

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL CAMBIO CLIMÁTICO: BASES CIENTÍFICAS, INCERTIDUMBRES Y PROYECCIONES PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA

Numerical Modeling of Climate Change: Scientific basis, Uncertainties and Projections for the Iberian Peninsula

José Manuel Gutiérrez¹ y María Rosa Pons²

¹ Dpto. de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación. Universidad de Cantabria, 39005 Santander.

² Instituto Nacional de Meteorología (INM), CMT/CAS, 39012 Santander.

E-mail: manuel.gutierrez@unican.es Fax: 942-201703

Resumen: En este artículo se hace un repaso del esfuerzo investigador llevado a cabo en las dos últimas décadas en el ámbito de la modelización numérica del cambio climático. En primer lugar, se describen brevemente las características de los modelos globales de circulación que reproducen la dinámica del clima, y que permiten simular su evolución futura en función de los forzamientos inducidos por actividades humanas (cambio en la composición de la atmósfera por emisión de CO₂, etc.). Dichos forzamientos son conocidos como escenarios futuros de emisión y representan la fuente principal de incertidumbre para la modelización del cambio climático; por ello, se suele considerar un conjunto de escenarios que tratan de cubrir el espectro de las posibles situaciones futuras, más o menos optimistas, para realizar cualquier estudio de cambio climático. También se analiza la influencia de otras fuentes de incertidumbre, como los propios errores de los modelos (por ejemplo, la parametrización de procesos físicos no resueltos en la dinámica). Esta incertidumbre hace necesario abordar el problema del cambio climático desde un punto de vista probabilístico, utilizando nuevas técnicas basadas en la predicción por conjuntos para cuantificar la incertidumbre. Esta característica, unida al enorme coste computacional necesario para resolver numéricamente estos modelos, hace que la resolución espacial de los mismos sea aún bastante grosera (cientos de kilómetros). Por ello, en los últimos años se han desarrollado distintas estrategias para la proyección regional del cambio climático, que proporcionen mayor detalle en zonas para realizar estudios de impacto.

Palabras clave: Cambio climático, escenarios de emisión, incertidumbres, resolución, proyección regional, Península Ibérica.

Abstract: We briefly describe the research work done in the last two decades regarding numerical modelling of climate. First, we describe the characteristics of global circulation models, which allow simulating the future evolution of climate according to different forcing scenarios related to human activities. These emission scenarios are the main source of uncertainty to model climate change; thus, a set of likely scenarios is usually considered in climate change studies. We also describe the effect of different sources of uncertainty in the final results; for instance, model errors due to approximate parametrizations, etc. These uncertainties put hard constraint to this problem and force to analyze it within the framework of probability, using new "ensemble prediction techniques" to quantify the existing uncertainty, and require huge computational resources. Therefore, the spatial resolution of climate simulation is constrained to 200-500 km, providing only global average information. However, in the recent years, an increasing research activity is focussing on the generation of regional climate change scenarios, applying different techniques to project global into local information.

Keywords: Climate change, emission scenarios, uncertainties, resolution, regional projection, Iberian Peninsula.

1. Introducción

En la actualidad el cambio climático global es una de las mayores preocupaciones de la humanidad dadas las enormes repercusiones que tiene para la sostenibilidad futura de su desarrollo. En las últimas décadas se ha llevado a cabo un enorme esfuerzo tecnológico e investigador para tratar de explicar las posibles causas de este fenómeno y tratar de predecir su tendencia futura. Este conocimiento ayudará a tomar medidas preventivas de mitigación y de adaptación a través de la adecuada planificación de las actividades futuras que se pudiesen ver afectadas por el cambio.

Este cambio climático comenzó a constatarse hace unas décadas a partir de distintas observaciones que indicaron no sólo un calentamiento global del planeta durante el último siglo, sino también un incremento de condiciones extremas que se traducen en sequías, olas de calor, inundaciones, etc. (ver Stott *et al.* 2004), con la

consiguiente incidencia en la salud humana (Patz *et al.* 2005). Recientemente se han encontrado también indicios de que este cambio está influyendo en la dinámica del propio sistema climático, con la deceleración de ciertas corrientes oceánicas (Bryden *et al.* 2005), etc. A partir de estos hechos, la comunidad científica ha realizado un gran esfuerzo para desarrollar modelos que permitan simular el sistema climático y que sean capaces de reproducir el cambio observado para, finalmente, determinar los factores que contribuyen al mismo. Para ello, se han desarrollado modelos físico-matemáticos del clima que simulan la dinámica de sus componentes, principalmente la atmósfera y el océano, en función de los distintos forzamientos del sistema. Estos modelos han puesto de manifiesto el origen antropogénico del cambio debido, principalmente, al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (ver, por ejemplo, Bertrand *et al.* 2002), y también han permitido obtener las primeras estimaciones de la tendencia futura de estos cambios.

Estos modelos son la única herramienta de la que se dispone en la actualidad para tratar de estimar el cambio climático a nivel cuantitativo en el futuro. No obstante, la resolución espacial de dichos modelos es todavía bastante limitada (entre 250 y 500 km) y sólo permiten obtener resultados sobre tendencias promedio de las variables climáticas en regiones muy extensas de la Tierra. Por tanto, estos modelos no permiten obtener predicciones con un detalle geográfico adecuado para tener en cuenta la incidencia de estos cambios en los distintos climas locales y para poder llevar a cabo estudios de impacto. Por ello, en los últimos años, distintos grupos han comenzado a aplicar técnicas dinámicas y estadísticas, denominadas técnicas de *downscaling*, que permiten aumentar la resolución de estos resultados. Aunque la aplicación de estas técnicas al clima está todavía en desarrollo, constituyen una de las líneas futuras de investigación en este campo.

En este artículo hacemos un breve repaso de estas técnicas, prestando especial atención a los resultados y aspectos relevantes para la península Ibérica. En la Sec. 2 se presentan ciertas evidencias del cambio climático, a través de cambios significativos observados en distintos índices y variables climáticas durante los últimos años. En la Sec. 3 se describe brevemente el problema de la modelización numérica del clima y en la Sec. 4 se analizan los distintos escenarios socio-económicos de emisión que se utilizan para forzar los modelos en el futuro. La Sec. 5 analiza las distintas fuentes de incertidumbre implicadas en el proceso y su tratamiento probabilístico a través de la predicción por conjuntos. La Sec. 6 muestra los resultados globales obtenidos hasta la fecha utilizando este esquema de predicción, haciendo también especial mención a los resultados que pueden deducirse para la península Ibérica. Finalmente, la Sec. 7 describe el problema de la proyección regional de los escenarios globales de cambio climático.

2. Evidencias del Cambio Climático

Con objeto de asesorar sobre todos los aspectos del cambio climático, y en particular sobre cómo las actividades humanas pueden inducir dichos cambios y sufrir su impacto, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) fundaron en 1988 el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC en sus siglas inglesas, <http://www.ipcc.ch/>). El IPCC es el principal organismo internacional que se encarga de coordinar todos los estudios sobre el cambio climático, y está organizado en tres grupos de trabajo: el Grupo I trabaja sobre los aspectos científicos, el II sobre los impactos y adaptaciones al cambio climático y el III sobre las posibles opciones para mitigar este cambio.

Hasta la fecha el IPCC ha publicado tres informes generales, en 1990, 1996 y 2001 y tiene previsto emitir un nuevo informe en 2007. Estos informes constituyen recopilaciones actualizadas del conocimiento sobre el

sistema climático y su variabilidad, basados en los trabajos y publicaciones de la comunidad científica internacional. Por tanto, son una fuente de información indispensable para la toma de decisiones políticas sobre el tema, a cargo de las instituciones competentes. El tercer informe del Grupo I (Houghton y otros 2001) describe los cambios observados en el sistema climático a lo largo del siglo XX, que se pueden resumir en:

- Un aumento de la temperatura global media de la superficie de 0.6 ± 0.2 °C desde finales del siglo XIX. La década de los años 90 ha sido la más cálida desde que se poseen registros instrumentales y, probablemente, de todo el último milenio, al menos en el hemisferio norte. En general, la amplitud de la oscilación diurna de temperatura sobre tierra está disminuyendo; por término medio, las temperaturas mínimas están aumentando a un ritmo dos veces más rápido que las máximas (0.2 frente a 0.1 °C por década).
- Un aumento de las precipitaciones en latitudes medias y altas del hemisferio norte de un 0.5 a un 1% por década, excepto en Asia oriental.
- Una disminución de las áreas cubiertas de nieve de un 10% en el hemisferio norte desde finales de los años 60. Los glaciares de las zonas continentales también han retrocedido, excepto en unos pocos lugares.
- Un aumento, todavía ligero (1 a 2 cm por década), del nivel del mar. El contenido calorífico de los océanos ha aumentado desde finales de los años 50 (desde cuando existen mediciones sub-superficiales adecuadas).
- El fenómeno de El Niño ha cambiado desde mediados de los años 70, con fases cálidas más frecuentes, persistentes e intensas que las fases frías.
- Un aumento en la frecuencia de episodios de precipitaciones abundantes (entre un 2 y un 4% más), generalmente en zonas en las que los promedios han aumentado, pero también en otras en las que han disminuido o no han variado apreciablemente.
- A nivel global, la superficie de las zonas que experimentan sequías fuertes ha aumentado relativamente poco, aunque en algunas áreas de Asia y África se ha observado una mayor frecuencia e intensidad de las sequías en las últimas décadas.
- Otros fenómenos de tiempo adverso, como tormentas tropicales, ciclones extratropicales, tormentas, granizo, tornados, etc., resultan difíciles de estudiar por su escasa frecuencia y elevada variabilidad espacial. Algunos trabajos apuntan a una mayor frecuencia en el Pacífico septentrional y zonas de Norteamérica y Europa en las últimas décadas.

El tercer informe del IPCC también describe los cambios ocurridos en los factores causantes del cambio climático, factores que pueden ser naturales (como

cambios en la radiación solar recibida por la Tierra) o provocados por la actividad humana (principalmente, el aumento de la concentración de los Gases de Efecto Invernadero, GEI, llamados así porque contribuyen al calentamiento global de la Tierra). Las variaciones en la energía disponible para el sistema climático global debidas a cambios en estos factores se denominan forzamientos radiativos del sistema climático, y se cuantifican en W/m^2 . Los cambios principales observados son:

- Desde 1750, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera ha aumentado un 31%, la de metano (CH_4) un 150% y la del óxido nitroso (NO_2) un 16%. Las concentraciones actuales de los dos primeros nunca habían sido superadas en los últimos 420000 años y la concentración actual del óxido nitroso es la más elevada del último milenio.
- La disminución del ozono presente en la estratosfera (entre los 12 y los 50 km de altitud aproximadamente) ha causado un enfriamiento de la troposfera (entre superficie y 12 km de altitud), que contrarresta parte del efecto invernadero de los demás gases. En cambio, el aumento del ozono troposférico en un 36% desde la época preindustrial ha producido un incremento del efecto invernadero. El ozono no se emite directamente, sino que se forma por reacciones fotoquímicas.
- Aumento en la concentración de aerosoles, que parecen producir una disminución de la temperatura troposférica, contrarrestando en parte el calentamiento producido por los GEI.
- Otros factores a considerar son las variaciones en el albedo de la Tierra (fracción de la energía solar que es reflejada de nuevo hacia el espacio), la irradiancia solar y la actividad volcánica. Así, los cambios en el uso del suelo (deforestación, etc.) parecen haber producido un forzamiento radiativo de unos $-0.2 W/m^2$. La radiación solar que llega a nuestro planeta se estima que ha aumentado ligeramente desde 1750, principalmente en la primera mitad del siglo XX, produciendo un forzamiento de 0.1 a $0.5 W/m^2$, pero las cenizas inyectadas en la estratosfera por las erupciones volcánicas explosivas de 1880-1920 y 1960-1991 compensaron este forzamiento con una contribución negativa.

3. Modelización numérica del clima

La complejidad del sistema climático impide la simple extrapolación de tendencias pasadas al futuro o el uso de técnicas estadísticas o puramente empíricas. Para simular la evolución del sistema climático ha sido necesario desarrollar complejos modelos numéricos, denominados *modelos climáticos globales*, que permiten simular la respuesta del clima a diferentes escenarios futuros de emisión y, así, estimar el cambio futuro del sistema con cierta confianza.

Estos modelos numéricos son una representación matemática simplificada de los procesos que tienen lugar entre los distintos componentes del sistema climático: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera. Entre ellos se producen enormes intercambios de materia, calor y momento, e incesantes interacciones mediante multitud de procesos físicos, químicos y biológicos, lo que hace que el sistema sea enormemente complejo. En consecuencia, la capacidad de los modelos numéricos para proyectar la evolución futura del clima depende básicamente del conocimiento de los procesos físicos y químicos que gobiernan el sistema climático. Las dos componentes principales del sistema climático son la atmósfera y el océano por lo que los modelos climáticos son generalmente modelos de circulación general atmósfera-océano.

Los modelos climáticos generales se basan en leyes de la física representadas por ecuaciones matemáticas, como por ejemplo la conservación del momento y de la energía. Es un complejo sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales que no tiene solución analítica y, por tanto, se resuelve de forma aproximada aplicando técnicas numéricas que requieren dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdillas tridimensionales. A partir de unos valores iniciales, en cada celdilla se resuelven las ecuaciones para cada variable, obteniendo su evolución temporal. Para evitar inestabilidades de cálculo, el paso temporal está forzosamente relacionado con el tamaño de la celdilla por lo que a menor tamaño de celdilla (es decir, mayor resolución del modelo) menor debe ser el paso temporal. Es por ello que aumentar la resolución del modelo tiene un enorme coste computacional. Actualmente, la resolución de la parte atmosférica de un modelo típico es de aproximadamente 250 km en la horizontal y de alrededor de 1 km en la vertical por encima de la capa límite. La resolución de un modelo oceánico corriente oscila aproximadamente entre 200 y 400 m en línea vertical, con una resolución horizontal de entre 125 y 250 km. Las ecuaciones se resuelven generalmente para cada período de media hora.

Existen multitud de procesos físicos que al tener una escala espacial menor que la rejilla del modelo, como por ejemplo la convección, no pueden ser resueltos de manera explícita. Sus efectos medios se incluyen entonces de una manera aproximada, a partir de su relación con las variables a mayor escala; esta técnica se conoce con el nombre de *parametrización* y todos los modelos dependen de un conjunto de parametrizaciones que pueden ajustarse para afinar la influencia de los distintos fenómenos.

De esta forma, los modelos atmósfera-océano se combinan con modelos, generalmente empíricos, que representan las otras componentes climáticas como por ejemplo la criosfera o la cubierta vegetal. El acoplamiento de las diferentes componentes es un

proceso difícil. Recientemente se están incorporando los ciclos del carbono y del azufre, con el objetivo final de incluir en el modelo la mayor parte posible del sistema climático terrestre y poder determinar así su evolución de una manera más precisa.

Se pueden utilizar modelos más simples (modelos de una y dos dimensiones) para estudiar cualitativamente la respuesta global del clima ante diferentes hipótesis. Sin embargo, para poder hacer proyecciones cuantitativas es necesario utilizar un modelo climático de circulación general. Estos modelos requieren computadoras muy potentes para poder ejecutarlos, lo que sólo puede ser llevado a cabo por grandes centros de investigación que ponen sus resultados a disposición de la comunidad científica para su estudio. Dos de los centros más importantes son el Centro Hadley, que utiliza un modelo denominado HadCM (Hadley Community Model), y el Max Planck Institute (MPI), que utiliza un modelo denominado ECHAM (las salidas globales de dichos modelos se utilizan en diferentes proyectos como entrada de los métodos de generación de escenarios regionales; ver más detalles en el apartado 7). Por ejemplo, la Fig. 1 muestra la resolución espacial de uno de los modelos climáticos globales más utilizados (la versión 3 del modelo de Centro Hadley).

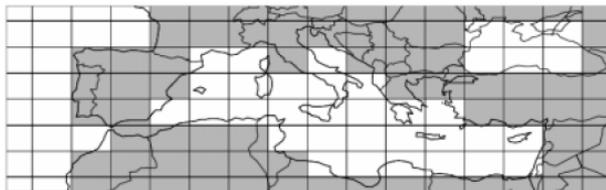


Figura 1. Rejilla del modelo HadCM3 sobre el Mediterráneo, indicando los píxeles de tierra (gris) y mar (blanco).

Antes de empezar a utilizar un modelo climático es necesario comprobar que es capaz de simular el clima actual (conocido con detalle a través de las observaciones instrumentales) y el clima pasado (conocido aproximadamente mediante los datos paleoclimáticos). Las pruebas llevadas a cabo en las dos últimas décadas han mostrado una continua mejora de los modelos que, actualmente, reproducen de manera aceptable la evolución experimentada por la temperatura global a lo largo de los últimos 150 años. Estos modelos numéricos son los que han proporcionado la prueba más sólida del origen antropogénico del cambio climático, pues en diferentes simulaciones realizadas incluyendo solamente forzamientos naturales, o forzamientos naturales combinados con los antropogénicos (las emisiones de gases de efecto invernadero), se ha podido determinar con un grado de confianza aceptable la contribución de las actividades humanas en el cambio experimentado por el clima hasta el día de hoy (Stott *et al.* 2001) que se traducen en un calentamiento global.

Estos modelos se utilizan para obtener escenarios futuros de cambio climático, considerando distintos

escenarios socio-económicos futuros que se traducen en distintos escenarios de emisión de GEI. Por ejemplo, la Fig. 2 muestra la anomalía de la temperatura media anual predicha para un escenario concreto de emisión durante el período 2070-2100 por un modelo numérico. La correcta definición de esos escenarios socio-económicos futuros es una tarea fundamental para la obtención de escenarios fiables de cambio climático.

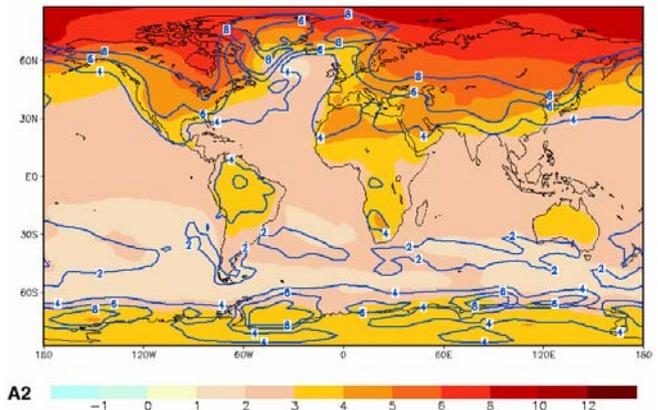


Figura 2. Anomalía de la temperatura media anual simulada para el escenario A2 para el período 2070-2100 por un modelo climático.

4. Escenarios Socio-Económicos de Emisión

Mediante el uso de modelos climáticos se ha podido determinar la influencia antropogénica (principalmente debida a las emisiones de gases de efecto invernadero) en el estado actual del clima. Por lo tanto, si queremos conocer la evolución futura del clima terrestre es necesario conocer primero cuál será la evolución de los distintos forzamientos del sistema en el futuro (emisiones de gases, etc.). Como esta evolución depende de distintos factores socio-económicos, es necesario utilizar un conjunto de posibles “escenarios de emisiones”, que tengan en cuenta esta incertidumbre. Los escenarios de emisiones utilizados actualmente para realizar proyecciones con modelos de clima a lo largo del siglo XXI se conocen por las siglas SRES (del inglés Special Report on Emission Scenarios). Han sido elaborados por un grupo de expertos mundiales dentro del IPCC (Nakicenovic *et al.* 2001), considerando diversos supuestos acerca del futuro desarrollo demográfico y socio-económico en la Tierra. Para cada uno de estos escenarios se ha realizado una cuantificación de las emisiones antropogénicas futuras de gases de efecto invernadero y compuestos de azufre (Houghton y otros 2001). Se formularon 40 hipótesis diferentes, agrupadas en 4 familias, que se describen brevemente a continuación:

- *A1*: se supone un crecimiento económico muy rápido, con una población mundial que alcanza un máximo a mediados de siglo para descender posteriormente, y una rápida disponibilidad de tecnologías más eficientes. También se supone

una creciente convergencia entre las distintas regiones del mundo, con intensas interacciones culturales y sociales, y reducción substancial de diferencias en la renta per cápita.

- **A2:** se supone un mundo muy heterogéneo, con autosuficiencia y preservación de las identidades locales, y una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico y el cambio tecnológico es más lento y menos generalizado que en los otros grupos de hipótesis.
- **B1:** hipótesis similares a las de A1, pero con un cambio muy rápido hacia una economía de servicios e información, con menor consumo de materias primas e introducción de tecnologías limpias y eficientes. Se enfatiza la sostenibilidad económica, social y ambiental, incluyendo una mayor equidad.
- **B2:** se describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a los problemas de sostenibilidad. La población mundial aumenta de modo continuo, pero a un ritmo inferior al de A2, con niveles intermedios de desarrollo económico y un cambio tecnológico más lento y diversificado que en A1 y B1.

Las hipótesis utilizadas en estas familias de escenarios conducen a concentraciones de CO₂ muy diferentes en el futuro: de 540 a 970 ppm en el año 2100 para los escenarios más representativos, es decir, un 90 a 250% más que las 280 ppm de 1750 (el rango total de las opciones es entre 490 y 1260 ppm). Dentro de este abanico de opciones se suelen considerar los escenarios A2 y B2 como situaciones extremas para realizar los estudios, con más o menos concentraciones respectivamente. Por ejemplo, la predicción que se muestra en la Fig. 2 corresponde a un escenario A2. Dada la existencia de múltiples escenarios posibles, es necesario cuantificar la variación de estas anomalías de temperatura mostradas en la Fig. 2 con otros escenarios, para tener una caracterización completa del problema. Esto incluye cuantificar las distintas fuentes de incertidumbre, como se describe en la siguiente sección.

5. Incertidumbres

La simulación de escenarios regionales de cambio climático se caracteriza por la presencia de distintas fuentes de incertidumbre que afectan a todos los pasos del proceso, desde el establecimiento de escenarios de emisión, hasta los modelos globales y la simulación a escala regional. Estas incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica o de cascada (Mitchell y Hulme, 1999):

- En el vértice de las incertidumbres se sitúan los escenarios de emisión descritos en la sección anterior.
- A estas incertidumbres hay que añadir las asociadas a cómo afectan las emisiones a las concentraciones de gases de efecto invernadero,

puesto que no se conoce exactamente el destino de las emisiones o, lo que es lo mismo, no se conoce plenamente el ciclo del carbono.

- Por otro lado, las herramientas utilizadas para generar las proyecciones climáticas, es decir los modelos acoplados atmósfera-océano, muestran también muchas incertidumbres en su nivel actual de desarrollo. Aunque los diferentes modelos son formulaciones similares de las ecuaciones que describen los distintos componentes del sistema climático (con distintas mallas, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, etc.), las simulaciones de cambio climático producidas con distintos modelos muestran una gran dispersión, reflejando la sensibilidad del clima a pequeños cambios en el forzamiento externo (sensibilidad climática), y por lo tanto un alto nivel de incertidumbre. También añaden incertidumbre a los resultados de los modelos otros subsistemas del modelo climático, como las variaciones en usos de suelo y el realismo en los modelos de suelo.
- Las distintas técnicas de regionalización (estadísticas y dinámicas) que, en muchos casos, se aplican al final del proceso para adaptar localmente las predicciones también contribuyen a la incertidumbre de los escenarios de cambio climático.
- Por último, los modelos de impacto en los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas (p.e., sector hidrológico, agrícola, energético, etc.) añaden fuentes adicionales de incertidumbre que hay que estimar y acotar.

En consecuencia, y a la vista de la gran cantidad de incertidumbres que existen en el proceso de generación de escenarios de cambio climático, se intentan utilizar metodologías que permitan estimar la incertidumbre asociada a cada paso de los arriba mencionados, permitiendo hallar un “intervalo de confianza” para un escenario resultante de cambio climático. Debido a la dificultad de este proceso, la evaluación de incertidumbres asociadas a las proyecciones de cambio climático se lleva a cabo con una aproximación probabilística en la que se explorara un conjunto representativo de métodos, modelos, emisiones, etc. (métodos de predicción por conjuntos, o *ensemble forecast*, en inglés).

5.1. Tratamiento Probabilístico

Esta metodología de predicción por conjuntos se ha impuesto en la última década para la predicción probabilística a distintas escalas temporales, desde el plazo medio hasta las proyecciones de cambio climático. Por tanto, las predicciones de tipo determinista (por ejemplo la predicción mostrada en la Fig. 2) van cediendo en favor de las predicciones probabilísticas, basadas en un conjunto o población de predicciones. El referente internacional actual de este tipo de

aproximación probabilística al cambio climático lo constituye el proyecto integrado ENSEMBLES (del 6º programa marco financiado por la UE, <http://www.ensembles-eu.org>) que se desarrolla entre los años 2005-2009, y que tiene entre otros objetivos el de acotar las incertidumbres en las predicciones seculares de cambio climático mediante integraciones con diferentes escenarios de emisión, diferentes modelos globales, diferentes modelos regionales y diferentes técnicas estadísticas de regionalización, proporcionando también métodos de pesado y de combinación (por ejemplo métodos estadísticos Bayesianos) para aglutinar los distintos resultados individuales en una única predicción probabilística de consenso, más robusta que las basadas en un único modelo global y en una única técnica de regionalización.

La tarea de construcción de escenarios probabilísticos a partir de los conjuntos de predicciones de distintos modelos requiere el desarrollo de técnicas de combinación apropiadas que tengan en cuenta la bondad de los distintos modelos para reproducir el clima de

referencia en distintas regiones y para distintas variables. Este problema constituye un área de investigación activa y se han propuesto varias técnicas que se están explorando en distintos proyectos: técnicas Bayesianas, métodos de escalado espacial, etc. Sin embargo, hasta la fecha existen pocos ejemplos operativos de construcción de escenarios probabilísticos regionales de cambio climático basados en estas técnicas.

Por ejemplo, la Fig. 3 muestra las anomalías medias previstas tomando el escenario B2 para la temperatura y precipitación durante el período 2071-2100. Estas predicciones se obtuvieron considerando un conjunto de nueve modelos numéricos de circulación distintos, que también permitieron estimar la incertidumbre asociada a cada predicción (consenso de los modelos) en cada una de las regiones de la Tierra. Se puede observar que mientras la predicción de anomalías de temperatura tiene mucho consenso en el hemisferio norte, la precipitación está mucho más influenciada por estas incertidumbres, no permitiendo obtener ninguna información clara a este respecto.

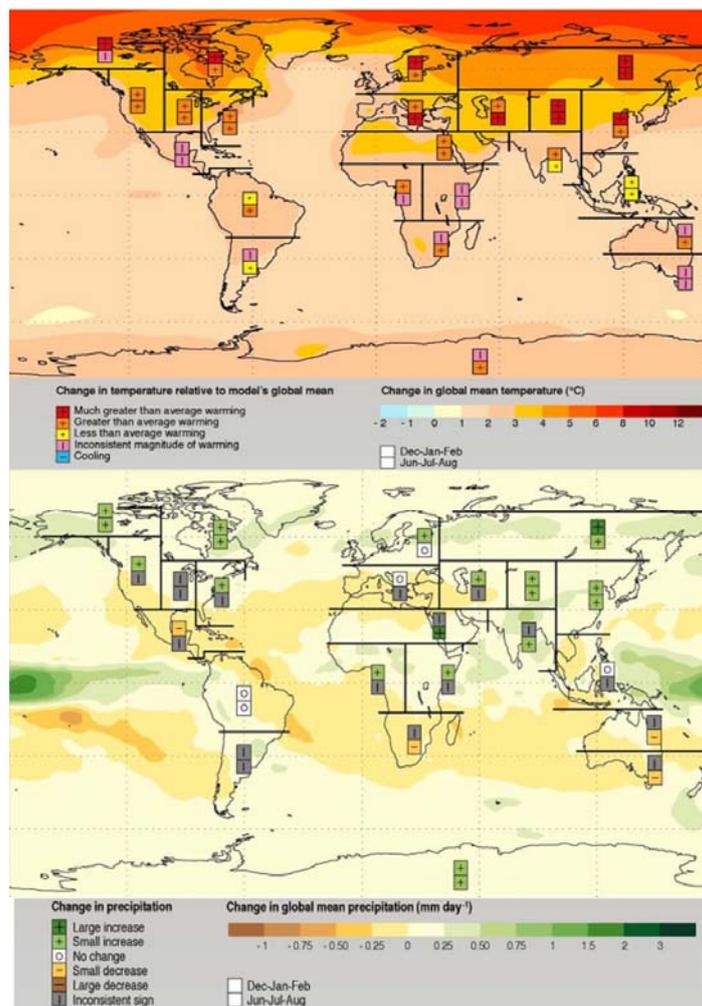


Figura 3. Previsiones globales de cambio climático para el período 2071-2100, obtenidas en forma de anomalías de temperatura y precipitación respecto al período de referencia 1961-1990, para el escenario de emisiones B2, mostrando la incertidumbre asociada a un conjunto de 9 modelos de circulación (Fuente: Houghton y otros 2001).

6. Predicción Global de Cambio Climático

En el tercer informe del IPCC (Houghton y otros 2001) se presenta el clima previsto a finales del siglo XXI en comparación con el clima observado durante el periodo de referencia 1961-1990, considerando un conjunto de 9 modelos (entre los que se encuentran HadCM3 y ECHAM-4) y según los diferentes escenarios descritos anteriormente. Los modelos predicen que la sensibilidad climática se encuentra probablemente entre 1.5 y 4.5 °C. La sensibilidad climática se define como el cambio que sufre la temperatura superficial global ante una duplicación de la concentración de CO₂.

Los modelos prevén un aumento de la temperatura de la superficie mayor sobre tierra firme que sobre los océanos, sobre todo en latitudes altas del hemisferio norte, y también más notable en invierno que en verano. La oscilación termométrica diaria tenderá a disminuir en muchas zonas, de forma que los ascensos de temperatura serán más acusados en las mínimas nocturnas que en las máximas diurnas. La superficie cubierta de nieve y de hielo seguirá disminuyendo. Las previsiones para finales de siglo (2071-2100) indican que, con el conjunto de hipótesis A2 sobre emisiones de gases, la temperatura media global del aire superficial será 3°C mayor que la del periodo 1961-90, como aumento más probable, aunque podría tener algún valor comprendido entre 1.3 y 4.5°C. Para las hipótesis B2, con menor aumento de la concentración de CO₂, la temperatura aumentaría unos 2.2°C (de 0.9 a 3.4°C). Debido al enorme coste computacional, los modelos de circulación atmósfera-océano sólo se integran para un número limitado de escenarios. Utilizando modelos climáticos más simples e integrando para 35 escenarios del SRES, se predice un aumento de temperatura para el siglo 2000-2100 de entre 1.4 y 5.8 °C, el mayor aumento en los últimos 10000 años, según datos paleoclimáticos.

En promedio global, el vapor de agua, la evaporación y la precipitación tienden a aumentar. A escala regional se producen tanto aumentos como disminuciones. En cuanto a fenómenos extremos, es muy probable que aumente la frecuencia de olas de calor sobre tierra y disminuya la de olas de frío, y que aumente también la frecuencia de precipitaciones extremas, así como la intensidad de las mismas. La mayoría de los modelos indican un debilitamiento de la circulación termohalina, aunque ninguno predice su interrupción. El estado medio del clima tiende a corresponderse con la ocurrencia del fenómeno de El Niño y a nivel global, el nivel del mar aumenta entre 0.09 y 0.88 m aunque existen grandes diferencias a nivel regional.

La variabilidad de respuestas producidas por los distintos modelos climáticos en los distintos escenarios produce una incertidumbre que ha de ser tenida en cuenta para generar las predicciones globales. En ocasiones esta incertidumbre sólo afecta a la magnitud del cambio (por ejemplo, todas las predicciones de

cambio futuro de temperatura en el hemisferio norte indican un calentamiento, y la incertidumbre sólo afecta a la magnitud mayor o menor del mismo, ver figura 3). En otras ocasiones la incertidumbre también afecta al carácter de la propia señal (como en el caso de la variación de precipitación en diversas zonas del planeta, que unos modelos y escenarios dan positiva y otros negativa, ver figura 3). Esta incertidumbre tiene que ser tenida en cuenta si se desea llevar a cabo un proceso de regionalización, que puede magnificarla o reducirla, haciendo que las predicciones globales sean más o menos útiles en distintas zonas geográficas de una misma región (ver Murphy *et al.* 2004).

6.1. Resultados en la Península Ibérica

Las predicciones globales comentadas en el apartado anterior han servido para que distintos países y organizaciones elaboren informes resumiendo la información relevante sobre cambio climático para su región o problema concreto. La Oficina Española de Cambio Climático (OECC) presentó en 2004 un informe elaborado por un grupo de expertos resumiendo las previsiones actuales de cambio climático en nuestro país. Este informe alerta sobre las posibles repercusiones que estos cambios pueden producir en los próximos 100 años en distintos sectores productivos y ecosistemas naturales (puede consultarse en <http://www.mma.es/oecc/impactos.htm>), y también ofrece resultados globales sobre nuestro país.

En primer lugar, el informe analiza en detalle los resultados obtenidos por el modelo HadCM3 para la Península Ibérica y Baleares en cuanto a temperatura y precipitación. Se percibe de forma clara un calentamiento progresivo a lo largo del siglo en toda la región, por lo general más intenso y rápido en los meses de verano que en los de invierno, en el escenario A2 que en el B2 y en las zonas continentales que en las oceánicas (en la mayor parte de la península la temperatura aumenta entre 2 y 3 °C cada 30 años en verano y entre 1 y 2 °C en invierno). En contraste con los cambios simulados para la temperatura, los de precipitación no resultan del mismo signo en las diversas zonas y épocas del año. Para los dos escenarios, en invierno predomina el aumento en cantidad de precipitación respecto al clima actual y en primavera y verano, la disminución.

En segundo lugar, el informe lleva a cabo un análisis de conjunto considerando los resultados de seis modelos climáticos globales atmósfera-océano incluidos en la base de datos del DDC-IPCC (http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html), concretamente los modelos llamados CCGM, CSIRO, HadCM3, NIES2, ECHAM4 y GFDL. Todos los modelos coinciden en pronosticar un aumento de temperatura para nuestra zona, con variaciones en cuanto a la magnitud del cambio, y con un ritmo de calentamiento estacional máximo durante el verano del A2 y mínimo

durante el invierno del B2. En cuanto a la precipitación, se evidencian más discrepancias entre los modelos, lo cual indica el menor grado de confianza que poseen las proyecciones de cambio en las precipitaciones en relación con las de temperatura. No obstante, casi todos los modelos coinciden en proyectar disminuciones de precipitación en el clima futuro respecto al periodo 1960-1990.

7. Escenarios Regionales de Cambio Climático

Como ya se ha comentado, la resolución de los modelos climáticos empleados para simular el clima futuro a partir de los distintos escenarios oscila entre 2.5 y 5°, es decir entre 250 y 500 km aproximadamente en nuestras latitudes. Por tanto, el detalle geográfico al que pueden obtenerse actualmente las previsiones es todavía muy limitado y no permite pronosticar diferencias ni tendencias regionales como, por ejemplo, en los distintos climas de la península Ibérica. Por ejemplo, la Figura 4 muestra las anomalías de temperatura previstas sobre la península Ibérica por el modelo HadCM3 para un único escenario de cambio climático (el escenario más desfavorable, A2). Las predicciones se reducen a 9 puntos de rejilla que caracterizan a toda la península Ibérica. Por tanto, los resultados obtenidos sólo dan indicaciones globales de las tendencias de las variables climáticas para los distintos escenarios supuestos, no teniendo en cuenta las heterogeneidades geomorfológicas y las distintas climatologías locales de una misma región. Por ejemplo, toda la autonomía de Cantabria está reducida a un solo punto de predicción en el modelo global y, sin embargo, posee una complicada geografía que le confiere distintos microclimas (Fig. 5).

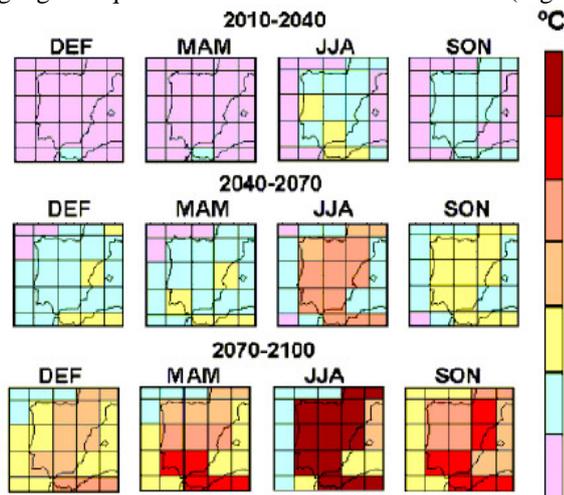


Figura 4. Predicción del incremento de temperatura para distintos períodos del siglo obtenidos con el modelo HadCM3 para el escenario de emisión A2.

Esta deficiencia de los modelos globales hace necesario realizar un esfuerzo adicional para obtener proyecciones que estimen los efectos regionales del cambio climático. Este problema es uno de los objetivos actuales de la comunidad investigadora y se denomina con el nombre genérico de “creación de escenarios regionales de

cambio climático” o “proyección regional del cambio climático”. Este ha sido el objetivo de algunos proyectos europeos recientes o en desarrollo (PRUDENCE, STARDEX, ENSEMBLES) orientados precisamente a la generación de escenarios a escala regional, con una gran variedad de métodos y modelos climáticos globales y regionales.

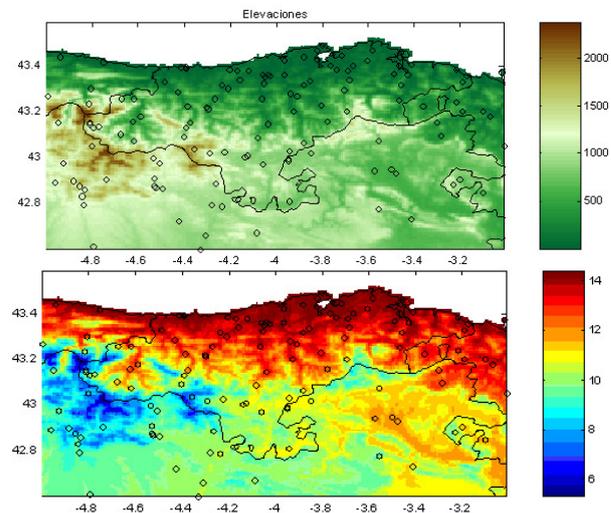


Figura 5. Topografía de Cantabria (arriba) y temperatura media anual (abajo) en una rejilla de 1km.

Esta tarea de proyección regional se realiza utilizando técnicas dinámicas, acoplando modelos numéricos locales de mayor resolución, o estadísticas, con modelos empíricos que relacionan las variables de gran escala con variables locales (Wilby y Wigley, 1997). Este proceso puede magnificar o reducir la incertidumbre asociada con las predicciones globales, haciendo que éstas sean más o menos útiles en distintas zonas geográficas de una misma región (ver Murphy et al. 2004); este hecho añade un nuevo componente a la cascada de incertidumbres que es necesario cuantificar para entender los escenarios finales de cambio climático que se obtengan.

7.1. Técnicas de downscaling dinámico

Las técnicas de regionalización dinámica se basan en el uso de modelos regionales o de área limitada (RCM, del inglés *Regional Climate Model*). Para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales, se “anida” un modelo regional de mayor resolución en el interior del modelo global, únicamente en la zona de interés. El modelo regional toma como condiciones de contorno los valores del modelo global a lo largo de toda la integración (Giorgi y Mearns, 1999). Las técnicas dinámicas tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la desventaja de necesitar una gran capacidad de cálculo, lo que limita actualmente las simulaciones a resoluciones no superiores a los 20 km. Este tipo de técnicas fueron descritas y aplicadas en el informe de la OECC descrito anteriormente y se refiere al lector al citado documento para más detalle.

7.2. Técnicas de downscaling estadístico

Los métodos estadísticos de regionalización se basan en el uso de técnicas estadísticas que relacionan de forma empírica las variables climáticas a gran escala, proporcionadas por los modelos globales de circulación, con las variables locales/regionales observadas en superficie relacionadas con el fenómeno bajo estudio. Se hace por ello necesario disponer de series históricas largas, tanto de salidas de modelos numéricos (reanálisis) como de observaciones, para entrenar estos métodos. La ventaja de las técnicas de *downscaling* estadístico es que, además de ser aplicables a variables estándar, como la precipitación y la temperatura, también pueden aplicarse a cualquier otra variable, como la altura de oleaje en un punto de rejilla o la producción de cereales en una región, que son dependientes de la circulación a gran escala, pero que no son proporcionadas por los modelos globales y regionales. Por otra parte, las necesidades de cálculo de estas técnicas son, en general, modestas, si bien en algunos casos las técnicas no lineales utilizadas consumen también grandes cantidades de recursos en los procesos de optimización involucrados (véase Gutiérrez et al., 2004). Estas características hacen que la regionalización estadística se haya potenciado en los últimos proyectos sobre cambio climático, que incluyen tareas específicas a este respecto.

Algunas de estas técnicas se han desarrollado y aplicado en el ámbito de la predicción a corto plazo y han sido posteriormente adaptadas a las escalas propias del cambio climático y al tratamiento de la incertidumbre asociada con la predicción por conjuntos. En este conjunto de técnicas se incluyen los métodos de regresión lineal (regresión múltiple, CCA, etc.) y no lineal (redes neuronales, etc.), y los métodos de condicionamiento o clasificación del tiempo (incluyendo las técnicas de análogos, modelos de Markov ocultos, redes Bayesianas y otras técnicas de agrupamiento). Estas técnicas permiten trabajar con la máxima resolución temporal disponible y regionalizan los resultados, mejorando la resolución espacial. Por otra parte, los generadores de tiempo (*weather generators*) han sido desarrollados para la predicción estacional, decadal y de cambio climático, trabajando con promedios mensuales o estacionales de los datos y permitiendo obtener al final del proceso series simuladas de datos diarios compatibles con las predicciones del modelo y con la estadística local observada. Una descripción más detallada de estas técnicas de *downscaling*, así como recomendaciones para su uso en la regionalización de cambio climático se tiene en Wilby et al. (2004). Por tanto, en lo siguiente se describen las particularidades de estas técnicas que sería necesario analizar para la generación de escenarios regionales en la Península, Baleares y Canarias (ésta es una tarea que se está planificando actualmente dentro del Ministerio de Medio Ambiente, a través del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático).

7.3 Proyecciones regionales en España: características y estudios a realizar

En primer lugar, una de las principales críticas al uso de técnicas de *downscaling* en estudios de regionalización de escenarios de cambio climático es la imposibilidad de demostrar que los modelos son apropiados para el clima futuro, con forzamientos distintos a los del período utilizado para inferir los modelos. Este problema es crítico para los estudios de cambio climático en España, dada nuestra gran variabilidad climática. Podría ocurrir, por tanto, que los modelos fuesen estacionarios para un tipo de clima, pero no para otro. Es por ello necesario realizar un estudio que estime la significancia de la estacionariedad de los modelos en presencia de distintos forzamientos radiativos y distintos períodos del clima presente. Para ello será necesario diseñar tests estadísticos apropiados que permitan cuantificar la variabilidad de los modelos respecto de la ventana temporal y los escenarios utilizados para entrenarlos. También será necesario determinar las variables de gran escala que son más robustas a estos cambios y que, por tanto, serían los predictores idóneos para las técnicas estadísticas, aún cuando no proporcionasen la mejor predicción del clima presente. De otra forma, se corre el peligro de sobreajustar los modelos a las condiciones actuales, perdiendo la capacidad de extrapolación.

En segundo lugar, dado que existe un amplio abanico de técnicas de *downscaling* estadístico y que su coste computacional es inferior al de los métodos dinámicos, sería conveniente aplicar y comparar el mayor número de técnicas posibles en un marco común, utilizando un único reanálisis global y la misma red de observación (por ejemplo, los reanálisis ERA-40 y una rejilla común de observaciones de alta resolución, o un conjunto de observaciones fiables en una red de puntos representativa de la geografía). La validación de resultados permitirá descartar las técnicas no apropiadas y descubrir las ventajas de cada técnica en las distintas regiones españolas. Cabe mencionar que nuestro clima no es homogéneo, sino que se ve afectado por fenómenos frontales, o convectivos, o ambos, según las zonas. Es, pues, de esperar que unas técnicas sean más apropiadas que otras para distintas variables y distintas zonas y, por tanto, resulte necesario este estudio comparativo para cuantificar adecuadamente la incertidumbre que, en cada zona, añade el uso de la técnica de *downscaling* estadístico. Por ejemplo, la figura 6 muestra cómo el método de análogos presenta mayor pericia en zonas donde predomina la precipitación frontal (principalmente Galicia) que en aquéllas donde predomina la precipitación convectiva (zona Mediterránea).

Una vez identificadas las mejores técnicas estadísticas para cada región y variable sería deseable realizar un abanico de proyecciones regionales futuras lo más amplio posible, tanto en cuanto a número de modelos globales como de escenarios de forzamiento. Este es un

tema insuficientemente explorado en casi todos los proyectos realizados hasta la fecha, donde grupos distintos se centran en regiones, modelos y escenarios distintos. Sería importante lograr un acuerdo de mínimos para obtener una matriz común de zonas, modelos y escenarios. Este trabajo requerirá de recursos de almacenamiento adecuados para poder distribuir esta matriz a los grupos que participarán en las tareas de *downscaling* (sería deseable que los grupos participantes adquiriesen el compromiso de simular la matriz completa). En este sentido se puede aprovechar parte de la infraestructura que se está desarrollando en ENSEMBLES para la creación de herramientas que aglutinen datos y métodos y permitan realizar estudios comparativos en un entorno común (véase, por ejemplo <http://www.meteo.unican.es/ensembles>).

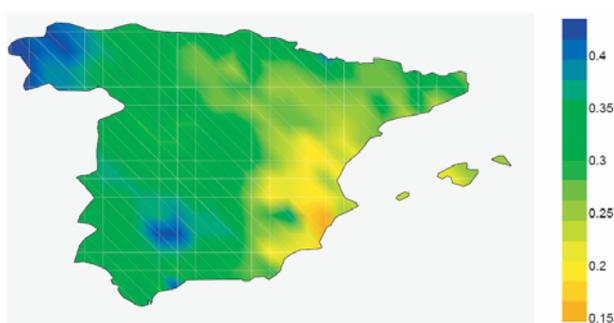


Figura 6. Validación de la predicción local de precipitación utilizando un método de *downscaling* estadístico basado en análogos para un período de 40 años. Se representa el Brier Skill Score (valores altos/bajos indican una pericia mayor/menor).

También será necesario adaptar los métodos estadísticos para la regionalización de eventos extremos (olas de calor, inundaciones, etc.), basados en los percentiles extremos de un período de referencia, y que tienen un comportamiento estadístico distinto a los valores promedio. En este sentido, el Proyecto STARDEX ha identificado un conjunto de índices extremos de interés y ha realizado un primer estudio comparativo de la calidad de distintos métodos estadísticos de *downscaling*; sin embargo, en la Península Ibérica el estudio es parcial y no proporciona resultados concluyentes (véase Goodess et al., 2006). Para este problema será necesario contar con datos de AOGCMs con la mayor resolución temporal disponible.

Además, sería deseable poder realizar algún estudio complementario sobre la viabilidad de combinar los métodos regionales dinámicos con los estadísticos, de forma que el método estadístico se obtenga utilizando los campos del modelo dinámico regional (esta tarea requeriría poder disponer de un reanálisis del modelo regional dinámico; por ejemplo, el proyecto InVento de la CICYT planea realizar un reanálisis del modelo WRF para la península Ibérica por lo que existiría la posibilidad de realizar el tipo de estudio indicado).

Finalmente, no hay que olvidar que muchas de las variables climáticas previstas (las variables de salida de las técnicas estadísticas y dinámicas de *downscaling*) constituyen las variables fundamentales de entrada para los diferentes modelos de impactos. Así pues, todas las mejoras que se logren introducir en la modelización y predicción de los cambios climáticos a escalas regionales cada vez más detalladas, deberían permitir, a su vez, mejoras apreciables en las previsiones, por ejemplo, de los riesgos de tipo hidro-geomorfológico.

Referencias:

- Bertrand, C., Loutre, M., Crucifix, M. And Berger, A. (2002) Climate Of The Last Millennium: A Sensitivity Study. *Tellus A*, 54, 221–244.
- Bryden, H.L., Longworth, H.R., Cunningham, S.A. (2005) Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 N, *Nature*, 438, 655–657.
- Giorgi, F. and L.O. Mearns, 1999: Regional climate modeling revisited: an introduction to the special issue. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6), 6335–6352.
- Goodess, C. M., C. Anagnostopoulou, A. Bárdossy, M. R Haylock, Y. Hundecha, P. Maheras, J. Ribalaygua, J. Schmidli, T. Schmith, R. Tomozeiu, (2006). An intercomparison of statistical *downscaling* methods for Europe and European regions: Assessing their performance with respect to extreme temperature and precipitation events. *Climate change*. En prensa.
- Gutiérrez, J.M., Cano, R, Cofiño, A. S. and Sordo, C. (2004). Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas. *Ministerio de Medio Ambiente, Monografías del Instituto Nacional de Meteorología*.
- Houghton, J. T. y otros (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.*
- Mitchell, T. D., M. Hulme (1999) Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography* 23(1): 57-78.
- Murphy, J.M. et al. (2004) Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature* 430, 768-772.
- Nakicenovic, N. et al. (2001) *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University press. 599 pp.

- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T. And Foley, J.A. (2005) Impact of regional climate change on human health, *Nature*, 438, 310-317.
- Stott, P.A., Stone, D.A, Allen, M.R. (2004) Human contribution to the European heatwave of 2003, *Nature* 432, 610-614.
- Stott, P.A., Tett, S.F.B., Jones, G.S., Allen, M.R., Ingram, W.J. and Mitchell, J.F.B. (2001) Attribution of Twentieth Century Temperature Change to Natural and Anthropogenic Causes, *Climate Dynamics*, 20, 789-850.
- Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L. (1997). Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21, 530-548.
- Wilby, R. L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P. and Mearns, L.O. "guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods". Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2004). <http://ddcweb1.cru.uea.ac.uk/guidelines/>

Figure captions

Figure 1. HadCM3 model's resolution in the Mediterranean area; land pixels in grey and ocean pixels in white.

Figure 2. Mean annual temperature anomaly for the period 2070-2100 simulated by a climate model using scenario A2.

Figure 3. Global climate change forecasts for the period 2071-2100, represented as temperature and precipitation anomalies with regard to the reference period 1961-1990, for emission scenario B2. The uncertainty associated with the ensemble of 9 circulation models is also represented (Source: IPCC 2001, Third Assessment Report).

Figure 4. HadCM3 model's forecasts of temperature increase for different periods using emission scenario A2.

Figure 5. Topography (top) and mean annual temperature (bottom) of Cantabria region using a 1 km resolution grid.

Figure 6. Validation of a local precipitation forecast for a 40 year period using an analog-based downscaling statistical method. The figure represents the Brier Skill Score (high/low values indicate greater/less skill).