
La adaptación del sector energético al cambio climático¹

Adapting the energy sector to climate change

El cambio climático afectará al sector energético global, y también al español, tanto de forma directa como indirecta. Así, el cambio climático inducirá directamente cambios en la demanda energética, o alteraciones en la operación de las centrales de producción. Pero también afectará a la disponibilidad de agua o de otros recursos, lo que a su vez tendrá influencia en la oferta y demanda de energía. Este artículo propone un marco conceptual para analizar estos impactos directos e indirectos, revisa la literatura internacional, presenta estimaciones aplicables al contexto español, y formula propuestas para la adaptación de este sector estratégico.

Klima-aldaketak globalki eragingo dio energiaren sektoreari, baita Espainiakoari ere, zuzenean nahiz zeharka. Klima-aldaketaren arabera, aldatu egingo da energiaren eskaera, edo alterazioak izango ditu ekoizpen-zentraletako jardunak. Baina, gainera, ura edo bestelako baliabideak inguratzeari ez da izango erraza, eta, horren eraginez, energiaren eskaintza eta eskaera ere aldatu egingo dira. Artikulu honetan zuzeneko nahiz zeharkako eraginak ulertzeko testuinguru kontzeptuala proposatuko dugu, beste herrialdetan honen inguruan idatzita dutena aztertuko dugu, Espainiako testuinguruan aplikatu daitezkeen estimazioak azalduko ditugu eta sektore estrategiko hau behar bezala egokitzeko proposamenak formulatuko ditugu.

Climate change will affect the global and also the Spanish energy sector, both directly and indirectly. Thus, climate change will directly induce changes in energy demand, or alterations in the operation of production plants. But it will also affect the availability of water or other resources, which in turn will influence the supply and demand of energy. This article proposes a conceptual framework to analyse these direct and indirect impacts, reviews international literature, presents estimates applicable to the Spanish context, and formulates proposals for the adaptation of this strategic sector.

¹ Este trabajo presenta un resumen de un informe más amplio elaborado por los autores para la Oficina Española de Cambio Climático (Girardi *et al.*, 2015), a la que agradecemos su financiación parcial de la investigación realizada.

Índice

1. Introducción
2. Marco conceptual
3. Impactos en los sistemas energéticos
4. Caso español
5. Propuestas de adaptación

Referencias bibliográficas

Palabras clave: adaptación, energía, cambio climático.

Keywords: adaptation, energy, climate change.

Nº de clasificación JEL: Q54, Q40

Fecha de entrada: 06/03/2020

Fecha de aceptación: 12/05/2020

1. INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo XX, después de la creación del IPCC en 1988, la celebración de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992 y la ratificación del Protocolo de Kioto en la COP-3 (Tercera Conferencia de la Partes) en 1997, la comunidad científica se ha volcado en el problema del cambio climático.

De entre las diversas maneras de afrontar el problema, aunque la mitigación (reducción de emisiones) copaba la gran mayoría de los esfuerzos, la estrategia de adaptación emergió como una forma importante y necesaria de gestionar el cambio climático. Poco a poco, gracias a la conciencia de que no podemos evitar sus consecuencias en su totalidad, la comunidad internacional ha comenzado a asumir la adaptación como una parte central de la estrategia global contra el cambio climático. Gracias a esto, en la actualidad disponemos de una amplia literatura científica sobre adaptación, aunque hay que seguir trabajando en la estimación de los impactos, sobre todo a nivel regional-nacional.

El Grupo de Trabajo II (WGII) es el grupo de trabajo del IPCC que evalúa la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, sus consecuencias y las opciones para adaptarse a él. Esta evaluación es general, no se centra solo en los sistemas de energía, sino que cubre todos los sectores que podrían verse afectados por el cambio climático, como los recursos hídricos, los ecosistemas, la agricultura y los bosques, los sistemas costeros, la industria y la salud humana, entre otros. Todos estos análisis son abordados en el 5º Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (2014), el informe más completo hasta la fecha acerca de esta problemática, y donde se da cuenta de las diferentes soluciones existentes y las posibilidades de adaptación sectoriales existentes. No obstante, aunque sí es el más importante, el IPCC no es el único grupo de expertos dedicado a adaptación. Muchos otros investigadores también se dedican a esta cuestión, y algunos se han centrado específicamente en las implicaciones sobre el sector energético (un buen ejemplo es Ebinger, 2011, o EEA, 2019). Son estos los que han servido de base al presente trabajo.

La referencia indirecta a la importancia del sector energético en el informe AR5 es permanente. Pero también hay algunas referencias directas. Según el AR5 (evidencia robusta, grado alto de acuerdo), el cambio climático tendrá los siguientes efectos en la *demanda energética*:

- Se reducirá la demanda en calefacción de los hogares.
- Se incrementará la demanda en refrigeración de los hogares.

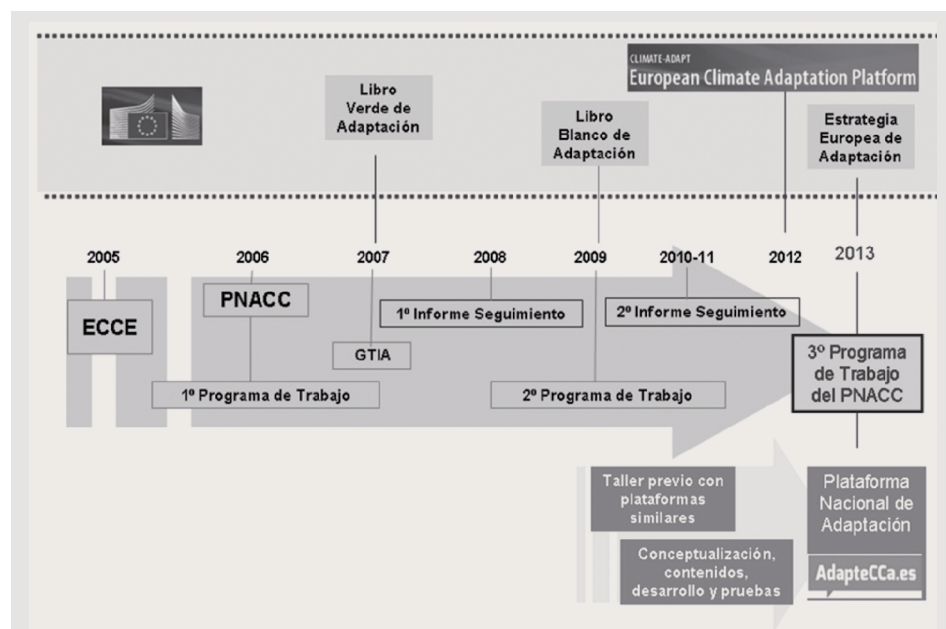
También hace hincapié el AR5 en que el efecto sobre las *fuentes energéticas* y las *tecnologías* afectará de manera diferente según los recursos primarios, los procesos tecnológicos y las ubicaciones.

En su análisis regional para Europa, el AR5 también destaca el problema de las restricciones de agua en zonas del sur de Europa, lo que conllevará, entre otros, problemas energéticos derivados de la disminución de la capacidad de generación hidráulica.

Por otro lado, dentro del apartado C, dedicado al manejo de los riesgos futuros y el incremento de la resiliencia, de nuevo se hace referencia al sector energético, concretamente a las importantes sinergias existentes entre este sector y otros como el agua, el suelo y la biodiversidad. Se destaca que las interacciones complejas entre todos ellos son importantes, aunque las herramientas para comprenderlas aún no están lo suficientemente desarrolladas. A modo de ejemplo, destaca acciones que suponen co-beneficios como (1) la mejora en la eficiencia energética y la apuesta por fuentes de energía más limpias, lo que redundará en disminución de las emisiones y en reducción de efectos dañinos sobre la salud de las mismas, o (2) la reducción en el consumo energético y de agua en zonas urbanas mediante la «transformación verde» de las ciudades y el reciclado de aguas.

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) cuyo primer programa de trabajo se aprobó en 2006, y que en mayo de 2020 ha sido actualizado para el período 2021-2030. Se trata de un programa que vino a su vez precedido por los trabajos del ECCE (Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático). La génesis completa del PNACC se recoge en el gráfico nº 1.

Gráfico nº 1. **HITOS DE LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA UE Y EN ESPAÑA ENTRE 2005 Y 2013**



Fuente: Elaboración propia.

El objetivo general del PNACC es «promover la acción coordinada y coherente frente a los efectos del cambio climático en España con el fin de evitar o reducir los daños presentes y futuros derivados del cambio climático y construir una economía y una sociedad más resilientes».

Para ello, plantea nueve objetivos específicos, estando varios de ellos asociados a la evaluación de los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad al cambio climático para cada sector. De entre todos estos sectores, uno de los más importantes desde el punto de vista de las sinergias que presenta con el resto, es el sector energético.

Queda de manifiesto por tanto la importancia que el PNACC otorga al sector energético, principalmente por el alto grado de interrelaciones con otros sectores

claves, algo que además hace particularmente complejo su análisis. Si bien algunos aspectos ya han sido considerados por otros estudios, como por ejemplo la influencia del cambio climático a través de la disponibilidad de agua, o estimaciones de la demanda de energía, faltan por analizar aún algunos elementos en detalle, y además hacerlo desde un marco integrado y coherente para España.

Este trabajo pretende analizar, con carácter exploratorio y preliminar, las consecuencias del cambio climático sobre el sector energético español, y más concretamente los efectos del mismo sobre la oferta y la demanda de energía en nuestro país. El estudio pretende identificar los análisis ya realizados y recopilar el conocimiento existente sobre esta cuestión a nivel internacional en general y su aplicación a España en particular.

El texto se organiza de la siguiente manera: el apartado 2 presenta el marco conceptual de adaptación al cambio climático en el sector energético que guía todo el trabajo. A continuación, el apartado 3 desgana este marco describiendo someramente los impactos directos e indirectos del cambio climático sobre los sistemas energéticos. El apartado 4 se centra en describir el caso español y, finalmente, el apartado 5 incluye algunas de las propuestas concretas de adaptación presentes en la literatura.

2. MARCO CONCEPTUAL

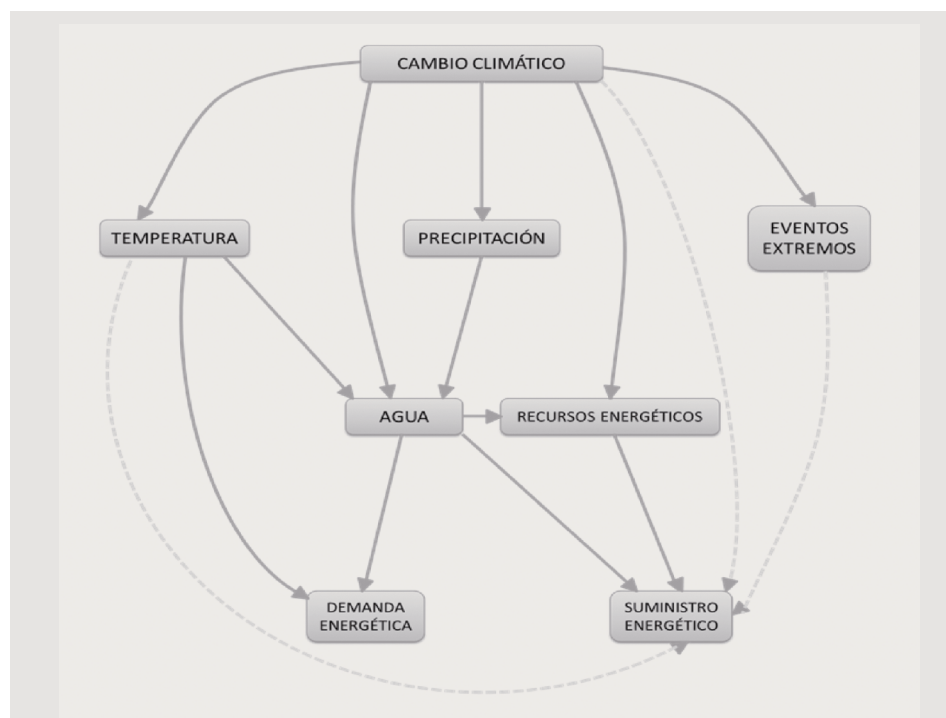
Como se ha comentado en la introducción, ante el creciente reconocimiento de que el cambio climático está en marcha y plantea graves riesgos para las sociedades humanas y los sistemas naturales, es necesario adoptar medidas que contemplen las estrategias nacionales de adaptación al cambio climático en aquellos sectores estratégicos más vulnerables. Ese es uno de los objetivos del PNACC desarrollado por la OECC, el cual, de entre todos los sectores, destaca al energético como uno de los prioritarios.

Para poder avanzar de forma ordenada en este análisis, el primer paso que se consideró fue crear un marco conceptual para el estudio de la adaptación al cambio climático en el sector energético, basado en la literatura científica (p.ej. Ebingger, 2011, o EEA, 2019). El gráfico nº 2 presenta este marco, en el cual pueden verse las diferentes relaciones que existen entre el cambio climático y el sistema energético.

Como se puede apreciar, el marco se divide en dos partes. Por un lado, la parte superior se centra en los sistemas físicos: se tienen en cuenta las principales tendencias climáticas que constituyen el cambio climático, a saber, los cambios en la temperatura, las precipitaciones y los fenómenos extremos. Por otro lado, la parte inferior se refiere a los impactos que el cambio climático y sus consecuencias producen en todos los sectores que constituyen un sistema de energía. Esta será la sección principal de este trabajo, que se abordará a continuación. Es importante

notar que en esta parte se considera el agua como *input* relevante del sistema de energía. Se hace así por tratarse esta de un recurso fundamental tanto para la demanda de energía como para la oferta. Agua y energía están vinculados a través de numerosas vías, como bien muestran los trabajos de Khan *et al.* (2016). Muchas fuentes de energía requieren cantidades significativas de agua y producen una gran cantidad de aguas residuales que requieren energía para su tratamiento. Por todo ello, los sistemas de energía deben ser gestionados teniendo en cuenta a su vez el agua y su gestión.

Gráfico nº 2. **MARCO GENERAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR ENERGÉTICO**



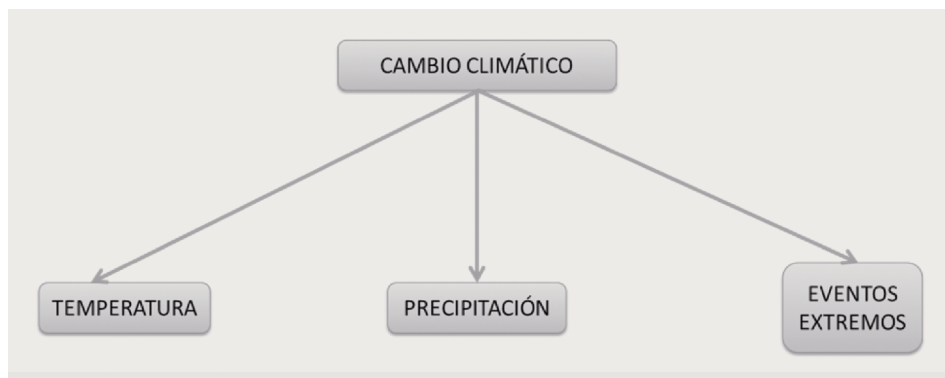
Fuente: Elaboración propia.

3. IMPACTOS EN LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

3.1. Impactos físicos

El punto de partida de toda evaluación de los impactos del cambio climático sobre el sistema de energía es la evaluación de los impactos físicos en los sistemas naturales.

Gráfico n° 3. **MARCO GENERAL. IMPACTOS FÍSICOS**



Fuente: Elaboración propia.

Hay un elevado acuerdo y una evidencia robusta de que el cambio climático se está produciendo y que está afectando a los sistemas naturales, físicos y humanos. Las observaciones de los cambios en el sistema climático y su magnitud son especialmente importantes para la adaptación, debido a que los grandes cambios del sistema físico son a su vez los motores de cambio sobre el sistema energético. Estas fuerzas motoras pueden ser agrupadas en tres grandes efectos climáticos: (1) el cambio de temperaturas, (2) el cambio de patrón de las precipitaciones y (3) el cambio de la frecuencia e intensidad de eventos extremos. Es importante analizarlas con algo de detalle, pues serán estas las fuerzas motrices de los impactos sobre todo el sistema energético.

3.1.1. *Cambios en la temperatura*

Cada una de las tres últimas décadas ha sido, sucesivamente, más caliente en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850. El efecto más claro del cambio climático tiene que ver con ello, es decir, con un aumento de la temperatura media en la casi totalidad del mundo. Este aumento de temperatura se puede observar en varios elementos que constituyen el sistema natural, como la atmósfera, la tierra, el océano, los ríos, los lagos y los glaciares.

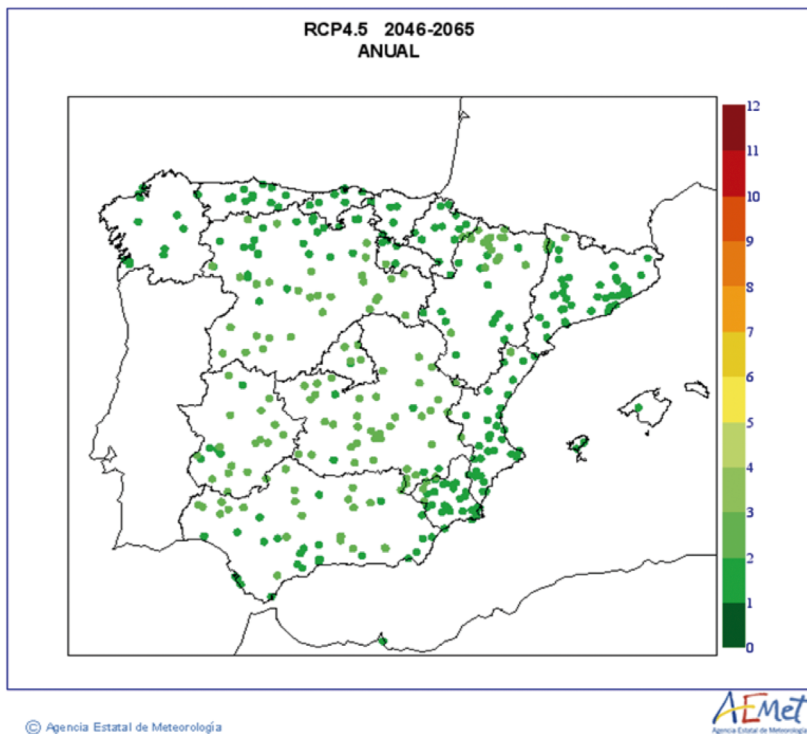
Para apreciar la intensidad media de este calentamiento, los investigadores sopesan algunos parámetros, como la temperatura media global de la superficie, la temperatura atmosférica libre, la temperatura de la troposfera y la temperatura del océano. A excepción de algunos casos particulares, todas las proyecciones ponen de manifiesto con evidencia robusta el calentamiento global.

El promedio global de la temperatura de la superficie de la tierra y el océano combinados ha aumentado 0,85°C durante el período de 1880 a 2012. Respecto a los océanos, el calentamiento es más grande cerca de la superficie: los primeros 700 m

de columna de agua en los océanos se han calentado a un ritmo de $0,11^{\circ}\text{C}$ por década durante el período 1971-2010, lo que supone más de un 60% del aumento neto de energía en el sistema climático.

Para los próximos años, en España tenemos las proyecciones regionalizadas desarrolladas por la AEMET, todas ellas disponibles de forma abierta (AEMET, 2019). A modo de ejemplo se incluye el gráfico nº 4, que presenta el incremento proyectado en la temperatura en el escenario el RCP4.5 en el período 2046-2065 y el gráfico nº 5, que presenta el incremento proyectado en la temperatura en el escenario el RCP8.5 en el período 2081-2100.

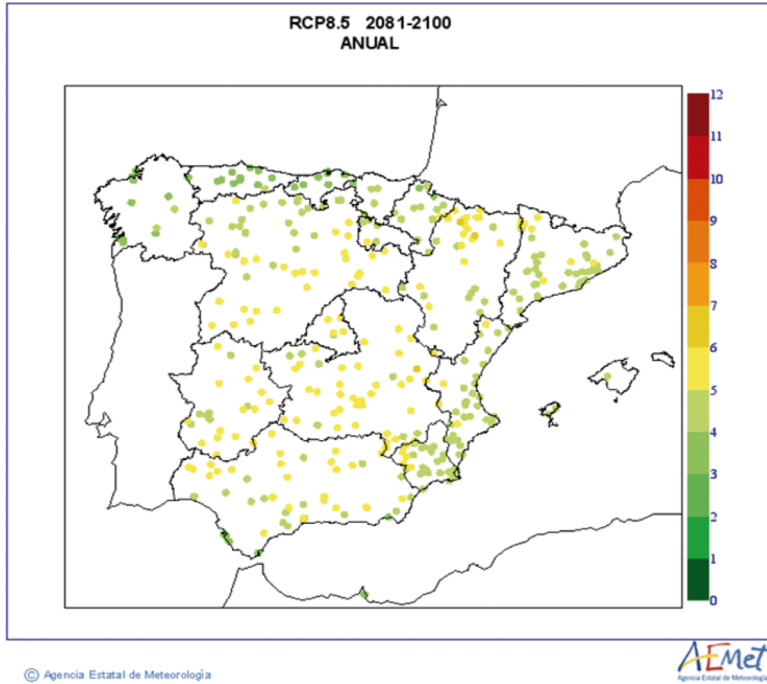
Gráfico nº 4. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. AUMENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL SEGÚN EL RCP4.5 EN EL PERIODO 2046-2065**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: AEMET.

Gráfico nº 5. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. AUMENTO DE LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL SEGÚN EL RCP8.5 EN EL PERIODO 2081-2100**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: AEMET.

Se observa que, en el escenario RCP8.5, el más extremo, el aumento puede alcanzar los 5 o 6 grados en zonas del interior de la meseta y el norte de Aragón.

3.1.2. *Cambios en las precipitaciones*

El patrón de precipitaciones ha cambiado significativamente en el siglo XX. Se estima que en las latitudes medias del hemisferio norte la precipitación ha aumentado desde 1901, y especialmente después de 1951. Sin embargo, un análisis detallado de la influencia humana en los cambios en los patrones de precipitaciones es difícil de hacer con los registros existentes. En la actualidad existe confianza media² en que ha habido una influencia humana significativa en los cambios a escala global en los patrones de precipitación, especialmente en el hemisferio norte (latitudes medias y altas).

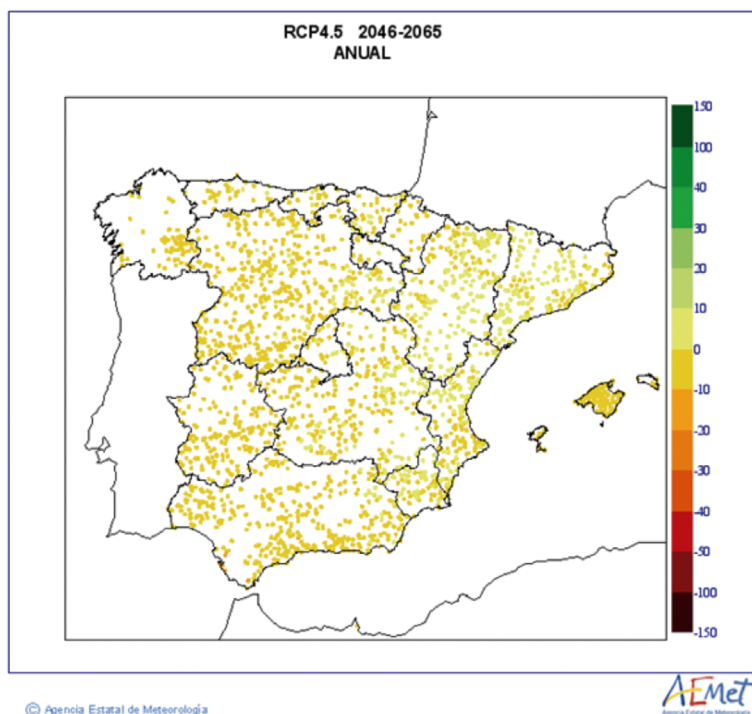
² Una de las métricas en las que se basa el AR5 es la confianza (*confidence*) en la validez de un hallazgo, basada a su vez en el tipo, la cantidad, la calidad y consistencia de la evidencia.

De cara al futuro, las proyecciones sí muestran un aumento claro de la precipitación más marcado en función de la latitud. En términos generales, las precipitaciones medias anuales aumentarán en las latitudes altas y disminuirán en las medias, ámbito en el que se encuentra nuestro país.

Con respecto a las concreciones para España, de nuevo la referencia son los estudios de regionalización llevados a cabo por la AEMET.

Aunque todas las proyecciones sobre cambios esperados en las precipitaciones están accesibles en la web de la AEMET, incluimos a modo de ejemplo, como hicimos con la temperatura, por un lado el gráfico nº 6, que presenta los resultados para el escenario RCP4.5 en el periodo 2046-2065 y, por otro lado, el gráfico nº 7, que presenta los resultados para el escenario RCP8.5 en el periodo 2081-2100, el más extremo, el cual, como se puede observar, incluye descensos superiores al 15% en el suroeste de la Península.

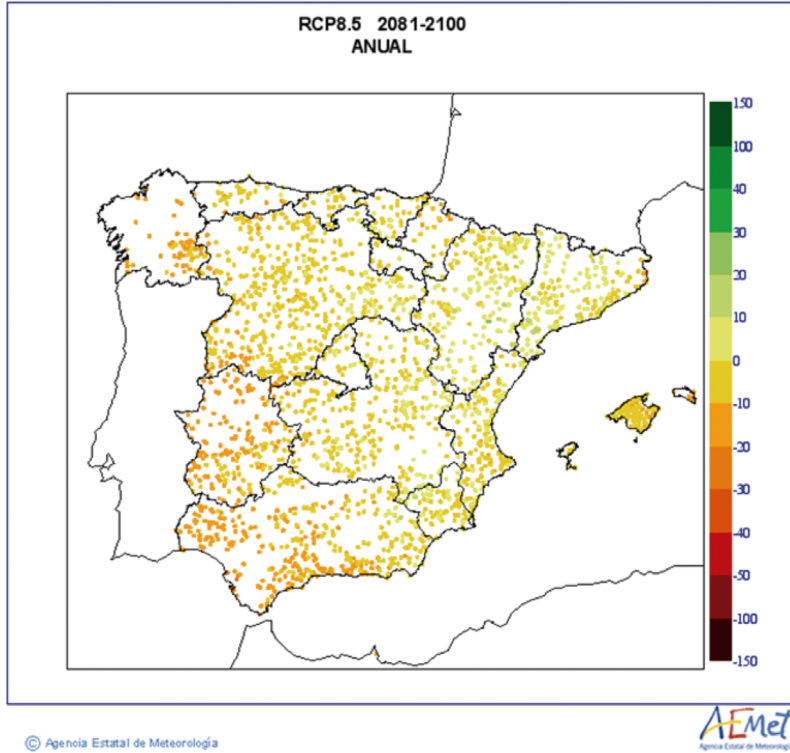
Gráfico nº 6. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. CAMBIO EN LAS PRECIPITACIONES SEGÚN EL RCP4.5 EN EL PERIODO 2046-2065**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: AEMET.

Gráfico nº 7. **PROYECCIONES REGIONALIZADAS DE LA AEMET PARA ESPAÑA. CAMBIO EN LAS PRECIPITACIONES SEGÚN EL RCP8.5 EN EL PERIODO 2081-2100**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: AEMET.

Estos datos de precipitaciones se complementan con los estudios del CEDEX (2010 y 2012) sobre la escorrentia. El cuadro nº 1 muestra las proyecciones de los cambios porcentuales en la misma en 2050, tomando la media del periodo 2041-2070. Estos estudios de CEDEX trabajan a su vez sobre escenarios de cambio climático del AR4³.

Vemos que, en el escenario más desfavorable (2), la reducción de la escorrentia en algunas demarcaciones hidrográficas del suroeste peninsular alcanza el 58 %.

³ El escenario 1 de cambio climático corresponde al escenario A2i, CGCM2-FIC del estudio del CEDEX, mientras que el escenario 2 corresponde al escenario A2ii, ECHAM4-FIC. El primer término (A2i o A2ii) se refiere al escenario original de cambio climático procedente del IPCC, y el segundo (CGCM2-FIC o ECHAM4-FIC) en función del modelo de circulación general de la atmósfera empleado para generar los. Así, el escenario 1 es un escenario de cambio climático medio, y el escenario 2 es un escenario severo.

Cuadro nº 1. VARIACIÓN INTERPOLADA DE LA ESCORRENTÍA EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (% , MEDIA 2041-2070)

Demarcación hidrográfica	Variación de la escorrentia (%) (2041-2070)		Variación del recurso disponible (%) (2041-2070)	
	1	2	1	2
Galicia Costa	-4	-31	-14	-37
Miño-Sil	-6	-34	-11	-28
Cantábrico Occidental	-4	-27	-20	-38
Cantábrico Oriental	-2	-24	-11	-34
Duero	-13	-41	-10	-37
Tajo	-16	-48	-13	-50
Guadiana	-23	-58	-19	-58
Tinto, Odiel Y Piedras	-23	-58	-8	-65
Guadalquivir	-18	-55	-7	-55
Guadalete y Barbate	-18	-55	-12	-56
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-15	-50	-13	-41
Segura	-10	-39	-11	-44
Júcar	-11	-28	-11	-32
Ebro	-6	-26	-14	-27
Distrito Fluvial de Cataluña	-2	-5	-5	-11

Fuente: CEDEX.

3.1.3. Eventos extremos

Desde 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos⁴. Estos episodios graves aparecen en diferentes formas, y afectan a la temperatura, a las precipitaciones y a la circulación atmosférica.

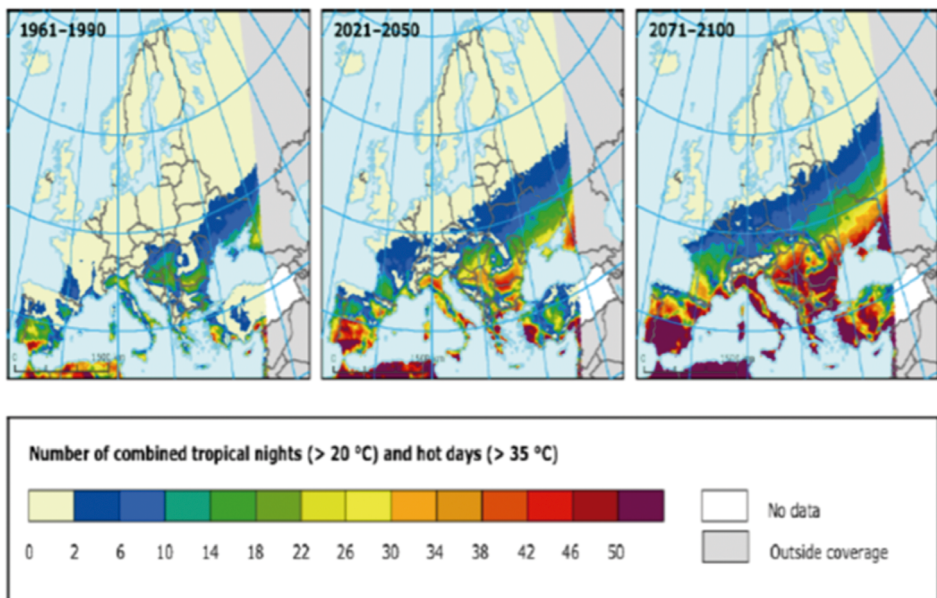
Los días y las noches fríos ha disminuido, y los días y las noches cálidos se han incrementado a escala global. La frecuencia de las olas de calor también ha aumentado en Europa, Asia y Australia. En general, la mayoría de estudios pronostican que en el futuro habrá más eventos extremos de alta temperatura y menos de baja temperatura en la mayoría de las zonas terrestres. En esa línea, las olas de calor se producirán con mayor frecuencia y duración, mientras que los inviernos de frío extremo, aunque menos numerosos, podrán seguir teniendo lugar.

⁴ Un evento extremo meteorológico es un evento inusual para un lugar en particular y una época del año concreta. Puede considerarse evento extremo meteorológico cuando se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 de la función de probabilidad observada. Por otra parte, para que se pueda hablar de evento extremo climático se precisa que el patrón meteorológico extremo se extienda en el tiempo hasta afectar de forma significativa a los parámetros climáticos medios de una estación.

La frecuencia y la intensidad de precipitaciones torrenciales han variado: en América del Norte y Europa se han incrementado, mientras que en otros continentes no hay tanta evidencia. Las proyecciones globales a corto y largo plazo confirman una tendencia clara de aumento en las precipitaciones medias a nivel mundial, pero hay variaciones significativas entre regiones. Por ejemplo, las precipitaciones extremas se harán más intensas y más frecuentes en la mayor parte de las latitudes medias y las regiones tropicales húmedas.

También ha habido una modificación en la actividad de huracanes o ciclones en el siglo XX. El informe AR4 del IPCC concluyó que existe una tendencia creciente de ciclones tropicales desde 1970 en algunas regiones. No obstante, la literatura más reciente indica que es difícil sacar conclusiones firmes con respecto a los niveles de confianza asociados con las tendencias observadas antes de la era de los satélites. Sin embargo, las proyecciones futuras de la actividad de los ciclones tropicales prevén que habrá una disminución o en todo caso un estancamiento a nivel agregado durante el siglo XXI. A nivel mundial, el área abarcada por sistemas monzónicos aumentará durante este siglo, mientras que los vientos del monzón se debilitarán y las precipitaciones se intensificarán debido al aumento de la humedad atmosférica.

Gráfico nº 8. **IMPACTOS DE EVENTOS EXTREMOS PROYECTADOS POR EL PROYECTO PESETA**



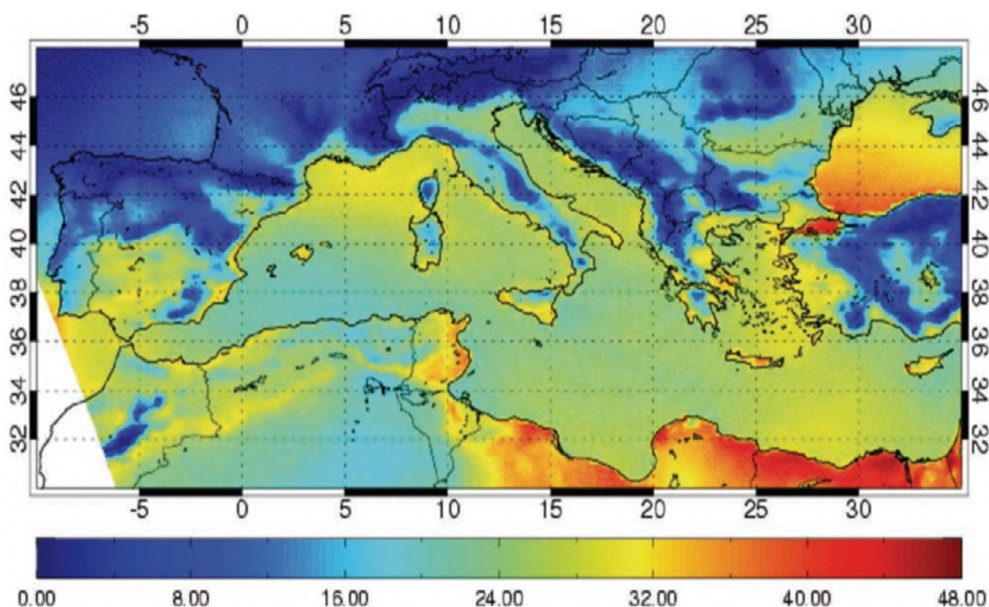
Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: Proyecto Peseta (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological (European Commission).

A nivel europeo, los proyectos PESETA (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) desarrollaron unos modelos *bottom-up* de impactos climáticos esperados. El gráfico nº 8 recoge uno de estos impactos a modo de ejemplo: el número de noches tropicales consecutivas.

De nuevo, en España, es la AEMET quien ha realizado estudios que analizan la evolución de los eventos extremos. Para ello han desarrollado proyectos que estudian las tendencias de una serie de índices de extremos, tales como el aumento en el número de días y noches cálidas, la frecuencia de olas de calor, los días de precipitación o el número de días secos consecutivos. Los principales resultados en estos ámbitos provienen del proyecto ENSEMBLES. A modo de ejemplo se incluyen dos gráficos. El gráfico nº 9 presenta una proyección de las noches tropicales (aquellas en las que la temperatura no baja de los 20°C) y la Figura 10 muestra el aumento proyectado en la duración máxima de los periodos de sequía (con precipitaciones por debajo de 1mm).

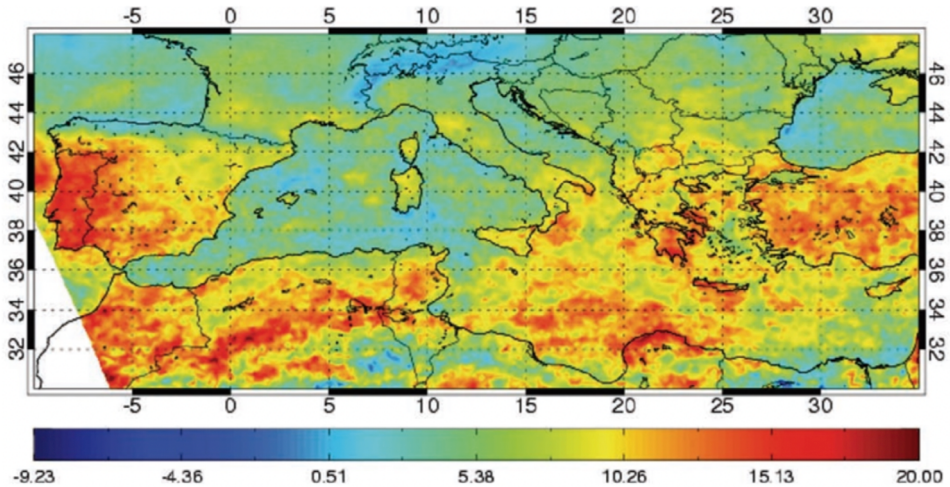
Gráfico nº 9. **AUMENTO PROYECTADO DEL NÚMERO DE NOCHES TROPICALES (>20°C) EN EL MEDITERRÁNEO, EN EL PERIODO 2021-2050 EN RELACIÓN A LA MEDIA DE 1961-1990. ESCENARIO A1B**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: Proyecto Peseta (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological (European Commission).

Gráfico nº 10. **AUMENTO ESPERADO EN LA DURACIÓN MÁXIMA DE SEQUÍAS (<1MM) EN EL MEDITERRÁNEO, EN EL PERIODO 2021-2050 EN RELACIÓN A LA MEDIDA DE 1961-1990. ESCENARIO A1B**



Nota: en la versión digital está disponible a color. www1.euskadi.net/ekonomiaz

Fuente: Proyecto Peseta (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis) Joint Research Centre-Institute for Prospective Technological (European Commission).

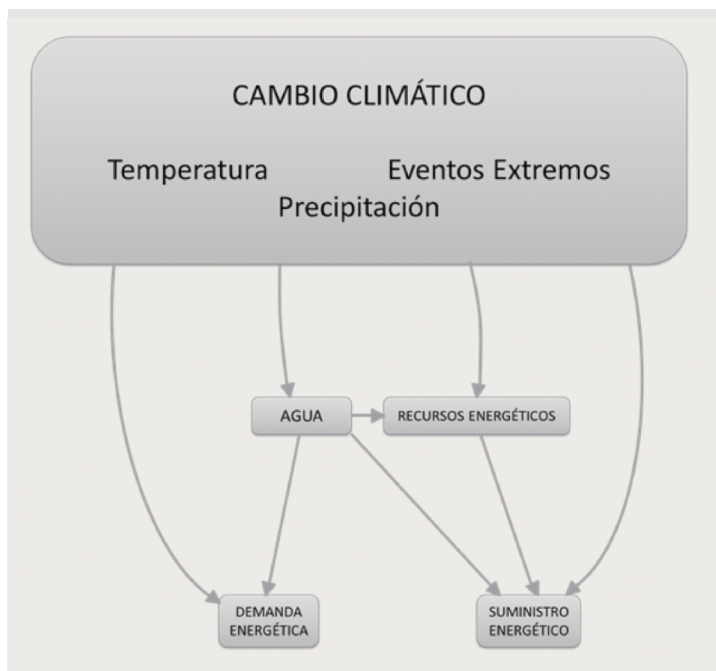
Las zonas más expuestas a estos eventos extremos son las zonas de costa. En España, el estudio de referencia sobre impactos de cambio climático en costa es el C3E, desarrollado por la Universidad de Cantabria para la OECC. Dentro de la zona costera, el proyecto se centra en los riesgos de inundación y erosión y la incidencia sobre las infraestructuras; más concretamente en los impactos y adaptación en grandes ciudades costeras y en el sector turístico.

3.2. Impactos en el sistema energético

Mientras que en la sección precedente se describieron cualitativamente los impactos del cambio climático sobre los sistemas físicos (temperatura, precipitaciones y eventos extremos), en este apartado se presenta una cuantificación de los impactos esperados del cambio climático sobre el sistema energético basándose en el AR5 del IPCC y en una revisión amplia de la literatura relacionada.

En este punto, el sistema energético se considera subdividido en tres ámbitos principales, como se puede observar en el gráfico nº 11: fuentes de energía (agua y otros recursos), demanda de energía y suministro de energía. Como se mencionó anteriormente, el agua se considera aparte de los recursos energéticos, ya que tiene una mayor importancia que otras fuentes de energía, y porque afecta fuertemente a muchas partes de la estructura.

Gráfico nº 11. **MARCO GENERAL. IMPACTO SOBRE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS**



Fuente: Elaboración propia.

Los recursos energéticos se refieren a la cantidad de energía primaria disponible; la demanda de energía se refiere al uso final de la energía; y el suministro de energía se centra en las tecnologías que convierten la energía primaria en una forma que pueda ser utilizada por los consumidores.

Con respecto al suministro, dado que parte importante del sistema energético actual (e incluso las instalaciones de energía en construcción o en proyecto que se llevarán a cabo en los próximos años) probablemente seguirá estando operativa en las nuevas condiciones climáticas debido a la larga vida útil de la infraestructura energética, se hace especialmente necesario realizar un análisis preciso de la oferta actual.

En esta sección se tratará por tanto de cubrir una amplia variedad de impactos que el cambio climático puede tener sobre los sistemas de energía, y se hará siempre con la guía del marco conceptual del gráfico nº 11.

En el informe original (Girardi *et al.*, 2015) se analizan con todo detalle cada una de las interacciones entre cambio climático y oferta y demanda energéticas. En este trabajo presentamos tan solo los cuadros que resumen algunos de los hallazgos a nivel mundial presentes en la literatura. La concreción para el caso español se incluye en el siguiente apartado.

3.2.1. Impactos en la oferta

El cuadro nº 2 recoge los impactos de los cambios de temperatura en la generación de energía.

Cuadro nº 2. IMPACTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE LA OFERTA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Eficiencia		
Fotovoltaica	El aumento de las temperaturas puede modificar la eficiencia de las células fotovoltaicas (la energía producida depende de la temperatura de la célula) y reducir la generación eléctrica PV.	Crook et al., 2011
Centrales térmicas	Para un aumento de temperatura de 1°C, hay una reducción en la generación en las centrales nucleares del 0,8%, y en centrales de gas y carbón de un 0,6%, debido a la pérdida de eficiencia térmica. Un aumento del 1°C en la temperatura ambiente reduce la generación en plantas térmicas aproximadamente un 0,45%.	Linnerud et al., 2009
Transmisión y distribución	Podría haber un aumento en las pérdidas en la transmisión debido a una mayor temperatura. Las altas temperaturas también pueden reducir la eficiencia de los transformadores.	Eskeland et al., 2008

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro nº 3 presenta los impactos de los cambios de la disponibilidad de agua en el suministro de energía.

Cuadro nº 3. IMPACTOS DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SOBRE LA OFERTA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Refrigeración (plantas térmicas)	Necesidad de agua dulce para la generación termoeléctrica en 2035: + 20% extracción de agua dulce en comparación con 2010. + 85% consumo de agua dulce en comparación con 2010.	Durmayaz y Sogut, 2006; Tobin et al., 2018

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro nº 4 resume los impactos de los eventos extremos en el suministro de energía.

Cuadro nº 4. IMPACTOS DE LOS EVENTOS EXTREMOS SOBRE LA OFERTA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Reducción/ interrupción del suministro	El aumento esperado en los eventos extremos (como los huracanes) tendrá un impacto significativo en el sector energético. Los huracanes (vientos fuertes y olas altas) pueden tener un impacto debilitante en el suministro de energía. Los eventos extremos afectan a las centrales térmicas y nucleares, la infraestructura, plantas hidroeléctricas, parques eólicos, tuberías de petróleo y gas y la red eléctrica. Todos estos impactos pueden causar interrupciones de suministro.	Kopitko y Perkins, 2011

Fuente: Elaboración propia.

Por último, El cuadro nº 5 presenta los impactos de los cambios en los recursos energéticos sobre el suministro de energía.

Cuadro nº 5. IMPACTOS DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS SOBRE LA OFERTA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Hidroelectricidad	La producción de energía hidroeléctrica con base en el río Colorado podría disminuir hasta en un 40% a mediados de este siglo. La energía hidroeléctrica en Central Valley podría disminuir entre un 10% y un 12%. Europa del Norte: las afluencias a los ríos se incrementaría en un 11% entre 2001 y 2040. Esto aumentaría el suministro de energía en un 1,8% con respecto a 2001, o incluso hasta el 20% según otras estimaciones, con reducciones similares en Europa del Sur. Cambios en la generación de energía hidroeléctrica en 2050: 2931TWh generación +2.46TWh, cambio de +0,08% del total. A nivel global, reducciones entre el 61 y el 74% de la capacidad útil de las centrales hidráulicas.	Mideksa y Kallbekken, 2010; Tobin <i>et al.</i> , 2018; van Vliet <i>et al.</i> , 2016
Viento	-10 a -15% de la velocidad media del viento en los EE.UU. continental, que se correspondería con una reducción en la generación de energía eólica en el orden de 30 a 40%. En Europa la reducción de la generación eólica oscila entre el 5 y el 10%.	Breslow y Sailor, 2002; Tobin <i>et al.</i> , 2018
Fotovoltaica	-6% de producción eléctrica en las células solares debido a -2% de la radiación solar (Norte de Europa) Reducciones de hasta el 10%, y aumentos de hasta el 3% en distintos países europeos.	Fidje y Martinsen, 2006; Tobin <i>et al.</i> , 2018

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Impactos en la demanda

Esta sección se centra sobre todo en el impacto debido al aumento de temperatura. En el informe original se analizan con más detalle otras interacciones.

El cuadro nº 6 recoge los principales resultados encontrados.

Cuadro nº 6. IMPACTOS DE LA TEMPERATURA SOBRE LA DEMANDA

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Demanda de calefacción	Incremento del 0.8% por año entre 2000 y 2030. Lento decrecimiento desde 2030. -34% en 2100 (Maryland, EE.UU.) Daños económicos asociados al cambio en la demanda de calefacción y climatización en Europa y EEUU, mayores en el segundo. Reducción en la demanda de calefacción de un 37% en Europa.	Ruth y Lin, 2006; Ciscar <i>et al.</i> , 2019; Ciscar <i>et al.</i> , 2018.
Demanda de refrigeración	7% incremento entre 2020 y 2030. +70% incremento para 2100 sobre la demanda estimada sin cambio climático; esto supone una demanda 40 veces superior en 2100 a la del 2000. Incremento del 50% de la demanda de refrigeración en Europa.	Wilbanks <i>et al.</i> , 2008; Ciscar <i>et al.</i> , 2018.
Industria	Consumo en EE.UU. por unidad de producción industrial: +0.0127% para un incremento de 1 HDD (Fahrenheit) +0.0032% para un incremento de 1 CDD (Fahrenheit) 1,098 billones m ³ de agua para 2100 (0,763 billones de m ³ en 2010: +45%)	MIT 2014
Agricultura	Carga riego en julio en Estados Unidos (Noroeste del Pacífico): + 9,8% sin cambios en la superficie de cultivo de regadío (evaluación anterior: + 8,7%) Agua en agricultura: 1,389 billones de m ³ en 2100 (1,551 billones de m ³ en 2010: -10%)	MIT 2014

Fuente: Elaboración propia.

4. CASO ESPAÑOL

En 2005, en el marco del proyecto ECCE (Efectos del Cambio Climático en España) promovido por la Oficina Española de Cambio Climático a través de un convenio de colaboración con la Universidad de Castilla La Mancha, un amplio panel de expertos nacionales en energía desarrollaron un informe sobre impactos en el sector debidos al cambio climático. Aunque propiamente no era un informe de adaptación, sus propuestas

pueden ser entendidas en esta clave. Se trata pues de un trabajo de referencia que en este último apartado se trata de complementar con los avances que hasta la fecha se han ido dando en materia de adaptación al cambio climático en el sector energético.

Como punto de partida, se incorpora un cuadro resumen, procedente de este informe de 2005, que muestra la escala de impactos que cada uno de los efectos asociados al cambio climático podría tener en las tecnologías y subsectores energéticos de nuestro país (Gráfico nº 12).

Gráfico nº 12. **IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SISTEMA ENERGÉTICO ESPAÑOL**

		Precipitaciones		Temperatura		Viento		Otros
		Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	
Electricidad	Generación	Positivo (hidráulica)	Negativo	Negativo*	Positivo*	Positivo en cónica	Negativo en cónica	Solar: insolación positiva
	Transporte y Distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo si es muy elevado	Neutro	
	Comercialización/demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Gas natural	Aprovisionamiento	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	Negativo (barco)	Neutro	
	Regasificación	Neutro	Neutro	Positivo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Positivo (gasoductos descubiertos)	Negativo (gasoductos descubiertos)	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Neutro	Neutro	Negativo (almacenes descubiertos)	Neutro	Neutro	Neutro	
	Comercialización/Demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Petróleo	Refino	Neutro	Neutro	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Demanda	Neutro	Neutro	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	
Carbón	Extracción	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Neutro	
	Demanda	Negativo	Positivo	Negativo **	Negativo **	Neutro	Neutro	
Renovables uso no eléctrico	Producción	Positivo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Neutro	Neutro	Solar de baja intensidad: insolación positiva

* Afecta al rendimiento de las centrales termoeléctricas, nucleares, cogeneración, biomasa, solar térmica, etc. Asimismo, la solar fotovoltaica disipa el calor con mayor dificultad.

** Se considera negativo al suponer una mayor demanda del recurso.

Fuente: Elaboración propia en base a información de ECCE.

4.1. Impactos en la oferta energética

Nos centraremos en este apartado en analizar tres ámbitos principales de impacto del cambio climático sobre la oferta energética en España, a saber, (1) los sistemas agua-energía, (2) la generación fotovoltaica y (3) la generación eólica.

4.1.1. Impactos vinculados a los usos del agua

El estudio de referencia en este ámbito es el desarrollado por Khan *et al.* (2016). Este estudio trabaja principalmente con dos escenarios de cambio climático a 2050:

- WC1na: escenario medio de cambio climático, sin adaptación.
- WC2na: escenario severo de cambio climático, sin adaptación.

Los principales resultados del estudio se exponen a continuación. En primer lugar, el cuadro nº 7 presenta los cambios en los usos del agua.

Cuadro nº 7. USOS Y CONSUMOS DE AGUA (en hm³)

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Total de recurso natural disponible	110.116	110.116	99.934	70.985
Total de recurso natural disponible para energía	Ilimitada	19.699	17.247	12.651
Consumo de agua para Energía Primaria	1.413	1.383	1.413	1.413
Uso de agua para Energía Primaria	1.186	1.147	1.178	1.188
Consumo de agua para Conversión Energética	920	744	708	651
Uso de agua para Conversión Energética	39.379	38.569	37.123	33.788
Consumo de agua total para energía	2.332	2.284	2.279	2.199
Uso de agua total para energía	40.565	39.716	38.301	34.975

Fuente: Khan *et al.* (2016).

El cuadro nº 8 recoge las principales tendencias relacionadas con los impactos en los consumos energéticos debidos a los cambios en la disponibilidad y usos del agua.

Cuadro nº 8. DEMANDAS Y CONSUMOS ENERGÉTICOS (en EJ)

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Electricidad generada	1,49	1,46	1,45	1,43
Electricidad renovable	0,77	0,74	0,73	0,71
Energía final total	5,63	5,64	5,64	5,62
Energía domestica	1,89	1,83	1,83	1,78
Dependencia energética (%)	74,84	75,43	75,39	75,89
Pérdidas en generación	1,71	1,65	1,65	1,63
Pérdidas en transporte	0,15	0,15	0,14	0,14

Fuente: Khan *et al.* (2016).

Se puede observar cómo en el escenario de cambio climático drástico sin adaptación se reduce el total de energía del sistema. Esto se debe a que el modelo utilizado prefiere ahorrar energía antes que aumentar los costes debidos a la falta de adaptación del sistema.

En este estudio no se han tenido en cuenta algunas interrelaciones del sistema, como son los posibles cambios en el coeficiente de aprovechamiento en función de los usos alternativos, por ejemplo, en los cambios en los caudales ecológicos. Tampoco se ha tenido en cuenta el posible cambio en el aterramiento de los embalses debido a un aumento de las precipitaciones extremas, lo que tendría a su vez un reflejo en la disponibilidad del recurso agua.

Es importante dejar claro que estos interesantes resultados provenientes de Khan *et al.* (2016) se centran solo en analizar los impactos del cambio climático en los sectores energéticos debidos a los cambios en la disponibilidad y los usos del agua. Para obtener una imagen completa del impacto total del cambio climático en el sistema energético español sería necesario emplear un modelo que recogiera todas las posibles influencias, no solo la debida al agua. Hasta la fecha, no somos conscientes de que ese trabajo se haya realizado.

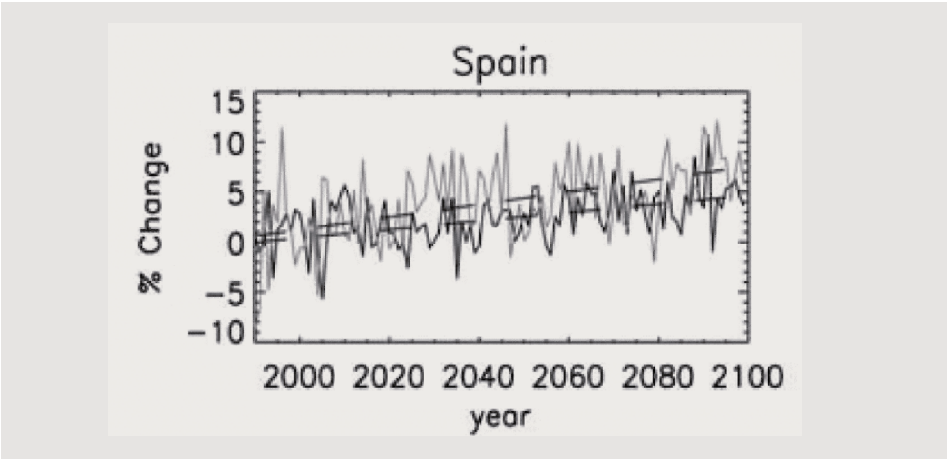
En otro estudio de interes Tobin *et al.* (2018) evalúan la producción hidroeléctrica en España para distintos escenarios de calentamiento global (hasta 3°C), encontrando reducciones de la producción de hasta un 18% a nivel agregado.

4.1.2. **Impactos en la producción fotovoltaica**

Uno de los estudios de referencia en este campo fue el desarrollado por Crook *et al.* (2011), basados en el escenario A1B del AR4. Se trata de un estudio internacional

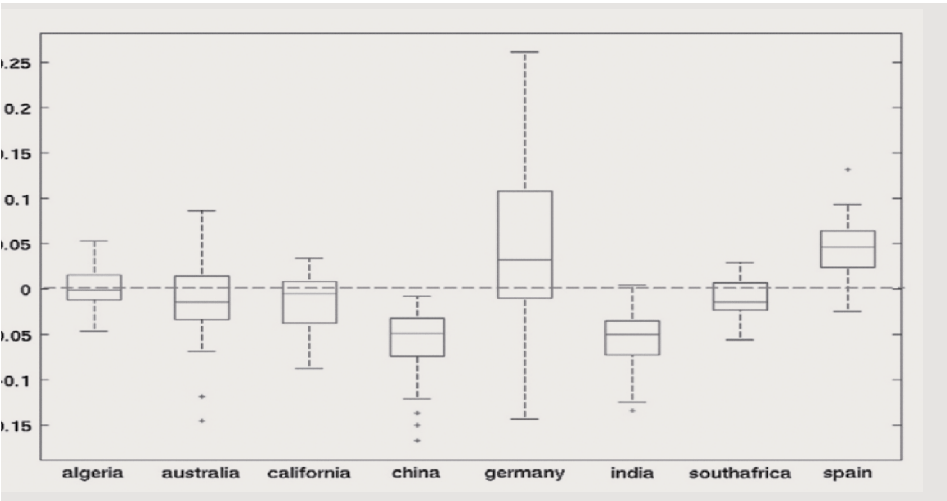
pero que tuvo una particularización para España. El gráfico nº 13 presenta la variación proyectada en la potencia fotovoltaica en España según dos modelos de trabajo (HadGEM1 y HadCM3).

Gráfico nº 13. CAMBIO EN LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA (2000-2100). ESCENARIO A1B



Fuente: Crook et al. (2011).

Gráfico nº 14. CAMBIOS ESPERADOS EN EL POTENCIAL FOTOVOLTAICO EN EL PERIODO 2006-2049 EN RELACIÓN A LA MEDIA DEL PERIODO 2006-2015. RCP8.5



Fuente: Wild et al. (2015),

Si observamos las rectas de regresión que marcan las tendencias de ambos modelos de trabajo, el impacto es bajo, apenas supera el 5% en los albores de final de siglo. Estos resultados se explican por la evolución de dos factores: temperatura e irradiancia. 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.

Estos datos se han visto complementados por el trabajo más reciente de Wild *et al.* (2015), basado en el escenario RCP8.5 cuyas estimaciones se presentan en el gráfico nº 14.

En el margen derecho de la imagen encontramos a España, que presenta un escueto potencial de incremento en la generación fotovoltaica centrado en el 5% para el periodo de estudio. Tobin *et al.* (2018) confirman el sentido positivo de los cambios, pero con magnitudes menores, limitadas al 2% de aumento.

4.1.3. *Impactos en el potencial eólico*

El trabajo más relevante en este aspecto es el de Santos *et al.* (2015), basado en el escenario A1B, para la Península Ibérica. El gráfico nº 15 muestra los resultados más destacados.

Gráfico nº 15. **CAMBIOS ESPERADOS EN EL POTENCIAL EÓLICO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA (MWH/DÍA) EN EL PERIODO 2041-2070. ESCENARIO A1B**

	DJF	MAM	JJA	SON
1. Northern Galicia	-0.31 (-0.54)	-1.29 (-1.16)	0.41 (0.41)	-1.00 (-0.61)
2. Burgos	-0.02 (-0.97)	-1.19 (-1.32)	0.21 (0.19)	-0.55 (-0.63)
3. Ebro valley	-0.13 (-0.49)	0.79 (0.72)	1.47 (1.34)	0.56 (0.34)
4. Northern Portugal	-0.76 (-0.96)	-0.81 (-1.28)	-0.61 (-0.32)	-0.88 (-0.82)
5. Southern Cataluña	-1.46 (-1.42)	0.76 (0.06)	-0.11 (-0.34)	-0.94 (-1.31)
6. Oeste	-0.51 (-1.02)	-0.90 (-0.60)	0.26 (0.00)	-0.66 (-0.58)
7. Albacete	-0.56 (-1.16)	-1.02 (-0.83)	0.47 (0.63)	-0.51 (-0.61)
8. Southern Andalucía	3.05 (2.14)	1.38 (1.07)	1.78 (1.14)	3.60 (3.06)

Fuente: Santos *et al.* (2015).

Las proyecciones del cambio climático presentan una disminución significativa en la mayor parte de la Península Ibérica (<2 MWh / día); aunque lo más destacable quizás sea el fuerte aumento de los potenciales en otoño en el sur de Andalucía (> 2 MWh / día). Esto se traduciría en una reducción media del potencial eólico en la Península en el periodo considerado del 15%, llegando incluso a un 40% en invierno.

Tobin *et al.* (2018) muestran resultados más conservadores: reducciones de entre el 2 y el 3% en la producción de electricidad con energía eólica para escenarios de calentamiento de hasta 3°C.

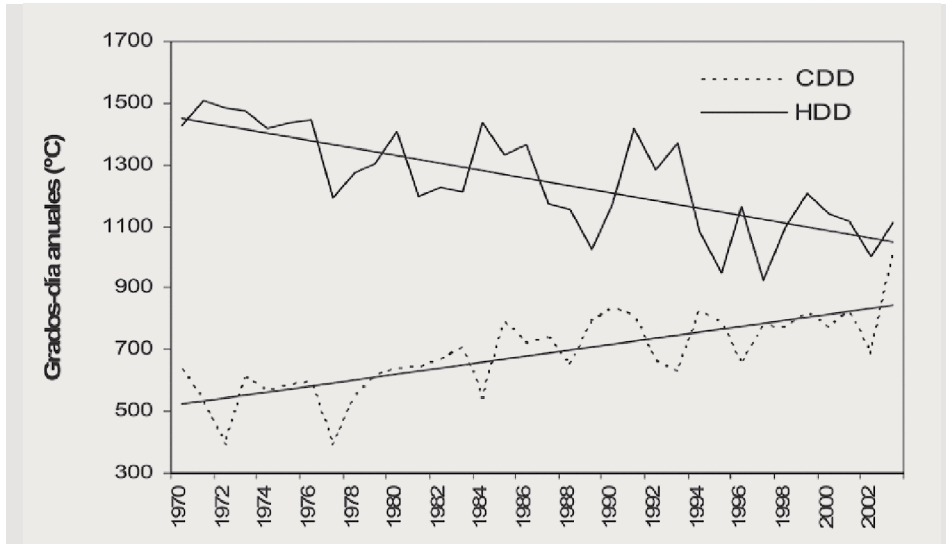
Es importante incidir en este punto sobre la necesidad de tomar estos resultados con prudencia, pues pueden cambiar mucho si el análisis se realiza teniendo en cuenta las distribuciones de viento en lugar de las velocidades medias. Este ejercicio es uno de los temas pendientes a abordar en el futuro.

4.2. Impactos en la demanda de energía

Nos centramos en el efecto principal del cambio climático sobre la demanda energética, a saber, los cambios en las necesidades de calefacción y refrigeración debidos al esperado aumento de temperatura.

Ya el informe «Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático» elaborado para el Ministerio de Medio Ambiente en 2005, con el que abrimos esta sección, se atendía a este tema. Suya es la autoría del gráfico nº 16.

Gráfico nº 16. **EVOLUCIÓN DE LOS HDD Y CDD EN ESPAÑA EN EL PERIODO 1970-2002**



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

El gráfico presenta una clara tendencia decreciente de los grados día de calefacción anuales (HDD) y asimismo una clara tendencia creciente de los grados día de refrigeración (CDD), ambas son consecuencia de una elevación progresiva de la temperatura media en las tres décadas del estudio.

Estos datos se vieron confirmados por Ortiz Beviá *et al.* (2012). En este trabajo se investigó la evolución de las necesidades de calefacción y refrigeración (HDD y CDD) en el caso de España en el periodo 1958-2005, y se plantearon proyecciones al medio plazo. La variabilidad observada se obtuvo de los registros de temperatura en 31 estaciones de toda España y de los datos de los censos disponibles. Respecto a la evolución futura de los grados-día, estos se estimaron con cuatro simulaciones realizadas sobre el escenario A1B del AR4, para el período 2001-2050. Las tendencias encontradas para las necesidades de calefacción (grados-día) en invierno no fueron muy significativas. Sin embargo, las tendencias observadas para las necesidades de refrigeración en verano sí lo fueron.

Gráfico nº 17. AUMENTO DE LOS GRADOS DÍA DE REFRIGERACIÓN (CDD/DÉCADA) EN ESPAÑA SEGÚN DIFERENTES MODELOS. ESCENARIO A1B

Model	(1950-1989)	(2010-2049)
INGV	$(5.49\% \pm 3.2\%)$	$(10.61\% \pm 4.9\%)$
IPSL	$(1.07\% \pm 8.1\%)$	$(27.68\% \pm 6.4\%)$
MPIM	$(7.25\% \pm 7.2\%)$	$(12.07\% \pm 4.0\%)$
MeteoFrance	$(9.42\% \pm 7.2\%)$	$(16.47\% \pm 6.7\%)$
Observed	$(4.92\% \pm 2.9\%)$	

Fuente: Ortiz Beviá *et al.* (2012).

En el gráfico nº 17 se presentan los resultados del estudio en lo que a aumento de CDD en España se refiere. Las proyecciones medias de aumento de los CDD/década se sitúan en $14\% \pm 5,3\%$, un aumento muy considerable.

Ahora bien, es preciso señalar que estas estimaciones de necesidades de calefacción y refrigeración no están ponderadas por la población, y por tanto no pueden extrapolarse directamente en términos de consumo energético. De nuevo, es otro análisis de detalle aún pendiente.

5. PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN

Tal y como señala el Banco Mundial (Erdinger, 2011), hasta la fecha, los responsables público-privados del sector energético se han centrado en la maximización de los suministros de energía para satisfacer la demanda, mientras que la gestión de los riesgos ha quedado en un segundo plano. Toda la evidencia disponible sugiere que la gestión de los riesgos planteados por el clima actual y futuro no es algo opcional sino algo absolutamente necesario, y además es probable que se convierta cada vez en más importante a medida que las consecuencias del cambio climático se materialicen.

5.1. Medidas propuestas a nivel internacional

La adaptación en su totalidad es un área extensa que abarca muchos sectores y estructuras socio-económicas, tal y como ha declarado la Convención sobre el Cambio Climático. Aunque la adaptación a estos impactos requerirá grandes inversiones y decisiones estratégicas, algunas acciones que podrían empezar a implementarse serían las siguientes:

- *Aumentar la concienciación y el intercambio de conocimientos.* Hay una necesidad de difundir y aumentar el conocimiento de los efectos del clima en el sector de la energía. Para poder tomar decisiones correctas es imprescindible: (a) mejorar el conocimiento de estos temas por parte de la ciudadanía, y (b) proveer de acceso abierto a los datos climáticos para facilitar la investigación.
- *Llevar a cabo una evaluación concreta de las necesidades vinculadas a los impactos del cambio climático en el sector.* Este análisis del impacto climático es el primer paso hacia el desarrollo de estrategias de adaptación. Es necesario también incluir una evaluación de los costes asociados a los impactos, y de las consecuencias que se generarían si no se aplicara una correcta gestión del riesgo climático.
- *Desarrollar herramientas de evaluación.* Desarrollo de plantillas para proyectos que incorporen la vulnerabilidad y los riesgos del clima, ya sea retrospectivamente o durante la planificación y ejecución de los proyectos. Esto debería exigirse particularmente a los proyectos de gran envergadura. Es necesario desarrollar un catálogo de reglas sencillas de decisión para la integración del riesgo climático en la toma de decisiones (por ejemplo, cómo elegir ubicaciones para nuevas plantas de energía, teniendo en cuenta el clima). Los modelos de simulación podrían apoyar al desarrollo de estas medidas mediante análisis de sensibilidad ante distintos parámetros.
- *Desarrollar normas de adaptación para el sector de la energía.* Estas normas deberían cubrir aspectos de ingeniería y requisitos de información. Podría ser acometido a través del sector de la energía en sí, o a través de organizaciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía (AIE), la Asociación Internacional de Energías Renovables (IRENA), y las universidades o instituciones de investigación.
- *Revisar los plazos de planificación y el uso de datos históricos y proyecciones para futuras inversiones.* Los enfoques de planificación tradicionales que utilizan datos históricos pueden necesitar ser revisados y ajustados para reflejar las tendencias climáticas previstas como base para futuras inversiones en energía.
- *Establecer planes de adaptación para las infraestructuras existentes.* Algunas metodologías disponibles, como las auditorías ambientales, pueden ayudar a identificar los cambios necesarios en los protocolos de operación y mantenimiento, o incluso los estructurales que exijan hasta la reubicación de plantas existentes.

- *Implementar medidas de adaptación específicas por tecnologías.* En el informe completo se detallan una serie de propuestas particulares. A modo de resumen se presentan algunas:
 - Explorar la interacción entre la demanda de agua y su uso.
 - Comprender mejor los impactos del cambio climático sobre el potencial de recursos renovables.
 - Explorar las sinergias entre mitigación del cambio climático y la adaptación.
 - Identificar las opciones (tecnológicas y de comportamiento) para mejorar el ahorro y la eficiencia en generación y reducir la demanda pico eléctrica.
- *Identificar los instrumentos de política necesarios para hacer frente a los impactos del cambio climático.* Por ejemplo, instrumentos de política que apoyan la internalización de la adaptación en operaciones de energía; o los incentivos para permitir la planificación con plazos más largos.
- *Fortalecer las estructuras de soporte.* Aumentar la capacitación de los actores claves, incluyendo los responsables del sector de políticas energéticas, los reguladores y los operadores.

Algunas de estas medidas, como la identificación y evaluación de medidas de adaptación específicas, o los instrumentos de política necesarios, ya están siendo emprendidas por la comunidad científica.

5.2. Medidas propuestas en España

En las consultas con expertos realizadas, uno de los puntos en el que se ha visto necesario profundizar ha sido el relacionado con la investigación. Se considera de vital importancia profundizar en el conocimiento de las dinámicas de cambio climático que permitan mejorar la planificación por parte de los agentes del sistema energético. Algunos de los puntos que se perciben como claves en las que profundizar se han organizado siguiendo la propuesta de marco de opciones de adaptación propuesta por el IPCC en el AR5.

Estos puntos se recogen también en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030, que identifica algunos de ellos de manera específica para el sector energético:

- Mejorar el conocimiento sobre los impactos del cambio climático en los potenciales de producción de las energías renovables y trasladar los resultados a la planificación energética.
- Mejorar el conocimiento sobre los impactos potenciales del cambio climático en la funcionalidad y resiliencia de los sistemas de generación, transporte, almacenamiento y distribución de la energía y concretar medidas de adaptación para evitar o reducir los riesgos identificados.

- Mejorar el conocimiento sobre los impactos del cambio climático en la demanda de energía e identificar medidas para evitar o limitar los picos de demanda, especialmente los asociados al calor.
- Identificar riesgos derivados de eventos extremos en las infraestructuras energéticas críticas y aplicar medidas para evitar su pérdida de funcionalidad.

Las propuestas también se han incorporado al Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030, que además enfatiza la sinergia entre la adaptación y las acciones de mitigación necesarias para cumplir con los objetivos planteados de emisiones de gases de efecto invernadero: el despliegue de las energías renovables, del almacenamiento y de la eficiencia energética reducirá la necesidad de consumo de agua de refrigeración de las centrales térmicas, permitirá gestionar la producción ante la previsible disminución de los recursos hídricos regulables, y limitará el crecimiento de la demanda de energía para climatización.

Cuadro nº 9. **PROPUESTAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR ENERGÉTICO ESPAÑOL**

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
Estructurales	Información	Afinar las estadísticas de viento proporcionando los cambios esperados, no solo en las velocidades medias a una determinada elevación sino también en las distribuciones, para de esta manera poder estimar mejor lo cambios en los potenciales eólicos. Sería ideal particularizarlo, en la medida de lo posible, también por cuencas. De la misma manera que con el viento, sería muy provechoso estudiar los otros parámetros climáticos básicos: temperatura y régimen de lluvias, no solo en términos agregados sino en términos de distribución temporal y regional. Esto permitiría a su vez afinar en el estudio del impacto directo sobre la oferta y demanda energética. Tanto en este punto como el anterior, existen algunos trabajos ya realizados por parte de diferentes empresas energéticas (Endesa, Iberdrola, Gas Natural, Repsol, entre otras), que pueden servir de base para futuros trabajos. Elaborar un histórico detallado de fenómenos extremos que permita proyectar, con una correcta base estadística, implicaciones a futuro. Sería positivo disponer de una base de datos, con criterios comunes, que incluya un histórico lo más amplio posible. Del análisis de esta información deberían alimentarse tanto en la Planificación Energética como las Especificaciones o Normas Técnicas constructivas del sector.
	Tecnología	Desarrollar un análisis basado en modelos computacionales del impacto del cambio sobre el sistema energético nacional en su conjunto. En la actualidad existen algunos resultados para el nexo agua-energía que podrían servir de base para un estudio que integrara el resto de subsectores energéticos. Hacer estimaciones por escenarios (tendenciales y disruptivos) para la demanda de calefacción y de refrigeración, mediante estudios de sensibilidad. Realizar un análisis de los HDD y los CDD ponderados por población, incorporando además factores como la humedad que influyen de una manera muy relevante en la sensación térmica. Recoger también en estos análisis el impacto en la demanda de calefacción y refrigeración en la industria y en el tercer sector.

.../...

.../...

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
Estructurales	Basadas en ecosistemas	Prestar una especial atención a los impactos derivados de la subida del nivel del mar sobre todas las infraestructuras energéticas operativas en la costa española. Del mismo modo, incorporar estas consideraciones en el estudio de viabilidad de nuevas infraestructuras a construir en dichas zonas. En este punto, serán de mucha ayuda los resultados del proyecto C3E que elaboró la Universidad de Cantabria para la OECC en 2012.
	Nexos	Profundizar en el análisis de las interrelaciones entre los sistemas energético y agropecuario, con especial atención a los biocombustibles y sus necesidades de agua.
Estructurales - físicas	Información	Diseñar una política de comunicación y difusión de estos resultados que consiga trasladar eficazmente al conjunto de la sociedad la importancia y urgencia de abordar esta problemática de manera integrada.
	Comportamiento	Fomentar una cultura empresarial nueva que prime el largo plazo frente al corto plazo en su planificación estratégica.
	Economía	Sería conveniente realizar estudios económicos más precisos en relación a las necesidades de financiación futuras vinculadas a las políticas de adaptación, tanto desde el sector público como privado. La pregunta a responder en este punto sería cuáles son los costes reales de la adaptación.
Sociales	Leyes y regulaciones	Facilitar una planificación estratégica conjunta, tanto a nivel público como privado, de los ámbitos energético y climático. Incorporar los riesgos regulatorios y de precios de CO ₂ en la planificación de la adaptación de cambio climático en el sector.
	Políticas y programas gubernamentales	Estudiar en profundidad las sinergias entre mitigación y adaptación. Para ello se propuso plantear el trabajo basado en escenarios base (2012) y futuros (2050 y 2100). Se consideró importante valorar en términos económicos el ahorro que en las políticas de adaptación pueden tener determinadas políticas de mitigación. Continuar con el trabajo de integración de las conclusiones obtenidas en los diferentes estudios de Adaptación en Cambio Climático que identifiquen las sinergias existentes entre ellos. Este punto fue identificado como uno de los más importantes por parte de los expertos consultados. Quedó patente la conveniencia de plantear un trabajo intersectorial sobre adaptación al cambio climático que integre los resultados parciales que ya se han obtenido y que ayude con ello a adecuar la Planificación Energética pública y privada a los requerimientos detectados. Un primer paso podría ser la elaboración de una encuesta por parte de la OECC en la que se interrogara al sector privado acerca de qué información o estudios técnicos necesitan para establecer sus propios análisis internos, de forma que puedan ser elaborados por las diferentes agencias estatales dedicadas a esa cuestión.

Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET (2019): «Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España». <http://escenarios.adaptecca.es>
- BRESLOW, P.B.; SAILOR, D.J. (2002): «Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States», *Renewable Energy* 27: 585-598.
- CEDEX (2010): «Evaluación del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural». Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Clave CEDEX 42-407-1-001.
- (2012): «Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación». Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Clave CEDEX 43-308-5-001.
- CÍSCAR, J.C.; FEYEN, L.; IBARRETA, D.; SORIA, A. (2018): «Climate impacts in Europe: Final report of the JRC Peseta III Project», European Commission EUR 29427 EN.
- CÍSCAR, J.C.; RISING, J.; KOPP, R.E.; FEYEN, L. (2019): «Assessing future climate change impacts in the EU and the USA: insights and lessons from two continental-scale projects», *Environmental Research Letters* 14: 084010.
- 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.
- DURMAYAZ, A.; SOGUT, O.S. (2006): «Influence of cooling water temperature on the efficiency of a pressurized water reactor nuclear power plant», *International Journal of Energy Research*, 30(10): 799-810.
- EBINGER, J.O. (2011): «Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation, a World Bank study», World Bank, Washington, D.C.
- EEA (2019): «Adaptation challenges and opportunities for the European energy system. Building a climate-resilient low-carbon energy system», EEA Report 01/2019. European Environment Agency.
- FIDJE, A.; MARTINSEN, T. (2006): «Effects of the climate change on the utilization of solar cells in the Nordic region», Reykjavik, Iceland.
- GIRARDI, G.; ROMERO, J.C.; LINARES, P. (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*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- IPCC (2014): *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects* Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático
- KHAN, Z.; LINARES, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, J. (2016): «Adaptation to climate-induced regional water constraints in the Spanish energy sector: An integrated assessment», *Energy Policy*, 97: 123-135.
- LINNERUD, K.; MIDEKSA, T.K.; ESKELAND, G.S. (2011): «The impact of climate change on nuclear power supply», *Energy Journal*, 32: 149-168.
- MIDEKSA, T.K.; KALLBEKKEN, S. (2010): «The impact of climate change on the electricity market: A review», *Energy Policy*, 38: 3579-3585.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2005): *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE. Informe Final*. https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico/evaluacion-preliminar-de-los-impactos-en-espana-del-cambio-climatico/eval_impactos.aspx
- MIT (2014). «2014 Energy and climate outlook», MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

- OECC (2012): *Evidencias del cambio climático y sus efectos en España*. Oficina Española de Cambio Climático <https://www.adaptecca.es/documento/evidencias-del-cambio-climatico-y-sus-efectos-en-espana>.
- ORTIZ BEVIÁ, M.J.; SÁNCHEZ-LÓPEZ, G.; ALVAREZ-GARCÍA, F.J.; RUIZ DE ELVIRA, A. (2012): «Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability», *Global and Planetary Change*, 92: 236-247.
- RUTH, M.; LIN, A.-C. (2006): «Regional energy demand and adaptations to climate change: Methodology and application to the state of Maryland, USA», *Energy Policy*, 34: 2820-2833.
- SANTOS, J.A.; ROCHINHA, C.; LIBERATO, M.L.R.; REYERS, M.; PINTO, J.G. (2015): «Projected changes in wind energy potentials over Iberia», *Renewable Energy*, 75: 68-80.
- TOBIN, I.; GREUELL, W.; JEREZ, S.; LUDWIG, F.; VAUTARD, R.; VAN VLIET, M.T.H.; BRÉON, F.M. (2018): «Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5°C, 2°C and 3°C warming», *Environmental Research Letters* 13: 044024.
- VAN VLIET, M.T.H.; WIBERG, D.; LEDUC, S.; RIAHI, K. (2016): «Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources», *Nature Climate Change* 6: 375-380.
- WILBANKS, T.J.; BHATT, V.; BILELLO, D.E.; BULL, S.R.; EKMANN, J.; HORAK, W.C.; HUANG, Y.J.; LEVINE, M.D.; SALE, M.J.; SCHMALZER, D.K.; SCOTT, M.J. (2008): *Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States*, US Department of Energy