, L.L. (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- KHAN, Z.; LINARES, P. and GARCÍA-GONZÁLEZ, J. 2016. «Adaptation to climate-induced regional water constraints in the Spanish energy sector: An integrated assessment». *Energy Policy*, 97, pp.123-135.
- KHAN, Z.; LINARES, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, J. 2017a. «Integrating water and energy models for policy driven applications. A review of contemporary work and recommendations for future developments». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, pp. 1123–1138
- KHAN, Z.; LINARES, P.; RUTTEN, M.; PARKINSON, S. C.; JOHNSON, N. and GARCÍA-GONZÁLEZ, J. 2017b. «Spatial and temporal synchronization of water and energy systems: Towards a single integrated optimization model for long-term resource planning». 2017. *Applied Energy SI. Energy-Water-Food Nexus*.

- NASA. «Global Climate Change: Vital Signs of the Planet». <https://climate.nasa.gov>. (último acceso: octubre de 2017).
- MAYOR, B. 2016. *The Water-Energy-Food Nexus*, «Trends, Trade-offs and Implications for Strategic Energies». Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- RAHMSTORF, S. 2007. «A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise». *Science* 315, pp. 368-370, 10.1126/science.1135456.
- SLANGEN, A. B. A.; CARSON, M.; KATSMAN, C.A.; VAN DE WAL, R. S.; KÖHL, W.; VERMEERSEN, A. 2014. «Projecting twenty-first century regional sea-level changes». *Climatic Change* 124, pp. 317-332.
- VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M. *et al.* 2011. «The representative concentration pathways: an overview», *Climatic Change* 109, p. 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- WBCSD. 2013. «The Nexus for Food, Feed and Fibre, Water and Energy, Co-Optimizing Solutions. World».
- Business Council for Sustainable Development. WILLAARTS, B.A; DE LA RÚA, C; CABAL, H; GARRIDO, A; LECHON, Y. 2016. *El Nexo Agua-Tierra-Energía en España*. Fundación Canal Isabel II.