
Evidencias y escenarios de cambio climático



María Jesús Casado Calle

Licenciada en Ciencias Físicas e Historia.
Meteoróloga del Estado y jefa de Servicio
en la AEMET



Petra Ramos Calzado

Dra. en Físicas por la Universidad de Sevilla.
Meteoróloga del Estado y jefa de la unidad
de Estudios y Desarrollos de la AEMET

Resumen

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos y el aumento del promedio del nivel del mar. En este estudio se analizan las causas del cambio climático observado, su evolución esperable a nivel global y regional, las herramientas para diagnosticar y predecir el clima con sus incertidumbres asociadas. Finalmente, se consideran las proyecciones de temperatura y precipitación para España en el siglo XXI.

Palabras clave

Cambio climático, modelos climáticos, incertidumbres, proyecciones

Abstract

Global warming and climate change is a reality today evidenced by the rises seen in the average global air and ocean temperatures, the generalized thawing of snow and ice and the increase in the mean sea level. This study analyses the causes of climate change, its predicted development at a global and regional level, and the tools by which to determine and forecast climate with its associated uncertainties. The article concludes with an examination of temperature and rainfall predictions for the 21st century.

Keywords

Climate change, climate models, uncertainties, forecast

Debido a la gran complejidad del problema del cambio climático, los políticos necesitan una fuente objetiva de información sobre sus causas, sus consecuencias socio-económicas y las opciones de adaptación y de mitigación para responder al mismo. Para resolver esta necesidad, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) establecieron el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en 1988. El IPCC no realiza ninguna investigación ni seguimiento de los datos relacionados con el clima. Su función es la evaluación exhaustiva, objetiva, abierta y transparente de la literatura científica, técnica y socio-económica elaborada en todo el mundo y relacionada con el cambio climático para la comprensión de los riesgos inducidos por el hombre en el clima, sus impactos observados y previstos y las opciones de adaptación y mitigación. Los informes del IPCC aspiran a ser neutrales con respecto a la política y de alto nivel científico y técnico. Los informes reflejan diferentes puntos de vista y experiencias con una amplia cobertura geográfica. El IPCC realiza sus informes a intervalos regulares e inmediatamente se convierten en obras de referencia, ampliamente utilizadas por los responsables políticos, expertos y estudiantes. Hasta la actualidad, el IPCC ha publicado cuatro informes y está elaborando el quinto: el Primer Informe en 1990 jugó un papel decisivo en la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que se abrió a la firma en la Cumbre de Río de Janeiro en 1992 y entró en vigor en 1994; el Segundo Informe de Evaluación en 1995 ofreció información importante para las negociaciones del Protocolo de Kyoto de 1997; el Tercer Informe de Evaluación (TAR) se publicó en 2001; el Cuarto Informe de Evaluación

(AR4) en 2007 y el Quinto Informe de Evaluación (AR5) se publicará en octubre de 2014 y proporcionará una evaluación rigurosa y actualizada del estado del conocimiento sobre el cambio climático. La mayoría de la información global resumida en este artículo procede, a menos que se indique lo contrario, del último informe del IPCC AR4 (información más detallada sobre la organización del IPCC y sus informes están disponibles en www.ipcc.ch).

2. El cambio climático observado a nivel global y regional

En el Cuarto Informe del IPCC (IPCC, 2007) se concluye que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, la fusión generalizada de nieves y hielos y el aumento del promedio mundial del nivel del mar.

Respecto a la temperatura mundial, en dicho informe, se indica que once de los doce años del periodo 1995-2006 figuran entre los doce años más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). De la actualización de la serie hasta el año 2012 realizada por el Climatic Research Unit y el UK Met. Office Hadley Centre se extrae que los años del periodo 1997-2012 son los más cálidos desde 1850. El año más cálido de toda la serie fue el 2010 con una anomalía de temperatura de 0,540 °C con respecto al periodo de referencia de 1961-1990, seguido del 2005, siendo el año 2012 el noveno más cálido. La década más cálida ha sido la del 2001 al 2010, con un incremento de 0,217 °C con respecto a la década anterior (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/warming/>).

La tendencia lineal de la temperatura global en 100 años (1906-2005), cifrada en 0,74° C (entre 0,56° C y 0,92° C), es superior a la tendencia correspondiente de 0,6 °C (entre 0,4 °C y 0,8 °C) para el periodo 1901-2000 indicada en el Tercer Informe de Evaluación. El aumento de la temperatura está teniendo lugar en todo el planeta, siendo más acusado en las latitudes altas del hemisferio norte. Por otro lado, las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos. La reciente publicación de Morice et al. (2012) indica un aumento de la tendencia lineal de la temperatura de 0,07 °C/década desde 1901 a 2010 y de 0,17 °C/década desde 1979 a 2010 globalmente. En el hemisferio norte (sur) estas tendencias son de 0,08 °C (0,07 °C)/década y de 0,24 °C (0,10 °C)/década, respecti-

vamente. En este artículo se hace referencia y se tienen en cuenta las incertidumbres asociadas a los distintos registros globales existentes.

El aumento de nivel del mar observado concuerda con este calentamiento. En promedio, el nivel de los océanos ha aumentado a razón de 1,8 [entre 1,3 y 2,3] mm/año desde 1961 a 2003, y de 3,1 [entre 2,4 y 3,8] mm/año desde 1993 a 2003. Este incremento es debido tanto al efecto de la dilatación térmica como al deshielo de los glaciares, de los casquetes de hielo y de los mantos de hielo polares. Según un estudio de Nerem et al. (2010), la tasa media de aumento del nivel del mar ha sido de 3,4±0,4 mm/año en los años del 1993 al 2009, consistente con el indicado en el Cuarto Informe del IPCC.

La disminución observada de las extensiones de nieve y de hielo concuerda también con el calentamiento. Datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que el promedio anual de la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido un 2,7 % [entre 2,1 % y 3,3 %] por decenio, con disminuciones estivales aun más acentuadas, de 7,4 % [entre 5,0 % y 9,8 %] por decenio. En promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve también han disminuido en ambos hemisferios. La figura 1 muestra estos cambios observados en temperatura del aire, en el nivel del mar y en la cobertura de nieve.

Entre 1900 y 2005, también se han observado cambios en la cantidad de precipitación en muchas regiones. La precipitación aumentó significativamente en las zonas orientales de América del sur y del norte, Europa septentrional, y Asia septentrional y central, y disminuyó en el Sahel, en el Mediterráneo, en el sur de África y en ciertas partes del sur de Asia. En todo el mundo, la superficie afectada por las sequías ha aumentado probablemente desde el decenio de 1970, según el Cuarto Informe del IPCC.

Respecto a los fenómenos extremos, algunos de ellos han cambiado en frecuencia y/o intensidad en los últimos 50 años. Así, según el Cuarto Informe del IPCC, es muy probable que en los últimos 50 años los días fríos, las noches frías y las escarchas hayan sido menos frecuentes en la mayoría de las áreas terrestres, y que los días y noches cálidos hayan sido más frecuentes. Es probable que las olas de calor hayan sido más frecuentes en la mayoría de las áreas terrestres, que la frecuencia de las precipitaciones intensas haya aumentado en la mayoría de las áreas, y que, desde

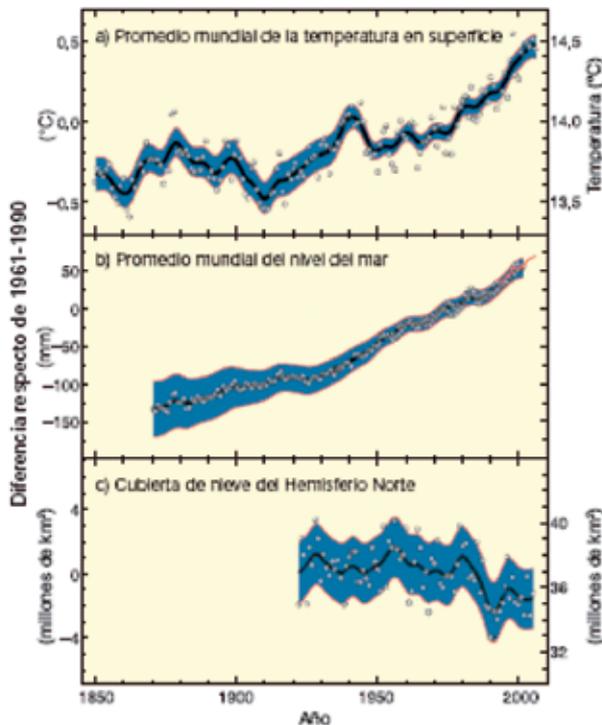


Fig. 1. Variación observada de a) el promedio mundial de las temperaturas en superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del hemisferio norte durante marzo-abril. Todas las diferencias han sido calculadas respecto de los promedios correspondientes durante el periodo 1961-1990. Las curvas aisladas representan los valores promediados decenalmente, mientras que los círculos denotan los valores anuales. Las áreas sombreadas representan los intervalos de incertidumbre estimados a partir de un análisis completo de las incertidumbres conocidas (a y b) y de la serie temporal c). Fuente: IPCC (2007)

1975, la incidencia de valores altos extremos del nivel del mar haya aumentado en todo el mundo. Las observaciones evidencian un aumento de la actividad ciclónica tropical, intensa en el Atlántico Norte desde aproximadamente 1970, con escasa evidencia de aumentos en otras regiones, no apreciándose una tendencia clara del número anual de ciclones tropicales.

3. Causas de la evolución observada del clima

Ya no hay mucha duda de que la mayor parte del aumento observado en las temperaturas medias mundiales desde

mediados del siglo XX sea debido al aumento observado en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes de las actividades humanas, principalmente de la combustión de combustibles fósiles y, en menor medida, de cambios en el uso de la tierra. Durante ese período, el efecto combinado de las variaciones naturales en la radiación solar y las erupciones volcánicas habrían producido temperaturas más frías, no más calientes. De hecho, se ha producido un enfriamiento en la atmósfera causado por aerosoles, algunos de ellos debidos, por ejemplo, a erupciones volcánicas y a determinadas actividades humanas que producen emisiones de sulfatos, de carbono negro orgánico, de nitratos y de polvo. Estos aerosoles reflejan o absorben parte de la radiación solar, en cualquier caso, impiden que alcance la superficie terrestre.

El IPCC afirma que la mayor parte del aumento observado en la temperatura media mundial desde mediados del siglo XX es, con una probabilidad superior al 90 %, debido al aumento de origen antropogénico observado en las concentraciones de gases de efecto invernadero. La influencia humana se extiende a otros aspectos del clima, entre los que se incluye el calentamiento del océano, las temperaturas medias continentales, las temperaturas extremas y los patrones de viento. Las simulaciones del clima para el siglo XX producidas con un conjunto de modelos, utilizando bien forzamientos naturales y antropogénicos (Fig. 2a) o únicamente forzamientos naturales (debido a la actividad solar y a los volcanes) (Fig. 2b), muestran que solo las integraciones que incluyen los forzamientos antropogénicos simulan razonablemente la evolución observada de la temperatura media global y, por lo tanto, explican el origen antropogénico del aumento de las temperaturas.

4. Herramientas para diagnosticar y pronosticar la evolución del clima global y regional

Los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (AOGCM, de las siglas en inglés), que se desarrollan en un número reducido de centros internacionales de investigación climática, constituyen la herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas. La nueva generación de modelos globales que se están utilizando para elaborar el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, pertenece a la categoría de los llamados Modelos del Sistema Tierra (ESM, de sus siglas en inglés). Estos modelos incluyen, en su versión estándar, además modelos del ciclo del carbono, de aerosoles, de química y de vegetación dinámica (véase WCRP, <http://www.agci.org/dB/>)

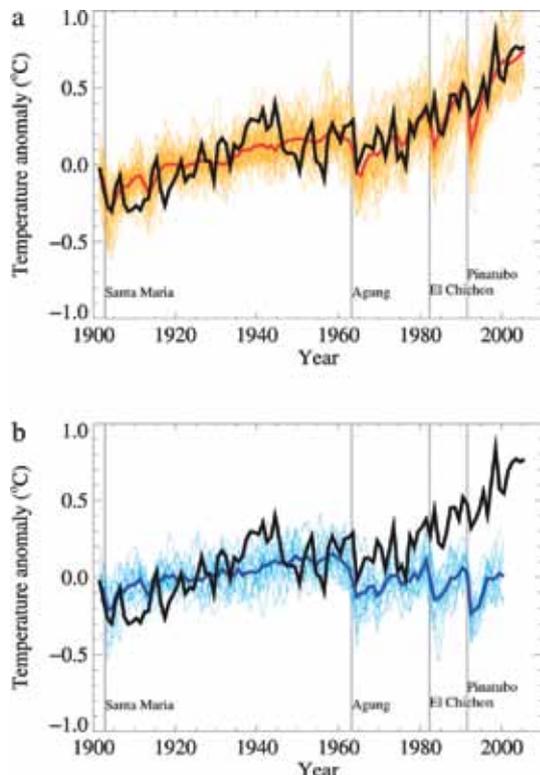


Fig. 2. Comparación entre las anomalías de la temperatura media mundial (°C) a partir de observaciones (negro) y simulaciones con MCGAO (a) tanto antropogénicas y los forzamientos naturales y (b) solo forzamientos naturales. Todos los datos se muestran como anomalías de la temperatura media mundial en relación con el período de 1901 a 1950. Las líneas grises verticales indican el momento de los principales eventos volcánicos. Fuente: IPCC (2007)

PDFs/Publications/06S1_WhitePaper.pdf, Informal Report N° 3/2007 y Taylor et al. 2012).

El desarrollo de los modelos climáticos avanza en el sentido de aumentar la resolución y de incluir más procesos, incorporando aspectos del medio ambiente químico y biológico tales como una vegetación activa y una bioquímica oceánica acopladas con los procesos físicos del clima. Una mayor resolución de los modelos permitirá entrar en el dominio de los modelos oceánicos que resuelven los remolinos de mesoescala. En las escalas oceánicas del orden de las decenas de km, dichos remolinos empiezan a ser resueltos explícitamente. La correspondiente escala de transición, en la atmósfera, es de unos pocos km. A esta escala, los modelos empiezan a resolver las circulaciones correspondientes a la convección profunda. Esta transi-

ción, para el caso atmosférico, ya se está realizando en los modelos de predicción numérica del tiempo. Los modelos que incluyen el ciclo del carbono son capaces de predecir la evolución de la concentración de CO_2 utilizando como datos de entrada solamente las emisiones antropogénicas en lugar de las concentraciones, que es como funcionan ahora la mayoría de los modelos globales. Los modelos que incluyen un módulo de aerosoles permitirán además acoplar la evolución de éstos con otros efectos indirectos sobre la radiación, la formación de nubes y la eficiencia de la precipitación a través de los procesos de microfísica de nubes. Otros temas emergentes que se irán incorporando a los modelos climáticos son la inclusión de otros gases de efecto invernadero y gases reactivos, el almacenamiento de agua y carbono por las plantas, los ciclos de nitrógeno y fósforo, que actúan como limitantes en el crecimiento de ecosistemas, la aclimatación de la microbiología del suelo a temperaturas más altas, etc.

Mientras que los modelos globales proporcionan las características a grandes rasgos de las proyecciones climáticas, la escasa resolución espacial que estas proyecciones climáticas proporcionan las hace poco útiles para ser utilizadas por los distintos tipos de modelos de impacto. Por este motivo, es necesario aplicar técnicas de regionalización a las proyecciones generadas por los AOGCM para aumentar su resolución espacial. La metodología, generalmente aceptada, para hacer estimaciones de proyecciones regionalizadas de cambio climático utiliza la idea del descenso de las escalas grandes a las escalas pequeñas. Las escalas grandes se estiman con los modelos globales acoplados océano-atmósfera y a continuación se desciende a las escalas más pequeñas con diferentes técnicas de regionalización. En este enfoque, la tarea predictiva la realizan los modelos globales y las técnicas de regionalización o de reducción de escala (*downscaling*) bien basadas en algoritmos empíricos o en modelos regionales, se limitan a introducir detalle local. Generalmente, la información solamente fluye desde las escalas grandes (modelos globales) a las escalas regionales (modelos regionales y algoritmos estadísticos) y no en sentido contrario. Únicamente los modelos que admiten anidado con flujo de información en ambos sentidos (*two way nesting*, en la literatura inglesa) constituyen la excepción a esta regla.

La generalidad de técnicas de regionalización parte de las proyecciones suministradas por los AOGCM y las dotan de detalles de escala más pequeña asociados con información

adicional de orografía, fisiografía, etc. En consecuencia, las proyecciones regionalizadas heredan todos los defectos y debilidades de los modelos “padre” globales. Si el modelo global simula incorrectamente aspectos de la variabilidad a gran escala relevantes para el clima regional/local, carece de sentido regionalizar proyecciones climáticas realizadas con el mismo. Ahora bien, si la simulación de la variabilidad climática natural es aceptable, entonces tiene sentido trasladar la información de los modelos globales a la escala local. Es importante tener en cuenta que, debido a que la variabilidad natural es mayor en las escalas regionales y locales que en la gran escala, las proyecciones de cambio climático en escalas regionales estarán sometidas forzosamente a más incertidumbre que las proyecciones de los AOGCM. Esta limitación de las técnicas de regionalización debe tenerse siempre presente.

5. Incertidumbre en las proyecciones de evolución del clima

Todos los informes del IPCC han prestado especial atención al tratamiento de las incertidumbres y su cuantificación. La generación de las proyecciones del cambio climático es un problema caracterizado por las incertidumbres inherentes procedentes de varias fuentes. La incertidumbre en las predicciones del cambio climático antropogénico están presentes, de forma jerárquica, en todos los pasos dirigidos a la obtención de proyecciones regionalizadas del clima.

La primera fuente de incertidumbre procede de los forzamientos naturales debido a nuestra falta de capacidad de predicción de los cambios en la radiación solar (aparte del ciclo de 11 años) y de las erupciones volcánicas. En segundo lugar, la especificación de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero, los aerosoles y sus precursores es muy incierta. Las emisiones futuras son el producto de sistemas de dinámica muy compleja, determinada por motores como la evolución demográfica, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico. Los escenarios son imágenes alternativas de cómo podría ser el futuro y son una herramienta apropiada que permite analizar cómo los diversos motores pueden influir en las emisiones futuras y evaluar las incertidumbres asociadas. La posibilidad de que cualquier tipo de evolución de las emisiones se produzca tal y como se describe en los escenarios es muy incierta. En tercer lugar, para un determinado escenario de emisiones, se utilizan diferentes modelos biogeoquímicos para calcular las concentraciones de los componentes en la atmósfe-

ra. Para convertir estas concentraciones en forzamiento radiativo son necesarios varios esquemas de radiación y de parametrizaciones. En cuarto lugar, la respuesta de los diferentes componentes del sistema climático (atmósfera, océano, hielo marino, superficie terrestre, estado químico de la atmósfera y del océano, etc) se calcula en un modelo climático global. Además, en los modelos climáticos, la formulación del ciclo del carbono y la interacción con el mismo introducen importantes retroalimentaciones que producen incertidumbres adicionales. La incertidumbre en la señal real del cambio climático se introduce tanto por los errores en la representación de los procesos del sistema terrestre en los modelos como por la variabilidad climática interna. Los efectos de la variabilidad interna se pueden cuantificar mediante la ejecución de un mismo modelo con diferentes condiciones iniciales, siempre que la variabilidad simulada sea consistente con las observaciones. Los efectos de la incertidumbre por el conocimiento de los procesos del sistema terrestre pueden ser parcialmente cuantificados mediante la construcción de conjuntos de modelos que consideren diferentes parametrizaciones de estos procesos. Es importante señalar, que el abanico de modelos no cubre necesariamente la gama completa de las posibles incertidumbres en los procesos ya que el conjunto de modelos es estrictamente un «conjunto de oportunidades», sin ningún protocolo de muestreo. Por último, los métodos de disminución de escala, añaden otro factor de incertidumbre en el cambio climático regional que habrá de explorarse mediante diferentes técnicas de reducción de escala (véanse los capítulos 10 y 11 (IPCC, 2007) para una discusión detallada sobre las incertidumbres y de su cuantificación).

6. Evolución esperable del clima a nivel global y regional

En el Cuarto Informe del IPCC (AR4), y para una serie de escenarios de emisión del IEEA (Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisión, 2000, <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>), los AOGCMs estiman un calentamiento global de alrededor de 0,2 °C por década para las próximas dos décadas. Esta proyección es consistente con los valores observados en las últimas décadas de aproximadamente 0,2 °C por década. Incluso, si las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y de aerosoles se hubieran mantenido constantes en los niveles de 2000, se esperaría un calentamiento adicional de aproximadamente 0,1 °C por década debido principalmente a la lenta respuesta de los océanos. De acuerdo con el IPCC (IPCC, 2007), las me-

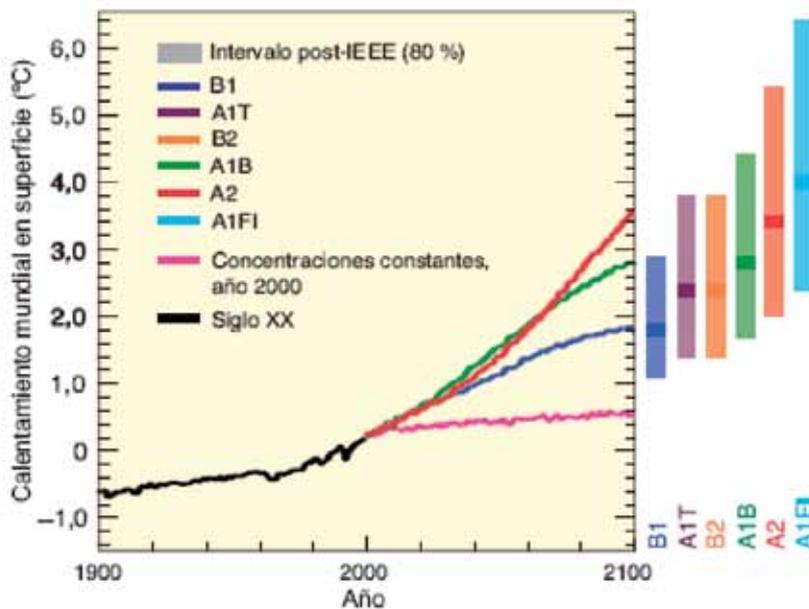


Fig. 3. Las líneas continuas representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. Estas proyecciones reflejan también las emisiones de GEI y aerosoles de corta permanencia. La línea rosa no es un escenario, sino que corresponde a simulaciones de MCGAO en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores del año 2000. Las barras de la derecha indican la estimación óptima e intervalo probable evaluado para los seis escenarios testimoniales IEEE en el periodo 2090-2099. Todas las temperaturas corresponden al periodo 1980-1999. Fuente: IPCC (2007)

jores estimaciones de las proyecciones de los modelos indican que el calentamiento medio por décadas en cada continente habitado en 2030 es insensible a la elección de los escenarios del IEEE y es muy probable de que sea al menos dos veces mayor que el correspondiente a la variabilidad natural estimada por los modelos durante el siglo XX. La mejor estimación para finales del siglo XXI con un escenario de emisiones bajas (B1) es de 1,8°C (el rango probable es de 1,1°C a 2,9°C), y con un escenario de emisiones altas (A1FI) es de 4,0°C (rango probable es de 2,4°C a 6,4°C) (Fig. 3).

Entre otros cambios previstos se incluyen los cambios de los patrones de viento, la precipitación y algunos cambios en los climas extremos y el hielo marino. Los cambios a escala regional incluyen: un calentamiento mayor sobre tierra y en las latitudes más septentrionales y menor en el océano del sur y en áreas del Atlántico norte; una contracción de la zona cubierta por la nieve, un aumento de la profundidad a la que la mayor parte del permafrost se deshíele, y una disminución en la extensión del hielo marino; un aumento de la frecuencia de los extremos de calor, olas de calor y fuertes precipitaciones, un probable aumento de la intensidad de los ciclones tropicales; y aumentos de las precipitaciones en latitudes altas, y probables descensos en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales.

Se esperan para finales del siglo XXI (2090-2099) aumentos del nivel medio global del mar para el escenario de emisiones bajas (B1) de 0,18-0,38 m, y para el escenario de emisiones altas (A1FI) de 0,26-0,59 m. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que muchos de los procesos relacionados con la fusión de los glaciares alrededor de las capas de hielo polares, singularmente en Groenlandia y la Antártida, no están incluidos en los modelos actuales. Por lo tanto, serán probables aumentos más rápidos del nivel del mar, por lo que las estimaciones del IPCC deben considerarse solo como un límite inferior para la subida del nivel del mar (Pfeffer et al., 2008).

El clima puede experimentar también cambios abruptos e irreversibles (Lenton et al., 2008). El cambio climático abrupto, a escalas de tiempo del orden de una década, implica cambios de la circulación oceánica. Según los modelos actuales, aunque es muy probable que la circulación termohalina (MOC, de las siglas en inglés) del Océano Atlántico se ralentice durante el siglo XXI, sin embargo se prevé un aumento en las temperaturas de la región. Cambios a más largo plazo en el MOC no se pueden evaluar con confianza. A escalas de tiempo más largo, la capa de hielo y los cambios en los ecosistemas también pueden desempeñar un importante papel. La pérdida parcial de las capas de hielo polar en la tierra y/o la dilatación térmica del agua de mar a escalas de tiempo muy largas podría suponer

metros de subida del nivel del mar, con impactos mayores en las costas, deltas de ríos e islas, lo que implica cambios importantes en la costa y la inundación de áreas bajas. La fusión completa de la capa de hielo de Groenlandia, si bien sería en escalas temporales de siglos debido a la alta inercia del sistema, elevaría el nivel del mar 7 m y podría ser irreversible.

7. Evolución esperable del clima para España

Una parte significativa del territorio español se encuentra situada en zonas clasificadas como áridas en las que la producción de cosechas, forraje, madera y otros servicios de los ecosistemas se encuentra limitados por el agua disponible. Las zonas áridas, como gran parte de la región mediterránea, están habitualmente sujetas a sequías estacionales, siendo especialmente vulnerables a la desertificación. La zona mediterránea se caracteriza también por las altas densidades de población, las fuertes concentraciones de la industria y la agricultura intensiva. A menudo, la degradación está vinculada a un inadecuado uso del suelo. Desde el punto de vista de la probable evolución de las condiciones climáticas, el panorama no es especialmente halagüeño ya que una parte significativa de las proyecciones de cambio climático generadas con la ayuda de modelos climáticos globales identifican claramente a la región mediterránea como una de las zonas en las que, con más probabilidad, habrá reducción de recursos hídricos como consecuencia del cambio climático. Aún teniendo en cuenta que las incertidumbres que se manejan en las proyecciones de precipitación son relativamente altas, los diferentes modelos muestran un alto nivel de acuerdo sobre la zona mediterránea. Los cambios que se esperan en precipitación y en temperatura se traducen en cambios en escorrentía y en disponibilidad de agua. Si se tienen en cuenta no solamente los cambios en los valores medios sino también los cambios en la variabilidad de la precipitación y de la temperatura, de nuevo la región mediterránea aparece como una de las regiones que va a mostrar más respuesta al cambio climático (Giorgi, 2006). Siendo la alta variabilidad interanual, por ejemplo de la precipitación, un motivo de gran preocupación en las condiciones actuales, se hace necesario extremar la preparación y adaptación de los sectores afectados por las condiciones climáticas para atenuar los efectos de un aumento en dicha variabilidad.

Las actividades de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en materia de cambio climático amplían las tradicio-

nales tareas de la Agencia en materia de observación y estudios relativos al clima de España, como consecuencia del reconocimiento explícito de la rápida evolución del clima debida a causas fundamentalmente antropogénicas. Estas nuevas actividades se encuadran en el marco del Plan Nacional de Adaptación del Cambio Climático (PNACC) del entonces Ministerio de Medio Ambiente (MMA), aprobado en 2006 por la Comisión de Coordinación de Políticas de Cambio Climático y el Consejo Nacional del Clima, y en el mandato recogido en los propios estatutos de AEMET. El PNACC establece el marco general de referencia para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Como el conocimiento detallado de las condiciones climáticas actuales y la estimación de las proyecciones climáticas en nuestro país son elementos imprescindibles para la puesta en funcionamiento del PNACC, se asignó a AEMET, en dicho plan, el proyecto de generar escenarios de cambio climático regionalizados para España utilizando tanto sus propios recursos como coordinando los esfuerzos de otros grupos de investigación activos en este campo.

Para cumplir con los compromisos asignados en el PNACC, con el mandato de los Estatutos de la Agencia y con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), AEMET: a) observa el clima y hace un seguimiento continuo de sus cambios, manteniendo una base de datos climáticos que constituye una referencia a nivel nacional; b) proporciona estimaciones de los posibles escenarios de evolución del clima, manteniendo una base de datos de libre acceso de escenarios de evolución del clima para la comunidad de impactos y adaptación al cambio climático; c) proporciona asesoramiento al MAGRAMA, a otros departamentos ministeriales e instituciones en temas relacionados con el clima, su cambio y variabilidad; d) participa activamente en los diversos foros nacionales e internacionales en los que se tratan los aspectos meteorológicos del cambio climático y e) contribuye a la formación en temas relacionados con los aspectos físicos del cambio climático en el contexto de cooperación internacional.

AEMET coordina la generación de escenarios regionalizados de cambio climático con los objetivos específicos de: desarrollar, documentar y poner a disposición del PNACC escenarios de cambio climático para España a la escala adecuada para su utilización por la comunidad de impactos; y poner en funcionamiento un mecanismo de generación operativa y actualización de escenarios regionales de cam-

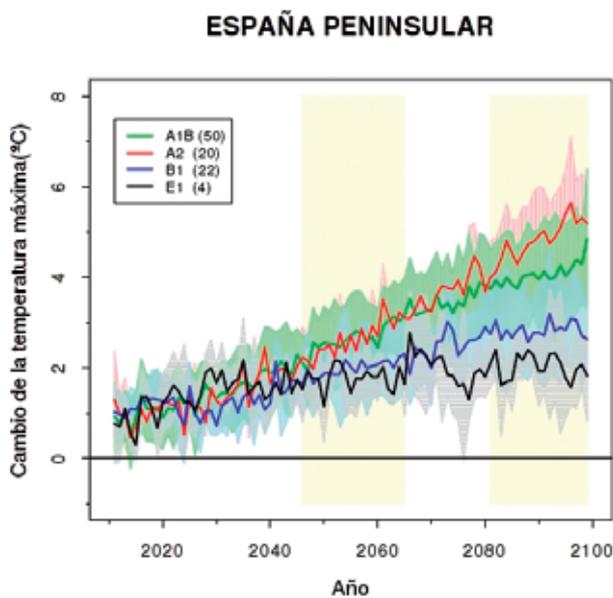


Fig. 4. Cambio de las temperaturas máximas, obtenidas por métodos de regionalización estadísticos y dinámicos, respecto al periodo de referencia promediado para todas las estaciones de España peninsular para cuatro escenarios de emisión. Las líneas representan el promedio de todas las proyecciones consideradas para cada escenario de emisiones y la zona sombreada representa la incertidumbre expresada como \pm una desviación estándar en torno a la media

bio climático para España en su página web, que alimente de forma periódica al PNACC (http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat).

A continuación se analiza la evolución esperable del clima para España a partir de los resultados de regionalización estadística y dinámica de la información disponible de 10 modelos climáticos del AR4 y de 12 del proyecto ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org>), de los valores medios y ciertos índices de extremos de las temperaturas máximas y mínimas y la precipitación, para el periodo 2000-2100 y para escenarios de emisión bajo (B2), intermedio (A1B), alto (A2) y el escenario de mitigación (E1). De estos escenarios los tres primeros no contemplan políticas de mitigación y muestran la evolución libre del clima en ausencia de acuerdos internacionales que limiten las emisiones de GEI. El cuarto escenario, E1, es un escenario de mitigación con una estabilización de los GEI en 450 ppm de CO₂ equivalente para 2140 y con el pico máximo en 2010 (van der Linden y Mitchell, 2009). El número total

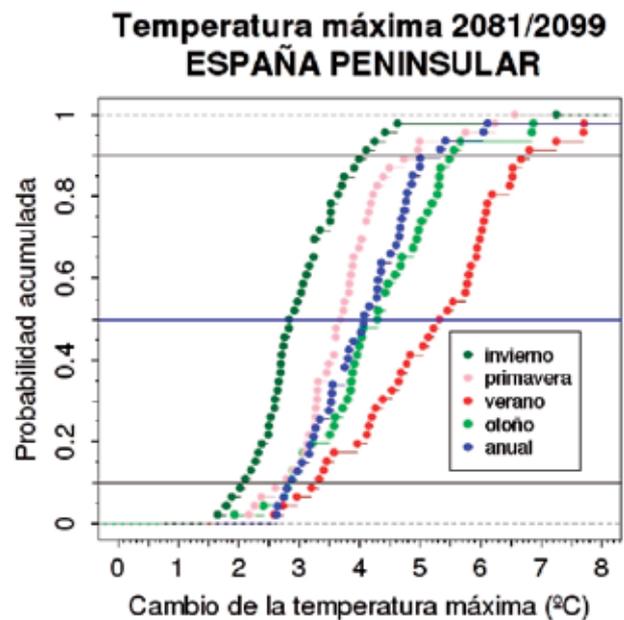
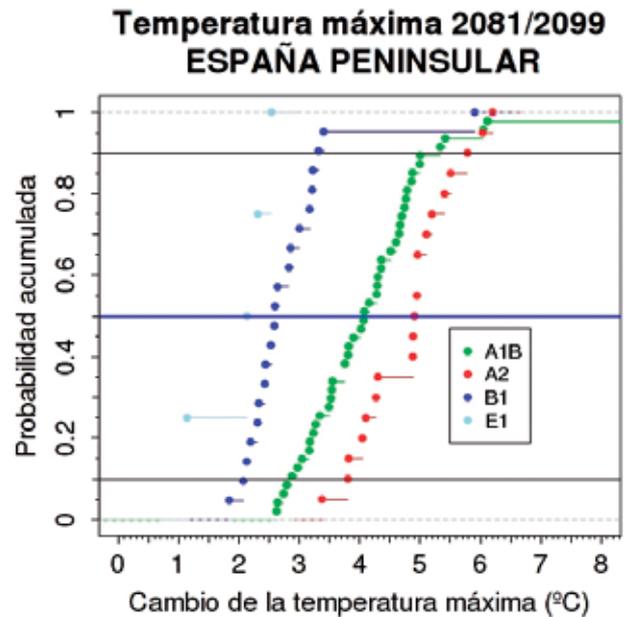


Fig. 5. Funciones empíricas de distribución acumulada del cambio del valor medio de la temperatura máxima del periodo 2081/2099 respecto al periodo de referencia para España peninsular para los cuatro escenarios de emisión (A2, A1B, B1 y E1) (5.a) y para el promedio anual y estacional con el escenario A1B (5.b). Las líneas horizontales muestran la mediana (color azul) y los percentiles 10 y 90 (color negro) de la distribución

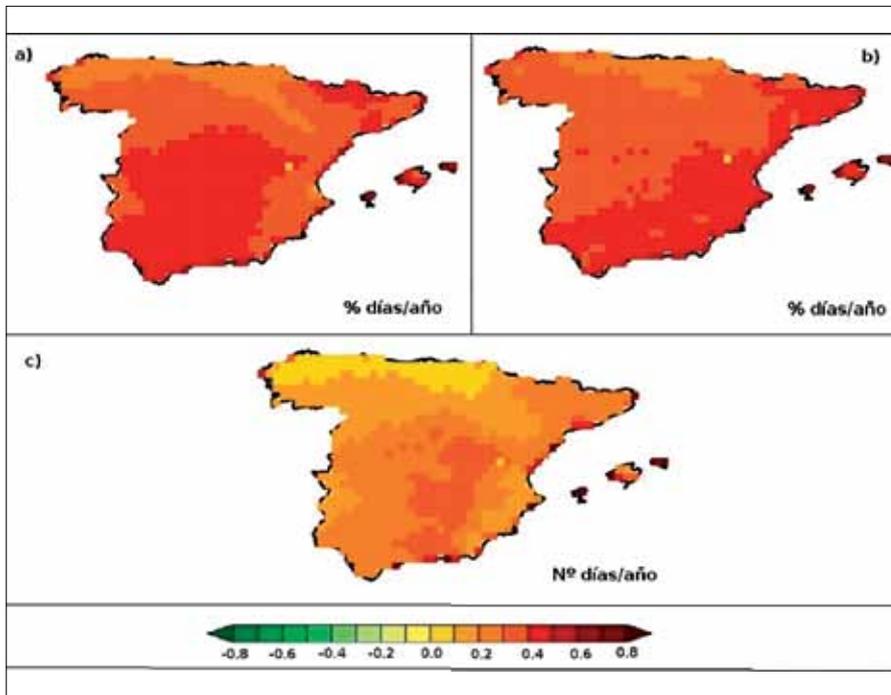


Fig. 6. Distribución espacial de la tendencia de la proporción de días cálidos (6.a), proporción de días con noches cálidas (6.b) y de la longitud máxima de las olas de calor (6.c) del periodo 2011/2098 proyectadas para el escenario de emisiones A1B por el conjunto de modelos del proyecto ENSEMBLES

de proyecciones regionalizadas analizadas asciende a 96 (50 para el escenario A1B, 22 para el escenario B1, 20 para el escenario A2 y 4 para el escenario E1). Esto permite realizar una estimación de las incertidumbres de las variaciones de las variables analizadas a partir de su distribución de probabilidad empírica, obteniéndose el rango de variación probable.

7.1. Temperatura máxima

Todas las proyecciones generadas muestran un aumento progresivo de las temperaturas máximas a lo largo del siglo XXI (Fig. 4), más rápido para el escenario más emisoro y más lento para el escenario menos emisoro y para el escenario de mitigación. Así, para finales de siglo, cuando los aumentos son mayores, es probable que la variación del valor medio de la temperatura máxima de los dos últimos decenios respecto al valor de referencia (1971/2000) esté comprendida entre 3,8 °C y 5,8 °C para el escenario de emisiones altas (A2) y entre 2,1 °C y 3,3 °C para un escenario de emisiones bajas (Fig. 5.a). Los incrementos menores se obtienen con el escenario de mitigación, en este caso el número de proyecciones disponibles es pequeño.

Las temperaturas estivales son las que experimentarán mayores cambios, entre 3,4 °C y 6,7 °C para el escenario

de emisiones A1B, y las invernales las que tendrán menos variaciones, entre 2,1 °C y 4,0 °C (Fig. 5.b). Respecto a la incertidumbre debida a los modelos globales y las técnicas de regionalización, estas son mayores en el verano.

Este comportamiento de las temperaturas máximas se manifiesta en todas las zonas de España peninsular, aunque con ligeras variaciones, siendo más acusado en la cornisa cantábrica.

Estos cambios en las temperaturas máximas inducen cambios en los índices extremos asociados a esta variable. Tanto la proporción de días cálidos como la longitud máxima de las olas de calor van a ir aumentando progresivamente a lo largo del siglo. Este aumento será más rápido en el centro y sur peninsular y en la zona pirenaica para los días cálidos (Fig. 6.a), y en la zona interior del cuadrante sureste de la península para la longitud de las olas de calor (Fig. 6.c). Respecto a su incertidumbre, se observa un aumento apreciable de la incertidumbre inducida por los modelos globales para finales de siglo para la longitud de las olas de calor.

7.2. Temperatura mínima

Al igual que para la temperatura máxima, todas las proyecciones de temperatura mínima dan un aumento progresivo

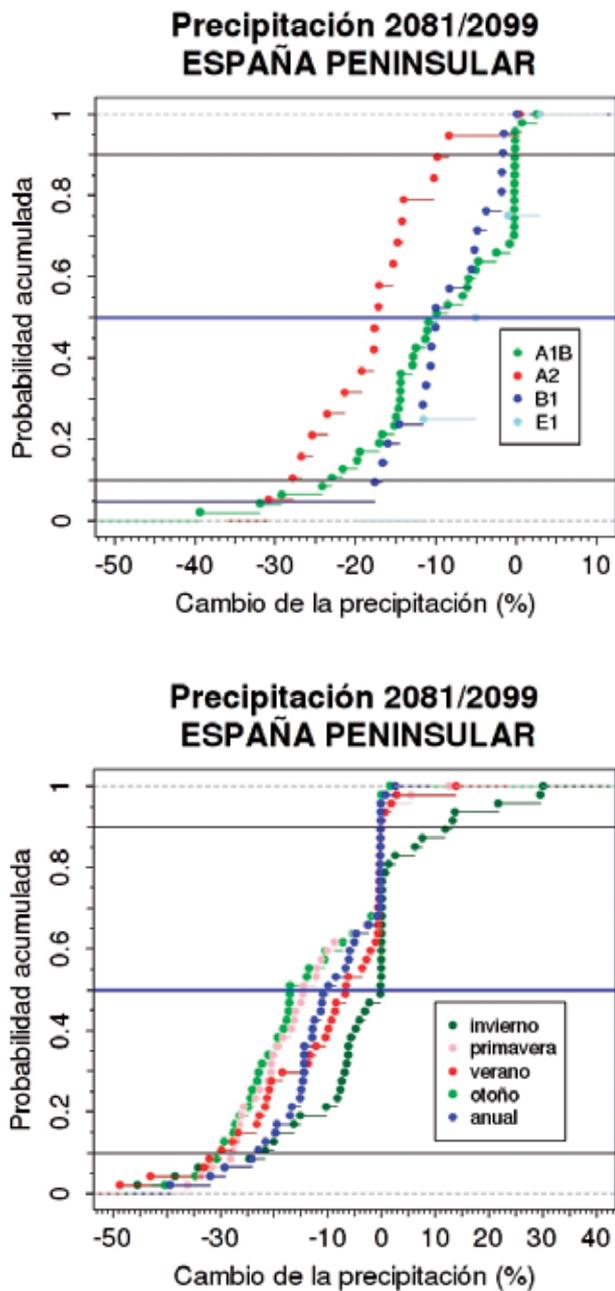


Fig. 7. Funciones empíricas de distribución acumulada del valor medio de la anomalía relativa de la precipitación anual del periodo 2081/2099 respecto al periodo de referencia para España peninsular para los cuatro escenarios de emisión (A2, A1B, B1 y E1) (8.a) y para el promedio anual y estacional con el escenario A1B (8.b). Las líneas horizontales muestran la mediana (color azul) y los percentiles 10 y 90 (color negro) de la distribución

a lo largo del siglo XXI, en todas las zonas geográficas de España peninsular. Por tanto, los mayores aumentos se obtienen para finales de siglo. Sin embargo, la rapidez con la que se puede producir este aumento varía, principalmente, según el escenario de emisión, poniéndose de manifiesto esta diferencia a finales de siglo. Los aumentos mayores son más probables en los escenarios más emisivos, así, es probable que la variación del valor medio de la temperatura mínima de España peninsular para los dos últimos decenios esté comprendida entre 2,8 °C y 4,3 °C para el escenario más emisivo (A2) y entre 1,6 °C y 2,5 °C para el escenario menos emisivo (B1). Estos valores tienden a ser menores en las proyecciones que se tienen para el escenario de mitigación E1.

Los cambios son mayores para el verano (entre 2,5 °C y 4,6 °C) y menores en invierno (1,6 °C y 3,4 °C) y primavera para el escenario de emisiones medias-altas (A1B). Respecto a la incertidumbre debida a modelos globales y técnicas de regionalización, también son mayores en el verano que en el invierno.

Este aumento de la temperatura mínima llevará consigo una variación de los índices extremos asociados a esta variable. Así, se espera una disminución en el número de días de heladas, especialmente en el área pirenaica. En esta zona, y para finales de siglo (periodo 1981/2100), es probable que haya entre 20 y 40 días menos de heladas que en el periodo 1971/2000. En las zonas de la mitad sur peninsular y zonas costeras, donde actualmente se registran pocos días de heladas, es muy probable que para finales de siglo las temperaturas no bajen por debajo de los 0 °C. Por el contrario, a lo largo del siglo XXI habrá un aumento progresivo en la proporción de noches cálidas. Así, para finales de siglo y a nivel de la España peninsular, es probable que el porcentaje de noches cálidas anuales aumente entre un 30 % y un 50 % respecto al periodo de referencia para el escenario de emisiones medias. Este aumento será más acusado en la parte sur y este peninsular, como se observa en la figura 6b, y más suave en la cornisa cantábrica.

7.3. Precipitación

A diferencia de las temperaturas máximas y mínimas, para la precipitación no todas las proyecciones muestran el mismo comportamiento. En general, se aprecia una tendencia a la disminución de la precipitación aunque existen proyecciones que no muestran tendencia significativa o incluso pueden tener una tendencia positiva. Las pro-

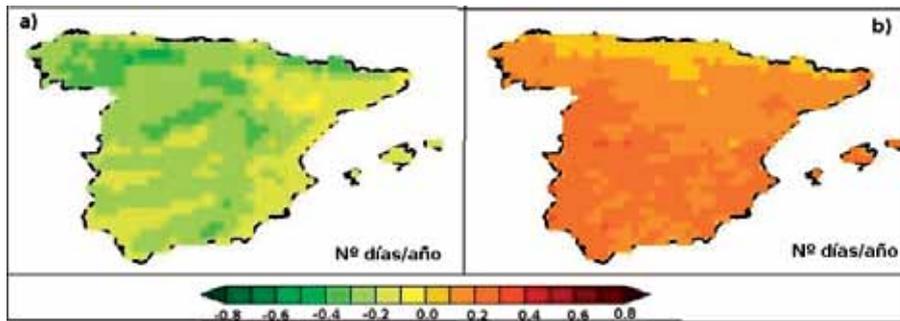


Fig. 8. Distribución espacial de la tendencia de número de días de precipitación (8.a) y de la longitud máxima de los periodos secos (8.b) del periodo 2011/2098 proyectadas para el escenario de emisiones A1B por el conjunto de modelos del proyecto ENSEMBLES

yecciones de los escenarios más emisivos son las que muestran mayor acuerdo (más de la mitad de las proyecciones muestran tendencia significativa y éstas son todas negativas) y dan mayor disminución de las precipitaciones para finales de siglo. El cambio relativo de la precipitación media del periodo 2081/2100 respecto al periodo de referencia es probable que esté entre el -10 % y el -27 % para el escenario A2 y entre el -2 % y el -17 % para el escenario B1 (Fig. 7a).

El desacuerdo entre las proyecciones es mayor en el invierno (Fig. 7b) –algo más de la mitad de las proyecciones obtenidas para el escenario A1B muestran tendencia negativa (30 de 50), siendo significativas solo en un cuarto de ellas–, con una variación la precipitación invernal de entre -21 % y 12 % para finales de siglo. Para el resto de las estaciones, el acuerdo entre las proyecciones es mayor (alrededor del 85 % tienen una tendencia negativa, siendo significativa para la mitad de ellas). Las reducciones mayores se producirían en otoño y primavera.

Respecto a los índices extremos asociados a esta variable, se aprecia una ligera tendencia a disminuir el número de días de precipitación, manifestándose más claramente hacia final de siglo y especialmente en los escenarios más emisivos. Esta disminución sería mayor en las áreas montañosas (Fig. 8a). También se puede apreciar una ligera tendencia al aumento de la longitud máxima de los periodos secos, algo mayor en el sur peninsular (Fig. 8.b), aunque la incertidumbre de este índice, para finales de siglo, es importante. Finalmente, no se aprecia una tendencia clara en el cambio de las precipitaciones intensas.

8. Conclusiones y perspectivas

El calentamiento del sistema climático es inequívoco y según los datos disponibles los años más cálidos desde 1850 han tenido lugar a partir de 1997. Este calentamiento no es uniforme, siendo mayor en las zonas terrestres y en las latitudes más altas del hemisferio norte. Además, este calentamiento se ha manifestado en varios indicadores como la subida del nivel del mar o la reducción de la extensión de hielo y nieve entre otros. La mayor parte de este calentamiento observado en las temperaturas medias mundiales es debido, muy probablemente, al aumento observado de GEI procedentes de la actividad humana.

Las herramientas básicas para realizar proyecciones futuras climáticas son los modelos de circulación general acoplados océano atmósfera. Sin embargo, hay que tener presente que el sistema climático es un sistema complejo altamente no lineal compuesto por varios subsistemas que interactúan entre sí, de ahí que se vaya tendiendo a utilizar mejor los denominados modelos del Sistema Tierra, donde se irá introduciendo más información sobre los subsistemas y sus interacciones, además de intentar alcanzar mayores resoluciones que permitan capturar fenómenos de escala más pequeña.

Los modelos globales proporcionan características a grandes rasgos de las proyecciones climáticas, sin embargo, la resolución actual de los mismos es insuficiente para las necesidades de la comunidad de impactos y adaptación al cambio climático. Por ello, es necesario aplicar técnicas de regionalización a las proyecciones globales para obtener proyecciones en escalas espaciales más pequeñas. Es

importante resaltar que las proyecciones regionales heredan los defectos y debilidades de los modelos globales en los que se basan, por lo que previamente a la regionalización será necesario realizar una evaluación de los modelos globales, cuyo resultado nos permitirá considerar para la regionalización solo aquellos modelos que simulen de forma aceptable la variabilidad natural del clima.

Las proyecciones regionales del clima están afectadas por incertidumbres que proceden de diferentes fuentes. Estas incertidumbres se propagan a lo largo de todos los pasos dirigidos a obtenerlas de una forma jerárquica. Estas fuentes de incertidumbre van desde los forzamientos naturales, por la falta de capacidad de predecir los cambios en la radiación solar y en las erupciones volcánicas, pasando por la evolución futura de las concentraciones de los GEIs, hasta las debidas a los procesos de modelización. El uso de ensambles permitirá una mejor estimación de las diferentes incertidumbres.

Del análisis del conjunto de proyecciones regionales se obtiene que a nivel de España peninsular se observa una tendencia a aumentar las temperaturas máximas y mínimas, más acusada para los escenarios más emisivos. Este aumento conlleva una disminución del número de días de heladas y un aumento de las noches cálidas, los días cálidos y la duración máxima de las olas de calor. Respecto a la precipitación existe más discrepancia entre las proyecciones, predominando aquellas que dan una disminución de precipitaciones para finales de siglo. Esta discrepancia es mayor en el periodo invernal. Este cambio lleva asociado una ligera tendencia a la disminución del número de días de precipitación, especialmente en las zonas montañosas, y un aumento en la longitud máxima de los periodos secos.

Evidentemente, a medida que se mejoren las estimaciones futuras de las concentraciones de GEIs, los modelos globales del sistema Tierra y las técnicas de regionalización se podrán disponer de proyecciones más fiables, siendo necesario la disponibilidad de métodos que permitan el acotamiento de las incertidumbres de las proyecciones obtenidas.

Agradecimientos

Los autores agradecen encarecidamente la revisión y sugerencias aportadas por Ernesto Rodríguez Camino. **ROP**

Referencias

- Giorgi, F., "Climate change hot-spots", *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734, 2006.
- IPCC (2007), Salomon, S., Qin D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor y Miller, K.L., "The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, U.K. y New York, USA, (Eds.). Cambridge University Press, Climate Change, 2007, p. 996.
- Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.H., Lucht, W., Rahmstorf, S., y Schellnhuber, H.J., "Tipping elements in the Earth's climate system", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 105(6), 2008, pp.1786-1793.
- MMA, "Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), OECC, MMA", [http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc/pdf/pna_v3.pdf], 2006.
- Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A. y Jones, P.D., 2012: "Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset". *J. Geophys. Res.*, 117, D08101, doi:10.1029/2011JD017187, 2012.
- Nerem, R.S., Chambers, D.P., Choe, C., y Mitchum, G.T., "Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions", *Marine Geodesy* Volume 33, Supplement 1, Special Issue: OSTM/Jason-2 Calibration/Validation, 2010
- Pfeffer, W.T., Harper, J.T., y O'Neel, S., "Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science*, 321, No. 5894, 2008, pp. 1340-1343, doi: 10.1126/science.1159099
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J. y Meehl, G. A., "An overview of CMIP5 and the experiment design". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 2012, 485-498. DOI 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Van der Linden P., y Mitchell, J.F.B. (eds.), ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 2009, 160pp.