

## ***ESTIMACIONES OBJETIVAS SOBRE LA EVOLUCION REGIONAL Y GLOBAL DEL CAMBIO CLIMATICO***

Lorenzo RODRÍGUEZ MAGAZ

Departamento de Desarrollo y Aplicaciones, Area de Modelización de AEMET.  
[lrodriguez@amet.es](mailto:lrodriguez@amet.es)

Recibido: 01/03/2013

Devuelto: 24/05/2013

Aceptado: 19/07/2013

**RESUMEN:** Los modelos climáticos han evolucionado notablemente y han permitido obtener nuevos datos referentes a la evolución del cambio climático debido principalmente a la actividad antropogénica. Gracias al CMIP5, que es un proyecto de intercomparación de modelos acoplados, se pueden llevar a cabo experimentos partiendo de unas premisas comunes preestablecidas. Nuevos estudios e investigaciones realizados en base a los nuevos datos obtenidos reflejan variaciones en diversos factores relacionados con el cambio climático que no se habían tenido en cuenta. Se ha producido una mejora en las capacidades de predicción del cambio climático gracias a una implicación creciente de un gran número de investigadores que ha hecho posible un incremento en el número de observaciones y nuevos indicadores.

**PALABRAS CLAVE:** modelo climático, cambio climático, CMIP5.

### ***OBJECTIVE ESTIMATES ON REGIONAL AND GLOBAL EVOLUTION OF CLIMATE CHANGE***

**ABSTRACT:** Climate models have evolved considerably and provide new data on changes in the evolution of climate change mainly due to anthropogenic activity. Thanks to CMIP5 project which is a coupled model intercomparison, experiments can be performed based on common premises preset. New studies and research conducted on the basis of new data obtained reflect changes in various factors associated with climate change. There has been an improvement in the predictive capabilities of the evolution of climate change due to a increasing involvement of the scientific community that has made possible an increase in the number of observations and new indicators.

**KEY WORDS:** climate model, climate change, CMIP5.

## **I. INTRODUCCIÓN**

El conocimiento sobre el cambio climático ha avanzado considerablemente en las últimas décadas. Esto ha sido posible gracias al trabajo multidisciplinar de la comunidad científica. Las variaciones en el balance de energía debidas a causas naturales o antropogénicas son la causa principal del cambio climático. ¿Son las actividades del hombre la causa principal de este cambio

o son más bien debidas a una evolución natural? ¿Se ha exagerado el cambio climático? ¿Tiene el hombre posibilidad de frenarlo? Intentaremos enfocar la respuesta a estas preguntas analizando varios estudios llevados a cabo sobre el cambio climático debido principalmente actividades humanas y sus impactos.

Existe un gran número de datos sobre el cambio climático, en las evaluaciones del PANEL INTERGUBERNAMENTAL PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO, (IPCC), que ha realizado ya cinco informes, de los cuales ha publicado solo cuatro. El quinto informe lo publicará a lo largo de 2013-2014. El IPCC fue fundado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con objeto de asesorar sobre todos los aspectos del cambio climático, y en particular sobre cómo las actividades humanas pueden inducir dichos cambios y su impacto. Las conclusiones que expone el IV informe del IPCC (AR4), apuntan a que es posible frenar esos cambios, confirma además que el cambio climático es ya una realidad, fundamentalmente por efecto de las actividades humanas e ilustra los impactos del calentamiento mundial que está ya acaeciendo y del que previsiblemente está en ciernes, y el potencial de adaptación de la sociedad para reducir su vulnerabilidad (IPCC, 2007, 5). Existen detractores del cambio climático que sugieren que el sol podría ser el principal causante de las modificaciones climáticas y partidarios de la teoría clásica del calentamiento global entre cuyos miembros de renombre podemos citar a SHERWOOD, S. (Universidad de Yale) que es uno de los expertos del AR4 (Working Group I). El climatólogo GOLDSMITH, E. defiende a su vez que si el calentamiento no se corta de raíz, la vida en el planeta será imposible al final de este siglo. Como contrapartida y coincidiendo con la filtración del V informe del IPCC (AR5), Canadá parece que abandona el protocolo de Kioto. En el IV informe del IPCC participan 29 científicos españoles, que estimaron que en el siglo XXI habrá en España más chubascos torrenciales, más olas de calor y años de sequía, no habrá nevadas y aumentará la salinidad del Mediterráneo (LEDESMA, 2011: 470). Los investigadores difieren en cuanto a la valoración en un futuro próximo de este cambio climático y sus repercusiones.

Parece incuestionable negar el cambio climático o la no implicación en él por parte del ser humano, como se refleja en las conclusiones del AR4 donde se indica de forma concreta que debe cesar la incertidumbre, ya que no existe el menor género de dudas y que es debido a la acción del hombre. La temperatura en el siglo XXI subirá entre 1,8 °C y 4,1 °C. El hielo del Polo Norte se habrá fundido a final del siglo. El nivel del mar subirá entre 18 y 59 centímetros. Habrá más sequías y el agua será insuficiente dentro de 75 años.

Muchas especies se extinguirán o estarán en vías de extinción (IPCC 2007: 49). La Unión Europea ha puesto empeño en paliar esta situación y reducir antes del 2020 un 20 o un 30% de sus emisiones. La preocupación surge de la aportación comprometida en este sentido que realicen otros países, principalmente en vías de desarrollo como China, India, Brasil o México. Éste último país, ha aprobado recientemente una ley general sobre cambio climático que en su contenido no ataca a los problemas específicos y además abre la puerta a la privatización de la producción de energía renovable.

En el estudio del cambio climático se tiene en cuenta el forzamiento radiativo, que es el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra, medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12.000 metros sobre el nivel del mar) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Se expresa en vatios/metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra (por ejemplo, el forzamiento de los gases de efecto invernadero es aproximadamente de  $2,45 W/m^2$ ), mientras que uno negativo favorece su enfriamiento. También es importante tener en cuenta la sensibilidad del clima y los mecanismos de realimentación. La primera es la relación entre la magnitud del forzamiento y la respuesta del sistema climático que nos da una medida de la sensibilidad del clima, es decir una medida objetiva del cambio cuando se altera uno de los factores del mismo. El proceso que altera la sensibilidad de la respuesta climática a un forzamiento es lo que se conoce por mecanismo de realimentación y puede ser positivo o negativo. Podemos obtener la sensibilidad a un forzamiento radiativo y estudiar cómo varía en función del mecanismo de realimentación estudiado según sea por ejemplo vapor de agua, nubosidad o albedo del hielo. A un aumento de temperatura le corresponden inviernos más suaves y templados mientras se reducen o desaparecen los glaciares, se funden los casquetes polares y sube el nivel medio del mar. Se han realizado un gran número de estudios que indican un aumento de las temperaturas de la superficie de la tierra en la segunda mitad del siglo XX, relacionado con un incremento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que podría ser considerado un factor de forzamiento climático de origen antropogénico. Surgen una serie de preguntas relacionadas: ¿han causado las actividades humanas el incremento de los GEI y a su vez se debe el calentamiento global observado a este incremento? ¿De qué forma podría cambiar el clima en un futuro cercano si siguen aumentando los GEI? Para dar respuesta a estas preguntas se han utilizado los modelos climáticos como herramienta indispensable para obtener una serie de conclusiones que permitan actuar de forma proactiva en la prevención del impacto futuro del cambio climático. Estos modelos climáticos son simuladores del sistema climático que incluye

atmósfera, hidrosfera, criosfera, biosfera y litosfera. Se basan en la resolución de las ecuaciones que gobiernan los procesos de cada componente del sistema y los intercambios de energía y masa que se producen entre ellos. Ofrecen una representación aproximada de la realidad con la simulación de mecanismos que permiten obtener información sobre variabilidad y cambio climático, cuyos resultados han mejorado bastante, gracias a la creciente potencia de cálculo, la mejora de los sistemas de observación y los métodos de asimilación de observaciones en los modelos y la utilización de modelos acoplados atmósfera-océano. Existe lo que se llama una jerarquía de modelos que incluye modelos de balance (balance de energía, ciclo del carbono) y modelos climáticos dinámicos (globales acoplados, globales completos y de complejidad intermedia). Se pretende así trabajar a diferentes escalas valorando también los impactos regionales que provocaría el proyectado cambio climático.

Es necesario establecer una distinción clara entre las causas del cambio climático. Debemos distinguir entre causas naturales y causas debidas a la actividad antropogénica. Las causas naturales asociadas a cambios climáticos de origen no antropogénico son las manchas solares, la órbita de la tierra, la deriva de los continentes, la formación de montañas y los volcanes. Los ciclos climáticos del pasado han supuesto variaciones de hasta unos 6 °C que han obedecido a causas naturales. En la actualidad, se asume que la Tierra se encuentra en un período interglacial, que se espera que finalice en unos 25000 años. La actual tasa de incremento en la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera, la cual es claramente causa antropogénica, podría retrasar la llegada de la próxima glaciación. Además si observamos los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 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] (1901-2000) indicada en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007). Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta y es más acentuado en las latitudes septentrionales superiores. Las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos. En España se calcula que podría afectar este calentamiento produciendo una pérdida del 30% de los humedales y un riesgo de contaminación de los acuíferos.

Si echamos la vista atrás también podemos encontrar un gran número de indicadores de la evolución del clima pasado que nos indican la fragilidad de nuestro medioambiente y a qué nos enfrentaríamos si se produjera un aumento de temperaturas por causa antropogénica. Estos indicadores podemos obtenerlos por ejemplo en muestras de sedimentos del fondo marino que

contienen restos de carbonato cálcico y organismos con umbrales de vida asociados a un estrecho margen de temperatura que constituyen un indicador de la temperatura del agua en épocas remotas. La proporción de isótopos de oxígeno en estas células nos indica las épocas de glaciaciones, empleándose el O16 y O18 ya que cuando el agua del océano se evapora el oxígeno pesado 18 tiende a permanecer durante los períodos de avance de la glaciación, es decir, los océanos contienen menos agua y disponen de una mayor concentración de oxígeno 18. Se obtienen conclusiones a partir de la proporción de oxígeno 18 con respecto al oxígeno 16 dentro de estas células, proporcionando información de cómo ha sido el clima del pasado, una proporción más alta de oxígeno 18 sugiere un clima más frío y si es más baja, más cálido (LEDESMA, 2011: 456). En resumen podemos decir que es también útil elaborar escenarios posibles basados en indicadores de la evolución del clima pasado para entender mejor las causas del cambio climático actual.

## II. CONFIABILIDAD DE LOS MODELOS CLIMATICOS

Los modelos climáticos globales (MCGs) constituyen actualmente la herramienta más confiable para simular los procesos que determinarán el cambio climático futuro en escalas globales y regionales (en el CUADRO 1 se relacionan algunos de esos modelos); sin embargo, las predicciones de los MCGs están sujetas a considerables incertidumbres. En este sentido, la confianza en la utilización de los MCGs se debe basar en una cuidadosa evaluación de su desempeño, haciendo uso de bases de datos observacionales y actividades de intercomparación de modelos. En la actualidad, existe un conjunto inédito de simulaciones de MCGs que serán incluidos en el quinto informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (AR5), cuya habilidad para simular el clima presente requiere ser evaluada a nivel global y regional (GULIZIA y CAMILLIONI, 2012: 1). La gran pregunta que surge del intento por realizar las predicciones más realistas es obviamente la de si los modelos empleados para obtener proyecciones futuras son suficientemente fiables. Hasta ahora se les ha atribuido una fiabilidad razonable en la simulación de la evolución futura del clima teniendo en cuenta diferentes escenarios de emisiones de GEI basados en criterios socioeconómicos. Se utilizan conjuntos o *ensembles* de modelos deterministas para obtener proyecciones probabilistas del clima (CALLADO *et al.*, 2013: 1). Las proyecciones futuras obtenidas a partir de estos *ensembles* tienen una incertidumbre donde cada resultado se expresa mediante un intervalo de valores. Esta incertidumbre es debida en parte a la dificultad de valorar el impacto de las actividades humanas en los próximos años y por supuesto a las propias limitaciones de los modelos en sí mismos (LORENTZ, 2005: 1). Los fundamentos se basan en leyes físicas establecidas, como conservación de masa, energía y momento,

además de una gran cantidad de observaciones que dan lugar a representaciones matemáticas del sistema climático, expresado en códigos de computadora y ejecutadas en equipos de gran capacidad de cálculo. Permiten simular aspectos importantes de la situación actual y se evalúa su efectividad de forma rutinaria mediante la comparación de sus simulaciones con las observaciones de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra.

Los modelos climáticos han evolucionado y han permitido obtener nuevos datos referentes a cambios en la evolución del cambio climático debidos principalmente a la actividad antropogénica. Son capaces de representar la distribución a gran escala de la temperatura atmosférica, precipitación, radiación, viento, temperaturas oceánicas, corrientes marinas e incluso la cubierta de hielo marino. Pueden simular los aspectos esenciales de muchos de los patrones de la variabilidad climática observada en una amplia gama de escalas de tiempo, así como características importantes de la circulación general a través de escalas de tiempo cortas, aspectos de la variabilidad estacional e interanual, los cambios estacionales de las temperaturas, el avance y retroceso de los principales sistemas monzónicos, la variación de presiones extratropicales superficiales, los modos anulares Norte y Sur, fenómenos de variabilidad de baja frecuencia como ENSO (el Niño-South Oscillation) y NAO (North Atlantic Oscillation) que guardan relación con la precipitación anómala en la península ibérica. Los resultados obtenidos del 4º informe del IPCC y de posteriores análisis de los datos CMIP3 sobre temperatura y precipitación, coinciden en señalar la región del Mediterráneo y la Península Ibérica como zonas especialmente vulnerables a los impactos del cambio climático debido a las relaciones existentes entre dichas variables y las teleconexiones (GONZÁLEZ, 2012:1).

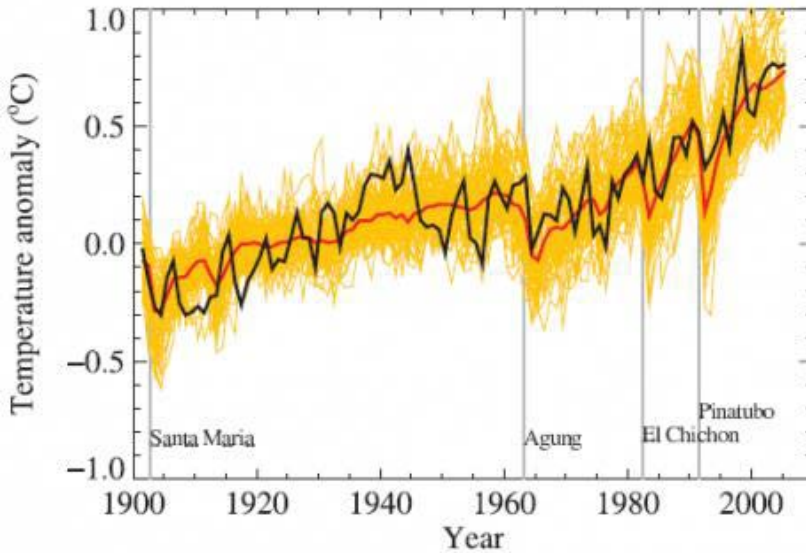
Las limitaciones en la capacidad de los modelos para pronosticar el tiempo solo en unos pocos días en principio no deberían influir en su capacidad de predecir a largo plazo los cambios climáticos, ya que estos son tipos muy diferentes de simulación: se usan los términos “predicción del tiempo” y “proyección del clima” que revelan su diferente naturaleza. Se han realizado además intercomparaciones entre los distintos modelos.

En el II Informe de Evaluación del IPCC, se utiliza la expresión “Modelo Climático Simple” (MCS) para referirse a los modelos simplificados empleados para elaborar previsiones de los cambios de la temperatura media mundial y el nivel del mar en respuesta a los escenarios de emisiones y los perfiles de estabilización del CO<sub>2</sub>. Los MCS contienen módulos que calculan la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) conforme a las emisiones futuras, el forzamiento radiativo resultante de las concentraciones de gases de efecto invernadero y las emisiones de gases precursores de aeroso-

les calculadas, la respuesta de la temperatura media mundial al forzamiento radiativo calculado y la subida del nivel del mar ocasionada por la expansión térmica del agua marina y la respuesta de glaciares y capas de hielo. (IPCC 1997b: 3).

La cantidad, el lugar, la altura, el tiempo de vida y las propiedades ópticas de las nubes ejercen controles importantes sobre el clima de la Tierra, y los cambios de esas propiedades podrían tener una función importante en el cambio climático. El impacto radiativo de un cambio determinado de las propiedades, la cantidad y la altura de las nubes depende del lugar y del mes y día en que se producen dichos cambios. Los cambios que se produzcan dependerán, entre otros, de los campos tridimensionales de la temperatura, la humedad y los procesos dinámicos de la atmósfera. A causa de esto, los modelos tridimensionales con resolución espacial alta y ciclo diurno simulan mejor el efecto neto de los cambios de las nubes sobre el clima. Pero la mayoría de los procesos de nubes ocurren a escalas muy inferiores a la resolución de los modelos globales, por lo que se necesitan representaciones sencillas promediadas zonalmente de los procesos nubosos, que podrían ocasionar errores de envergadura en los cambios simulados de las nubes. Otro factor influyente en el forzamiento radiativo es el cambio en los mantos de hielo y nieve, altamente reflectantes. Al calentarse el clima, disminuye la extensión de hielo y nieve, lo que ocasiona una mayor absorción de energía solar y el calentamiento consiguiente. Según el AR4 los modelos actuales apuntan a unas mayores pérdidas de masa de hielo por efecto de la temperatura, más rápidamente que las acumulaciones de masa por efecto de una mayor precipitación, y parecen indicar que el balance de masa en superficie llegará a ser negativo (pérdida de hielo neta) cuando el promedio mundial del calentamiento (respecto de los valores preindustriales) sea superior a entre 1,9 y 4,6°C. De prolongarse milenios, ese balance de masa negativo conduciría a una desaparición prácticamente total del manto de hielo de Groenlandia y, consiguientemente, contribuiría a un aumento de nivel del mar en aproximadamente 7 m (IPCC, 2007: 47). En la FIGURA 1-a se puede ver una comparativa entre las anomalías globales de la temperatura superficial media (en °C) a partir de observaciones (línea color negro) y simulaciones (amarillo-naranja) obtenidas a partir de 58 simulaciones producidas por 14 modelos climáticos diferentes. Se utilizan los forzamientos antropogénicos y naturales. En la FIGURA 1-b se tienen en cuenta los forzamientos naturales solamente. Un aumento de 1-2°C de la temperatura media mundial respecto de los niveles de 1990 (aproximadamente 1,5-2,5°C respecto de la era preindustrial) entrañaría importantes riesgos para numerosos sistemas únicos y amenazados y, en particular, para numerosas regiones de rica biodiversidad (IPCC 2007: 19), (IPCC 2002: 52).

**Figura 1a.** Media global del siglo XX de las temperaturas en superficie a partir de observaciones (en negro) y su obtención a partir de 58 simulaciones producidas por 14 modelos climáticos diferentes, teniendo en cuenta factores naturales y de origen humano que influyen en el clima (amarillo-naranja). La media de todos estos resultados se muestra en la línea roja. Las anomalías de temperatura se muestran en relación a la media de 1901 a 1950. Las líneas verticales grises indican grandes erupciones volcánicas.



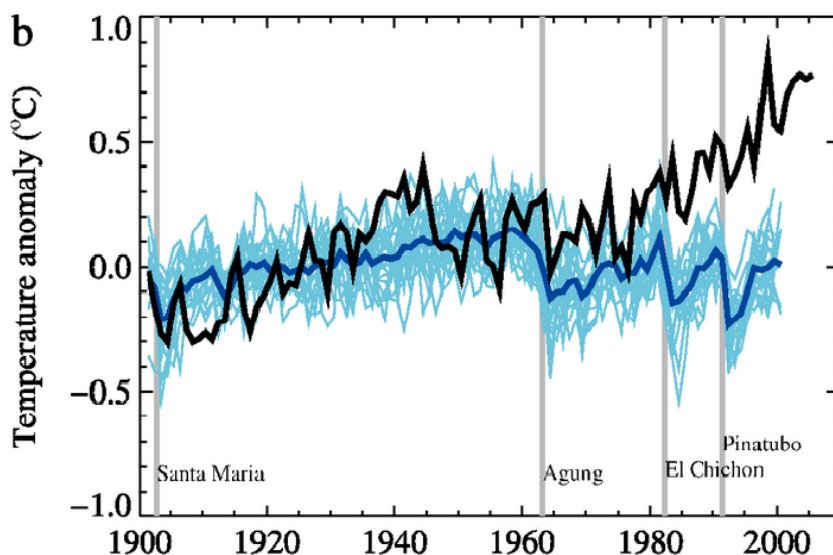
FUENTE: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Informe del grupo de trabajo I. Gráfico RT.23 a.

Después de varias décadas de desarrollo, los modelos climáticos han proporcionado resultados que pronostican un calentamiento significativo como respuesta al aumento de los gases de efecto invernadero. Llegados a este punto surge una pregunta que es causa de una creciente controversia. ¿Son las actividades del hombre la causa principal del aumento de estos gases y por lo tanto del llamado cambio climático o es más bien debido solo a una evolución natural? ¿Se ha exagerado el papel del ser humano como motor del cambio climático? Nuevos estudios e investigaciones realizadas en base a los nuevos datos obtenidos reflejan variaciones en diversos factores relacionados con este cambio, tanto factores bióticos como abióticos. Los modelos de predicción de la temperatura global utilizados durante las últimas dos décadas han estado de acuerdo en general con las observaciones posteriores durante ese período e incluso han podido reproducir otros cambios observados, tales como el aumento más rápido en la noche de las temperaturas dia-



rias, el mayor grado de calentamiento en el Ártico y los pequeños enfriamientos globales y su posterior recuperación, que han seguido a las grandes

**Figura 1b.** Simulación de las anomalías del promedio de temperatura global. Son 19 simulaciones producidas por cinco modelos teniendo en cuenta forzamientos naturales solamente. La media del conjunto multi-modelo se muestra como una línea azul gruesa y las simulaciones individuales se muestran como curvas finas de color azul.

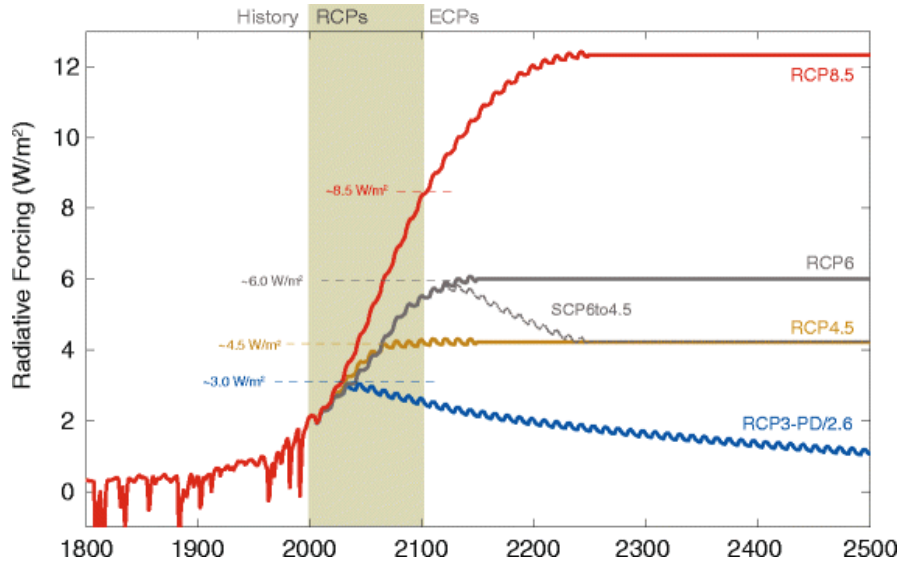


FUENTE: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Informe del grupo de trabajo I. Gráfico RT.23 a.

erupciones volcánicas, como la del Monte Pinatubo en 1991. Se ha producido, en definitiva, una evolución positiva en cuanto a la confiabilidad de los modelos climáticos y una mejora en las capacidades de predicción de la evolución del cambio climático. Esto se ha debido a una implicación creciente de la comunidad científica que ha hecho posible el incremento en el número de observaciones y nuevos indicadores. Un problema que existía referente a la utilización de los modelos climáticos en diferentes experimentos es el de que no había uniformidad en cuanto a su uso, configuración y parametrización, lo cual impedía que los resultados obtenidos a partir de los mismos pudieran relacionarse y valorarse adecuadamente entre sí. De la necesidad de solucionar este problema surge CMIP5 que es un proyecto de intercomparación de modelos acoplados donde cerca de 20 grupos de modelización de todo el mundo llevan actualmente a cabo experimentos partiendo de unas premisas comunes preestablecidas. Se trata de evaluar el comportamiento de

distintos modelos climáticos, estudiando y comparando simulaciones de los mismos a través de una amplia gama de experimentos, escalas de tiempo y configuraciones dadas a los grupos de trabajo (acoplado, con atmósfera única, con o sin inicialización de océano, etc), lo que puede proporcionar pistas sobre el origen de las diferencias entre modelos climáticos y el origen de posibles errores de los mismos. La motivación para llevar a cabo el CMIP5 surgió a partir del IV informe de evaluación del IPCC (AR4). Más detalles

**Figura 2.** Forzamiento radiativo total (antropogénico + natural) para 4 RCPs y ECPs (Extended Concentration Pathways). El RCP8.5 es el más interesante por ser el de mayor forzamiento radiativo ( $8.5 \text{ W/m}^2$ ). Comparamos como se estabiliza el forzamiento para cada RCP a partir de 2100. Se estabilizan antes el RCP6 y RCP4.5. Las variaciones a corto plazo de 1800 a 2000 en el forzamiento radiativo se deben a forzamientos de origen volcánico. Se toma la constante solar de un ciclo solar de 11 años.



FUENTE: MEINSHAUSEN et al, 2011, 230.

sobre CMIP5 se puede encontrar en (TAYLOR *et al.* 2009, 2011). Los investigadores han definido un conjunto de escenarios conocidos o sendas definidas llamadas Representative Concentration Pathways (RCP), con el objetivo de ofrecer una gama de futuros posibles para la evolución de la composición atmosférica. Para algunos propósitos, están destinados a sustituir a las proyecciones anteriores basadas en escenarios de composición de la atmósfera, como las del Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Estas sendas predefinidas se utilizarán en las simulaciones de modelos climáticos en el

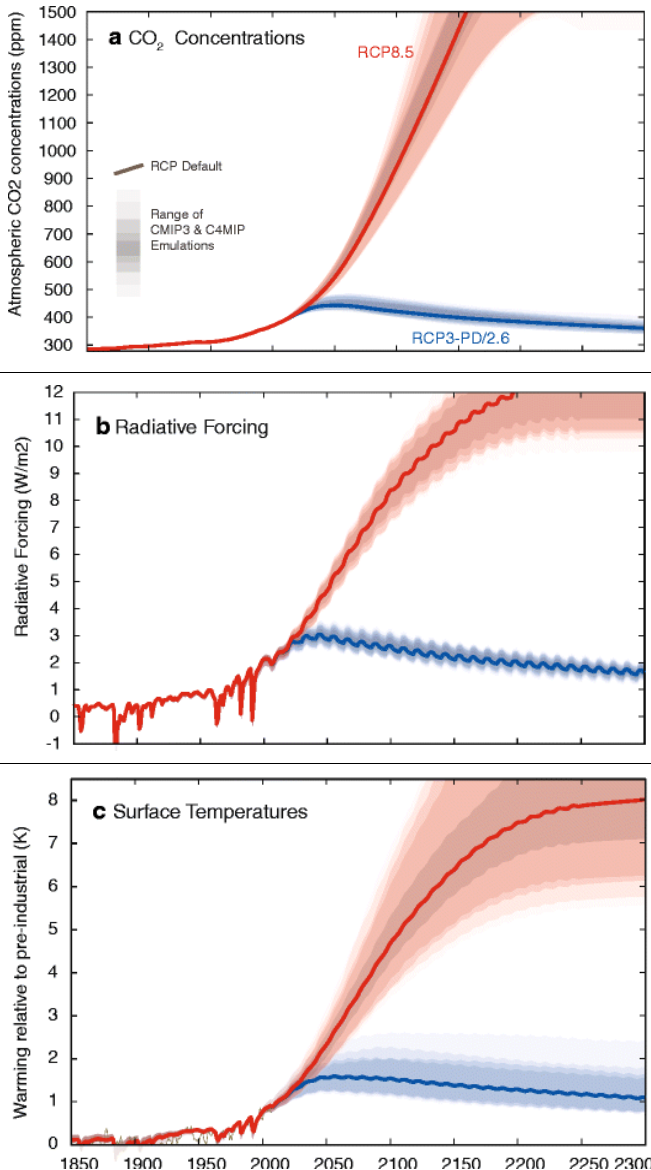
marco del CMIP5. La Base de datos RCP Versión 2.0.5 está disponible en <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb> y el portal CMIP5 (Project Phase 5) en <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>. Los RCP's definidos se basan en escenarios de emisiones de varios gases que se seleccionaron a partir de trabajos realizados por varios investigadores y que se seleccionaron para tal fin. (MEINSHAUSEN et al, 2011: 213). En la FIGURA 2 podemos observar el forzamiento radiativo total (antropogénico + natural) para 4 RCP's definidos para varios GEI. Observamos como el forzamiento se estabiliza a partir de 2100. Aquí se hace una comparativa usando el mejor y el peor escenario (RCP). Las variaciones a corto plazo de 1800 a 2000 en el forzamiento radiativo se deben a forzamientos de origen volcánico. Se toma la constante solar de un ciclo solar de 11 años. Este es uno de los resultados de un experimento en el que se combina una serie de concentraciones observadas y una serie de estimaciones de emisiones de GEI, en el período (1750-2005) con las emisiones armonizadas proyectadas por cuatro diferentes modelos de evaluación integrada para 2005-2100. Se han utilizado *ensembles* de 4 modelos IAM (Integrated Assessment Models). Los ECPs son simples extensiones de los RCPs. Nos interesan especialmente los resultados de forzamiento radiativo obtenidos para el RCP 8,5 (8,5 W/m<sup>2</sup>) que es la estimación para finales de 2100 donde vemos que hay un forzamiento creciente hasta 12 W/m<sup>2</sup> en 2250 donde se estabiliza y RCP-PD (3 W/m<sup>2</sup>) que es el escenario opuesto. Estos forzamientos varían según las concentraciones que son algo que depende del propio clima futuro (debido a la retroalimentación producida por el ciclo del carbono y otros gases). A partir de conjuntos de datos de concentración estandarizados, a través del CMIP5 se obtienen intercomparaciones que permitirán la comprensión de la relación entre las emisiones y las concentraciones. Se obtienen así resultados sobre las emisiones y el efecto invernadero producido en base a estas sendas predefinidas RCP, con concentraciones de GEI históricas y datos armonizados de emisiones a los niveles comunes de emisión 2000-2005. El resultado es una mejor estimación de las concentraciones de GEI futuras, y su extensión más allá de 2100 en base a estas sendas predefinidas. (MEINSHAUSEN et al, 2011: 235). Uno de los problemas existentes todavía en la predicción realizada por los modelos climáticos es la parametrización de la nubosidad que influye de manera importante en el forzamiento radiativo. El principal desafío radica en cómo hacer la parametrización teniendo en cuenta la retroalimentación de los modelos.

También hay algunas inconsistencias en las relaciones entre las emisiones y las concentraciones que podrían complicar la interpretación de las consecuencias climáticas de los diferentes escenarios dados.

Podemos observar resultados de la aplicación de RCPs en la FIGURA 3, donde se han escogido los escenarios extremos basados en concentraciones

de CO<sub>2</sub> para los RCP8.5 y RCP3-PD. Podemos ver la relación directa entre las concentraciones de CO<sub>2</sub>, la temperatura en función del tiempo para cada RCP y el forzamiento radiativo correspondiente.

**Figura 3.** A) Concentración de CO<sub>2</sub>. B): Forzamiento radiativo total C) Temperatura de superficie. Se utilizan RCP8.5 y RCP3-PD



FUENTE: MEINSHAUSEN et al, 2011, 233.

**Cuadro 1. MGCs del CMPI5: Nombre del modelo y su procedencia**

BCC_CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China
CanESM2	Canadian Centro for Climate Modelling and Analysis, Canadá
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics laboratory (GFDL), Estados Unidos
GFDL-ESM2G	
GFDL-ESM2M	
GISS-E2-H	NASA Goddard Institute for Space Studies Usa, Estados Unidos
GISS-E2-R	
HadCM3	UK Met Office Hadley Centre, Reino Unido
HadGEM2-CC	
HadGEM2-ES	
INMCM4	Russian Institute for Numerical Mathematics, Rusia
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, Francia
IPSL-CM5A-MR	
MIROC-ESM	University of Tokio, National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón
MIROCESM-CHEM	
MIROC4h	
MIROC5	
MIRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japón
NorESM1_M	Norwegian Climate Centre, Noruega

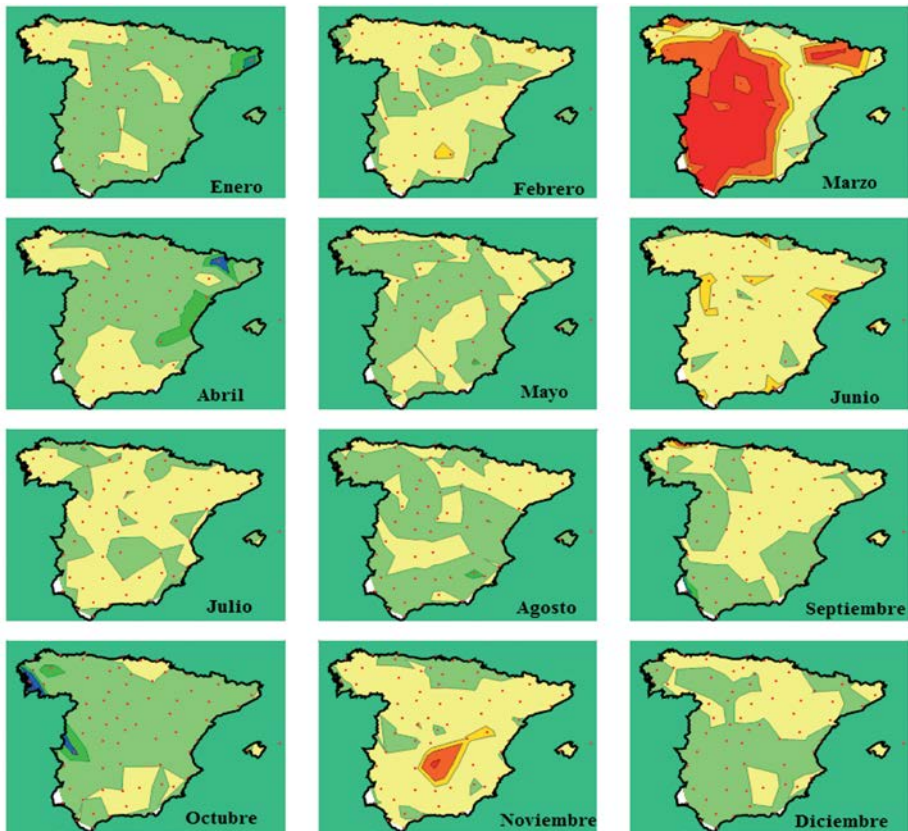
FUENTE: GULIZIA y CAMILLIONI, 2012, 12.

### III. ÚLTIMOS ESTUDIOS Y AVANCES REALIZADOS A NIVEL REGIONAL

Las series de observaciones climatológicas son importantes para la monitorización del clima y la valoración de impactos sobre las actividades humanas. Pueden no ser fiables debido a causas ajenas a la evolución del clima: errores puntuales, cambios de ubicación, actualización de la instrumentación de medida o cambios de situación de los observatorios o características de su emplazamiento. Se ha paliado este problema empleando diversos métodos de homogeneización de series climáticas, para discriminar los datos erróneos debidos a los factores mencionados.

La Agencia Española de Meteorología (AEMET) ha impulsado iniciativas como por ejemplo GUIJARRO (2008: 158). Para poder analizar la variabilidad climática es necesario contar con bases de datos climáticos homogéneos en un largo recorrido temporal que permita la obtención de escenarios de cambio climático regionalizados. Se están realizando esfuerzos en esta línea como se refleja en la ponencia de LUNA *et al.* (2012: 499). Esto nos indica que existe una continua mejora y una mayor implicación por parte de los servicios meteorológicos nacionales que hace posible a su vez una mayor capaci-

**Figura 4.** Tendencias de precipitación observadas para el periodo 1902-2010 en los diferentes meses, de enero a diciembre. Su variación se representa de menor a mayor por gradientes de color desde amarillo a rojo, destacando en este caso un aumento en los meses de Marzo y Noviembre. Los valores representan el valor absoluto del logaritmo en base 10 del p-valor, siendo significativos al 5% los valores superiores a 1.3.



FUENTE: LUNA et al, 2012, 506.

dad de predicción en la evolución del cambio climático ya que permite obtener tendencias más coherentes y confiables.

Las temperaturas medias anuales en Castilla y León durante el período 1961-2006 han experimentado un aumento significativo, especialmente a partir de 1973, con un incremento promedio de  $0,043^{\circ}\text{C}$  por año, debido sobre todo al comportamiento de las temperaturas medias de las máximas. Los meses de marzo y junio han sido los más sensibles a estos cambios (CEBALLOS *et al.* 2010: 59). No se observa en España un patrón homogéneo en la distribución espacial de las tendencias que sea estadísticamente signifi-

cativo: el patrón depende del periodo temporal elegido, por lo que se puede afirmar que las tendencias observadas no son consistentes, sino que son debidas a la gran variabilidad que caracteriza a la precipitación en las regiones mediterráneas. Realmente se detecta una elevada variabilidad decadal en la precipitación y no se puede afirmar que exista una reducción significativa en las cantidades de precipitación recogidas aunque hay signos claros de un cambio en la distribución temporal de las cantidades con un descenso claro de la precipitación recogida en el mes de marzo (LUNA et al, 2012: 505).

El cambio climático se refleja en variaciones de muchos indicadores no solo abióticos (temperatura, precipitación, etc) sino también bióticos, como por ejemplo el polen. Podemos observar los efectos producidos en este indicador tomando como ejemplo el polen de abedul a partir de un análisis bayesiano realizado que muestra los efectos del cambio climático en los niveles observados y proyectados en el aire, en cuanto a contenido en este de polen de abedul (*Atmospheric Environment*, Volume 68, 2013), donde las producciones anuales y los valores máximos desde 2020 hasta 2100 bajo diferentes escenarios será mayor que los valores medios del año 2000. Los niveles de polen en suspensión se calculan en base a factores climáticos observados. Un efecto claro es que la temporada de polen tiende a comenzar más temprano. Se ha realizado otro estudio sobre índices de polen y registros sedimentarios de carbón vegetal en volcanes, en África central: Virunga en el Rift, que es una de las zonas con mayor biodiversidad del mundo (*Quaternary Science Reviews*, Volume 2013,61). Se observan cambios en la vegetación en el último milenio debidos posiblemente a cambios en el régimen de incendios y otras causas derivadas de actividades humanas. Como podemos comprobar en los últimos estudios sobre riesgos climáticos e impacto ambiental (GARCÍA-LEGAZ y VALERO, 2003: 233), el 35% de los incendios forestales se produce en los fines de semana y el número de incendios atribuibles a visitantes en los montes es aproximadamente del 60% (ICONA, 1968-1995). En España en los últimos 30 años el fenómeno de la urbanización ha originado nuevos aspectos en las relaciones entre el monte y el fuego debido principalmente a la construcción de segundas viviendas en zona forestal que implica pasar en ellas el tiempo libre creando situaciones generadoras de fuego. La influencia de la actividad productiva del hombre es ya incuestionable, pero en algunos casos esta puede ser positiva. Un pequeño ejemplo a nivel local lo apreciamos en el estudio de (RUIZ et al., 2013: 22), donde se estudia el impacto de dos especies de arbustos típicas de la dehesa ibérica. Estos proporcionan refugio y forraje al ganado, controlan la erosión, facilitando la regeneración de los árboles y muestran una gran capacidad como sumidero de carbono que ayuda positivamente a mitigar los efectos locales del cambio climático. El porcentaje de carbono llega a ser aproximadamente el 25% de

la cantidad de biomasa vegetal total. En respuesta a las alteraciones del clima regional y la calidad del aire de las últimas décadas se puede apreciar un cambio en el crecimiento radial de especies arbóreas de zonas templadas. Se ha observado una variación en el área basal y en los primeros estadios de crecimiento de robles, hayas y pinos de los bosques templados del noroeste de Europa, en relación con series temporales de concentración de CO<sub>2</sub> y ozono. En hayas se ha producido un descenso del crecimiento desde la década de 1960 y un aumento en robles. La deposición de nitrógeno juega un papel importante en la reducción de la biodiversidad de muchos ecosistemas. Desde 1860 a 1990 se observó un aumento de las deposiciones en amplias zonas que podría seguir aumentando (DENTENER, 2006). El Indicador de Deposición de Nitrógeno (NDI, por sus siglas en inglés), se basa en mediciones de deposiciones de nitrógeno reactivo tanto húmedas como secas y tanto naturales como antropogénicas. Una disminución de la deposición de nitrógeno podría evitar en parte los efectos negativos del cambio climático para las hayas.

Existe un gran número de estudios que reflejan un cambio apreciable en cuanto a la variación de los valores extremos de temperatura y precipitación. En un estudio reciente (BOCCOLARI, 2012: 16), se recogen los resultados de una gran cantidad de series temporales de varias variables meteorológicas, (temperatura, precipitación, humedad relativa, presión, nubosidad), desde principios del siglo XIX, siempre en la misma posición, que confirman los reportados por el IPCC y otros estudios realizados en el Mediterráneo. Como dato interesante se observa que la temperatura mínima tiene una tendencia no significativa positiva de 0,1 °C por década, teniendo en cuenta todo el periodo, el valor se incrementa a 0,9 °C por década entre 1981-2010. Para la temperatura máxima se observó una tendencia no significativa de 0,1 °C para todo el período, y 0,8 °C durante los últimos treinta años. Por otra parte la precipitación está disminuyendo, -6,3 mm por década, teniendo en cuenta todo el período analizado, mientras que los últimos treinta años se caracterizan por un gran incremento de 74,8 mm por década. Durante los últimos 30 años los días de heladas y hielo están disminuyendo, mientras que los días de verano van en aumento. Se prevé que se produzcan sequías con mayor frecuencia, que implican aumentos de la temperatura y pocas precipitaciones con un impredecible impacto sobre la producción de vegetación regional ya que implican diversas respuestas por parte de la misma a la sequía estival interanual. Según el AR4 se espera que en el sur de Europa, se agraven las condiciones existentes (altas temperaturas y sequías) en una región ya de por sí vulnerable a la variabilidad climática, que reduciría la disponibilidad de agua, el potencial hidroeléctrico, el turismo estival y la productividad de los cultivos en general (IPCC 2007, 11).

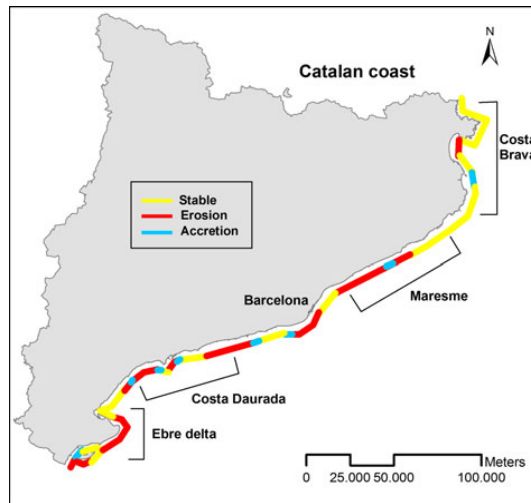
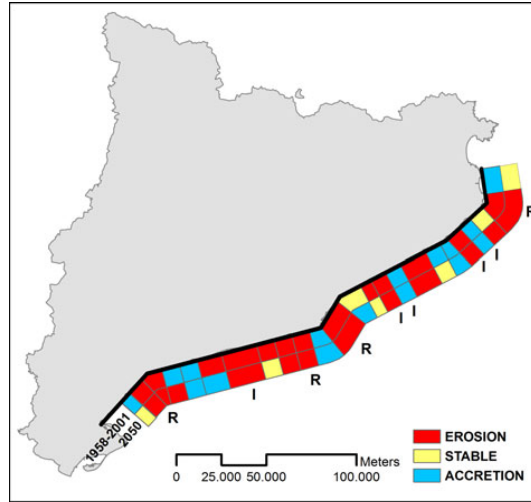


Un mayor conocimiento en profundidad de las fortalezas y debilidades de los modelos de ecosistemas ayudaría a comprender mejor los efectos de la sequía del verano debidos a un futuro cambio climático. Actualmente también es posible evaluar la desertificación y las condiciones para el crecimiento de la vegetación gracias a la información obtenida por cámaras hiperespectrales (HSI) instaladas en los nuevos satélites que permiten realizar una cartografía de la vegetación (ESCALANTE-RAMÍREZ, 2012). Se han podido asimismo calcular aproximadamente las pérdidas de superficie vegetal y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la cría de ganado, gracias a estudios recientes, basados en datos de la deforestación que resulta del establecimiento de pastos y posterior quema de la vegetación talada, quema de pastos y de la fermentación entérica bovina. La ganadería intensiva puede reducir la superficie de pastos necesarios para la producción de carne, lo que afecta a las tasas de deforestación. La mezcla adecuada de granos o forrajes puede mejorar la digestibilidad de las raciones y ayudar a mitigar las emisiones de metano. Al mismo tiempo, sin embargo, la producción de grano para alimentación animal puede acarrear un aumento de las emisiones de GEI debido a mayores aportes de nitrógeno reactivo (BUSTAMANTE M. *et al.*, 2012: 559).

Se ha evaluado el impacto climático de la captura de carbono y su almacenamiento asociados al uso del suelo, cambios en el uso de la tierra y la silvicultura (LEVASSEUR, A. *et al.*, 2012: 759). Existe un impacto potencial del ciclo de vida de los GEI asociado a factores que producen un secuestro de carbono mediante determinados usos del suelo y la liberación de nuevo a la atmósfera debido al fuego o a la explotación forestal. Los bosques son vulnerables a perturbaciones naturales como incendios forestales y plagas que causan una liberación parcial del carbono fijado de nuevo a la atmósfera. La capacidad de un proyecto de forestación para compensar la emisión de GEI depende de los pasos seguidos en el mismo y su valoración es complicada según los escenarios.

La búsqueda de nuevos impactos del cambio climático es un tema candente en la comunidad científica. Sin embargo se había prestado poca atención a los efectos del cambio climático en el oleaje y en particular a cambios en su dirección. Hay un estudio que aborda los análisis de tendencias en dirección de las olas y los impactos asociados al cambio climático en el litoral catalán (CASAS y SIERRA, 2012: 667). Mediante una metodología de análisis de tendencias por medio de un análisis de regresión lineal, suponiendo que la tendencia estimada para 1958-2001 se aplica en el futuro, se calculó la tendencia en el tiempo hasta 2050. También se realizó una evaluación del impacto en la morfología dinámica costera y una comparación entre la situación ac-

**Figura 5.** Arriba: Clasificación de los distintos tramos en términos de erosión, estabilidad y acreción para 1958 - 2001 y la extrapolación para 2050. I y R: aumento y reducción, respectivamente, en los cambios detectados. Abajo: Evolución de la erosión en el litoral catalán.



FUENTE: CASAS-PRAT y SIERRA, 2012. Adap.de *European EUROSION project* (2002–2004)

tual y la futura en el Mediterráneo noroccidental basado en datos de 44 años, observándose una reducción de la frecuencia de las olas que vienen del Norte y Noreste y un aumento de las que vienen del Sur. Este cambio de dirección puede provocar cambios en el 70% de la costa catalana, donde, por ejemplo,

playas aparentemente estables podrían sufrir cambios considerables (FIGURA 5) y afectaría a un gran número de puertos de Cataluña que están orientados hacia el Sur-suroeste.

La cantidad anual de energía aportada por las olas permanecerá casi constante. Se prevé en cambio una variación en la dirección y un posible aumento en la sedimentación de algunos puertos. Se han observado unos patrones de cambio en la temperatura superficial del mar (SST) en el Atlántico Norte durante las últimas tres décadas. La SST es un indicador importante de los cambios en el clima y en los ecosistemas.

En un estudio reciente (GONZÁLEZ *et al.*, 2012: 1) utilizando radiómetros de muy alta resolución (AVHRR), basado en la toma de datos de las últimas tres décadas sobre la media de la SST en el atlántico Norte, anomalías de temperaturas, ubicación de isotermas, cambios de intensidad en el tiempo y valores estacionales extremos, obtiene resultados coherentes relacionados con los impactos predichos por las proyecciones de cambio climático. Se aprecian mayores cambios en las latitudes del Norte y cerca de tierra que indican que el calentamiento de las aguas superficiales en el Atlántico Norte es un proceso generalizado, especialmente en las latitudes altas y en las zonas costeras. Los cambios observados en la SST ponen de relieve la necesidad de realizar estudios sobre el cambio climático asociado a un enfoque más local y regional. Se aprecia un contenido calórico mayor derivado presumiblemente de perturbaciones antropogénicas y un mayor transporte del exceso de energía absorbida en las regiones subtropicales hacia latitudes septentrionales. Se superponen además con las fluctuaciones del clima a largo plazo y con las de los patrones de teleconexión como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Se aprecia una influencia de estos patrones de teleconexión de variabilidad de baja frecuencia en el Atlántico Norte, sobre la precipitación primaveral en el área del Mediterráneo Occidental (LUNA *et al.*, 2004), donde la variabilidad de los patrones atmosféricos a gran escala en el Atlántico Norte explica alrededor del 50% de la varianza de la precipitación primaveral en el Mediterráneo occidental. Las anomalías de precipitación en Europa occidental y en el sureste de América del Norte están estrechamente relacionadas con el patrón de las anomalías de la SST en el Atlántico Norte y tropical. El origen de estas anomalías se atribuye también al calentamiento global, asociado a cambios en los ciclos solares cuya amplitud ha aumentado drásticamente al final del segundo milenio sin incluir la posible contribución de las emisiones de GEI cuyo impacto sobre el clima no es resonante según (PINAULT, 2012: 621) que investigó sobre el calentamiento global y la oscilación de las precipitaciones en periodos de 5 y 10 años en Europa occidental, Europa oriental y América del Norte observando mediante el análisis conjunto de ondas de Rossby y anomalías de la TSM una reducción en las

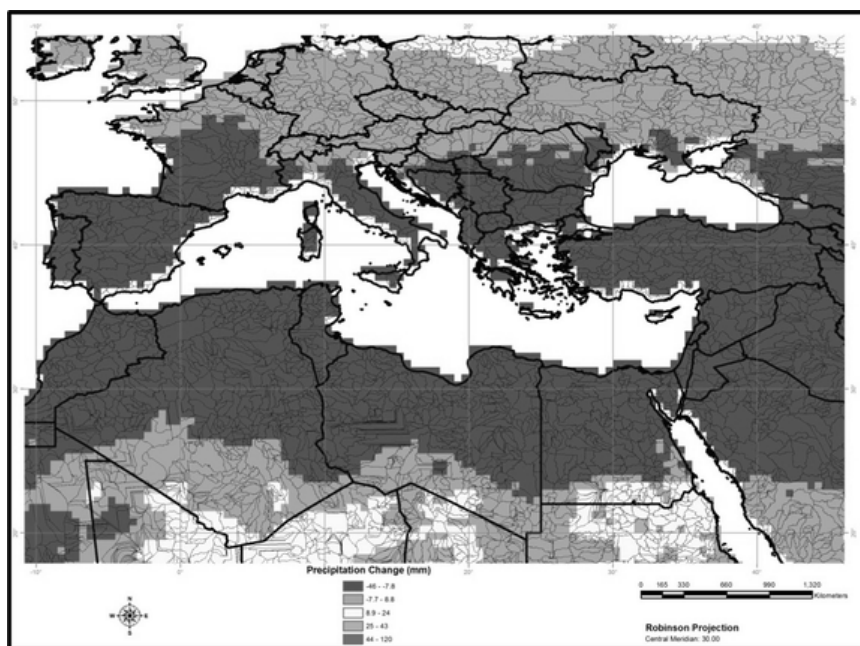
precipitaciones en el área estudiada, donde se ponen de relieve algunos mecanismos clave involucrados en la variabilidad de la precipitación interanual que involucran a unas ondas (QSWs) o Quasi-stationary Waves, en los océanos tropicales generadas como resultado de una combinación de fuerzas gravitacionales producidas por la topografía de la superficie del mar, un estrés observado en los alisios (ENSO events), la dimensión de la cuenca y la longitud de onda de las ondas planetarias. Se producen una serie de resonancias que ocurren en latitudes críticas de 40° norte y 40° sur.

#### **IV. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

Aunque hemos aludido anteriormente a un gran número de impactos, vamos a centrarnos ahora en algunos estudios realizados recientemente que nos indican que a pesar de que la comunidad científica pueda disentir en la valoración de la magnitud del cambio, lo que no se debe discutir es que se están presentando una serie de alteraciones imprevistas cuyas consecuencias están aún por valorar, pero que son potencialmente críticas. Se hace difícil por ejemplo realizar un seguimiento de los efectos del cambio climático asociados con la ecología. Supone un reto a la hora de valorar convenientemente la gestión sostenible de los recursos marinos, como por ejemplo el caso de la pesca de atún (NICOL et al, 2013: 131), ya que esta información es de vital importancia para asegurar la sostenibilidad futura del sector pesquero. La pesca no regulada y las alteraciones en las condiciones climáticas afectan a las poblaciones de atunes e incluso a otras especies que no son objetivo de pesca, especies dependientes e incluso también al ecosistema en general. Se hace necesaria una mejor comprensión de los ecosistemas oceánicos y obtener mejores datos para la parametrización de los modelos que pronostican los impactos del cambio climático. Una solución es el empleo de los programas de observadores que aún están iniciándose, con lo que existen limitaciones temporales y espaciales. Las recientes decisiones de política internacional y nacional han permitido ampliar su cobertura y realizar una serie de acciones para mejorar el control, consiguiendo colaboraciones que aseguren la utilización de los datos de la mejor calidad, garantizando que se cumplen los objetivos del ecosistema monitoreado. Se utilizan plantillas para la vigilancia y modelos de ecosistemas donde se identifican indicadores adecuados a su estado y a los posibles cambios a los que pudieran estar expuestos. La información obtenida debe mejorar la capacidad de desarrollar políticas de gestión de los ecosistemas, en el caso del atún, políticas de gestión pesquera adecuadas. Es necesario obtener series temporales de datos físicos y biológicos a distintas escalas con el fin de utilizarlos en los modelos de ecosistemas existentes y reestructurar la información para los nuevos modelos biofísicos,

además de complementar los actuales sistemas de observación de los ecosistemas.

**Figura 6.** Previsión de cambios en las precipitaciones en las cuencas mediterráneas de la actualidad a 2100.



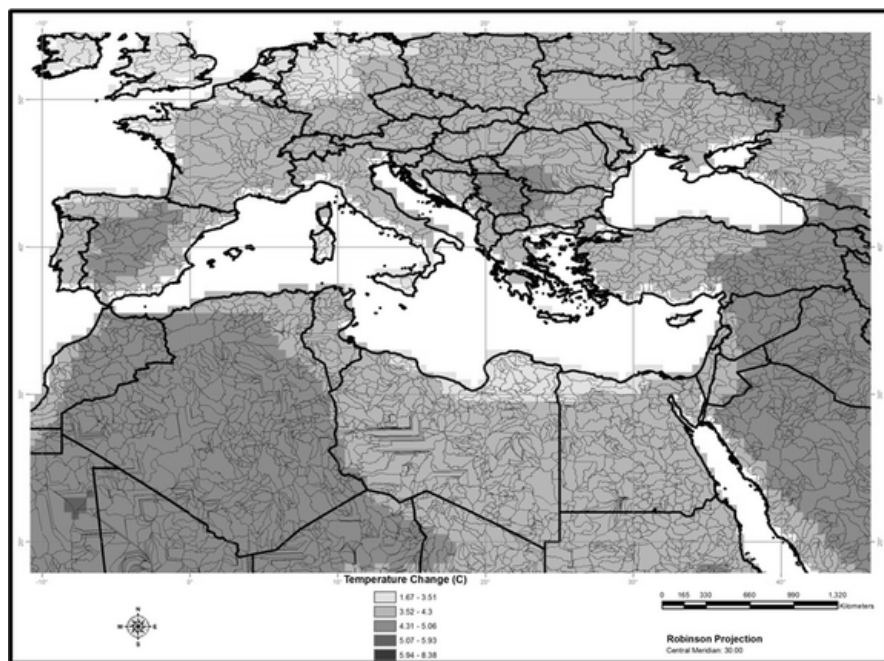
FUENTE: EROL y RANDHIR, 2012, 325.

Encontramos impactos importantes en los ecosistemas de las cuencas mediterráneas que requieren una acción rápida para mejorar la gestión de los mismos. El aumento de la escasez de agua y un abusivo uso de la tierra puede alterar el balance hídrico y ecológico además de la salud de los hábitats de las cuencas. A los propios efectos del cambio climático pueden sumarse la intensificación del uso del suelo, un aumento de la extracción de agua y una disminución de la calidad del agua por los cambios en los regímenes de temperatura y precipitación. También pueden alterar la escorrentía, la evapotranspiración, el almacenamiento superficial y otros factores que afectan directamente a la biota y el hábitat de la región (EROL y RANDHIR, 2012: 319).

Es necesario aumentar la capacidad de recuperación de las cuencas hidrográficas en base a las condiciones climáticas y cambios en el uso de la tierra. Sería conveniente obtener una resolución mejorada de las predicciones climáticas a escala local. El impacto del cambio climático en los procesos de las cuencas hidrológicas mediterráneas podría ser significativo. Se espera

que por el cambio climático disminuyan las lluvias de verano, aumente el número de días secos y las olas de calor, además de ampliarse los períodos de sequía en la región. Esto amplificaría las diferencias regionales entre los recursos y bienes naturales de Europa. Entre los impactos negativos, habría un mayor riesgo de crecida repentina en regiones interiores, una mayor frecuencia de inundaciones costeras, y una mayor erosión debida a una mayor profusión de tempestades y a un aumento de nivel del mar (IPCC, 2007). La temperatura y los cambios en las precipitaciones pueden causar importantes cambios en el régimen hidrológico. Las características biofísicas y el uso humano de los sistemas hidrográficos de la región lo hacen altamente vulnerable al cambio climático. En la FIGURA 6 podemos apreciar una previsión de los cambios en las precipitaciones en las cuencas mediterráneas desde la actualidad hasta el 2100. Observamos para España una disminución de entre -4,6% y -7,8% y se espera que en el futuro sea mayor. En la FIGURA 7 observamos que la previsión en el mismo período para una gran parte de la cuenca mediterránea una variación en la temperatura entre 3,52°C y 4,30°C. Es España en la zona de costa, muestra variaciones entre 1,67°C y 3,51°C, menores que en el interior (EROL y RANDHIR, 2012: 323).

**Figura 7.** Previsión de cambios en las temperaturas en las cuencas mediterráneas de la actualidad a 2100.



FUENTE: EROL y RANDHIR, 2012, 323.

Pueden producirse abusos en la explotación de los recursos hídricos que acrecienten los impactos del cambio (ROBERTS y REED, 2009: 255). Las cuencas del Norte Mediterráneo son menos vulnerables al cambio climático que las del sur (GIANNAKOPOULOS et al, 2009). Los lagos corren peligro a causa de una disminución en la entrada de agua producida por un aumento en la evapotranspiración, un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación. También habrá efectos sobre la cobertura del suelo y el contenido de humedad del mismo (COSTA y FOLEY, 2000: 35).

Se piensa que podría acelerarse la salinización de las lagunas costeras y tener efectos sobre la nieve. Además se producirían variaciones en acuíferos poco profundos y en la calidad del agua en sistemas de lagos tropicales y subtropicales. Hay controversia en la valoración de los cambios previstos en el nivel medio del mar en el siglo XXI. (CAZENAVE y LLOVEL, 2010: 145) Hay estudios, por ejemplo, que indican que aunque se reducirán aproximadamente un 30% las tormentas y que esta reducción compensaría el pronosticado aumento del nivel medio del mar, en el caso de Venecia (TROCCOLI et al, 2012: 1081), (TROCCOLI et al, 2011: 1065) se podrían generar aún así impactos causados por un aumento de las inundaciones. La elevación del nivel del mar, junto con cambios en otros factores climáticos, puede afectar también a una serie de humedales de agua dulce situados en regiones bajas. Por ejemplo, en el caso de regiones tropicales, las llanuras inundables y los pantanos asociados con ellas se podrían ver desplazados por hábitats de agua salada debido a los efectos combinados de la elevación del nivel del mar, unas lluvias monzónicas más intensas, mayores mareas y un mayor número de tormentas fuertes repentinas. La intrusión de agua salada en acuíferos de agua dulce también representa un gran problema potencial (BEDOYA, 2009: 4)

La distribución mundial de la biodiversidad se encuentra correlacionada con las pautas mundiales de temperaturas y precipitaciones, entre otros factores. La pérdida de biodiversidad en amplios y diferentes ecosistemas no implica necesariamente una pérdida de productividad. El cambio climático va a tener un impacto sobre las características físicas, biológicas y biogeoquímicas de los océanos y de las costas en diferentes escalas de espacio y tiempo, modificando sus estructuras y funciones ecológicas. Esto, a su vez, podría generar respuestas en el sistema climático. Se producirá previsiblemente una reducción de los días adecuados para el crecimiento de las plantas, una erosión del suelo más acusada y de este modo un grave impacto sobre la biodiversidad de la región.

En definitiva, los impactos van a ser mayores en latitudes más bajas, donde se encuentran casualmente la mayoría de los países en vías de desarrollo. España también es un área clave para la evaluación de los efectos del cambio

climático en la biodiversidad, ya que presenta un ecotono de matorrales entre el bioma mediterráneo y el subtropical. En bosques de ciertas especies de coníferas constituye un caso relevante por ejemplo, la “sabina de Cartagena” o “alerce africano” (ESTEVE-SELMA et al, 2011: 663). Estos bosques de *Tetraclinis articulata* (sabina de Cartagena), una especie de árbol iberoafricano, constituyen un caso interesante para evaluar los efectos previstos del cambio climático en la biodiversidad. Las pérdidas de biodiversidad podrían ser especialmente graves en el sur de Europa. Algunas teorías y estudios experimentales sugieren que existe un grado de redundancia en la mayoría de los ecosistemas y que la contribución a la producción por parte de especies perdidas en un ecosistema se va a ver sustituida por la de otras especies (a veces especies invasoras). Entre un 20 y un 30% aproximadamente de las especies vegetales y animales estudiadas hasta la fecha estarán probablemente expuestas a un mayor riesgo de extinción si los aumentos del promedio mundial de temperatura exceden de entre 1,5 y 2,5°C (IPCC, 2007). Los cambios en la distribución de la vegetación constituirán una respuesta a las nuevas condiciones climáticas como se observa en períodos significativos anteriores de cambio climático. Esto puede comprobarse a partir de trabajos realizados sobre el análisis de polen que indica movimientos altitudinales y latitudinales de distribución de las especies a lo largo de siglos e incluso décadas. El aumento previsto en la temperatura y la disminución de las precipitaciones en España podría ser favorable para las especies termófilas y negativo para especies templado-frías, aunque hay muchos factores que pueden afectar a la respuesta de cada especie, como su capacidad de dispersión, los posibles hábitats futuros y la conectividad del hábitat (ESTEVE-SELMA et al, 2011: 664). Los efectos negativos de la sequía sobre el crecimiento y el vigor de las especies de árboles y su relación con la pérdida de bosques no han sido adecuadamente evaluados. No se han tenido en cuenta las diferentes respuestas al estrés de los árboles según de qué especies se trate. Se pueden sopesar estas respuestas distintas mediante la cuantificación de los cambios en el crecimiento radial de las plantaciones de pino en el sureste de España de cuatro especies principalmente (*Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*) que muestran una clara disminución de los niveles de defoliación. Se utilizan para el estudio registros de defoliación, modelos lineales mixtos de incremento del área basal y técnicas de análisis especiales que permiten cuantificar las respuestas de los árboles según la especie de que se trate y las escalas individuales, situación y condiciones de sequía existentes en cada caso. La reducción del incremento en el área basal y los eventos de defoliación significativa ocurren después de sequías intensas y consecutivas. Una disminución en la disponibilidad de agua en primavera, durante el período de mayor actividad cambial y el consiguiente crecimiento de la madera es el principal factor desencadenante de la decadencia de los bosques de



pino en el sureste de España que se caracterizará por una reducción del crecimiento rápido y una defoliación generalizada. Esto afectará previsiblemente a algunas especies de forma más persistente, lo cual se intuye que sea consecuencia de las previsiones de clima más cálido y condiciones ambientales de mayor sequedad.

**Figura 8.** Impacto del cambio climático en el turismo de las provincias de costa en España. El aumento de las temperaturas afectará negativamente a las provincias situadas en la costa sur y sureste de España (Huelva, Cádiz, Málaga, Granada, Almería, Murcia, Alicante, Valencia, Castellón) en términos de probabilidades de elección de destino turístico. Las provincias costeras del norte (Pontevedra, La Coruña, Lugo, Asturias, Cantabria, Vizcaya, Guipúzcoa) se beneficiarán de este aumento.



FUENTE: BUJOSA Y ROSELLÓ, 2012, 368

Un impacto esperado es que las playas que actualmente se erosionan sufran aún más erosión a medida que cambie el clima y se eleve el nivel del mar. Un aumento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> y por lo tanto del CO<sub>2</sub> oceánico, va a afectar incluso a la capacidad de las plantas de corales y otros animales para hacer esqueletos calizos. Otra serie de impactos que em-

piezan a tenerse en cuenta son los que pueden incidir directamente en las propias actividades humanas, desde un punto de vista económico, de salud... etc. Por ejemplo, se espera que pueda afectar incluso a la elección del destino vacacional, lo cual deriva en impactos asociados que en un contexto económico podrían afectar al turismo en España. Los destinos se caracterizan en términos de gastos de viaje y factores atrayentes para el turista tales como la temperatura, el sol y la playa, relacionados a su vez entre sí. Se ha llevado a cabo un estudio donde se utiliza un modelo para investigar el impacto del cambio climático en dos escenarios basados en la asignación de turismo interno dentro de España. Los resultados muestran que, si bien provincias del norte de España, más frías, se beneficiarían de un aumento de las temperaturas, en las provincias de la costa sur se experimentaría una disminución en la frecuencia de los viajes (BUJOSA y ROSELLÓ, 2012: 363). Muchos destinos turísticos piden iniciativas, tales como la implementación de medidas de mitigación y políticas de adaptación, para hacer frente a las repercusiones económicas negativas del inminente cambio climático (BECKEN, 2005: 381). Es necesario prestar menos atención a los estudios cualitativos que aparecieron en los años noventa ya que el sector turístico tiene una gran necesidad de datos cuantitativos y estudios que podrían proporcionar nueva información sobre cómo el cambio climático modificará la demanda del turismo. Para llenar este vacío, se han desarrollado enfoques diferentes durante los últimos años que permitirán analizar los efectos globales del cambio climático en los movimientos del turismo internacionales. Existen grandes incertidumbres que aún no se han resuelto. Los resultados de (BUJOSA, 2012:363) muestran que la temperatura juega un papel central en la explicación del patrón observado en base a viajes interprovinciales. La temperatura se ha identificado como un factor positivo en la determinación de la probabilidad de visitar un destino costero específico. Destaca la existencia de un umbral en el que el aumento de las temperaturas conduce a una reducción en la probabilidad de que un determinado destino ser elegido y afectará negativamente a las provincias situadas en la costa sur de España en términos de probabilidades de elección mientras que provincias costeras del norte se beneficiarán de este aumento. Mientras tanto, en general, el impacto del aumento de las temperaturas en estas provincias del este de España es más baja, con una mayor variabilidad. Los resultados de este estudio van en la misma línea que los señalados por (MORENO y AMELUNG, 2009: 550) que aprecian un incremento del turismo de playa para las provincias del norte de España y una disminución de las del sur. Sin embargo, mientras que (MORENO y AMELUNG, 2009: 551) atribuye la pérdida de atractivo de las provincias del sur a condiciones de calor extremo, los resultados obtenidos también muestran que en presencia de las temperaturas más cálidas, los españoles tendrán en cuenta la costa norte a la hora de realizar la planificación

para sus viajes de verano, además de las tradicionales del sur. Dado el aumento de su atractivo como lugares de vacaciones de verano, las provincias españolas del norte deberían aprender de la experiencia de los del sur en la gestión del desarrollo turístico. Hemos comprobado en este último ejemplo que los efectos e impactos del cambio climático son en gran parte impredecibles y además van generando otros distintos asociados a otros ámbitos que no son solamente físicos o ambientales, si no que pueden ser sociales e incluso económicos.

## V. CONCLUSIONES

Los impactos debidos al cambio climático existen y su incremento va siendo aceptado cada vez más como posible y cercano en el tiempo. Los MCGs constituyen actualmente la herramienta más confiable para simular los procesos que determinarán el cambio climático futuro en escalas globales y regionales. Sin embargo, las predicciones de los MCGs están sujetas a considerables incertidumbres. Los modelos van perfeccionándose e intercomparándose sus resultados gracias al CMIP5 y a la utilización de RCPs. Se dispone además de un número mayor de observaciones que indican con más precisión la evolución en esta última década del cambio climático lo cual permite elaborar proyecciones cada vez más acertadas. Nuevos estudios e investigaciones, además de los informes AR4 y AR5, aportan nuevos datos y reflejan variaciones en diversos factores relacionados con el cambio climático que no se habían tenido en cuenta anteriormente. La comunidad científica ha comprobado que los impactos del cambio climático son en parte impredecibles ya que además desencadenan otros secundarios asociados a otros ámbitos distintos tan dispares como por ejemplo, el turismo.

## AGRADECIMIENTOS

A Luís Balairón Ruiz (Director del Programa “Análisis y Atribución del Cambio Climático” de AEMET – Agencia Estatal de Meteorología-) y Carlos Santos Burguete (Grupo de Predictabilidad, Area de Modelización de AEMET) por su inestimable ayuda en la realización de este artículo.

## BIBLIOGRAFÍA

- BECKEN, S. (2005): «Harmonising climate change adaptation and mitigation: the case of tourist resorts in Fiji». *Global Environmental Change*, Editorial Elsevier, vol 15, 381–393.
- BEDOYA, J. M. (2009): «Propuesta metodológica para el manejo de acuíferos costeros. El problema de la intrusión salina». Universidad Nacional de Colombia, 1-129. En línea: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2304/1/71316950.2009.pdf>, consultado el 7/06/2013

- BOCCOLARI, M.; MALMUSI, S. (2012): «Changes in temperature and precipitation extremes observed in Modena, Italy» *Atmospheric Research* (2013), vol. 122, 16-31.
- BUJOSA, A.; ROSSELLÓ, J. (2012): «Climate change and summer mass tourism: the case of Spanish domestic tourism». *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 117, 363-375. En línea: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10584-012-0554-x>, consultado el 10/09/2013.
- BUSTAMANTE, M. (2012): «Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil». *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 115, 559-577
- CALLADO, A.; ESCRIBÀ, P.; GARCÍA-MOYA, J.A.; MONTERO, J.; SANTOS, C.; SANTOS-MUÑOZ, D.; SIMARRO, J. (2013): «Ensemble Forecasting, Climate Change and Regional/Local Responses», pp 1-57. En línea: <http://www.intechopen.com/books/climate-change-and-regional-local-responses/ensemble-forecasting>, consultado el 7/06/2013.
- CASAS, M.; SIERRA, P. (2012): «Trend analysis of wave direction and associated impacts on the Catalan coast» *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 115, 667–691.
- CAZENAVE, A.; LLOVEL W. (2010): «Contemporary sea level rise», *Annual Review of Marine Science* 2(1), 145–173.
- CEBALLOS, A. (2010): «Evolución de las temperaturas y precipitaciones en las capitales de Castilla y León en el período 1961-2006» *Polígonos. Revista de Geografía* 2007, nº 17, 59-81
- COSTA, M.H.; FOLEY, J.A., (2000): «Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on the climate of Amazonia», *Journal of Climate*, vol. 13, 35–58
- DENTENER, F.J. (2006): «Global Maps of Atmospheric Nitrogen Deposition, 1860, 1993 and 2050» *Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC)*, 1-7. En línea: [ftp://daac.ornl.gov/data/global\\_climate/global\\_N\\_deposition\\_maps/comp/global\\_N\\_deposition\\_maps\\_readme.pdf](ftp://daac.ornl.gov/data/global_climate/global_N_deposition_maps/comp/global_N_deposition_maps_readme.pdf), consultado el 27/06/2013
- ESCALANTE-RAMÍREZ, B. (2012): «Remote sensing advanced techniques and platforms» En línea: <http://www.intechopen.com/books/remote-sensing-advanced-techniques-and-platforms>, consultado el 7/06/2013
- EROL, A.; RANDHIR, T. (2012): «Climatic change impacts on the ecohydrology of Mediterranean watersheds». *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 114: 319–341
- ESTEVE-SELMA, M. A.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; HERNÁNDEZ-GARCÍA, I.; MONTÁVEZ, J.P.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.J.; CALVO, J. F. (2011): «Potential effects of climatic change on the distribution of *Tetraclinis articulata*, an endemic tree from arid Mediterranean ecosystems». *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 113, 663–678
- EUROPEAN EUROSION PROJECT (2002–2004).
- GARCÍA-LEGAZ, C.; VALERO, F. (2003): *Riesgos climáticos e impacto ambiental*. Ed. Complutense.
- GIANNAKOPOULOS, C.; LE SAGERA, P.; BINDIC, M.; MORIONDOD, M.; KOSTOPOULOU, E.; GOODESSE, C.M. (2009): «Climatic changes and associated

- impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming». *Global and Planetary Change*, Vol. 68-3, 209-224.
- GONZÁLEZ, N.; RODRÍGUEZ, C.; RODRÍGUEZ, B. (2012) «Ensayos de simulación del índice NAO de invierno con datos de cimp5». Dpto. de Física General y de la Atmósfera. Universidad de Salamanca, Dpto. de Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid, pp 1-10. En línea: <http://fundacion.usal.es/colnaec/pendrive/ficheros/ponencias/ponencias1/10-Modelos.pdf>, consultado el 7/06/2013.
- GUIJARRO, J.A. (2008) «Homogeneización de series termoplumiométricas de Baleares y su influencia en la evaluación de las tendencias». *Cambio climático regional y sus impactos*, Asociación Española de Climatología, A-6, 151-160. En línea: <http://webs.ono.com/jaguijarro2/homstpbal.pdf>, consultado el 7/06/2013
- GULIZIA, C.; CAMILLONI, I. (2012) «Análisis comparativo de la habilidad de un conjunto de modelos climáticos globales correspondientes a los proyectos de intercomparación cimp3 y cimp5 para representar la precipitación en Sudamérica» 1-19, En línea: <http://www.congremet.prmarg.org/upload/guliziacara.pdf>, consultado el 7/06/2013
- IPCC (2007): «Cambio climático 2007: Informe de síntesis». *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, 1-114. En línea: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf), consultado el 7/06/2013
- IPCC (1997b) HOUGHTON JT, MEIRA GRIGGS D. MASKELL K. «Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC» 1-57. En línea: [www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf), consultado el 7/06/2013
- IPCC (2002) GITAY H, SUAREZ A, WATSON RT, DOKKEN JD. «Cambio Climático Y Biodiversidad» Ed. *IPCC technical paper V, Working Group II technical support unit*, 1-85. En línea: <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>, consultado el 7/06/2013
- LEDESMA, M. (2011): *Principios de meteorología y climatología*. Editorial Paraninfo, 1ª ed.
- LEVASSEUR, A.; LESAGE, P.; MARGNI, M.; BRANDÃO, M.; SAMSON R. (2012): «Assessing temporary carbon sequestration and storage projects through land use, land-use change and forestry: comparison of dynamic life cycle assessment with ton-year approaches» *Climatic Change*, 115, 759–776
- LORENTZ, E.N. (2005). «A look at some details of the growth of initial uncertainties». *Tellus*, 57a, 1-11, En línea: <http://www.tellusa.net/index.php/tellusa/article/view/14608>, consultado el 7/06/2013.
- LUNA, Y.; MORATA, A.; MARTIN, M.; VALERO, F. (2004): «Influencia de los patrones de teleconexión del Atlántico Norte en la precipitación primaveral del Mediterráneo occidental» *Física de la Tierra*, vol 16. Universidad Complutense de Madrid. En línea: <http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/FITE0404110137A>, consultado el 7/06/2013.
- LUNA, Y.; GUIJARRO, J.A.; LÓPEZ DÍAZ, J.A. (2012): «Reconstrucción, homogeneidad y tendencias de las series históricas de precipitación mensual acumulada en

- la España peninsular y las Islas Baleares» Ponencia en 8º Congreso Internacional, *Cambio Climático. Extremos e Impactos* (Salamanca, del 25 al 28 de septiembre de 2012). Asociación Española de Climatología, 499-507. En línea: <http://fundacion.usal.es/conaec/pendrive/ficheros/ponencias/ponencias2/26-Extremos.pdf>, consultado el 7/06/2013
- MEINSHAUSEN, M.; SMITH, S. J.; CALVIN, K.; DANIEL, J. S.; KAINUMA, M. L.; LAMARQUE, J. F.; MATSUMOTO, K.; MONTZKA, S. A.; RAPER, S. C. B.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; VELDEERS, G. J. M.; VAN VUUREN, D.P. (2011): «The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300», *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 109, 213-241.
- MORENO, A.; AMELUNG, B. (2009): «Climate change and tourism comfort on Europe's beaches in summer: a reassessment». *Coastal Management*, Editorial Taylor & Francis, vol. 37, 550-568.
- NICOL, S.; ALLAIN, V.; GRAHAM, M.; PILLING, J.; POLOVINA, J.; COLL, M.; BELL, J.; DALZELL, P.; SHARPLES, P.; OLSON, R.; GRIFFITHS, S.; DAMBACHER, J.; YOUNG, J.; LEWIS, A.; HAMPTON, J.; JURADO, J.; HOYLE, S.; BRIAND, K.; BAX, N.; LEHODEY, P.; WILLIAMS, P. (2013): «An ocean observation system for monitoring the affects of climate change on the ecology and sustainability of pelagic fisheries in the Pacific Ocean», *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 119, 131-145.
- PINAULT, J. (2012): «Global warming and rainfall oscillation in the 5-10 yr band in Western Europe and Eastern North America», *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 114, 621-650.
- ROBERTS, N.; REED, J.M. (2009): «Lakes, wetlands, and Holocene environmental change», *The physical geography of the Mediterranean*. Editorial Oxford University Press, 255-286.
- RUIZ, R.; MORENO, G.; JUAREZ, E.; MONTERO, G.; ROIG, S. (2013): «The contribution of two common shrub species to aboveground and belowground carbon stock in Iberian dehesas» *Journal of Arid Environments*, Editorial Elsevier, vol. 91, 22-30
- TAYLOR, K.E.; STOUFFER, R.J.; MEEHL, G.A. (2009): «A summary of the CMIP5 Experimental Design», CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project), 1-33. En línea: [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor\\_CMIP5\\_design.pdf](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf), consultado el 7/06/2013
- TAYLOR, K.E.; STOUFFER R.J.; MEEHL GA.; (2011): «An Overview of CMIP5 and the Experiment Design» *American Meteorological Society*, vol. 93, 485-498. En línea: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>, consultado el 7/06/2013
- TROCCOLI, A.; JORDÀ, G.; GOMIS, D.; MARCOS, M. (2012): «Comment on “Storm surge frequency reduction in Venice under climate change”», *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 113, 1081-1087
- TROCCOLI, A.; ZAMBON, F.; HODGES, KI.; MARANI, M. (2011): «Storm surge frequency reduction in Venice under climate change», *Climatic Change*, Editorial Springer, vol. 113, 1065-1079