

Editores:

J.M. Cuadrat Prats, M.A. Saz Sánchez, S.M. Vicente Serrano,
S. Lanjeri, M. de Luis Arrillaga y J.C. González Hidalgo

Clima, Sociedad y Medio Ambiente/ Climate, Society and Environment

Ponencias



Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC)
Serie B, n.º 6

Primera Edición 2007

Copyright © Asociación Española de Climatología y Autores

Esta obra recoge las conferencias invitadas al V Congreso de la Asociación Española de Climatología, celebrado en Zaragoza entre el 18 y el 21 de septiembre de 2006

Comité Científico: José Creus Novau (Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC), José María Cuadrat Prats (U. de Zaragoza), Rosario Díaz-Pabón Retuerta (Instituto Nacional de Meteorología), Felipe Fernández García (U. Autónoma de Madrid), Juan Carlos García Codrón (U. de Cantabria), José Antonio Guijarro Pastor (Centro Meteorológico en Illes Balears), José Luis López Díaz (Instituto Nacional de Meteorología), Javier Martín Vide (U. de Barcelona), María Victoria Marzol Jaén (U. de La Laguna), Concepción Rodríguez Puebla (U. de Salamanca)

Comité Organizador: José María Cuadrat Prats, Miguel Ángel Saz Sánchez, Sergio M. Vicente Serrano, Siham Lanjeri, José Carlos González Hidalgo, Martín de Luis Arrillaga.

El V Congreso de la Asociación Española de Climatología fue organizado por la propia Asociación y por el Grupo de Investigación Consolidado de *Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales*, del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. Actuaron como coorganizadores: el Instituto Nacional de Meteorología (Ministerio de Medio Ambiente), el Departamento de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón y el Ministerio de Educación y Ciencia.

ISBN 978-84-1340-183-6

Depósito Legal:

Derechos reservados para todos los países

No se permite la reproducción total o parcial de este libro ni la compilación en un sistema informático ni la transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro o por otros medios presentes y futuros, ni el préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión del uso del ejemplar, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

Printed in Spain / Impreso en España

Edita: Asociación Española de Climatología

Imprime: Prensas de la Universidad de Zaragoza

Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza

V CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE CLIMATOLOGÍA



Zaragoza
18 al 21 de septiembre de 2006

Presidencia de honor

S.A.R. El Príncipe de Asturias,
D. Felipe de Borbón y Grecia

Comité de honor

Excmo. Sr. D. Marcelino Iglesias Ricou
Presidente del Gobierno de Aragón.

Excmo. Sr. D. Felipe Pétriz Calvo
Rector Magnífico de la Universidad de Zaragoza

Excma. Sra. Dña. Cristina Narbona Ruiz
Ministra de Medio Ambiente

Excmo. Sr. D. Alfredo Boné Pueyo
Consejero de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón

Excma. Sra. D.^a. Angela Abós Ballarín
Consejera de Ciencia, Tecnología y Universidad del Gobierno de Aragón

Excmo. Sr. D. Juan Alberto Belloch Julbe
Alcalde de Zaragoza

Ilmo. Sr. D. Arturo Gonzalo Aizpiri
Secretario General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático

Ilmo. Sr. D. Francisco Cadarso González
Director General del Instituto Nacional de Meteorología

Excmo. Sr. D. Roque Gistau Gistau
Presidente de la Sociedad Estatal Expoagua Zaragoza 2008

Excmo. Sr. D. José Luis Alonso Gajón
Presidente de la Confederación Hidrográfica del Ebro

Excmo. Sr. D. José Ángel Villar Rivacoba
Vicerrector de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad de Zaragoza

ÍNDICE

Prólogo / *Foreword*

José M. Cuadrat

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. España .. 7

Las relaciones entre el clima y la sociedad / *Relationships between Climate and Society*

M.^a Fernanda Pita

Departamento de Geografía Física y AGR. Universidad de Sevilla. España 11

Cambio climático y sistemas naturales / *Climate Change and Natural Systems*

Fernando Valladares

Instituto de Recursos Naturales, CCMA-CSIC, Madrid. España 43

Cambio climático y variabilidad climática / *Climate Change and Climate Variability*

Eduardo Zorita

GKSS Forschungszentrum, Max-Planck, Geesthacht. Germany 87

PRÓLOGO

José M. Cuadrat

*Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.
Universidad de Zaragoza. España*

Para la Climatología española el último cuarto del siglo xx marca el comienzo de una fructífera etapa de renovación temática y metodológica que explica su eclosión y actual desarrollo. La nueva situación ha significado un avance espectacular en la producción científica, la asunción de líneas de investigación de vanguardia y la progresiva internacionalización, que se inserta en la corriente mundial de los nuevos paradigmas que protagonizan los vigentes intereses y objetivos de la Climatología.

En esta transformación han jugado un papel esencial los cambios en los objetos de estudio, el uso de métodos estadísticos más contrastados y la generación de bancos de datos depurados. Con la asunción definitiva del concepto de sistema climático como referente común de análisis de los climas, surgen nuevos elementos de estudio que habían tenido escasa atención hasta entonces. Se incorporan líneas de investigación de vanguardia, como son los análisis sobre la variabilidad y el cambio climático, o la influencia de los patrones de teleconexión sobre los elementos del clima. Se manejan nuevas fuentes de información distintas de las que habitualmente suministran los observatorios meteorológicos: datos proxy, indicadores paleoclimáticos, mapas del tiempo y, en particular, imágenes de satélite, que cada día ofrecen mayores posibilidades de empleo. Y en cuanto a las técnicas, el cambio ha sido extraordinario, con recurso a tratamientos estadísticos complejos, técnicas multivariantes, modelización del clima, manejo de SIG, cartografía de alta resolución, y el ordenador como herramienta de uso indispensable.

La Climatología se está moviendo desde un pasado reciente, asociado a los estudios analíticos y de los estados de la atmósfera, a un futuro renovado y muy activo, que tiene al sistema climático como eje central de estudio, impulsado por el reconocimiento del actual cambio climático y la incertidumbre de sus impactos. De esta dinámica participa la Asociación Española de Climatología, AEC, y en particular en este V Congreso. Su lema «Clima, sociedad y medio ambiente» es la expresión del interés por conocer los avances en la investigación del cambio climático, su acción sobre los sistemas físicos y biológicos y las nuevas preguntas que surgen respecto a los fenómenos extremos, gestión de los recursos y actuaciones en el contexto amplio del desarrollo sostenible.

Con este planteamiento, el presente Congreso se ha organizado en cuatro áreas temáticas, en torno a las cuales se han presentado buen número de comunicaciones, que se recogen en la publicación J.M. Cuadrat; M.A. Saz; S.M. Vicente-Serrano; S. Lanjeri; M. de Luís y J.C. González-Hidalgo (Editores): *Clima, Sociedad y Medio Ambiente* (Zaragoza, 2006), dentro de la Serie A de Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Además, se

desarrollaron sesiones de debate y ponencias a cargo de prestigiosos especialistas invitados al efecto, cuya versión escrita se publica en esta monografía, con estos títulos: «Las relaciones entre el clima y la sociedad», a cargo de la Dra. M.^a Fernanda Pita, de la Universidad de Sevilla (España); «Cambio climático y sistemas naturales», a cargo del Dr. Fernando Valladares, del Instituto de Recursos Naturales, CCMA-CSIC, Madrid (España); y «Cambio climático y variabilidad climática», a cargo del Dr. Eduardo Zorita, del GKSS Forschungszentrum, Max-Planck, Geesthacht (Alemania).

La organización del Congreso ha sido posible, obviamente, gracias a la iniciativa de la AEC, pero también al firme apoyo de buen número de personas e instituciones que han colaborado en el éxito de este encuentro. En primer lugar, al Comité de Honor, y de manera especial a la presidencia de SAR el Príncipe de Asturias, D. Felipe de Borbón, siempre interesado por todo lo relativo al medio ambiente y su proyección social. A los organismos que han prestado su apoyo, en particular al Instituto Nacional de Meteorología, que siempre ha alentado las actividades de la Asociación desde su fundación; al Ministerio de Educación y Ciencia, al Gobierno de Aragón y a la Universidad de Zaragoza. A los miembros del Comité Científico por su abnegada y eficaz labor; a todo el equipo humano del Grupo de Investigación «Clima, agua y cambio global» del Departamento de Geografía, responsable local de la organización. Y, sobre todo, a los verdaderos protagonistas del acontecimiento, los ponentes, comunicantes y miembros de la mesa redonda, por sus aportaciones respectivas. A todos, gracias por su colaboración y esfuerzo.

José M. Cuadrat
Presidente de la Asociación Española de Climatología
Coordinador del V Congreso de la AEC

FOREWORD

José M. Cuadrat

Geography Department. University of Zaragoza. Spain

The last quarter of the 20th Century marks the beginning of a fruitful stage of a methodological renewal for Spanish Climatology that explains its emergence and current development. The new situation has seen dramatic progress in scientific production, the assumption of cutting-edge lines of research and the progressive internationalization, which is inserted in the world trend of new paradigms that are at the centre of the current interests and objectives of Climatology.

The changes in the objects of study, the use of more contrasted statistical methods and the generation of refined databases have played an essential role in this transformation. With the definitive assumption of the climate system concept as a common reference point for the analysis of climates, new study elements emerge that had received little attention until then. Innovative lines of research are incorporated, such as analyses of climate variability and change, or the influence of teleconnection patterns on the elements of climate. New sources of information other than those usually provided by meteorological observatories are being used: proxy data, paleoclimatic indicators, weather maps and, in particular, satellite images, which each day offer greater employment opportunities. And in terms of techniques the change has been extraordinary, with recourse to complex statistical treatments, multivariate techniques, climate modelling, GIS management, high-resolution mapping, and the computer as an indispensable tool for use.

Climatology is moving from a recent past, associated with analytical studies and studies of the states of the atmosphere, to a renewed and very active future, which has the climate system as the central axis of study, driven by the recognition of current climate change and the uncertainty of its impacts. The Spanish Climatology Association, AEC, participates in this dynamic, and in particular in this 5th Conference. Its motto “Climate, Society and Environment” is the expression of interest in learning about the advances in climate change research, its action on physical and biological systems and the new questions that arise regarding extreme phenomena, resource management and actions in the broad context of sustainable development.

With this approach, the Conference has been structured in four thematic areas, with a substantial number of communications covering them. These communications are included in the publication by J.M. Cuadrat; M.A. Saz; S.M. Vicente-Serrano; S. Lanjeri; M. de Luís and J.C. González-Hidalgo (Editors): Climate, Society and Environment (Zaragoza, 2006), included in the Series A in Publications of the Spanish Climatology Association. In addition, discussion sessions and presentations were carried out by prestigious specialists invited for this purpose, the written version of which is published in this monograph, with the following titles: “Relationships between Climate and Society”, by Dr. M.^a Fernanda Pita, University of

Seville (Spain); “Climate Change and Natural Systems”, by Dr. Fernando Valladares, from the Institute of Natural Resources, CCMA-CSIC, Madrid (Spain); and “Climate Change and Climate Variability”, by Dr. Eduardo Zorita, from the GKSS Forschungszentrum, Max-Planck, Geesthacht (Germany).

The organization of the Conference has been possible, obviously, thanks to the initiative of the AEC, but also to the firm support of a large number of people and institutions that have collaborated towards the success of this meeting. First of all, thanks to the Honour Committee, and especially to the presidency of HRH the Prince of Asturias, Mr. Felipe de Borbón, always interested in everything related to the environment and its social projection. Thanks to the organizations that have provided support, in particular to the Spanish *National Institute of Meteorology*, which has always encouraged the activities of the Association since its foundation; the Ministry of Education and Science, the Government of Aragon, and the University of Zaragoza. To the members of the Scientific Committee for their selfless and effective work; to all the human team of the «Climate, water and global change» Research Group of the Department of Geography, local manager of the organization. And, above all, thanks to the true protagonists of the event, the speakers, communicators and members of the round table, for their respective contributions. Thank you all for your collaboration and efforts.

José M. Cuadrat
President of the Spanish Climatology Association
Coordinator of the 5th AEC Conference

LAS RELACIONES ENTRE EL CLIMA Y LA SOCIEDAD

M.^a Fernanda Pita

Departamento de Geografía Física y AGR Universidad de Sevilla. España

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es desarrollar algunas reflexiones sobre los aspectos esenciales que presiden las relaciones entre el clima y la sociedad en el mundo actual, y sobre el papel que debe jugar la climatología para contribuir a unos niveles crecientes de desarrollo socioeconómico. La amplitud del tema nos obliga sin embargo a acotarlo y a precisar su alcance.

En primer lugar queremos destacar que nos vamos a centrar exclusivamente en el clima, sin abordar los aspectos relacionados con el tiempo, su previsión y las grandes ventajas económicas y sociales que se derivan del mismo, temas para los cuales existe una gran tradición investigadora y una abundante bibliografía (Houghton, 1985; Katz y Murphy, 1997; Ludlum, 1989; Freebairn y Zillman, 2002; Gunasekera, 2004; Burroughs, 1997; Nicholls, 1996). A su vez, dentro del clima, obviaremos los aspectos relativos a las relaciones concretas que éste establece con las diferentes actividades humanas, algunas de las cuales también han sido objeto de estudios muy avanzados por sus importantes repercusiones económicas y sociales; tal es el caso de la agricultura (Sonka et al., 1986; Luo et al., 1994; Mjelde y Penson, 2000), la actividad forestal (Sisak y Pulkrab, 2002), la arquitectura (Hui y Tsang, 2005), la salud (Epstein, 1999), el turismo (Shackleford y Olsson, 1995), la energía (Roulston et al., 2003; Hamlet et al., 2002) y tantas otras. Nuestra intención es centrarnos en los aspectos más generales que presiden las relaciones clima-sociedad; unas relaciones en las que nos interesa destacar dos hechos esenciales: en primer lugar, la influencia extraordinaria que el clima puede ejercer sobre la sociedad, hasta el punto de que sería necesario que pasara a incorporarse como una variable más en los procesos de planificación y ordenación territorial; en segundo lugar, la escasísima presencia, cuando no clara ignorancia, que existe del clima en estos mismos procesos de ordenación del territorio. Creemos que hay razones ligadas a la propia naturaleza del clima que explican esta ignorancia; también pensamos que de ello se derivan tareas y obligaciones importantes a desarrollar por parte de la climatología en los momentos actuales. Intentaremos explicitar ambas cuestiones.

Pero, además, partimos de la idea de que en la actualidad las relaciones entre el clima y la sociedad son cada vez más bidireccionales, pudiendo incluso afirmarse que las repercusiones de la sociedad sobre el clima en los momentos actuales adquieren igual o mayor importancia que la tradicional influencia del clima sobre la sociedad, siendo paradigmático en este sentido el fenómeno del cambio climático. También es nuestra intención analizar este importante aspecto de la cuestión. En consecuencia, abordaremos en primer lugar la influencia del clima sobre la socie-

dad, enfatizando las posibilidades y dificultades para su necesaria inserción en los procesos de ordenación del territorio; a continuación plantearemos el tema de las influencias crecientes que la sociedad ejerce sobre el clima; por último estableceremos las conclusiones más relevantes en relación con ambos temas.

2. LA INFLUENCIA DEL CLIMA SOBRE LA SOCIEDAD

2.1. La inserción del clima en la ordenación del territorio: dificultades y retos

En términos sencillos la ordenación del territorio puede entenderse como la actividad destinada a asignar a cada parcela del territorio los usos o las actividades a través de los cuales se obtenga un mayor partido del mismo, maximizando sus ventajas y minimizando sus inconvenientes. Ello suele implicar la fragmentación del territorio y el establecimiento para cada una de las unidades o parcelas resultantes de ciertas limitaciones de uso, o a veces claras prohibiciones; en sentido contrario, también se pueden establecer recomendaciones de usos que se consideren especialmente adecuados para ese espacio, y en otras ocasiones, el planificador se limita a autorizar los usos, pero estableciendo ciertas normas. En el fondo, en todos los casos, se persigue el mismo objetivo: lograr para el suelo el uso más adecuado.

Lógicamente, en este proceso tiene que intervenir el medio físico, y lo hace, en primer lugar, como mero soporte de los usos y las actividades, pero además lo hace a través de tres vías principales: los *recursos naturales*, que siempre han ocupado un lugar preferente en la ordenación del territorio, dado que con ella se persigue su gestión adecuada; más recientemente ha empezado a participar también a partir de los *riesgos*, que intentan minimizarse o, cuando menos, reducir la vulnerabilidad de la sociedad frente a ellos; por último, también interviene cada vez más a través de los *problemas de deterioro ambiental*, que intentan reducirse al mínimo en la búsqueda de un desarrollo sostenible en términos económicos, sociales y ambientales.

Siendo ello así, lo lógico sería que el clima ocupara un lugar relevante en los procesos de ordenación del territorio, dado que es un recurso vital para la sociedad —estando además en la génesis de otros muchos recursos—, es una fuente de riesgos nada desdeñable y, desde luego, protagoniza algunos de los problemas ambientales que más preocupación suscitan en la actualidad, como la contaminación atmosférica o el cambio climático. Sin embargo, la realidad es que el papel del clima en la ordenación del territorio es muy reducido cuando no inexistente. Ello refleja dificultades para la inserción del clima en estos procesos, las cuales proceden básicamente de que sus peculiaridades se adaptan mal a dos de las exigencias fundamentales que la ordenación del territorio tiene para poder llevarse a cabo: la precisión espacial y la precisión en la caracterización de los fenómenos.

Para ordenar el territorio y atribuirle los usos y las actividades más adecuadas es necesaria una cartografía precisa, con líneas que delimiten claramente las unidades territoriales y los fenómenos que en ellas se dan. Además, es necesario que esos fenómenos que se cartografián estén también caracterizados con precisión como buenos o malos, favorables o desfavorables,

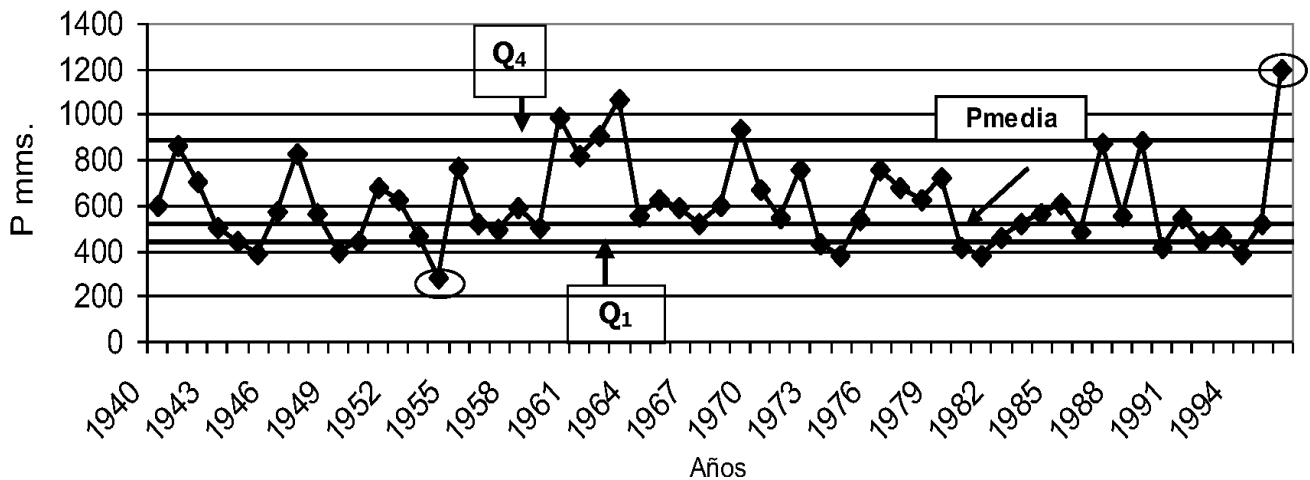


Figura 1. La variabilidad temporal de las series de observación en climatología. Precipitaciones anuales en la cuenca del Guadalquivir (1940-97). Fuente: Elaboración propia.

vulnerables o resistentes, en orden a estimularlos, evitarlos, favorecerlos, protegerlos en mayor o menor medida etc.

Pues bien, en el clima no es fácil alcanzar ninguno de esos niveles de precisión requeridos, en virtud de que el clima es esencialmente *variabilidad*; en primer lugar, *variabilidad espacial*, lo cual dificulta el propio conocimiento y la cartografía del clima pero, sobre todo, *variabilidad temporal*, la cual impide toda precisión en la caracterización de los fenómenos y determina que éstos puedan ser polivalentes, buenos y/o malos, favorables y/o desfavorables a la vez, dependiendo de los momentos, de los espacios o incluso dentro de un mismo espacio.

La variabilidad temporal del clima forma parte de su misma esencia, hasta el punto de que la tarea primera y esencial del climatólogo es la de reducir esa variabilidad por medio de la estadística. Supuesta la aleatoriedad de una serie de observación, ésta será caracterizada a partir de algún parámetro de tendencia central (la media o la mediana son los más frecuentes), que será el valor que la represente en la cartografía correspondiente. Pero resulta evidente que la inmensa variabilidad que caracteriza a las series climatológicas nunca puede ser representada a partir de un solo valor, de ahí que la caracterización suela completarse a partir de algún parámetro de dispersión, indicativo de la magnitud de las fluctuaciones en torno al valor central (el rango de la variable, la desviación típica, los quintiles de la serie suelen ser los más utilizados). En la figura 1 exemplificamos estos hechos mediante la serie de precipitaciones de la cuenca del Guadalquivir durante el periodo comprendido entre 1940 y 1997. La precipitación media de la cuenca para ese periodo se sitúa en 585 mm, pero tiene un intervalo de posibilidades mucho más amplio, que se refleja en el comportamiento de sus quintiles extremos, representados en la figura y que oscila entre 1200 mm en el año máximo y algo más de 200 mm para el año más seco. En consecuencia, la expresión de la precipitación a partir de su valor medio resulta de una imprecisión inadmisible para su consideración en los procesos de ordenación territorial; es un valor ambiguo que en nada

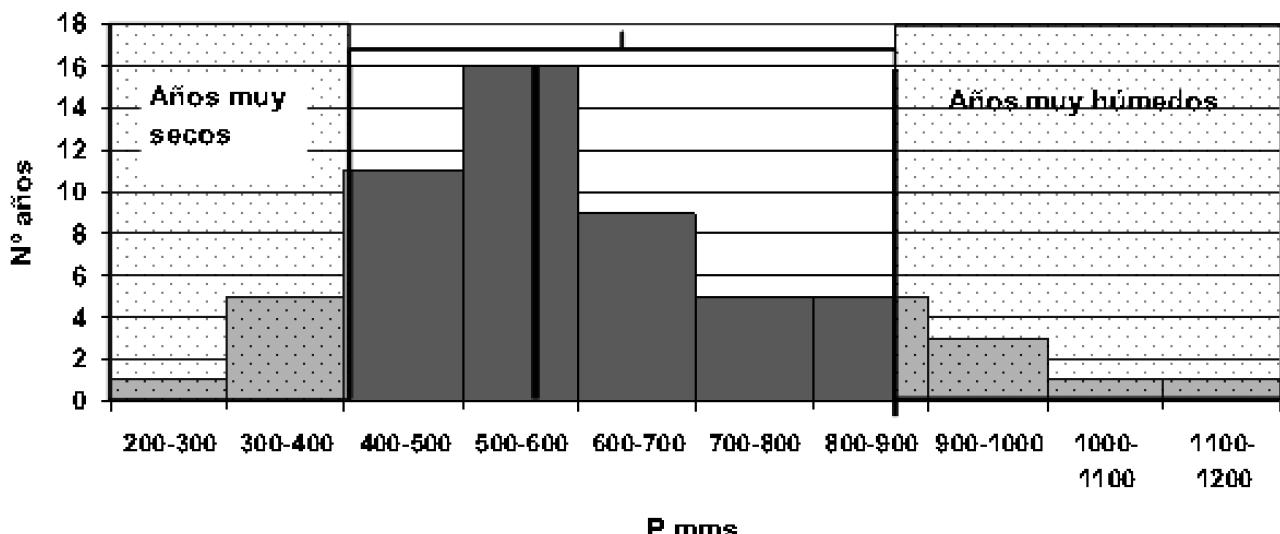


Figura 2. Histograma de frecuencias de las precipitaciones en la cuenca del Guadalquivir.
Fuente: Elaboración propia.

puede asimilarse a los restantes parámetros caracterizadores del medio natural: la geología, la cubierta vegetal, los suelos, realidades todas muy concretas y no sometidas a ambigüedades de ningún tipo. El valor medio de 585 mm de lluvia apenas nos aporta información acerca de la precipitación caída; muchos totales anuales de lluvia son posibles, cada uno de ellos con una determinada frecuencia o probabilidad de ocurrencia, que serían los términos que deberíamos utilizar para estos temas, aunque resulten mucho más difíciles de transmitir a los usuarios del espacio y a los gestores de la planificación.

En realidad, el conocimiento del clima —en el caso de nuestro ejemplo, las precipitaciones— necesita, más que un valor medio, el examen de la distribución de frecuencias de la serie, la cual aporta muchas más precisiones en torno al comportamiento de las variables. Pero, además, el histograma de frecuencias va a permitir establecer una distinción importante de cara a la gestión y a los impactos del clima: la distinción entre los fenómenos habituales y los fenómenos raros y extremos (ver figura 2).

Los *fenómenos habituales* son aquellos situados en torno a los parámetros de tendencia central de la serie y presentando una alta frecuencia de aparición. Por su parte los *fenómenos raros y extremos* se sitúan en los límites del campo de variabilidad de la serie y con frecuencias de aparición mucho más bajas. Ambos tipos de fenómenos, además de individualizarse desde un punto de vista matemático, tienen un claro reflejo en la realidad, puesto que ejercen efectos totalmente diferentes sobre la sociedad. Los fenómenos habituales, precisamente por su alta frecuencia, son los que generan un medio propio y una respuesta social específica. Cada lugar del planeta ostenta un medio natural peculiar que responde a los ambientes atmosféricos que en él se dan con más frecuencia. Así mismo, la sociedad en cada lugar se adapta a las condiciones atmosféricas habituales y en función de ellas organiza su vida y sus actividades.

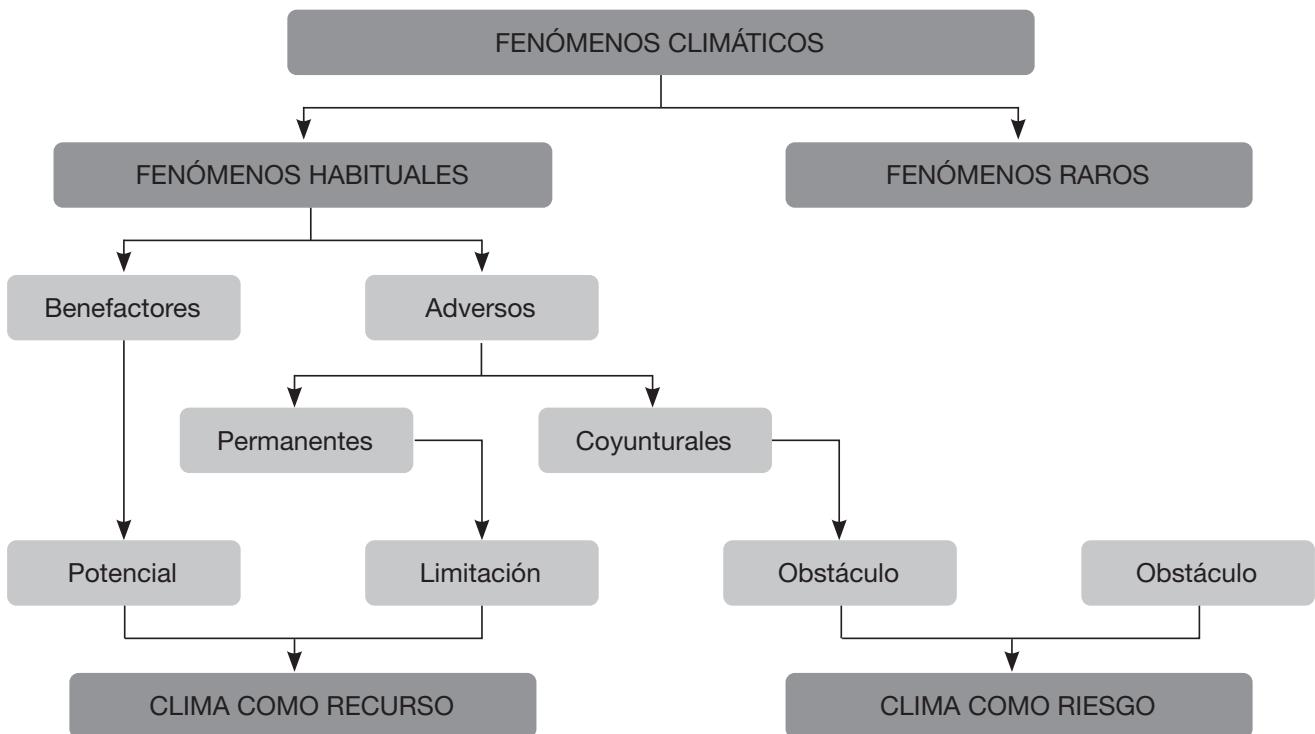


Figura 3. Tipología de los fenómenos climáticos en función de su impacto sobre la sociedad.
Fuente: Elaboración propia.

Pero este es el único rasgo común que presentan, puesto que pueden ser muy diferentes en sus impactos, distinguiéndose en este sentido dos tipos básicos: los que resultan benefactores o neutros para la sociedad, posibilitando su desarrollo y constituyendo lo que podemos denominar el potencial climático del lugar, y aquellos que dificultan u obstaculizan ese mismo desarrollo. A su vez, dentro de estos últimos podemos distinguir dos tipos diferentes: los que actúan de modo permanente o casi permanente dificultando la vida social y limitando sus posibilidades, y aquellos otros que sólo actúan durante cortos períodos de tiempo, aunque de modo recurrente y habitual (ver figura 3). Ejemplifican bien los primeros la escasez de agua de los grandes desiertos o la escasez de energía calorífica de los casquetes polares. Entre los segundos se sitúan, por ejemplo, los ciclones tropicales, tornados y otro tipo de perturbaciones de corta duración, pero que ponen en juego tales cantidades de energía, que resultan devastadoras para la sociedad durante su ocurrencia. No obstante, una vez acaecidas, el clima vuelve a adquirir su cara beneficiaria o neutra, permitiendo el desarrollo de la vida colectiva. Los primeros pueden ser denominados como *limitaciones*, ya que son, en efecto, caracteres climáticos limitantes para la sociedad, en tanto que los segundos pueden catalogarse como *obstáculos*, ya que cumplen el papel de barreras circunstanciales que el clima impone a la sociedad y que ésta debe sobremontar.

En cuanto a los *fenómenos raros y extremos*, éstos, meramente por su baja frecuencia, y su ruptura de los ritmos climáticos habituales, suponen un cierto stress para el medio y la sociedad y

exigen buenas dosis de esfuerzo para recuperar la normalidad; en consecuencia, constituyen un obstáculo, aunque no sean en sí mismos dañinos ni limitadores. Los 585 mm de precipitación que constituyen la normalidad en la cuenca del Guadalquivir, constituirían una sequía desastrosa en los Alpes Escandinavos o en la Amazonía, por su mero carácter de fenómenos anómalo y extraordinario en estos medios. Algo similar sucedería con unas temperaturas de 5º, en principio inofensivas, si éstas tuvieran lugar en el mes de agosto en el sur del Mediterráneo. Por eso pueden ser catalogados como obstáculos al mismo nivel que los analizados hace un momento entre los fenómenos habituales. Y es que ambos tienen muchos elementos en común: ambos son devastadores para la sociedad durante un tiempo corto, son imprevisibles en su acaecimiento, y sorprenden a la sociedad inadaptada para asimilarlos sin perjuicio, aunque en el segundo caso la inadaptación se deba a la rareza de los fenómenos y en el primero a la naturaleza intrínseca de éstos.

Considerando en conjunto todos los fenómenos climáticos susceptibles de producirse en un lugar, podríamos reducirlos a dos modos de actuación fundamental de cara a la sociedad: la actuación del *clima como recurso*, que no sería sino el balance entre su potencial y sus limitaciones, y la actuación del *clima como obstáculo*, que resulta de la intervención de fenómenos adversos coyunturales o de fenómenos raros y no habituales, por su presencia fuera de tiempo o fuera de lugar (Pagney, 1994). Cada uno de estos dos modos de actuación, por sus distintas repercusiones sobre la sociedad, requerirá unas vías específicas de análisis por parte de la climatología.

2.2. El clima como recurso

Para el análisis del clima como recurso es importante tener en cuenta que éste interviene a través de dos tipos de influencias diferentes: una *influencia indirecta*, a través de la producción de los recursos naturales que el hombre utiliza para el desenvolvimiento de su vida, y una *influencia directa*, derivada del hecho de que el clima, en tanto que sucesión variable de ambientes atmosféricos es la ambientalidad, la condición de existencia, tanto del medio como de la sociedad (ver figura 4). Ambas revisten también formas diferentes y exigen de la climatología actitudes distintas.

Si nos centramos en la *influencia indirecta*, observamos al clima como fuente importante de recursos para la sociedad: recursos vivos, en primer lugar, que dependen en gran medida del comportamiento climático, pero también recursos hídricos y energéticos, que son estrechamente dependientes del clima. Prescindiendo de los recursos vivos, los hídricos y energéticos gozan de una naturaleza física o material que les otorga el carácter de ser regulables, es decir, son recursos que se pueden almacenar y transportar de unos lugares a otros. Ello determina que las escalas espaciotemporales de actuación del clima por esa vía sean relativamente difusas y la dependencia espacio-temporal sea moderada. Por ello la dependencia de la sociedad respecto al clima en tanto que fuente de recursos naturales goza de cierta flexibilidad.

La *influencia directa* se deriva del carácter de ambientalidad que el clima tiene para el hombre y sus actividades, entendiendo por tal una cualidad del medio sin ninguna entidad física o material (una determinada temperatura, un valor de humedad etc.). Este carácter de atributo del clima, este carácter de cualidad no almacenable ni transportable determina para él unas

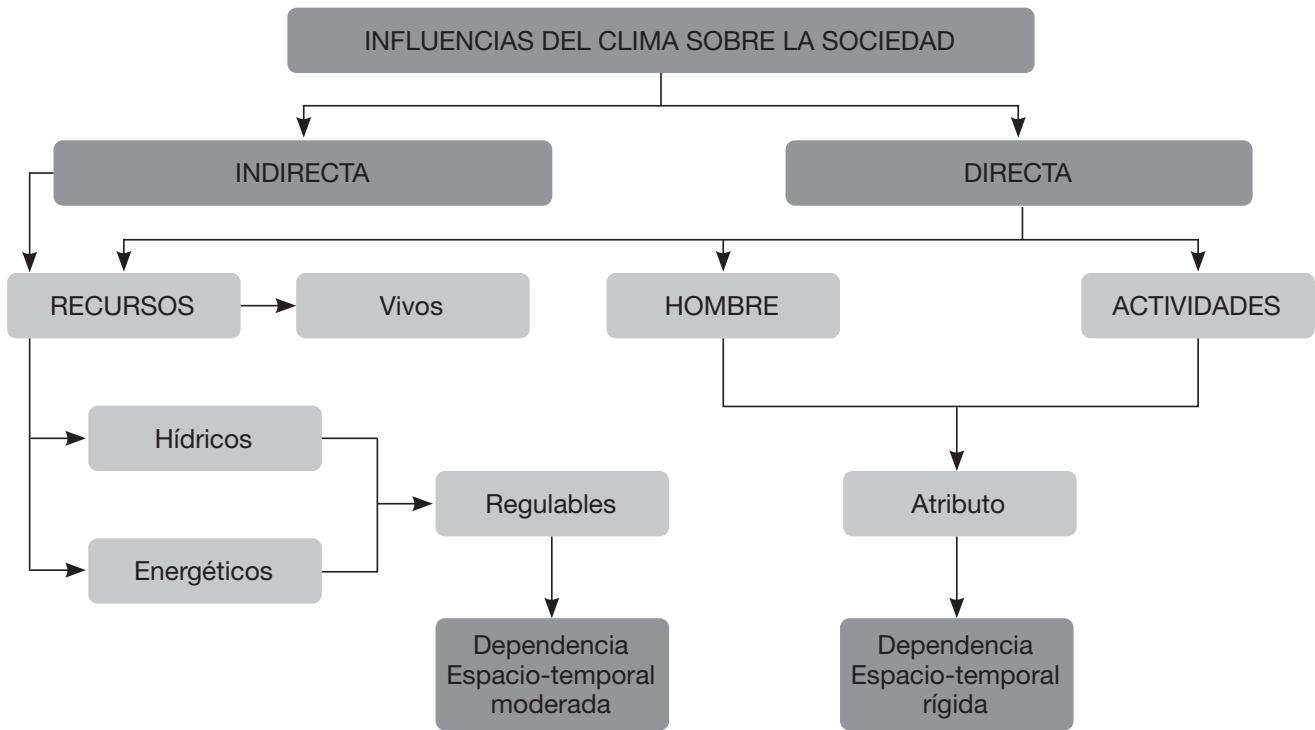


Figura 4. Las influencias del clima sobre la sociedad. El clima como recurso. Fuente: Elaboración propia.

escalas espacio-temporales de actuación muy precisas y detalladas (cada punto concreto de la superficie terrestre experimenta en cada momento un ambiente atmosférico peculiar al que se ven sometidos el hombre y sus actividades). En consecuencia, se genera una dependencia muy rígida de la sociedad respecto al clima como ambientalidad.

Esta diferencia será capital a la hora de abordar los estudios necesarios para una adecuada gestión del clima y su inserción en la ordenación del territorio: los estudios necesarios para la planificación de los recursos podrán desarrollarse sobre amplios espacios, como cuencas vertientes o grandes regiones, requiriendo, de cualquier forma, diversidad de escalas espacio-temporales en función del recurso de que se trate. Por el contrario, los estudios relativos a la instalación sobre el espacio de asentamientos humanos o de las distintas actividades habrán de abordar el clima a escalas muy detalladas, a fin de captar la gran variabilidad espacial que presentan los elementos del clima y a los cuales las actividades económicas y el hombre son muy sensibles. En este caso lo importante es la parcela, la ubicación concreta en la que se pretende instalar una determinada actividad, con sus características topográficas y fisiográficas peculiares, que la dotarán de unos valores climáticos muy precisos, que son los que influirán definitivamente en el desarrollo de estas actividades.

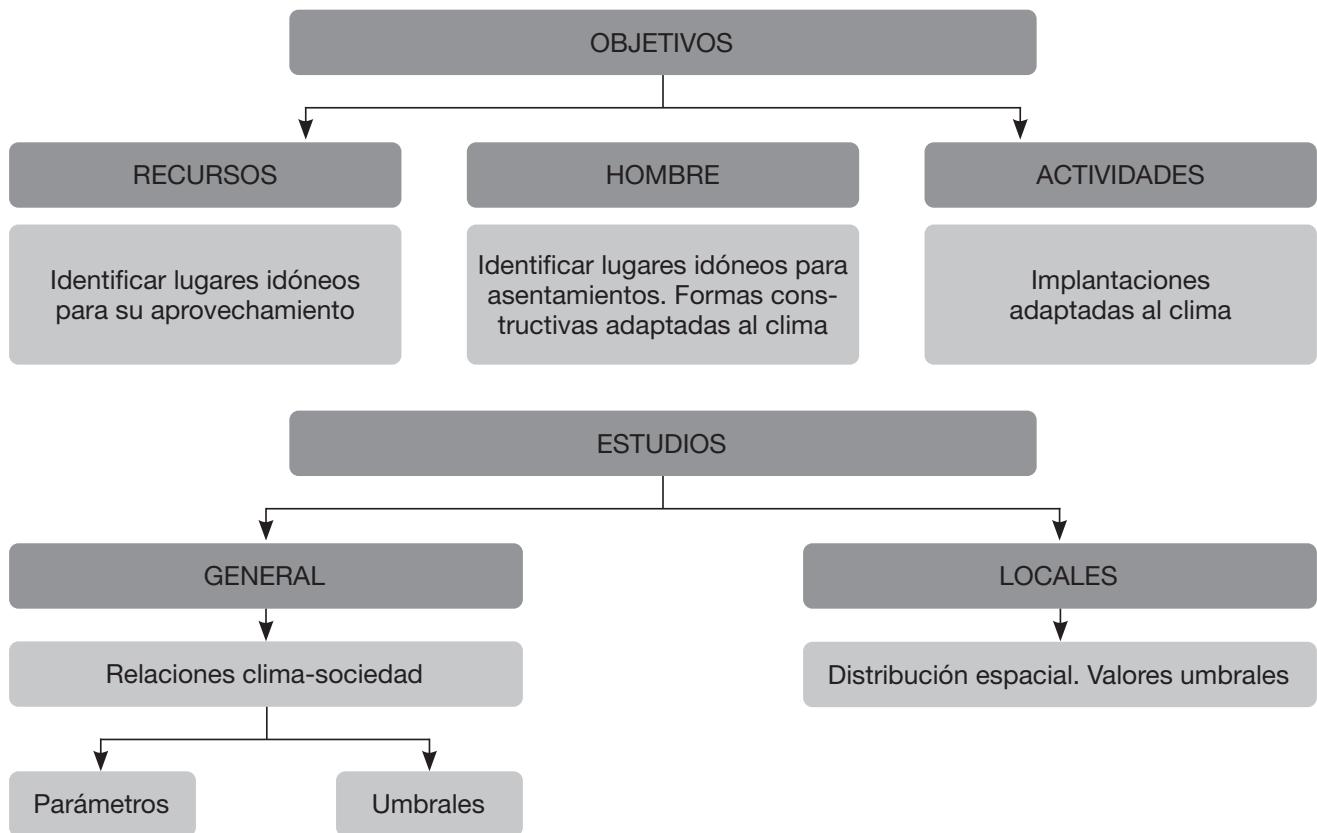


Figura 5. El estudio del clima como recurso. Fuente: Elaboración propia.

Si llevamos estas consideraciones al papel que la climatología debería jugar para lograr una gestión óptima del clima como recurso, éste debería centrarse en asesorar a la sociedad en torno a los lugares idóneos para el aprovechamiento de los recursos hídricos y energéticos; también en torno a los lugares idóneos para la instalación de los asentamientos humanos o, en su defecto, las formas constructivas más aptas para cada ámbito espacial (reuniendo el máximo grado de confort con un mínimo coste energético); y en torno a la implantación en cada lugar de las actividades más productivas para su potencial climático y más inmunes a sus limitaciones (ver figura 5).

Ello implica para la climatología la necesidad de desarrollar estudios de una doble índole: en primer lugar, una investigación de carácter general, tendiente a determinar las relaciones existentes entre el comportamiento climático y el comportamiento respectivo de los recursos, el organismo humano o las actividades económicas. En ella habrá que determinar, sobre todo, qué parámetros climáticos intervienen en esa relación y qué valores de esos parámetros son especialmente significativos en la misma, entendiendo por tales aquellos umbrales que propicien o dificulten de manera clara la producción de los recursos hídricos y energéticos, el bienestar humano y el desarrollo de las actividades. Además, habrá que hacer una investigación de carácter regional o local destinada a determinar la distribución espacial de esos valores, al objeto

de definir los lugares más idóneos para cada una de las actividades. Lógicamente, la cartografía de los umbrales habría de expresarse en términos de probabilidades de ocurrencia, abordando simultáneamente un esfuerzo importante de transmisión de estos conceptos a la mayoría de los usuarios de la información climática.

Queda aún mucho por hacer en ese sentido. En primer lugar, falta voluntad política para la inclusión del clima en la ordenación del territorio, pero es cierto también que están aún muy poco desarrollados los estudios necesarios para que esta inserción pueda efectuarse. Está algo más desarrollada la investigación de orden general, y existen ya abundantes indicadores climáticos orientados a aplicaciones, como resultado de los esfuerzos empleados en la modelización numérica de las relaciones entre el clima y las diferentes actividades humanas (Mac Kendry, 2002). Son clásicos ya, aunque cada día mejorados, los modelos hidrometeorológicos (Cazorzi y Dalla Fontana, 1996) o los agroclimáticos (Kravchenko et al., 2000), y gozan también de cierto desarrollo y solidez los modelos de difusión de los contaminantes (Bischoff-Gauss et al., 1998) o los que ligan el clima con el confort humano (Matzarakis et al., 1999). Pero cada día se modelizan nuevos impactos del clima, tales como los recursos energéticos (Broesamle et al., 2000), la biodiversidad o tantos otros. La continuación de esta trayectoria, junto con el estudio de las adaptaciones de estos modelos a las peculiaridades de cada región, serían ahora el objetivo a cubrir en esta fase de la investigación.

Pero aún son muy incipientes los estudios de carácter local y detallado susceptibles de poner esta información a la escala en la que interactúan el hombre y el clima, a la escala, en suma, necesaria para las aplicaciones de la climatología. En este sentido sería también importante desarrollar técnicas de modelización numérica, pero en este caso modelización de las variables climáticas a partir de las variables fisiográficas y esencialmente topográficas, las cuales están estrechamente relacionadas con aquéllas. La temperatura y sus magnitudes derivadas, tales como las heladas, por su fuerte dependencia del relieve, son algunas de las variables que mejor responden a estos métodos (Ninyerola et al., 2000). También son objeto prioritario de aplicación aquellas variables muy escasamente medidas en el espacio, pero con unas aplicaciones evidentes, como es el caso de la radiación solar o el viento (Mengelkamp, 1999). Sin duda los Sistemas de Información Geográfica deben ser aliados insustituibles en esta tarea (Chapman y Thornes, 2003; Agnew y Palutikof, 2000) al permitir capturar, modelizar, analizar y visualizar datos espaciales, lo que facilita la producción en rutina de atlas climáticos a escalas detalladas y orientados a las aplicaciones del clima y a su inserción en los procesos de ordenación territorial (Felicísimo, 1992; Felicísimo et al., 2001).

2.3. El clima como riesgo

El clima puede actuar también como riesgo y los riesgos sí empiezan ya a tener alguna presencia en la ordenación del territorio (Olcina Cantos, 2002; Pita López, 1999). En este caso los climatólogos están obligados a poner a disposición de los planificadores los análisis y las cartografías que necesitan para llevar a la práctica de manera eficaz las disposiciones legales que ya existen en relación con la prevención y gestión de los riesgos. Para ello conviene tener presente la clasificación que antes establecimos entre dos tipos de riesgos diferentes



Figura 6. Clasificación de los riesgos climáticos con arreglo a sus repercusiones sobre la ordenación del territorio. Fuente: Elaboración propia.

en cuanto a sus orígenes: los desastres asociados a fenómenos coyunturales y muy intensos, aunque derivados del comportamiento habitual del clima, y aquellos que se generan como consecuencia de los comportamientos anómalos del clima, aunque no revistan especial intensidad (ver figura 6).

Los primeros, ejemplificados por fenómenos tales como los huracanes, tornados, gotas frías, temporales de viento, tormentas de arena o granizadas, pertenecen a la categoría de los denominados desastres intensivos (Pita López, 1999). Son desastres brutales, asociados al despliegue de grandes niveles de energía, y se caracterizan por ser desastres dicotómicos, es decir, que se producen o no se producen. Es también un rasgo característico de ellos el que impactan a todos los sectores de actividad porque suelen ser tan destructivos que arrasan con todo lo que encuentran a su paso, lo cual determina que tengan una peligrosidad claramente identificada. De todo ello se deriva un alto nivel de precisión en la caracterización de estos fenómenos, que son en sí mismos perjudiciales y dañinos sin ningún género de duda. La precisión espacial no es tan nítida y, desde luego, no permite la cartografía de los fenómenos en un dibujo estático, a la manera de la representación de los volcanes, las llanuras de inundación o las fallas transformantes, pero, al menos, permite cartografiar la probabilidad de ocurrencia del desastre asociada a los

distintos lugares a partir de las trayectorias pasadas registradas por este tipo de fenómenos, lo cual constituye un instrumento de cierta utilidad.

En los desastres ocasionados por fenómenos raros la imprecisión es total en la propia caracterización. En principio pueden darse en cualquier lugar, porque todos los lugares del mundo son susceptibles de experimentar fenómenos climáticos poco habituales; ello implica una ausencia de dimensión territorial, que en nada beneficia a su tratamiento en la ordenación territorial. Además, no son fenómenos dicotómicos, sino que existen multitud de situaciones entre el fenómeno normal y el anómalo (piénsese, por ejemplo, en las dificultades de establecer el inicio de una sequía a partir de una situación excedentaria en agua o en los problemas inherentes al intento de definir los umbrales separadores entre una situación térmica normal y una ola de frío o calor). Por otro lado, sus impactos son sólo parciales, afectan a determinados sectores de actividad, pero no al conjunto de la sociedad, con lo cual es ya incluso difícil identificar la propia peligrosidad del fenómeno. De hecho, en estos desastres suele producirse la paradoja de que las pérdidas generadas suelen ser inversamente proporcionales a su frecuencia de aparición (recuérdese el elevado número de muertos generados por la ola de calor del verano de 2003 en París, muy superior al registrado en Madrid o Sevilla, con temperaturas mucho más elevadas, o las enormes pérdidas económicas que pueden ocasionar unas heladas tardías en áreas de clima benigno, como Almería, frente a la inocuidad que éstas tienen en ámbitos muy fríos, como las áreas de montaña).

En estos casos, pues, la dificultad es aún mayor para la inserción del clima en la ordenación del territorio, y el reto para la climatología es mucho más difícil, porque es su obligación ofrecer a los responsables de la gestión la información climática en los términos en los que éstos la necesitan. Ello exige desde el inicio acudir a la sociedad para examinar los impactos de los fenómenos anómalos del clima, porque es sólo en esa respuesta social y no fuera de ella donde podrán encontrarse los umbrales separadores entre el fenómeno anómalo y el desastre climático.

Pero el clima no sólo genera sus propios riesgos, sino que además participa activamente en la configuración de otros, tales como los riesgos hidrometeorológicos (especialmente las inundaciones, los aludes o los fenómenos de erosión costera), los biometeorológicos, entre los que destacan los incendios forestales, y algunos geológicos, como los suelos expansivos, los movimientos de laderas o los fenómenos de subsidencia del terreno por extracción de agua (ver figura 7).

En todos ellos es tónica común el que el clima participe poniendo el evento concreto que desencadena el desastre, el cual se sobreimpone a la condición del mismo, que es fija y que está constituida por todos aquellos rasgos del territorio que propician su acaecimiento y que son los que realmente se cartografián para caracterizar la peligrosidad. En el caso de una inundación el evento desencadenante del desastre es el episodio de precipitación torrencial, pero la condición que la propicia es la llanura de inundación, que es la que se cartografía en el análisis de la peligrosidad; la ola de calor asociada a fuertes vientos desencadena el incendio forestal, pero éste se produce en una determinada masa forestal dotada

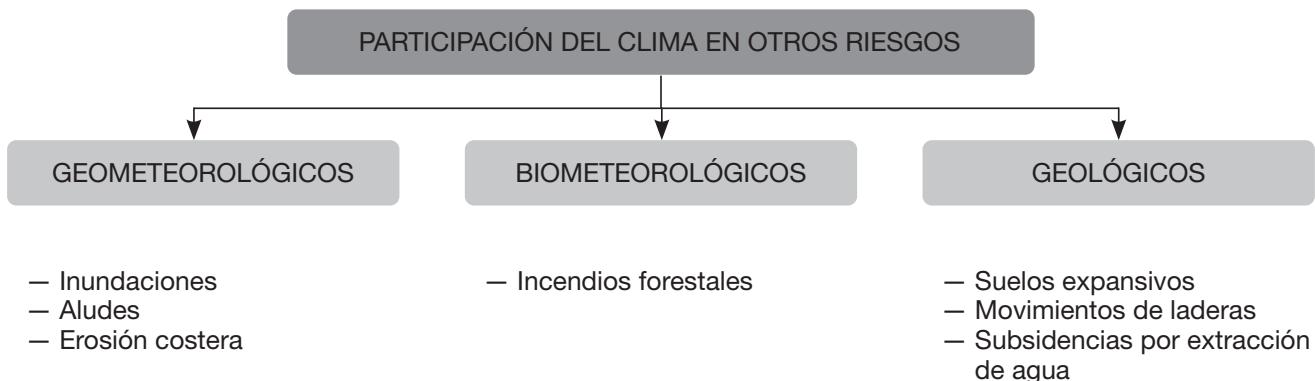


Figura 7. Participación del clima en riesgos extraclimáticos. Fuente: Elaboración propia.

de cierta combustibilidad; el temporal desencadena el episodio de erosión costera, pero su condición de posibilidad es la existencia de una franja costera de determina anchura, con ciertos rasgos geomorfológicos, posible presencia de construcciones etc.; las laderas inestables son la condición de posibilidad de los movimientos de laderas y son las que se someten a cartografía, aunque un episodio de lluvias intensas pueda ser el desencadenante de esa inestabilidad.

En todos estos casos es apreciable la dificultad inherente a la inserción del clima en las cartografías de peligrosidad, instrumentos de primer orden para la ordenación del territorio. Las manchas de peligrosidad en los mapas las definen los fenómenos fijos y estables, y probablemente así seguirá siendo, pero desde la climatología se debería poder ofrecer una intervención más activa de los episodios climáticos desencadenantes como un factor ponderador importante en la asignación de peligrosidad a las diferentes unidades territoriales. Esa tarea aún está en buena medida por realizar.

Si nos preguntamos ahora acerca del papel que la climatología debería jugar para lograr una gestión óptima del clima como riesgo, no debemos olvidar que aquí el objetivo esencial sería el de minimizar los impactos de los obstáculos climáticos. Tal objetivo se logra esencialmente a través de la implantación en cada lugar de las actividades más inmunes a sus riesgos y de la prevención de los mismos, al objeto de reducir los daños. Ello exigiría disponer de inventarios y cartografías precisas de todos los riesgos susceptibles de producirse en el territorio. En el caso de los riesgos asociados al acaecimiento de fenómenos raros y extremos, se hace obligado el análisis de la variabilidad climática del espacio estudiado, pero también la fijación de los umbrales que separan los fenómenos desastrosos de los benefactores o neutros, para lo cual la climatología debe acercarse por fuerza a la sociedad y a los impactos que ésta experimenta, porque son los impactos los que fijan los umbrales que separan los fenómenos extremos de los fenómenos desastrosos. También es obligado estudiar los impactos que estos obstáculos generan en las distintas actividades a fin de catalogarlas con arreglo a su grado de vulnerabilidad y tomar las medidas defensivas más oportunas en

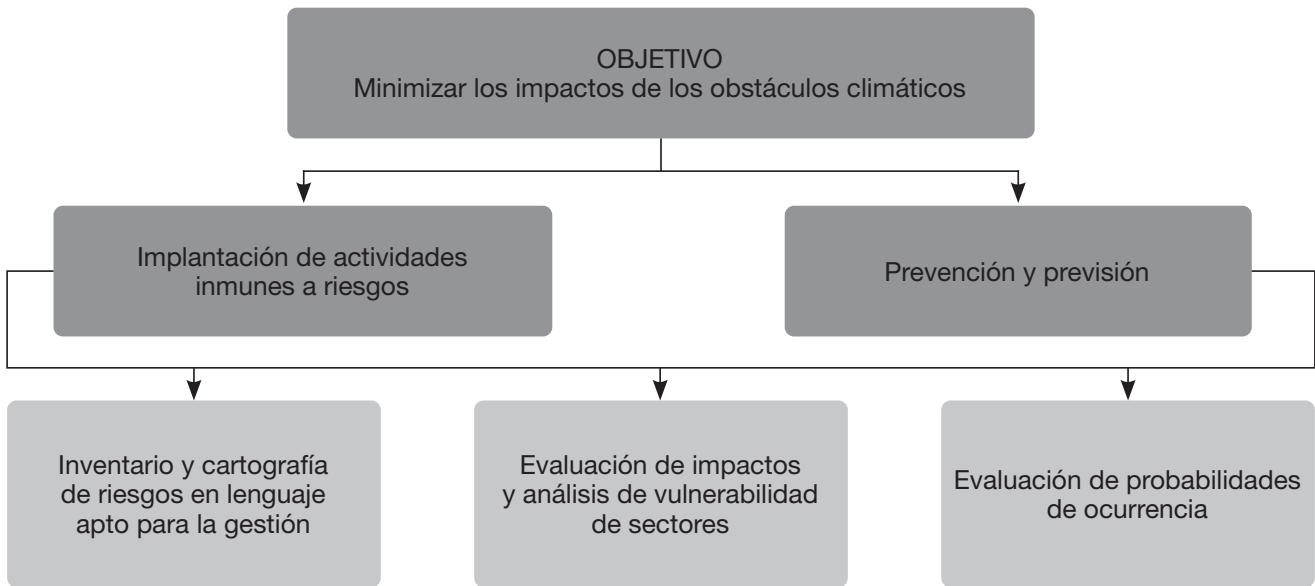


Figura 8. El estudio del clima como riesgo. Fuente: Elaboración propia.

cada caso. Por último, habría que estudiar la probabilidad de ocurrencia de los distintos obstáculos climáticos como medida de prevención de los mismos y del riesgo social que implican (ver figura 8).

3. LA INFLUENCIA DE LA SOCIEDAD SOBRE EL CLIMA

La sociedad también tiene una gran capacidad de influencia sobre el clima, como se ha puesto claramente de manifiesto a raíz de los estudios propiciados por el problema del cambio climático, siendo además una capacidad creciente con el tiempo. Hay dos aspectos esenciales en el ejercicio de esta influencia: en primer lugar, el papel cada vez más activo que juega la naturaleza de la superficie terrestre como variable clave dentro de los componentes del sistema climático, y no hay que olvidar que la superficie terrestre en cada vez en mayor medida un producto de responsabilidad social; en segundo lugar, el protagonismo de la superficie como emisora/captadora de gases de efecto invernadero, GEI y, por ende, como principal responsable del efecto invernadero y del cambio climático.

En relación con el primer aspecto, es importante recordar que hasta los años setenta del siglo el clima era un fenómeno que concernía exclusivamente a la atmósfera, de manera tal que los modelos climáticos sólo incluían esta componente en sus análisis. Desde entonces hasta aquí cada vez nuevos componentes se han ido introduciendo en el sistema y han adquirido un progresivo protagonismo (ver tabla 1). La superficie terrestre como tal se introduce en los años ochenta, pero desde entonces hasta ahora se van introduciendo nuevos elementos que, o bien son tipos específicos de superficies (es el caso de los océanos o las extensiones de hielo), o

bien son productos derivados directamente de esta superficie y de los usos del suelo asociados (es el caso de los aerosoles o la dinámica de la vegetación).

Efectivamente, la sociedad cada vez es más consciente del importante papel que juegan en el equilibrio climático los intercambios que se realizan entre la atmósfera y la superficie terrestre, intercambios que dependen esencialmente de variables superficiales tales como el albedo, la emisividad, la temperatura, el contenido de humedad o la rugosidad. Pero no hay que olvidar que cada vez un porcentaje más importante de los continentes es producto de la intervención humana, bien a través de intervenciones directas (urbanismo, grandes explotaciones agrícolas, instalaciones industriales, implantaciones ganaderas o forestales etc...), bien a través de las consecuencias derivadas de otras intervenciones (desertización como consecuencia de sobre-explotación del territorio o de incendios forestales masivos etc.). Por esta vía la sociedad acaba convirtiéndose en gestora de su propio clima, y no sólo en las escalas locales, en las cuales el fenómeno es muy evidente y conocido desde hace años (Fernández García et al., 1998), sino también en las escalas globales.

Tabla 1. Evolución de los componentes de los modelos climáticos. Fuente: Elaboración propia a partir de modificaciones de <http://www.ipcc.ch/graphics/gr-climate-changes-2001-wg1.htm>.

Años 70	Años 80	Inicio años 90	Mediados años 90	Finales años 90	Inicio años 2000	Actualidad
Atmósfera	Atmósfera	Atmósfera	Atmósfera	Atmósfera	Atmósfera	Atmósfera
	Superficie terrestre					
	Océano y mar de hielo					
		Aerosoles de sulfato				
			Otros aerosoles	Otros aerosoles	Otros aerosoles	Otros aerosoles
				Ciclo del carbono	Ciclo del carbono	Dinámica de la vegetación
						Química atmosférica

A pesar de esta realidad incontestable, desde la climatología todavía no se ha convertido a la variable uso del suelo en una variable climática y esa será una tarea a abordar en los años que vienen: la obtención de parámetros de utilidad climática a partir de la variable uso del suelo.

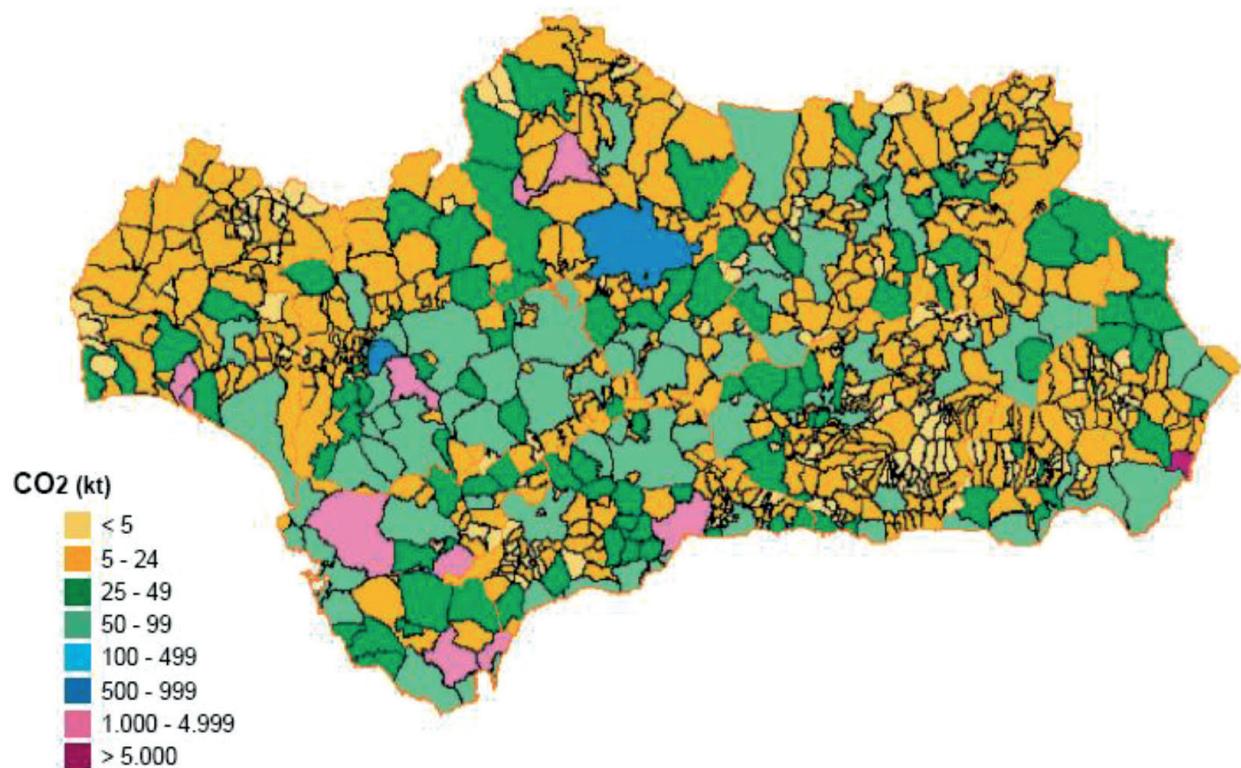


Figura 9. Emisiones de GEI en Andalucía en al año 2003 a escala municipal (Kt de CO₂ equivalente). Fuente: Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. (<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/>).

En relación con el segundo aspecto, hay que destacar la importante influencia que la sociedad ejerce en el clima a través de la emisión hacia la atmósfera de GEI, de los cuales se derivaría en un plazo más o menos dilatado un proceso de calentamiento global (IPCC, 2007). La asunción de esta idea por parte de la sociedad es ya tan extendida que se han suscrito convenios internacionales —como el Protocolo de Kyoto— destinados a frenar la escalada creciente de emisiones por parte de los países con mayores responsabilidades en este sentido. Ello implica la necesidad de inventariar anualmente las emisiones realizadas por parte de los distintos países, tarea que ya se viene realizando desde hace más de una década y con unos niveles de detalle espacial que alcanzan la escala municipal (ver figura 9).

Tal nivel de detalle espacial es posible porque, en el fondo, tanto las emisiones como los sumideros de GEI son un fiel reflejo de las actividades de la sociedad y de los usos del suelo que se asignan a cada espacio. Las instalaciones industriales, los transportes o los consumos de energía asociados a la calefacción y refrigeración se traducen en elevados niveles de emisiones de CO₂, los usos agrícolas se reflejan en fuertes niveles de óxidos de nitrógeno, el metano recoge esencialmente en su distribución la dedicación ganadera del suelo o las plantas de tratamiento de residuos, y así sucesivamente. La asociación entre emisiones y usos del suelo es tal que, en realidad, los mapas de emisiones sólo en muy escasa medida se realizan a partir de la medición

directa de las emisiones realizadas por las empresas. El sistema habitual de cómputo es la inferencia de las emisiones a partir de las actividades y los usos del suelo existentes en el territorio y de la utilización de factores multiplicadores o coeficientes de emisión aplicables a esas actividades y usos del suelo. Probablemente aquí, como en ningún otro aspecto, se puede visualizar hasta qué punto el clima es un producto social.

De ambas aproximaciones a la influencia de la sociedad sobre el clima se derivan imperativos para los climatólogos que pueden sintetizarse en la necesidad de generar variables útiles para la climatología a partir de las variables relacionadas con los usos del suelo. Ello deriva en una triple exigencia:

- a) La incorporación a los estudios climáticos de la información ya existente sobre la superficie terrestre. En ese sentido la teledetección y la mejora de las estadísticas sobre usos del suelo, que se irían incorporando progresivamente en los estudios acerca del clima, serían las piezas clave.
- b) La generación de nuevas fuentes de información (estadísticas y otras) a la luz de los nuevos problemas que se plantean y para los cuales no se disponía hasta ahora de información. Probablemente éste es el momento en que, desde la climatología, se debe demandar a los Institutos de Estadística Nacionales o Regionales que generen nueva información, hasta ahora inexistente, para abordar estos nuevos problemas.
- c) La generación de nuevos indicadores que transformen esos datos superficiales en información útil para los nuevos problemas planteados.

En suma, la climatología deberá tener un contacto cada vez más estrecho con la sociedad, incorporando y adaptando la información sobre los usos del suelo que ésta suministra en la actualidad, pero, además, demandando nueva información que hasta ahora no había sido necesaria. Pero también hay que destacar que por esta vía de nuevo llegamos a la necesidad de incluir el clima en los procesos de ordenación territorial, aunque en esta ocasión con otra pretensión, la de evitar que las intervenciones humanas sobre el territorio conduzcan a un deterioro irreversible del sistema climático.

RELATIONSHIPS BETWEEN CLIMATE AND SOCIETY

M.^a Fernanda Pita

Dept. of Physical Geography and Regional Geographical Analysis, Seville University, Spain

1. INTRODUCTION

The purpose of this work is to develop some reflections on the essential aspects prevailing in the relationships between climate and society in the current world, and on the role that has to be played by climatology in order to contribute to increasing levels of socioeconomic development. The extension of the topic forces us, however, to put a limit to it and to specify its scope.

Firstly, we would like to specify that we are going to focus exclusively on climate, without tackling the aspects related to weather, its forecast and the relevant economic and social advantages deriving from it, issues that enjoy a large research tradition and plenty of references (Houghton, 1985; Katz and Murphy, 1997; Ludlum, 1989; Freebairn and Zillman, 2002; Gunasekera, 2004; Burroughs, 1997; Nicholls, 1996). Within the topic of climate, we will avoid the aspects relative to the specific relationships that it establishes with the different human activities, some of which have also been subject of advanced studies due to their important social and economic repercussions, as the cases of agriculture (Sonka et al., 1986; Luo et al., 1994; Mjelde and Penson, 2000), forestry (Sisak and Pulkrab, 2002), architecture (Hui and Tsang, 2005), health (Epstein, 1999), tourism (Shackleford and Olsson, 1995), energy (Roulston et al., 2003; Hamlet et al., 2002) and many others. Our intention is to focus on the most general aspects prevailing in the relationships between climate and society. As for these relationships, we are interested in standing out two essential facts: in the first place, the extraordinary influence that climate can have on society, up to the point that it would be necessary to incorporate it as one more variable in the planning and land management processes; in the second place, the very scarce presence, if not sheer ignorance, of climate in these land management processes. We believe that there are reasons linked to the climate nature itself that explain this ignorance; we also think that some tasks and obligations which should be developed by the climatology now derive from it. We will try to explain both issues.

In addition, we start from the idea that relationships between climate and society are nowadays increasingly bidirectional, fact that enables us to state that society repercussions on climate are currently getting the same or even more importance than the traditional influence of climate on society, the phenomenon of the climate change being paradigmatic in this sense. We also intend to analyze this relevant aspect of the issue. Consequently, we will first tackle the influence of climate on society, enhancing the possibilities and difficulties to include it in the land management processes; then we will raise the question of the increasing influence that society has on climate; lastly, we will draw the most important conclusions related to both subjects.

2. INFLUENCE OF CLIMATE ON SOCIETY

2.1. Climate inclusion in land management: difficulties and challenges.

In simple terms, land management can be understood as the activity earmarked to allocate the uses and activities through which to make the most of each plot of the territory, maximizing its advantages and minimizing its disadvantages. This generally implies the territory fragmentation and the establishment of certain use limitations or sometimes clear prohibitions to each of the resulting units or plots; in the opposite direction, use recommendations that are considered specially suitable for this or that space can also be established, and in other occasions, the planner is limited to authorize the uses but setting up certain rules. In the end, in all the cases the same purpose is pursued: to achieve the most appropriate use for the land.

Logically, the physical environment has to be taken into account and it does it, in the first place, as a mere support of the uses and activities but also through three main ways: the *natural resources*, that have always been among the most important elements in land management as it is with this tool that their appropriate management is pursued; more recently the physical environment has started participating also from the point of view of the *risks*, in order to try to minimize them or, at least, to reduce the society's vulnerability against them; lastly, it is also increasingly taken into account through the *environmental damage problems*, tried to be reduced to a minimum in the search for a sustainable development in economic, social and environmental terms.

Within this context, the most logical thing would be that climate held a relevant position in the land management processes, as it is a vital resource for society —constituting the genesis of a good many other resources too—, it is also an important risk source and, indeed, it plays the lead in some of the environmental problems of the current highest concern, as pollution or climate change. However, the truth is that climate in land management plays a very poor role if not a non-existing one, which presents difficulties for the inclusion of climate in these processes that, basically, come from the fact that its features do badly adapt to two of the main demands of land management: space accuracy and accuracy in the characterization of events.

In order to be able to manage the land and give it the most appropriate uses and activities, an accurate cartography is necessary, with lines clearly delimiting the territory units and the events occurring in each of them. In addition, it is necessary that the mapped events are also accurately characterized as good or bad, favourable or unfavourable, vulnerable or resistant, in order to stimulate them, avoid them, favour them, protect them to a greater or lesser extent, etc.

As for climate, it is not easy to reach any of such accuracy levels required, owed to the climate being essentially *variability*; firstly *space variability*, which makes the knowledge itself and the mapping of climate more difficult but, above all, *temporal variability*, which hampers any accuracy in the characterization of events and determines that they can be polyvalent, good and/or bad, favourable or unfavourable at the same time, depending on the moments, the spaces or even within the same space.

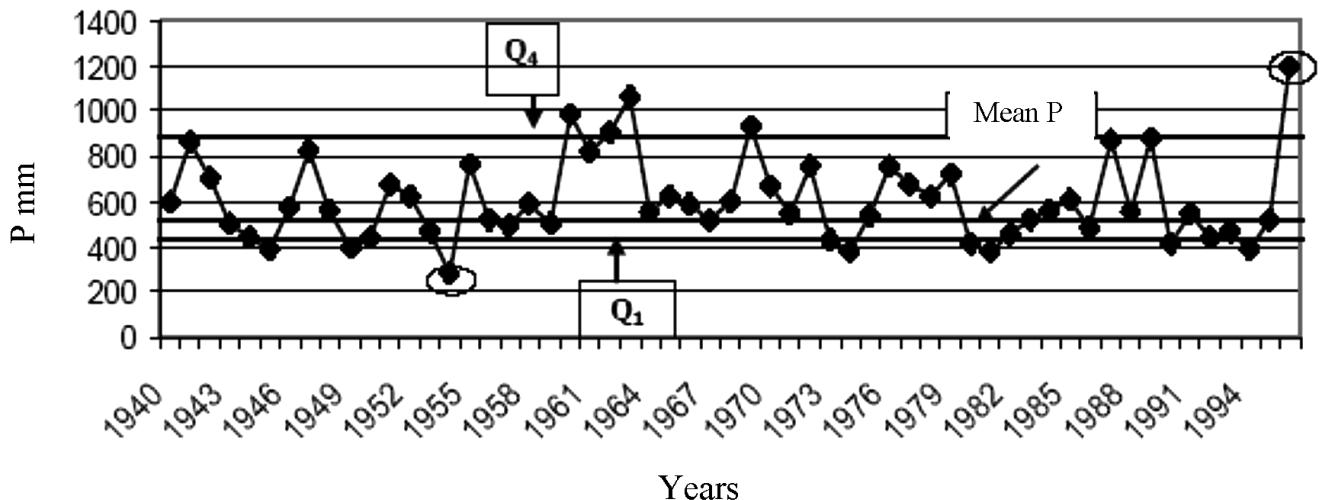


Figure 1. Temporal variability of the observation series in climatology. Annual precipitations in the Guadalquivir River basin (1940-97). Source: Own elaboration.

The temporal variability of climate is part of its very essence, up to the extent that the first and main task of the climatologist is to reduce that variability by means of statistics. Assuming the randomness of a climatological series, it will be characterized from some central trend parameter (the mean or the median being the most frequent ones), that will be the value that will represent it in the relevant map. But it is obvious that the immense variability that characterizes the climatological series can never be represented from a single value, which is why the characterization tends to be completed from some dispersion parameter, indicative of the magnitude of the fluctuations around the central value (the variable rank, the standard deviation, the series quintiles are the most used ones). In Figure 1 we illustrate these facts through the precipitation series of the Guadalquivir basin during the period comprised between 1940 and 1997. The mean precipitation for this period is 585 mm, but it has a much wider possibility interval, reflected in the behaviour of their extreme quintiles, represented in the figure, which range between 1200 mm in the year of the maximum and something above 200 mm in the driest year. Consequently, the expression of the precipitation from its mean value is unacceptably inaccurate for its consideration in the land management processes; it is an ambiguous value that cannot be put on an equal footing with the rest of the parameters that characterize the natural environment: geology, the plant cover, lands... all very specific realities and not ambiguous at all. The mean rain value of 585 mm hardly gives us any information about the fallen precipitation; many yearly rain totals are possible, each of them with a certain frequency or occurrence probability, which would be the terms that we should use for such issues, although they are much more difficult to be transmitted to the space users and the planning managers.

Actually, the knowledge of climate —or in our case here the precipitation— rather than a mean value needs the analysis of the frequency distribution of the series, which is much more

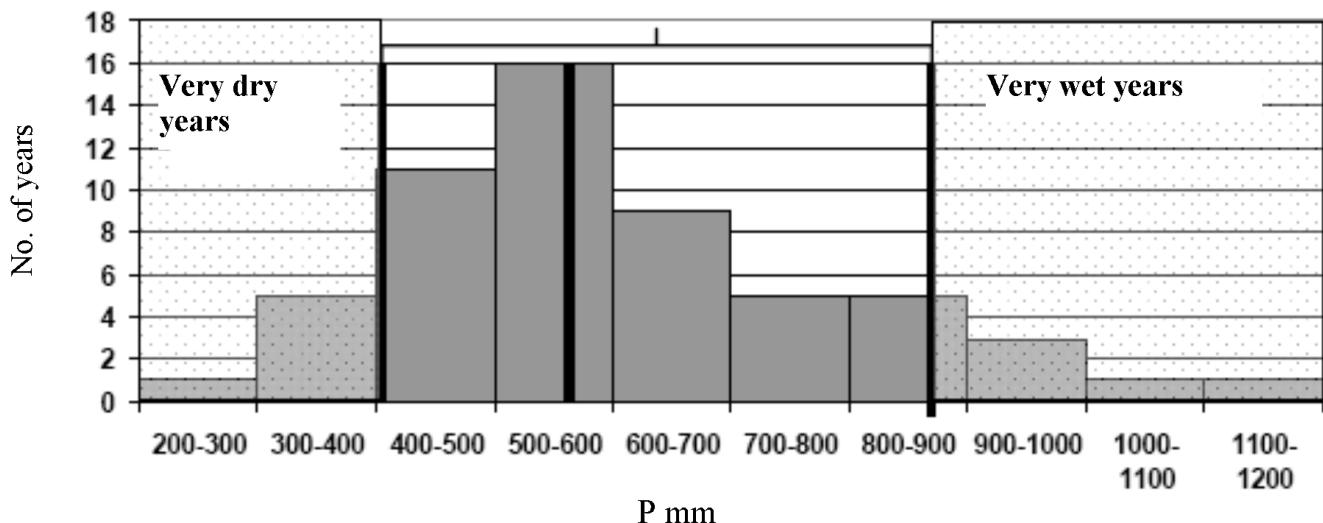


Figure 2. Precipitation frequency histogram in the Guadalquivir river basin. Source: Own elaboration

accurate as regards variable behaviour. But, in addition, the frequency histogram will enable us to make an important distinction in view of the climate management and impacts: the distinction between normal events and rare and extreme events (see Figure 2).

The *normal events* are those located around the central trend parameters of the series presenting a high appearance frequency. The *rare and extreme events* are located in the limits of the variability field of the series with appearance frequencies that are much lower. Both types of events, apart from getting individualized or isolated from a mathematical point of view, are clearly reflected in reality, as they have totally different effects on society. The normal events, precisely due to their high frequency, are those generating their own environment and a specific social response. Each place of the planet has its own particular natural environment, which responds to the atmospheric environments that are most frequently given in it. Likewise, societies in each place adapt themselves to the usual atmospheric conditions and organize their life and activities according to them.

But this is the only common feature that these events present, as they can be very different in their impacts. In this sense, we can distinguish two basic types: those resulting beneficial or neutral to society, enabling its development and constituting what we can call the climate potential of the place, and those hampering or obstructing that development. At the same time, the latter can be divided into two different types: those having a permanent or almost permanent action making social life difficult and limiting its possibilities, and those acting only for short periods of time, although in a repeated and regular way (see Figure 3). As examples of the former, we can mention the water scarcity of the large deserts or the lack of calorific energy of the polar icecaps. Among the latter we find, for instance, tropical cyclones, tornadoes and other temporary disturbances, involving such amounts of energy that they result devastating for the

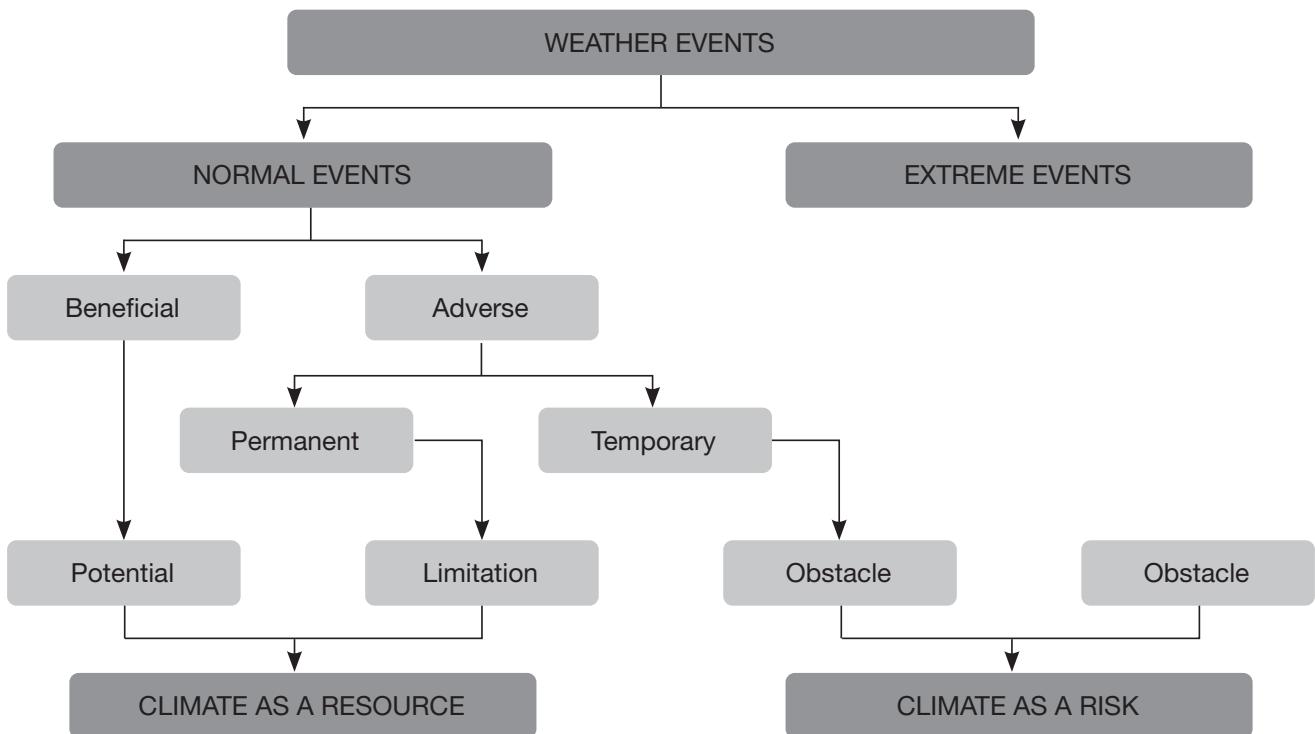


Figure 3. Typology of the climate events according to their impact on society. Source: Own elaboration

societies. Nevertheless, once they have occurred, the climate regains its beneficial or neutral side, allowing the development of collective life. The former can be called limitations, as they indeed are limiting climate features for society, while the latter can be classified as obstacles, as they just represent incidental barriers that climate imposes to society and that society has to overcome.

As for the *rare and extreme events*, merely due to their low occurrence and their breaking the normal climate rhythms they mean a certain degree of stress for the environment and the society and demand big efforts so as to recover “normality”; consequently, they constitute an obstacle, although they are not intrinsically harmful or limiting. The 585 mm precipitation normal in the Guadalquivir River basin would mean a terrible drought in the Scandinavian Alps or in the Amazonia, given its mere anomalous and extraordinary nature in such areas. Something similar would happen with temperatures of 5°C, which in principle are harmless, if they took place in the month of August at the South of the Mediterranean Sea. This is the reason why they can be classified as obstacles at the same level as the ones analyzed before as normal events. Both have many elements in common: both are devastating for societies for a short time, are unforeseeable in their occurrence, and surprise the society, incapable of assimilating them without prejudice, although in the second case the failure to adapt is due to the rarity of the events and in the first one to their intrinsic nature.

Considering all the weather events that are susceptible of being produced in one place, we can reduce them to two ways of basic action in view of society: the action of climate as a resource, which would be the balance between its potential and its limitations, and the action of climate as an obstacle, resulting from the intervention of adverse temporary events or rare events, due to their occurrence out of place or out of season (Pagney, P., 1994). Each one of these two action ways, according to their different repercussions on society, will require specific types of analyses on the part of climatology.

2.2. Climate as a resource.

For the analysis of climate as a resource it is important to bear in mind that climate takes part through two types of different influences: an indirect influence, through the production of the natural resources that man uses to develop his life, and a direct influence, derived from the fact that climate, as a variable series of atmospheric environments, is the condition for both the environment existence and the society existence (see Figure 4). Both influences also present different forms and demand different approach attitudes from climatology.

If we focus on the *indirect influence*, we see climate as an important source of resources for society: firstly resources that are alive, depending largely on climate behaviour, but also water and energy resources, closely depending on climate. Disregarding those that are alive, the water and energy resources possess a physical or material nature that makes them adjustable, that is to say, they are resources that can be stored and transported from one place to another. This determines that the spatio-temporal scales of climate's indirect influence are relatively vague and its spatio-temporal dependence is moderate. This is the reason why society's dependence respect to climate as a source of natural resources has certain flexibility.

The *direct influence* derives from the character of "environment" that climate has to man and his activities, meaning a quality with no physical or material significance (a certain temperature, a humidity value, etc.). This feature of climate as an attribute, as a non-storable or transportable quality determines very accurate and detailed spatio-temporal scales (at every moment, each specific point of the Earth's surface experiences a peculiar atmospheric environment that has an influence on man and his activities). Consequently, this results in a very strict dependence of society on climate.

This will be a key difference when it comes to tackling the necessary studies for the appropriate climate management and its inclusion in land management: the necessary studies for resource planning could be developed on extensive areas, such as basins or large regions, anyhow requiring a diversity of spatio-temporal scales according to the resource. On the contrary, the studies relative to human settlements or diverse activities in the area will have to deal with climate in very detailed scales, with the purpose of capturing the high spatial variability presented by climate elements and to which both economic activities and man are very sensitive. In this case, the important issue is the plot of land and the specific location where a certain activity is intended to be set up, with its own topographic and physiographic characteristics, which will give it very precise climatic values, the ones that will definitively have an influence on the development of these activities.

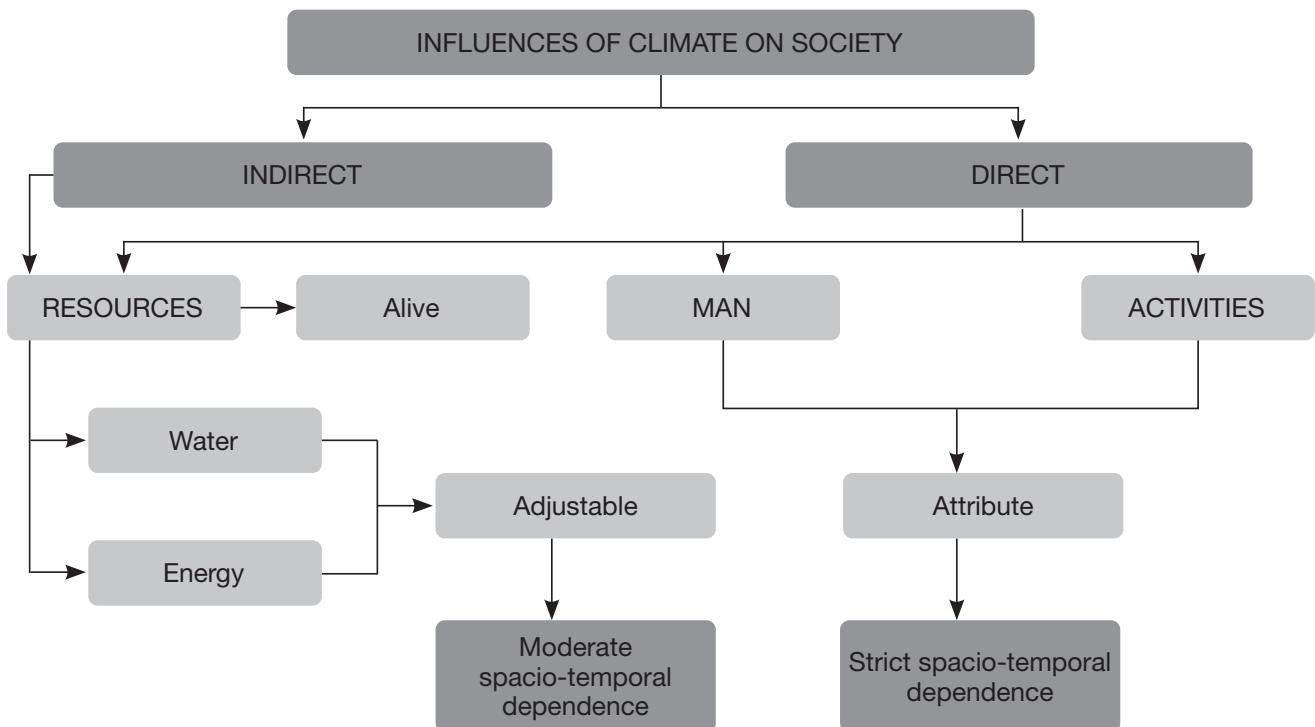


Figure 4. Climate influences on society. Climate as a resource. Source: Own elaboration

If we take these considerations to the role that climatology should play to achieve an optimum management of climate as a resource, this role should focus on advising society on the ideal places to make the most of water and energy resources; also on the ideal places for human settlements or at least the most appropriate construction types for each area (giving maximum comfort with minimum energy cost); and on the establishment of the most productive activities taking into account the climate potential in each place and the activities that are most immune to the climate's limitations (see Figure 5).

This entails the need to develop two types of climatological studies: firstly, a research of a more general nature, designed to determine the existing relationships between climate behaviour and the corresponding behaviour of resources, human body or economic activities. In this research the issues to be determined will mainly be which are the climate parameters that have an influence on these relationships and which values of these parameters are the most significant in these relationships, understanding as such those thresholds that clearly facilitate or obstruct the production of water and energy resources, human welfare and the development of activities. In addition, regional or local research projects will have to be performed in order to determine the spatial distribution of those values with the purpose of defining the ideal places for each of the activities. Logically, threshold plotting should be expressed in terms of probability of occurrence, simultaneously making an important effort to spread these concepts to most of the climate information users.

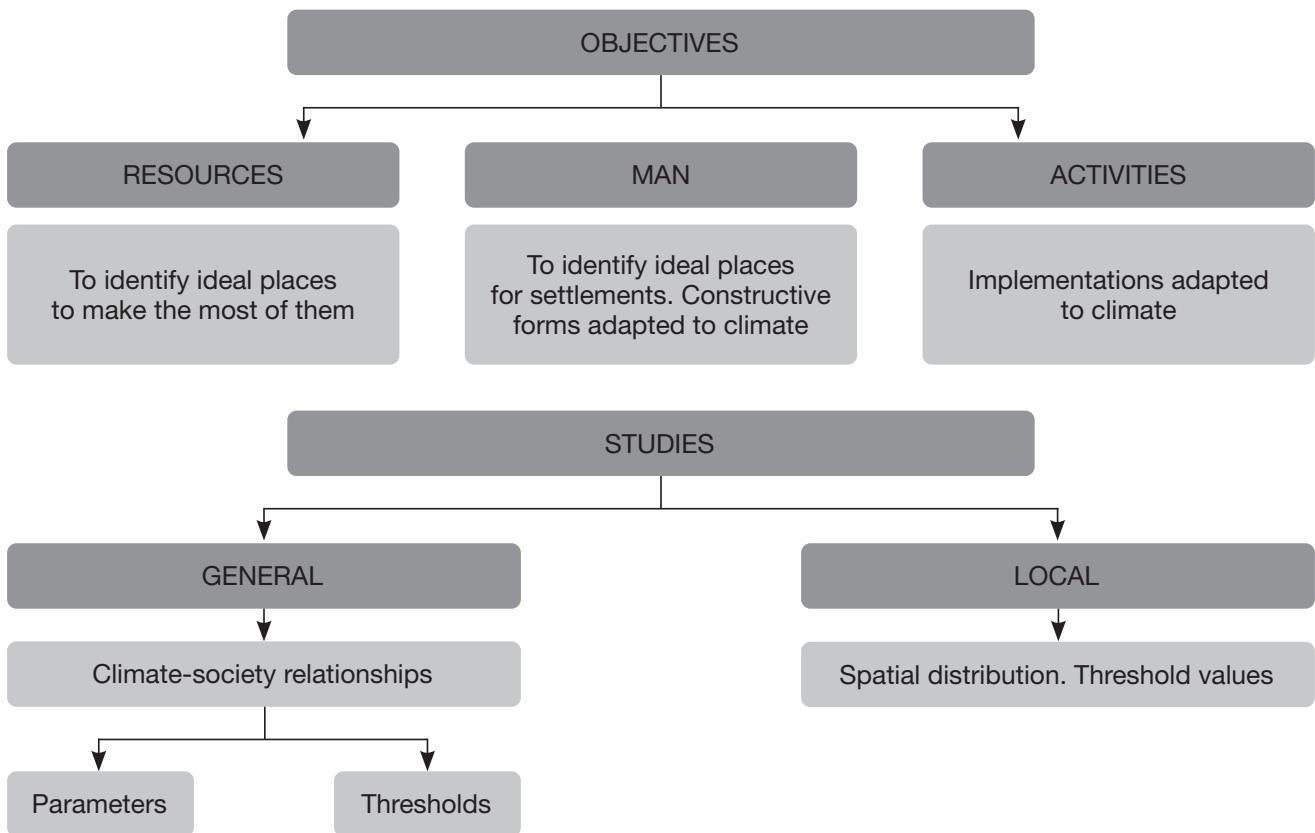


Figure 5. The study of climate as a resource. Source: Own elaboration.

There is still a long way to go in this sense. Firstly, there is a lack of political will to include climate in land management, but it is also true that the studies needed for this inclusion are very poorly developed. General research is a bit more developed and there are many climate indicators aiming at applications, as a result of the efforts made on the numerical modelling of the relationships between climate and different human activities (Mac Kendry, 2002). The hydrometeorological models (Cazorzi and Dalla Fontana, 1996) or the agroclimatic ones (Kravchenko et al., 2000) are already classic, although they are improved day by day, and also the pollutant diffusion models (Bischoff-Gauss et al., 1998) or the models linking climate with human comfort (Matzarakis et al., 1999) have certain degree of development and consistency. But every day new climate impacts are modelled, such as energy resources (Broesamle et al., 2000), biodiversity or many others. The goals to be achieved at this stage of the research are to continue this path and to study the adaptations of these models to the peculiarities of each region.

But the local and detailed studies capable of putting this information to the scale in which man and climate interact, that is to say, to the scale that can be applied to climatology, still are very incipient. In this sense, it would also be important to develop numerical modelling techniques, but in this case modelling the climate variables from physiographic and especially topographic variables, which are closely linked to them. Temperature and its derived magnitudes, such as

frosts, due to their strong dependence on terrain, are some of the variables that better respond to these methods (Ninyerola et al., 2000). Also, those variables that are very poorly measured spatially but which have obvious applications, like solar radiation or wind, are the priority subject of application (Mengelkamp, 1999). Undoubtedly, the Geographic Information Systems must be irreplaceable allies in this task (Chapman and Thornes, 2003; Agnew and Palutikof, 2000) as they allow to capture, model, analyze and visualize spatial data, which facilitates the routine production of climate atlas on detailed scales and aimed at the climate applications and their inclusion in the land management processes (Felicísimo, 1992; Felicísimo et al., 2001).

2.3 Climate as a risk

Climate can also act as a risk, and risks do start having some presence in land management (Olcina Cantos, 2002; Pita López, 1999). In this case, the climatologists are forced to offer the planners the analysis and maps that they need to efficiently implement the existing legal provisions related to risk prevention and management. To this end, it is advisable to remember the classification that we established before between two types of different risks according to their origin: the disasters associated to temporary and very intense events, although within the normal behaviour of climate, and those generated as a consequence of the anomalous behaviour of climate, although they are no especially intense (see Figure 6).

The first ones, examples of which are events such as hurricanes, tornadoes, cut-off lows, windstorms, sandstorms or hailstorms, belong to the category of the so-called “intensive disasters” (Pita López, 1999). These are brutal disasters, associated to the display of high levels of energy and characterized by being dichotomic disasters, that is, that either they are produced or not produced. Another distinctive feature is that they have an impact on all the activity sectors because they tend to be so destructive that they devastate everything that stands on their way, which determines that they have a clearly identified dangerousness. As a result of all this, the characterization of these undoubtedly damaging and harmful events is highly accurate. The spatial accuracy is not so clear and, of course, it does not allow event mapping on a static drawing, as the representations of volcanoes, floodplains or transform faults would do, but at least it allows to map the disaster occurrence probability associated to different places from the recorded history of this type of events, which is a tool of some use.

In the disasters caused by rare events there is total inaccuracy in the characterization itself. In principle, these events can occur anywhere in the world; this implies a lack of territorial dimension that is not favouring their inclusion in land management. In addition, these are not dichotomic events, but there are many situations between the normal event and the anomalous one (if, for instance, we think about the difficulties of establishing the start of a drought from a water surplus situation or the problems inherent in the attempt to define the thresholds separating a situation with normal temperatures and a cold spell or a heat wave). On the other hand, their impacts are only partial: they affect certain sectors of activity, but not the whole of society, thus making it difficult to simply identify the mere dangerousness of the event. In fact, the paradox of these disasters is that the losses generated tend to be inversely proportionate to their occurrence frequency (the high number of casualties generated by the heat wave in the summer of 2003

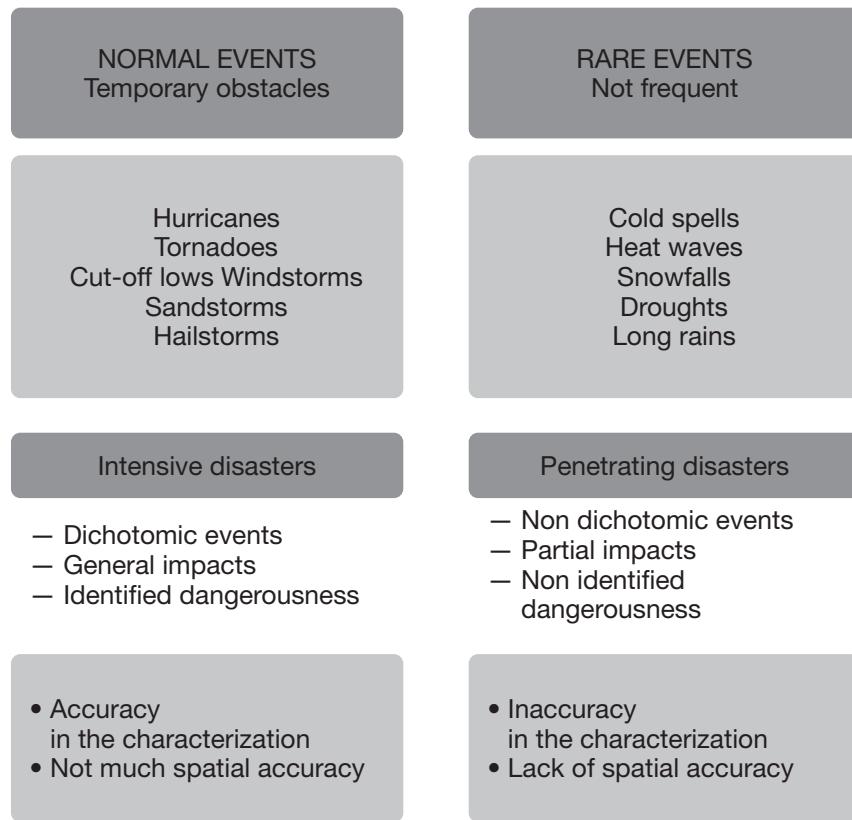


Figure 6. Classification of climate risks according to their repercussions on land management.
Source: Own elaboration.

in Paris should be remembered, as it was much larger than the number recorded in Madrid or Seville, where the temperatures were much higher; or the enormous economic losses that can be caused by late frosts in mild climate areas, such as Almería, compared to how harmless they are in very cold areas, like mountains).

In these cases, it is more difficult to include climate in land management, and the challenge to climatology is much bigger, because climatology is forced to offer climate information to the managers in the terms needed by them. This demands to turn to society from the beginning, in order to examine the impacts of the anomalous weather events, because it is only in that social response and not outside where the thresholds separating the anomalous event and the climate disaster can be found.

But climate does not only generate its own risks, but it also participates actively in the configuration of other risks, such as hydrometeorological ones (especially floods, avalanches or coastal erosion phenomena), biometeorological ones (especially forest fires), and some geological ones, like expansive soils, landslides or land subsidence due to water withdrawal (see Figure 7).

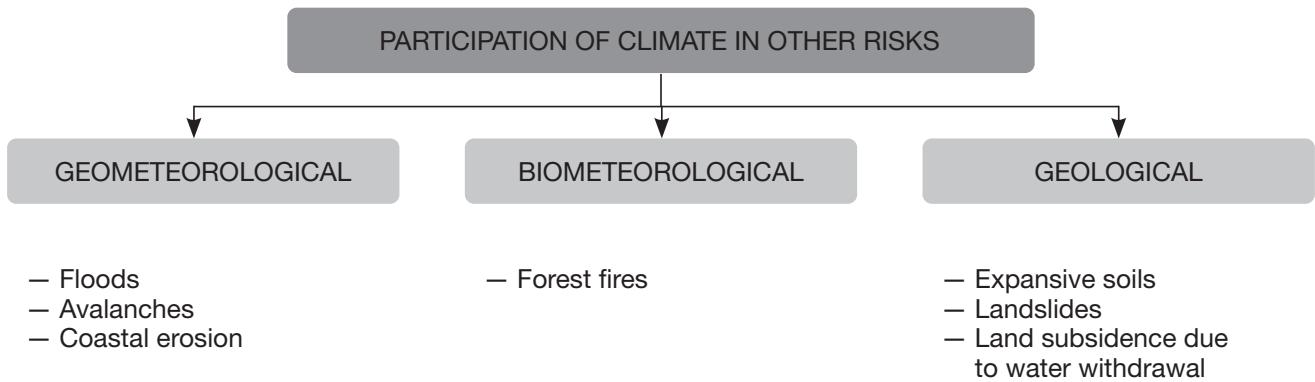


Figure 7. Influence of climate in other risks. Source: Own elaboration.

In all of them it is normal that climate participates with the specific event that triggers the disaster, which overimposes itself to its condition. This condition is fixed and it is made up of all the territory features that favour its occurrence, which are the ones being actually mapped so as to characterize their dangerousness. In case of flood, the disaster-triggering element is the torrential precipitation, but the condition favouring it is the floodplain, which is the mapped element in the analysis of dangerousness; the heat wave associated to strong winds triggers the forest fire, but it is produced in a specific forest stand that has certain combustion capacity; the storm triggers the coastal erosion event, but its probability is determined by the existence of a coast with a certain width, specific geomorphological features, possible presence of buildings, etc.; unstable slopes are the probability condition of landslides and the elements subject to mapping, although an intense rainfall event can trigger this instability.

All these cases are examples of how difficult it is to include climate in the maps analysing dangerousness, first-rate tools for land management, in which the dangerousness spots are defined by fix and stable events, and probably it will continue being so in the future. From the point of view of climatology, a more active role should be given to the triggering weather events due to their being important weighing factors in assigning dangerousness to the different territory units. This is still a task to be carried out.

If we wonder now what is the role that climatology should play so as to achieve the optimum management of climate as a risk, we must not forget that here the main goal would be to minimize the impacts of the climate obstacles. This goal is mainly attained through implementing the activities that are most immune to the risks in every place and through risk prevention with the purpose of reducing the damage. This would demand having more precise inventories and maps of all the territory risks. In the case of risks associated to the occurrence of rare and extreme events, the analysis of climate variability in the area of study becomes compelling, as well as the setting of the thresholds separating the disastrous events from the ones that are beneficial or neutral. To this end, climatology must get closer to society and to the impacts that society experiences, because it is these impacts what establishes the thresholds separating

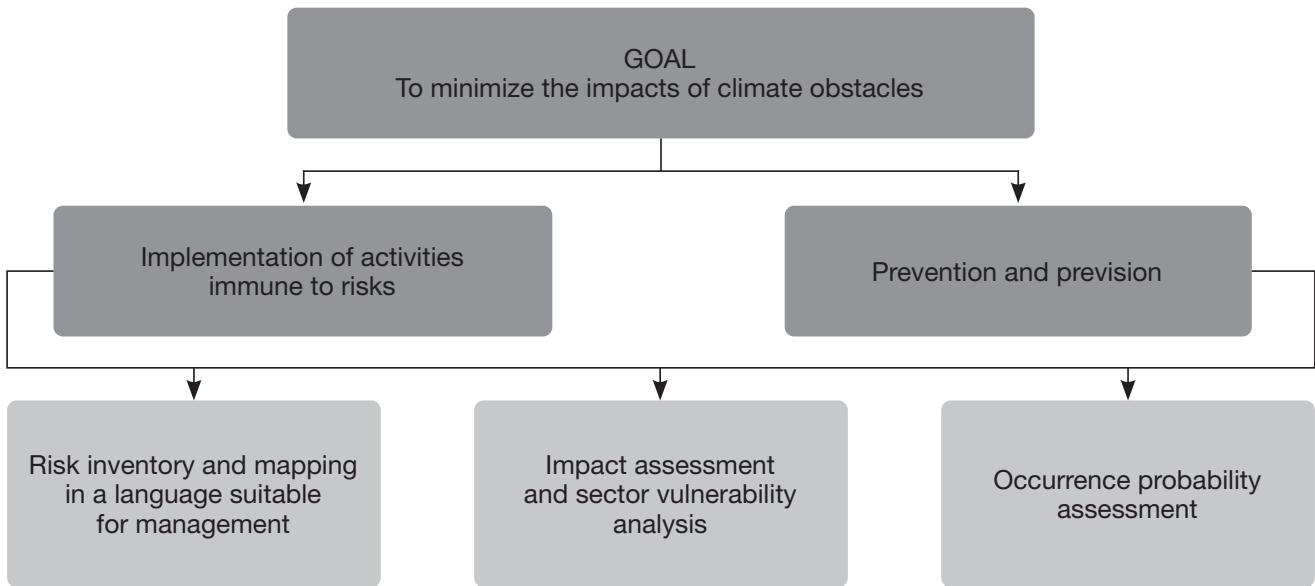


Figure 8. The study of climate as a risk. Source: Own elaboration.

extreme events from disastrous ones. It is also compulsory to study the impacts that these obstacles generate in the different activities in order to record them according to their degree of vulnerability and to take the most appropriate defensive measure to each case. Finally, the occurrence probability of the different climate obstacles should be studied as a preventive measure against them and against the social risk that they involve (see Figure 8).

3. INFLUENCE OF SOCIETY ON CLIMATE

Society also has an important influence capacity on climate, as it has become obvious as a result of the studies brought about by the problem of climate change, in addition it being a capacity that grows with time. This influence has two essential aspects: firstly, the increasingly active role of the earth's surface nature as a key variable within the climate system components, and we must not forget that the earth's surface is becoming more and more a social responsibility product; secondly, the surface prominence as an emitter/captor of greenhouse effect gases and, therefore, as the main responsible element of the greenhouse effect and the climate change.

As for the first aspect, it is important to remember that up to the seventies of the 20th century, climate was something that exclusively concerned the atmosphere in such a way that the climate models only included this component in their analysis. Since then, more components have been included in the system, becoming more and more relevant (see Table 1). The earth surface as such is introduced in the eighties, but ever since then new elements are being introduced that either are specific types of surface (this is the case of oceans or ice expanses), or are products directly derived from this surface and from the associated land uses (this is the case of aerosols or vegetation dynamics).

Table 1. Evolution of climate model components. Source: Own elaboration from modifications of <http://www.ipcc.ch/graphics/gr-climate-changes-2001-wg1.htm>.

70's	80's	Early 90's	Middle 90's	Late 90's	Early 2000	Currently
Atmosphere	Atmosphere	Atmosphere	Atmosphere	Atmosphere	Atmosphere	Atmosphere
	Earth surface	Earth surface	Earth surface	Earth surface	Earth surface	Earth surface
		Ocean and sea of ice				
			Sulphate aerosols	Sulphate aerosols	Sulphate aerosols	Sulphate aerosols
				Other aerosols	Other aerosols	Other aerosols
					Carbon cycle	Carbon cycle
						Vegetation dynamics
						Atmosphere chemistry

It is true, society is every day more aware of the important role played by the interchanges between atmosphere and earth surface in climate balance. These interchanges essentially depend on surface variables such as albedo, emissivity, temperature, moisture content or roughness. But we must remember that every time a higher percentage of continents is a product of human intervention, be it directly (through urbanization, large agricultural exploitations, industrial facilities, livestock or forest farms, etc...), or through the consequences of other interventions (desertification as a result of territory overexploitation or massive forest fires, etc.). In doing so, society ends up by becoming the manager of its own climate and not only on a local scale, in which the phenomenon has been very obvious and well known for years (Fernández García et al., 1998), but also on a global scale.

Despite this incontestable reality, in climatology the land use variable has not yet been converted in a climate variable and this will be a task to be tackled in the coming years: to obtain climatically useful parameters from the land use variable.

As for the second aspect, the important influence of society on climate through the emission of greenhouse effect gases to the atmosphere that will sooner or later cause a process of global warming is to be stressed (IPCC, 2007). This idea is already so assumed by society that international agreements have been signed —like the Kyoto Protocol— aimed at stopping the increasing emissions on the part of the more accountable countries in this sense. This entails the making of an annual inventory of every country's emissions, activity that has been carried out for over a decade with such good spatial detail levels that even the municipality scale is included (see Figure 9).

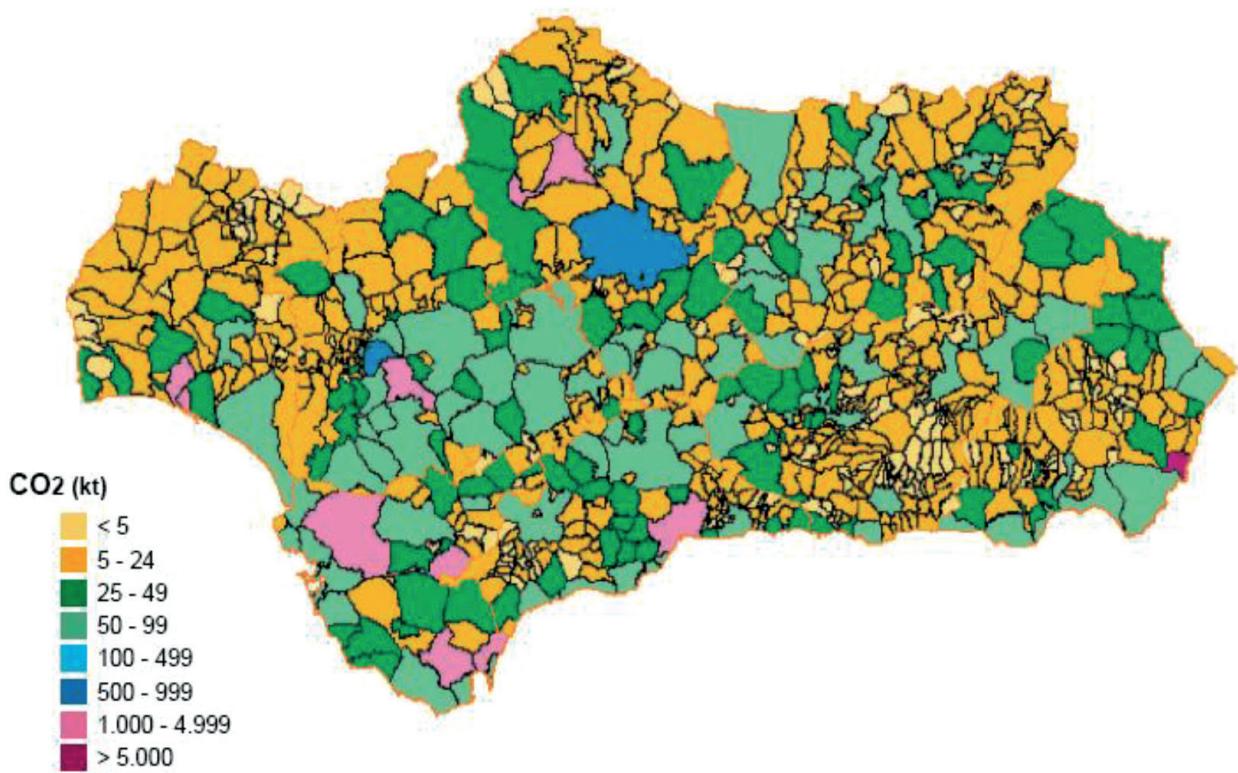


Figure 9. Emissions of greenhouse effect gases in Andalusia in 2003 on a municipal scale (Kt of CO₂ equivalent). Source: Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. (<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/>).

Such a spatial detailed level is possible because both emissions and drains of greenhouse effect gases are a true reflection of society's activities and the land uses assigned to every area. The industrial facilities, the transports or the energy consumptions associated to heating and air conditioning lead to high CO₂ emission levels, the agricultural uses result in high nitrogen oxide levels, the effect of cattle or the waste treatment plants on soil translate into methane distribution, and so on. The association between emissions and land uses is such that the emission maps are actually hardly made from direct measurement of company emissions. The normal calculation system is by emission inference from the activities and land uses existing in the territory and the use of multiplication factors or emission coefficients applicable to those activities and land uses. Probably here, more than anywhere else, it is patently obvious up to which degree climate is a social product.

Some imperatives for the climatologists arise from both approaches to society's influence on climate; they can be summarized in the need to generate useful variables for climatology from the variables related to land uses. This creates a triple condition:

- a) To include the existing information on earth surface to climate studies. In this sense, remote sensing and the improvement of statistics on land uses, which would be progressively incorporated to the studies on climate, would be key elements.

- b) To generate new sources of information (statistics and others) in view of the new problems that arise and for which there was no information so far. Probably, this is the moment in which climatologists should demand from the National or Regional Statistics Institutes to generate new information, non-existent up to now, in order to tackle these new problems.
- c) To generate new indicators in order to transform these data on surface into useful information for the new problems.

Summing up, climatology will have to have an increasingly closer contact with society, incorporating and adapting the information on land uses that society currently gives, but also demanding new information that was not necessary before. It has to be mentioned that through this way again we come to the need to include climate in the land management processes, although in this occasion with another hope: to avoid that human interventions on the territory lead to an irreversible decline of the climate system.

REFERENCIAS / REFERENCES

- Agnew, M.D. and Palutikof, J.P. (2000). GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate Research*, 14, 115-127
- Bischoff-Gauss, I., Kalchoff, N. and Fiedler, F. (1998). The impact of secondary flow systems on air pollution in the area of Sao Paulo. *Journal of Applied Meteorology*, 37, 269-287
- Broesamle, H. et al. (2000). Assessment of solar electricity potentials in North Africa based on satellite data and a geographic information system. *Solar Energy*, 70, 1-12
- Burroughs, W.J. (1997). Does the weather really matter? Cambridge University Press
- Cazorzi, F. and Dalla Fontana, G. (1996). Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. *Journal of Hydrology*, 224, 21-44
- Chapman, L. and Thornes, J.E. (2003). The use of Geographical Information Systems in Climatology and Meteorology. *Progress in Physical Geography*, 27, 3, 313-330
- Epstein, P.R. (1999). Climate and Health. *Science*, v.285, n.5426: 347-348
- Felicísimo, Á. M. (1992). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Oviedo. Pentalfa Ediciones.
- Felicísimo, A. M. et al. (2001). Elaboración del Atlas climático de Extremadura mediante un sistema de información geográfica. *GeoFocus*, n.º 1, p. 17-23
- Fernández García, F., Galán Gallego, E. and Cañada Torrecilla, R. (1998). Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas. Madrid. Ed. Parteluz
- Freebairn, J.W. and Zillman, J.W. (2002). Economic benefits of meteorological services. *Meteorological Applications*, 9, 33-44.
- Gunasekera, D. (2004). Economic Issues Relating to Meteorological Services Provision. BMRC, Research Report No. 102. Bureau of Meteorology. Australia
- Hamlet, A. F., Huppert, D. and Lettenmaier, D.P. (2002). Economic Value of Long-Lead Streamflow Forecasts for Columbia River Hydropower. *Journal of Water Resources Planning and Management*, March/April 2002:91:101.
- Houghton, D. D. (Eds.) (1985). Handbook of applied meteorology. New York. John Wiley and Sons.

- Hui, S. C. M. and Tsang, M. F. (2005). Climatic data for sustainable building design in Hong Kong, in Proceedings of the Joint Symposium 2005: New Challenges in Building Services, 15 November 2005, Hong Kong SAR
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge
- Katz, R.W. and Murphy, A.H. (1997). Economic Value of Weather and Climate Forecasts. Cambridge University Press
- Kravchenko, A.N., Bullock, D.G. and Boast, C.W. (2000). Joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope. *Agronomy Journal*, 92, 1279-1290
- Ludlum, D. M. (1989). The weather factor. American Meteorological Society. Boston.
- Luo, H., Skees, J.R., and Marchant, M.A. (1994). Weather information and the potential for inter-temporal adverse selection in crop insurance. *Review of Agricultural Economics*, 16, 441-451.
- Mac Kendry, I. (2002). Applied Climatology. *Progress in Physical Geography*, 26, 3, 462-468
- Matzarakis A, et al. (1999). Heat stress in Greece. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*. 43: 76-84
- Mengelkamp, H.T. (1999). Wind climate simulation over complex terrain and wind turbine energy output estimation. *Theoretical and Applied Climatology*, 63, 129-139
- Mjelde, J.W. and Penson, J.B. (2000). Dynamic aspects of the impact of the use of perfect climate forecasts in the Corn Belt region. *Journal of Applied Meteorology*, 39, 67-79.
- Nicholls, J.M. (1996). Economic and social benefits of climatological information and services: a review of existing assessments. World Meteorological Organization, Geneva. WMO/TD-No. 780.
- Ninyerola, M., Pons, X. and Roure, J. M. (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20, 1823-1841.
- Olcina Cantos, J. (2002). Riesgos naturales y ordenación territorial, in Ayala Carcedo, F.J. and Olcina Cantos, J.: *Riesgos naturales*. Barcelona. Ariel Ciencia, pp. 1235-1309
- Pagney, P. (1994). *Les catastrophes climatiques*. Paris. Presses Universitaires de France
- Pita López, M.F. (Ed) (1999). *Riesgos catastróficos y ordenación del territorio en Andalucía*. Sevilla, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Junta de Andalucía.
- Roulston, M.S. et al. (2003). Using medium-range weather forecasts to improve the value of wind energy production. *Renewable Energy* 28, 585-602
- Shackleford P. and Olsson, L.E. (1995). Tourism, climate and weather. *WMO Bulletin* 44: 239-242
- Sisak, L. and Pulkrab, K. (2002). Estimate of economic impacts of climate change upon Czech forestry. *Journal of Forest Science*, 48, (11): 499-507
- Sonka, S.T. et al. (1986). Economic use of weather and climate information: concepts and an agricultural example. *Journal of Climatology*, 6:447-457.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SISTEMAS NATURALES

Fernando Valladares, Silvia Matesanz, Oscar Godoy y Teresa Gimeno

Instituto de Recursos Naturales. Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. Madrid. España

1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero están acelerando el aumento de la temperatura de la superficie de la Tierra, modificando asimismo el ciclo hidrológico y la distribución de precipitaciones a escala regional y global (Christensen et al., 2007). El cambio climático también ocasiona un aumento de la frecuencia y la intensidad de las sequías en muchas regiones del planeta, en particular en zonas como la cuenca Mediterránea (Christensen et al., 2007). Todos estos cambios pueden afectar potencialmente la organización y el funcionamiento de la biosfera a escalas tan diferentes como los organismos (morfología, fisiología, fenología), las poblaciones (demografía), las comunidades (composición, interacciones entre especies), los ecosistemas (estructura, funcionamiento, servicios) y la biosfera en su conjunto (Duarte et al., 2007; Moreno, 2005).

Una forma de comprender el impacto que el cambio climático puede ejercer en los sistemas naturales es mediante el estudio de los efectos de cambios climáticos del pasado similares a los actuales, sea a escala geológica o histórica (Velázquez de Castro, 2005). De hecho, hay muchas pruebas de impactos importantes en la distribución de la vegetación como resultado de fenómenos climáticos extremos recientes (Valladares et al., 2005; Alcamo et al., 2007). Así, por ejemplo, Allen and Breshears (1998) documentaron cambios en la vegetación a escala regional en el sur de Estados Unidos causados por la alta mortalidad de *Pinus ponderosa* durante la sequía de los años cincuenta. Posteriormente, los mismos autores observaron cambios similares en respuesta a una sequía que tuvo lugar en el sudoeste norteamericano en 2002-2003 (Breshears et al., 2005), y la ola de calor global de 2003 por cuyos efectos murieron varias docenas de miles de europeos ha dejado una huella histórica en el balance de carbono: se considera que la sequía de 2003 es responsable de una de las crisis más importantes de productividad de la biosfera (Ciais et al., 2005). Se han observado cambios similares en la sabana australiana (Fensham and Holman, 1999; Fensham et al., 2005) y en las estepas del norte de China (Liang et al., 2003). En nuestro país, Peñuelas and Boada (2003) han documentado cambios importantes en la vegetación de la Sierra de Montseny durante las últimas décadas, y Sanz-Elorza et al. (2003) documentaron cambios parecidos en la Sierra de Guadarrama. Ambos cambios en la vegetación parecen estar vinculados con un aumento progresivo de la temperatura así como con cambios en los usos del suelo, dos procesos que han tenido lugar durante las últimas cuatro décadas y que están actuando conjuntamente en muchos lugares del planeta, de modo que es difícil separar sus efectos.

Dado que el clima afecta a los ciclos biogeoquímicos y a la manera como se comportan las especies que componen los ecosistemas, es fácil comprender que un cambio en el clima conlleva toda una cascada de efectos directos e indirectos sobre los sistemas naturales (Llebot, 2005; Valladares, 2006; Velázquez de Castro, 2005). Desde la disponibilidad de agua y de nutrientes hasta la productividad o la biodiversidad de los ecosistemas, el cambio climático afecta a muchos procesos que tienen impactos que abarcan desde la escala de moléculas hasta la de ecosistemas enteros (Moreno, 2005; Valladares, 2008). Hay dos aspectos cruciales, aunque muy sencillos, que han de tenerse en cuenta cuando se abordan el cambio climático y los ecosistemas: i) cada especie que integra los ecosistemas se ve afectada de forma distinta por la misma intensidad de cambio ambiental, ii) las especies que componen un ecosistema interactúan entre sí, esto es, hay una compleja red de relaciones que van desde la dependencia hasta la competencia pasando por la simbiosis o la simplificación mutua de la existencia. Lo que se puede deducir de estos dos aspectos es que las consecuencias del cambio climático en todo el ecosistema son muy complejas (Duarte et al., 2007). Los cambios en la biodiversidad directa o indirectamente inducidos por el cambio climático no solo afectan a los ecosistemas que están en funcionamiento, sino también a su capacidad para prestar servicios y para recuperarse de las perturbaciones. Dado que el cambio climático no solo ejerce impactos en las especies sino también en la intensidad y la naturaleza de las interacciones entre ellas, genera alteraciones importantes que solo estamos empezando a comprender. Algo tan sencillo como las alteraciones en la fenología o en los ritmos estacionales de los animales y las plantas como consecuencia de los cambios en el clima es la causa de que se pierdan las sincronizaciones entre especies (Peñuelas y Filella, 2001), ejemplos de lo cual pueden ser que un polinizador o bien el animal que esparce las semillas de una planta no la encuentren a tiempo si el calentamiento avanza su ciclo, o que muchos animales no encuentren su alimento o su especie anfitriona si tienen una fuerte respuesta al clima.

2 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO: DE LO SENCILLO A LO COMPLEJO

Un caso claro de efectos simples y directos de cambio climático son los cambios en los ritmos estacionales de los organismos como resultado de los cambios en el clima. Y, aparte de los cambios en las fechas de floración y de fructificación de las plantas (p. ej. Peñuelas et al., 2002), otro buen ejemplo lo proporcionan especies como el oso pardo (*Ursus arctos*), adaptado a soportar inviernos duros hibernando tras un consumo intenso de alimentos en verano y otoño (Swenson et al., 2007). Se ha demostrado lo siguiente: que cuanto más al sur menor duración tiene la hibernación, que los osos pueden avistarse cada vez más al norte debido al calentamiento global y que en diversos lugares la hibernación se ve interrumpida o no tiene lugar como consecuencia de los inviernos templados (Doupe et al., 2007). Por ejemplo, los pocos osos pardos de la Cordillera Cantábrica están más activos durante el invierno, dedicándose a buscar comida de forma casi ininterrumpida (Palomero et al., 2007). La explicación de este comportamiento parece residir en las alteraciones climáticas que han motivado otoños malos, por un lado, en los que la producción de frutos ha sido muy baja, especialmente castañas, por lo que no han podido almacenar la grasa necesaria para soportar un largo periodo de hibernación; e inviernos suaves por otro lado, lo que les permite buscar alimentos de forma activa.

Los efectos del cambio climático se vuelven más complejos cuando tratamos con sistemas fluctuantes o inestables. En lo relativo al clima, los humedales mediterráneos se caracterizan por una gran inestabilidad, que alterna periodos de varios años lluviosos con sequías. Los animales de estos ecosistemas, a diferencia de las plantas, se mueven por sus propios medios en respuesta a estas oscilaciones climáticas. Este es el caso de la cigüeña común (*Himantopus himantopus*), que se defiende de las condiciones climáticas adversas moviéndose con rapidez a lugares del norte de África y a Europa (Figuerola, 2007). Las cigüeñas comunes representan una gran población del entorno mediterráneo, cuyos individuos se mueven entre Marruecos, España, Portugal, Francia e Italia, según la disponibilidad de agua en cada una de estas zonas. Los movimientos de dispersión de las cigüeñas comunes están relacionados tanto con las condiciones locales de las marismas del Guadalquivir como con la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), un fenómeno pseudocíclico que afecta el clima de una gran parte del hemisferio norte (Figuerola, 2007). Los modelos actuales de cambio climático apuntan la tendencia hacia un aumento de la NAO en las próximas décadas, lo cual significaría más sequías en el Mediterráneo y, en este caso, más dispersión de las aves que viven en sus humedales. El comportamiento de las cigüeñas comunes ante el cambio climático es representativo de la respuesta de las aves acuáticas que viven en hábitats muy inestables y sigue sin haberse establecido hasta qué punto los resultados se pueden generalizar a aves forestales y a otros hábitats más estables.

Desde ahora hasta 2100, el cambio climático y sus impactos pueden convertirse en los generadores directos de cambio más importantes en la determinación de la pérdida de la biodiversidad y el cambio de los servicios de los ecosistemas a escala mundial. Aunque es posible que al principio algunos servicios de los ecosistemas de ciertas regiones se beneficien de los aumentos previstos en la temperatura o la precipitación, se espera un impacto negativo neto importante a escala global en estos servicios cuando la temperatura sobrepase los 2º C con respecto a los niveles preindustriales o una vez que el calentamiento aumente más de 0,2º C por década (Valladares et al., 2005; Moreno, 2005). Ahora podemos recordar con más detalle la información recientemente adquirida en el informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) publicado en 2004 sobre los impactos del cambio climático en Europa.

El cambio climático ha afectado a los ecosistemas terrestres europeos sobre todo en lo relativo a fenología (los ritmos estacionales de los ciclos vitales de las especies) y en la distribución de especies animales y vegetales. Muchas especies de plantas han adelantado su producción de hojas, flores y frutos y se han visto muchos insectos en fechas más tempranas. El calentamiento global ha aumentado en 10 días la duración media de la estación de crecimiento entre 1962 y 1995. En apoyo a esta tendencia, la medida del verdor de los ecosistemas en las imágenes por satélite (una estimación demostrada de la productividad de las plantas) ha aumentado en un 12% durante este periodo. Sin embargo, es preciso señalar que este aumento en la duración de la estación de crecimiento no implica un aumento real del crecimiento y la productividad en los ecosistemas mediterráneos, dado que el calentamiento estaría acompañado de una menor disponibilidad de agua (Valladares et al., 2005; Valladares, 2004). La migración de varias especies vegetales termófilas al norte de Europa ha aumentado la biodiversidad en esas áreas, pero la biodiversidad se ha reducido o no ha variado en el resto del continente. Muchas especies endémicas de alta montaña están amenazadas por la migración altitudinal de matorrales y especies

más competitivas típicas de zonas bajas y por el hecho de que los pronósticos de temperatura para las próximas décadas se sitúan fuera de sus umbrales de tolerancia.

En el periodo 1990-1998, la biosfera terrestre de Europa ha sido un sumidero neto de carbono, compensando en parte las emisiones antropogénicas de CO₂ y contribuyendo a la atenuación del cambio climático. No es probable que este balance positivo en la captura de carbono, que se ha mantenido a lo largo de los últimos 20 años, se siga manteniendo en el futuro más cercano (o al menos no a los niveles actuales), dado que el aumento de la temperatura reducirá la capacidad de captura de CO₂ de los ecosistemas europeos. Esta captura de carbono puede incrementarse mediante planes de reforestación y una política agrícola adecuada, pero todo ello solo significará un pequeño aumento si se compara con las metas establecidas en el protocolo de Kioto.

La supervivencia de las aves que se quedan en Europa durante el invierno se ha alargado debido a que las temperaturas invernales son ahora más suaves. Esta supervivencia seguirá aumentando en paralelo al incremento previsto de la temperatura, pero el efecto neto de este aumento de la supervivencia en las poblaciones de aves no se conoce aún. Se han observado cambios significativos en las fechas de llegada y salida de numerosas especies de aves migratorias. Sin embargo, en algunos estudios realizados en la Península Ibérica, se ha demostrado que el cambio climático ha motivado un descenso del éxito reproductivo de aves como el Papamoscas cerrojillo (*Ficedula hypoleuca*), debido a que ya no coinciden sus llegadas con los ciclos de las plantas ni con los ciclos de los invertebrados de los que se alimenta esta ave en los ecosistemas receptores españoles (Sanz et al., 2003).

Un aspecto importante del cambio global en nuestras latitudes es el aumento del impacto de los incendios. Las futuras condiciones de mayor temperatura y mayor aridez, junto al aumento de biomasa y su inflamabilidad debida al abandono de tierras aumentan la frecuencia y la intensidad de los incendios forestales. Los desastrosos incendios sufridos en España y Portugal en el verano de 2003 parecen apoyar esta tendencia.

El aumento de temperatura tiene efectos múltiples y diversos en la actividad de los organismos vivos. Un efecto importante para el medio ambiente es el aumento exponencial de las emisiones biogénicas de compuestos orgánicos volátiles (COV) por parte de las plantas (Peñuelas, 2004). Estas emisiones afectan la química atmosférica, no solo con respecto al ciclo de carbono y a la formación de aerosoles, sino también debido a su papel en el equilibrio oxidativo del aire. Las emisiones de COV son un campo de investigación emergente, dado que no solo demandan más atención los efectos del cambio climático en su emisión, sino que con cierta periodicidad se van encontrando nuevas y fascinantes funciones ecológicas de los COV, lo que indica que nuestra comprensión acerca de estos compuestos es aún fragmentaria. Los ciclos de vida de los organismos que no controlan su temperatura corporal, como los invertebrados, los anfibios y los reptiles, están directamente afectados por el calentamiento global. Muchos estudios indican fallos en la reproducción de los anfibios y los reptiles asociados al calentamiento y a los cambios en el régimen de precipitaciones (Moreno et al., 2005). Estos fallos en la reproducción de anfibios y reptiles están afectados por una serie de circunstancias asociadas a características (p. ej. la producción de huevos de cáscara blanda, permeables, sin cuidados por parte de los

padres; la determinación del sexo de los individuos dependiendo de la temperatura durante el desarrollo embrionario) y por la combinación de diversas fuerzas relacionadas con la alteración del hábitat.

A parte de complejos, los efectos del cambio climático en los sistemas naturales son muy variados. Este es el motivo por el que no podemos aspirar a cubrir todos ellos en este trabajo. Nuestro objetivo, más bien, es sido revisar aspectos actuales de interés general para ilustrar algunos casos con mayor detalle y ofrecer al lector una bibliografía y unas referencias que le permitirán ampliar su lectura con otras fuentes. En particular, aquí nos vamos a centrar en la importancia de los eventos extremos, en la incidencia del cambio climático en un aspecto tan importante del cambio global como es el impacto de las especies exóticas invasoras y en lo que ya sabemos acerca de la capacidad de las especies para evolucionar y adaptarse a un cambio ambiental tan rápido como es el cambio climático. Terminaremos con un breve análisis de por qué en ecología es preferible hablar de cambio global en vez de cambio climático y cuáles son los desafíos científicos para mejorar nuestra comprensión sobre sus efectos en los sistemas naturales. A pesar de nuestra sensibilidad y de que nuestra percepción sea más rápida con respecto a los efectos en los sistemas terrestres debido a que esencialmente somos organismos terrestres, los efectos en los sistemas marinos son tan importantes o más debido al fuerte impacto que los procesos marinos ejercen en el funcionamiento y el clima de nuestro planeta. Los efectos en las especies y ecosistemas marinos son análogos a los que se tratan aquí para los ecosistemas terrestres, razón por la cual nuestro análisis sobre los efectos del cambio climático en sistemas marinos es deliberadamente breve e incidental. Para estudiar esta cuestión en mayor profundidad, recomendamos leer Duarte et al. (2007) y sus referencias.

3. IMPORTANCIA DE LOS FENÓMENOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

Uno de los aspectos más comunes de la mayoría de los modelos climáticos es que prevén un aumento en la frecuencia y la intensidad de los fenómenos climáticos extremos. (Christensen and Christensen, 2003; Sillmann and Roeckner, 2008) (ver figura 1). Entre estos, se incluyen inundaciones y tormentas, olas de calor, temperaturas cálidas, olas de frío y sequías extremas (Beniston, 2007). Todos estos fenómenos tienen en común el hecho de ser perturbaciones estocásticas, con el potencial de alterar la estructura de los ecosistemas o el resultado de los procesos ecológicos a distintos niveles de organización (Thibault and Brown, 2008). Sin embargo, durante los últimos años ya hemos visto varios fenómenos como las inundaciones estivales de 2002 y 2005 en Europa central o las heladas tempranas y tardías, con efectos devastadores en la producción de plantas. Los ecosistemas están directamente afectados por estos episodios, a los que hay que añadir interacciones con otras perturbaciones (plagas y la introducción de especies invasoras) y efectos indirectos (como incendios o desprendimientos de tierras).

A pesar de la importancia de estos episodios en los ecosistemas, su naturaleza variable hace que sea difícil realizar estudios coherentes, dado que requieren un carácter repetitivo, control de variables y reproducción. No obstante, hay numerosos estudios que ilustran el potencial de estos efectos. Los procesos y la estructura de los ecosistemas son vulnerables a los fenómenos

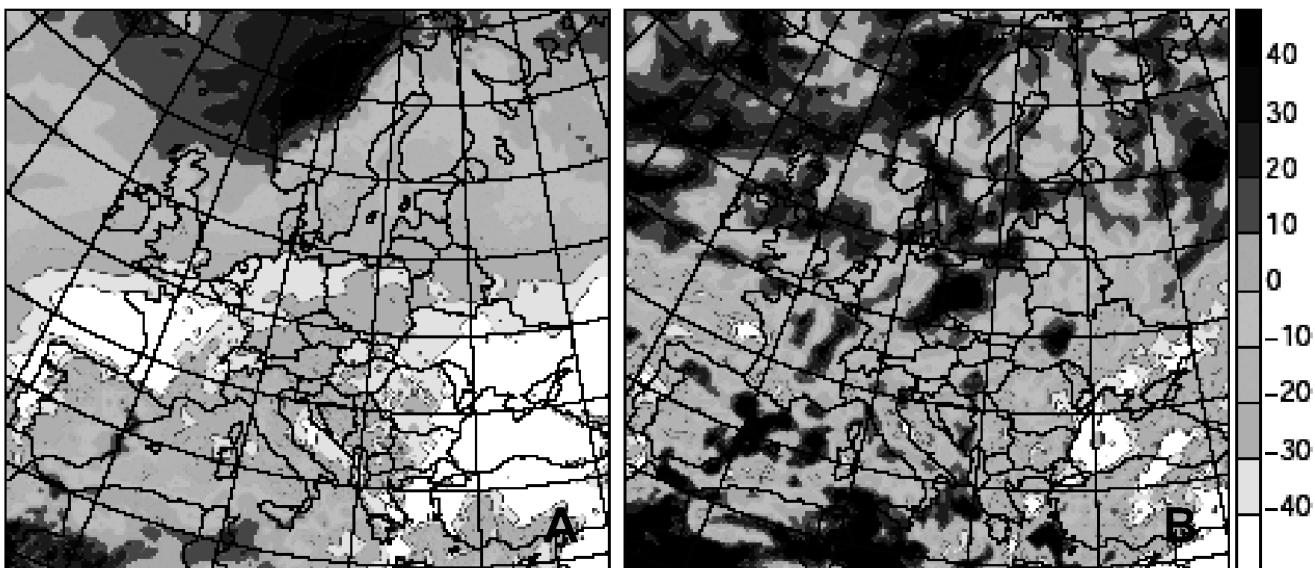


Figura 1. Variación de la precipitación julio-septiembre en comparación con el presente, según la previsión realizada por el IPCC del peor escenario posible. a) Cambio de la media estacional y b) cambio de episodios de precipitaciones extremas. Producido por Christensen and Christensen, 2003.

climáticos extremos a todas las escalas. A nivel de población puede ocurrir que los individuos de la misma especie presenten una sensibilidad diferente a ciertos parámetros. Esto es lo que Miriti et al. (2007) observaron en el Desierto del Colorado (EE.UU.), donde los individuos que mostraron menor crecimiento a largo plazo fueron los más sensibles a la grave sequía de 2002. En este tipo de ecosistema los episodios de reclutamiento son muy escasos y se ven limitados por lluvias ocasionales. Por tanto, es la mortalidad de los adultos lo que marca la dinámica de esta población. En este caso, los matorrales y cactus estudiados se caracterizan por ser especies muy longevas, resistentes a condiciones adversas, siendo los fenómenos extremos (como la sequía de 2002) la primera causa de mortalidad. Estos fenómenos ofrecen la posibilidad de rejuvenecer la población o incluso de inducir un cambio en la comunidad.

En un estudio a largo plazo de la comunidad de roedores en otro desierto, el Desierto de Chihuahua (Méjico), se observó que dos lluvias torrenciales habían afectado a la especie de la comunidad de manera diferente, suprimiendo el predominio de una de ellas y favoreciendo la proliferación de otras subdominantes (Thibault and Brown, 2008). La respuesta de las diversas especies dependió de sus estrategias vitales y de la intensidad y duración de las lluvias. Por ejemplo, la especie que había dominado en la comunidad hasta las lluvias torrenciales sufrió una reducción importante de su población que aún no se había recuperado ocho años después debido a su poca capacidad para nadar y trepar. Sin embargo, otras dos especies de ratones de pequeño tamaño, que sobrevivieron a las inundaciones, aumentaron su población gracias a la desaparición de su competencia por los recursos comunes. La comunidad de roedores recuperó su población total en tres meses después de las tormentas, pero su composición cambió profundamente (Thibault and Brown, 2008).

Los procesos ecológicos pueden verse particularmente alterados por fenómenos climáticos extremos. Para las regiones más frías algunos modelos climáticos estiman que el cambio climático estimulará la producción primaria, el reciclaje de nutrientes y la capacidad que tiene la vegetación para drenar CO₂ con la previsión del aumento medio de la temperatura (Ciais et al., 2005; Rustad, 2001; Hyvonen, 2007). No obstante, estos modelos pueden subestimar el efecto de los fenómenos climáticos extremos en esos procesos. Por ejemplo, la ola de calor que asoló Europa en 2003 afectó significativamente la producción primaria de las plantas a lo largo de un gradiente latitudinal y de aridez (Peñuelas et al., 2007). En este estudio a largo plazo (1995-2005), realizado en diversos matorrales y prados europeos, se simularon un aumento de la temperatura y una reducción de la precipitación y se analizaron los efectos en las estructuras y procesos ecológicos. El aumento de temperatura estimuló la producción primaria en los lugares más fríos, pero el fuerte incremento de la aridez experimentado durante la estación de crecimiento en 2003 fue la causa de que en la mayoría de los lugares del estudio la acumulación de biomasa cayera en picado respecto al año anterior (Figura 2). En este estudio, el impacto de la ola de calor en los matorrales y prados europeos excede la reducción de producción primaria bruta calculada por Ciais et al. (2005) para los bosques y cultivos europeos. Él sugiere que la caída en la asimilación de carbono, debida a la ola de calor de 2003, iguala lo que estos bosques habrían asimilado en cuatro años. Todos estos resultados demuestran la función tan importante que desempeñan los fenómenos climáticos extremos cuando se trata de evaluar los efectos del cambio climático en los ecosistemas y su capacidad para actuar como sumideros de CO₂.

Además, estos fenómenos pueden implicar consecuencias más sutiles y menos evidentes en el entorno natural. Por ejemplo, Martinho et al. (2007) se dio cuenta de que las sequías recurrentes acaecidas entre 2003 y 2006 alteraron la composición de las especies en un estuario de la costa portuguesa: la disminución de las aportaciones de agua dulce favoreció a las especies de agua salada, lo cual modificó la estructura de la comunidad. Un efecto secundario asociado a los fenómenos climáticos extremos es que suponen una ventana de oportunidad para que se asienten especies invasoras tras la destrucción de un hábitat. Por ejemplo, la alteración del régimen de inundaciones puede favorecer la colonización de la llanura de inundación por parte de especies invasoras, que desplazan a las nativas (Florentine et al., 2006). En este caso, la destrucción de un hábitat no solo favorece la introducción de especies no nativas, sino que estos fenómenos también las pueden ayudar a extenderse y dispersarse. En Japón se observó que en las llanuras de arena fina, en las que se solían formar acumulaciones de sedimentos durante las sucesivas inundaciones, el riesgo de colonización por parte de una planta herbácea invasora era mucho más alto. El minúsculo tamaño de la planta invasora hizo que fuera muy fácil para ella ser transportada por las crecidas del río (Nakayama et al., 2007).

Todos estos ejemplos hacen hincapié en la importancia de preservar la resiliencia (la capacidad para recuperarse tras una perturbación) de los ecosistemas, que a su vez implica preservar el hábitat y la diversidad, no solo la de las especies sino también la de la genética, de grupos funcionales y procesos ecológicos, como forma de mitigar los efectos negativos de los fenómenos climáticos extremos.

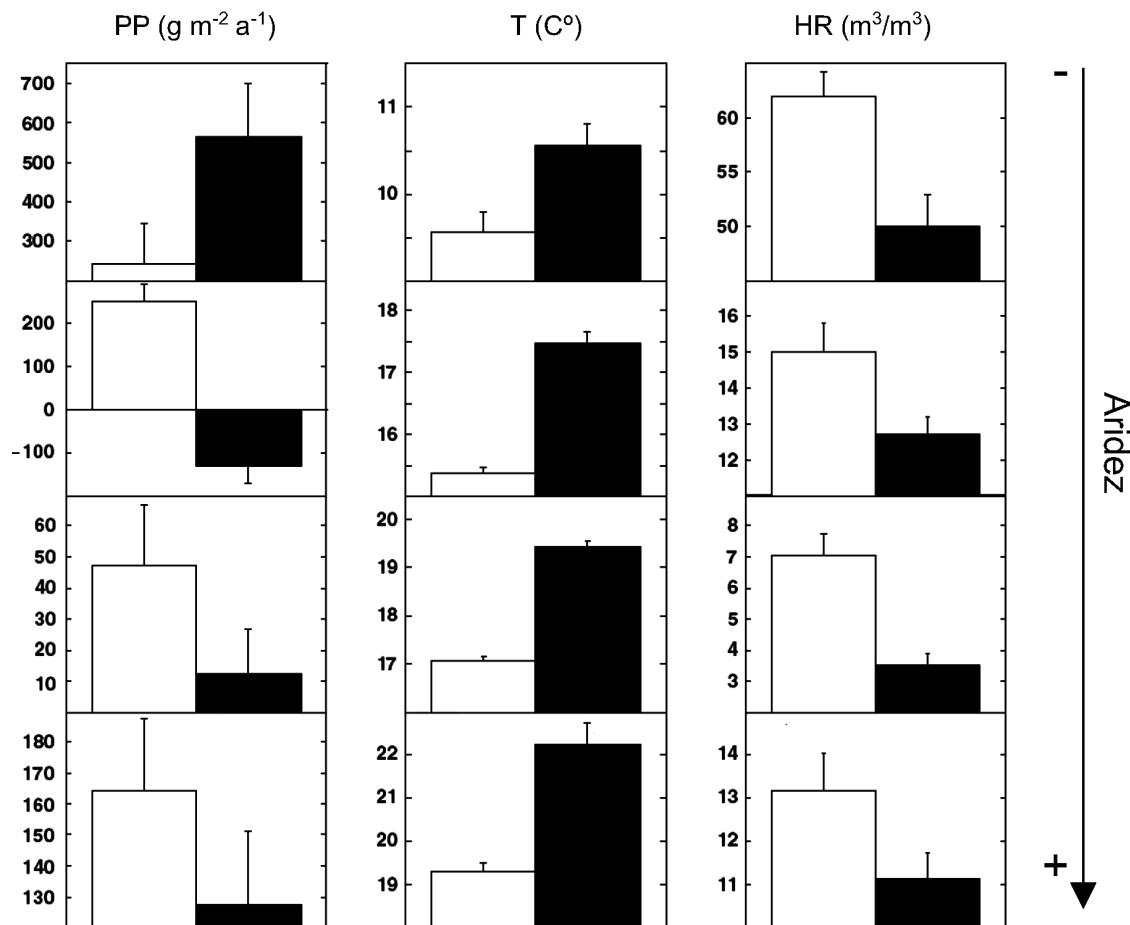


Figura 2. Producción primaria anual neta de la biomasa aérea (PP), la temperatura (T) y la humedad relativa media de la tierra durante la estación de crecimiento de cuatro matorrales europeos ordenados de menor a mayor índice de aridez. Comparación entre los años 2002 (barras blancas, normal) y 2003 (barras negras, ola de calor). Producido por Peñuelas et al., 2007.

4 CAMBIO CLIMÁTICO Y ESPECIES EXÓTICAS INVASORAS

Los efectos ecosistémicos derivados de las especies exóticas que colonizan y se vuelven «invasoras» son una de las cinco fuerzas que impulsan el cambio ambiental a nivel global (Vila et al., 2008). Tanto la expansión de estas especies invasoras como la importancia de sus efectos interactúan de forma compleja con el cambio climático. En el caso de las especies invasoras tropicales, su expansión se ve claramente favorecida por el cambio climático. Las diferencias fisiológicas, morfológicas y fenológicas entre las especies nativas y las invasoras afectan a las dinámicas de su población mediante procesos de competencia, mutualismo y facilitación. Si, como resultado de esta interacción una especie invasora tiene éxito, podrá influir en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, alterando flujos y procesos como el ciclo del agua, el de los nutrientes o el régimen de perturbación de los incendios (Mack et al., 2000).

Es importante enmarcar el estudio de las especies invasoras dentro del contexto del cambio climático. A nivel global, los procesos no tienen lugar como casos aislados y la interacción entre diversos factores es común. De hecho, si se tienen en cuenta los dos motores globales del cambio de manera conjunta, muchos estudios señalan que el cambio climático está aumentando, facilitando y acelerando el éxito de las especies invasoras en varias partes del planeta, así como causando que sus consecuencias sean más importantes (Stachowicz et al., 2002; Theoharides and Dukes, 2007; Ward and Masters, 2007). No solo eso, sino que el cambio climático también representa una oportunidad para que aquellas especies exóticas que aún no se habían considerado como peligrosas aumenten su potencial invasor (Aronson et al., 2007). Dos causas que no se excluyen mutuamente pueden explicar esta situación: o las especies invasoras adquieren nuevos recursos y consiguen adaptarse mejor a las nuevas condiciones climáticas o los efectos del cambio climático en los ecosistemas las favorecen (Dukes and Mooney, 1999; Theoharides and Dukes, 2007).

Adquirir más recursos bajo nuevas condiciones climáticas es, en resumen, mostrar una alta capacidad competitiva, sea porque las especies invasoras tengan mecanismos más eficientes para captar recursos o porque los utilicen de manera más eficiente. Por ejemplo, como resultado del aumento de la concentración de dióxido de carbono en condiciones experimentales, los individuos de *Bromus tectorum* y de *Cirsium arvense* (especies nativas de la Península Ibérica e invasoras en las praderas norteamericanas) son más competitivas y más difíciles de erradicar gracias a una alta ganancia de biomasa (Ziska et al., 2004, 2005). Al mismo tiempo, este aumento de la concentración de dióxido de carbono aumenta el aprovechamiento del agua. Las especies invasoras transpiran menos agua cuando realizan la fotosíntesis, lo que les permite extenderse hacia zonas más áridas donde la falta de este recurso anteriormente solía limitar su crecimiento (Dukes and Mooney, 1999). Sin embargo, estos resultados experimentales no son los mismos para todas las especies invasoras y pueden dejar de tener validez o incluso ser opuestos cuando se tienen en cuenta factores como la comunidad de plantas nativas con la que compiten o el ecosistema invadido (ver Dukes and Mooney 1999 para una revisión de los estudios que muestran distintas respuestas de las especies invasoras ante las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono en diversos entornos).

Adaptarse a otros escenarios climáticos no es algo nuevo para las especies invasoras. De hecho, su introducción en zonas con condiciones ambientales muy diferentes de las de sus regiones de origen ya representa un cambio climático en sí. Este es el motivo por el que el estudio de las especies invasoras con rangos de distribución amplios, que invaden ecosistemas muy diferentes, puede ser útil para predecir su capacidad potencial para adaptarse al cambio climático. Si una especie exótica no tiene éxito al reproducirse, se extinguirá y perderá la oportunidad de invadir la región en la que se haya introducido. Por lo tanto, el potencial invasivo se basa en la optimización del éxito reproductivo gracias a la adaptación biológica de los fenotipos para cada situación particular, generalmente mediante la plasticidad fenotípica (Hulme, 2008) (Figura 3). La planta herbácea *Pennisetum setaceum* es un claro ejemplo de ello. Actualmente, presenta un amplio rango de distribución, estando presente casi en todo el mundo y siendo capaz de invadir por igual los entornos extremadamente húmedos, como los bosques tropicales hawaianos, y las zonas muy áridas como los desiertos de California (Poulin et al., 2005). La baja variabilidad

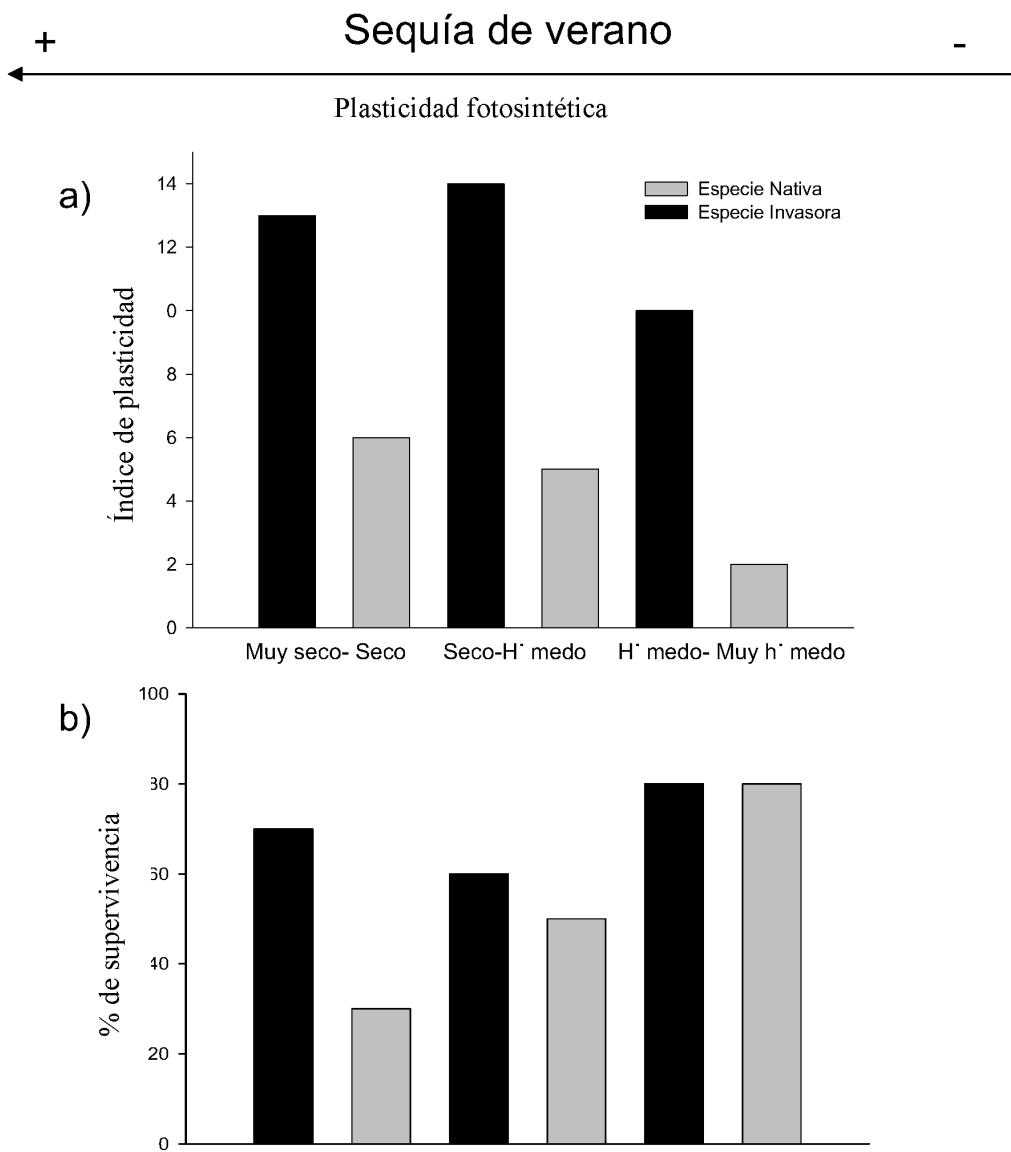


Figura 3. El éxito de las especies invasoras en regiones diferentes con condiciones ambientales diferentes gracias a su alta plasticidad fenotípica constituye una demostración de su capacidad de adaptación al cambio climático. Como ejemplo, aquí comparamos el caso hipotético de una especie invasora con una nativa a lo largo de un gradiente de sequía estival. La sección a) muestra hasta qué punto las especies invasoras tienen una respuesta fotosintética más plástica para enfrentar el gradiente de sequía estival que las especies nativas. Con respecto a la sección b), aunque las condiciones climáticas no sean restrictivas (zonas húmedas y muy húmedas), la diferencia de plasticidad fotosintética entre las especies no tiene un valor de adaptación y, por tanto, tanto la especie nativa como la invasora mantienen el mismo porcentaje de individuos vivos. Sin embargo, cuando las condiciones son más restrictivas (zonas secas y muy secas), la especie invasora mantiene unos altos niveles de supervivencia individual, mientras que la nativa no se adapta a las condiciones ambientales y su porcentaje de supervivencia disminuye abruptamente.

genética de sus poblaciones revela que no ha habido procesos de adaptación local, sino que el éxito de la invasión se ha debido a la gran plasticidad fenotípica de la especie (Poulin et al., 2007, 2005). En resumen, se puede decir que el valor de adaptación que la plasticidad fenotípica otorga a las especies invasoras es doble: por un lado, les permite invadir ecosistemas diferentes con condiciones ambientales diferentes, y por otro les puede ayudar a adaptarse mejor a los efectos del cambio climático que han de sufrir.

Aunque los efectos del cambio climático en los ecosistemas son una amenaza para muchas especies, también representan una oportunidad para otras, especialmente para las especies invasoras (Simberloff, 2000; Theoharides and Dukes, 2007). Por ejemplo, en la cuenca del Mediterráneo puede ser preocupante el hecho de que los crecientes incendios forestales producidos como resultado del efecto combinado del aumento de temperatura y el aumento de la intensidad de las sequías favorece a las especies invasoras pirófitas o pirófilas (que se adaptan al fuego), como las del género *Acacia*. Esta situación incluso se puede agravar cuando los incendios aumentan y el periodo de incidencia de incendios se acorta como sigue: tras un incendio, las semillas de estas especies invasoras germinan antes y son más numerosas que las de las especies nativas, monopolizando espacio y recursos con rapidez. Esta respuesta temprana a los incendios reduce la capacidad de germinación y rebrote de las semillas de las especies nativas que no se hayan podido adaptar a esta perturbación. Además, el rápido crecimiento de especies invasoras y su precocidad reproductiva pone en juego tanto una gran cantidad de biomasa, dado que puede convertirse en material combustible, como muchas semillas que germinarán una vez que ocurra un incendio de nuevo, repitiéndose así el ciclo de nuevo (Figura 4). Un hecho ecológico importante derivado de todo el proceso es que una pequeña perturbación inicial puede motivar un nuevo estado de equilibrio mantenido a largo plazo en la comunidad (Milchunas y Lauenroth, 1995). La nueva dinámica de esta comunidad permite la persistencia de la especie invasora y también supone un obstáculo para la recolonización de especies nativas no adaptadas al fuego.

Tan importante como el tipo de efecto del cambio climático que favorece las especies invasoras es el momento en el que se produce. Stachowicz et al. (2002) observaron cómo un aumento de las temperaturas máximas del agua en invierno (inviernos templados) favorecía la reproducción de especies invasoras de ascidias (invertebrados marinos), mientras que un descenso de las temperaturas mínimas en invierno (inviernos fríos) favorecía las especies nativas de ascidias. A su vez, un aumento de las temperaturas máximas en verano favoreció un mayor crecimiento de las especies invasoras, mientras que las especies nativas no se vieron afectadas por él.

El aumento de la temperatura global que se prevé tenga lugar puede aumentar las áreas de distribución de ciertos organismos y convertirlos en especies invasoras (Figura 5). Cuando se extienden a nuevos territorios, estas especies empiezan a competir con otros organismos, desplazándolos y a veces incluso eliminándolos. El caso más claro es el de las regiones polares (Aronson et al., 2007; Frenot et al., 2005). Muchas especies y procesos ecosistémicos (redes tróficas, flujos de carbono y de energía) de estas regiones son únicos debido al aislamiento motivado por las condiciones ambientales extremadamente frías. Cuando llegan especies invasoras, estos procesos ecosistémicos se ven profundamente alterados y las especies nativas se extinguieren, tanto porque no están adaptadas a un alto grado de competencia como porque los

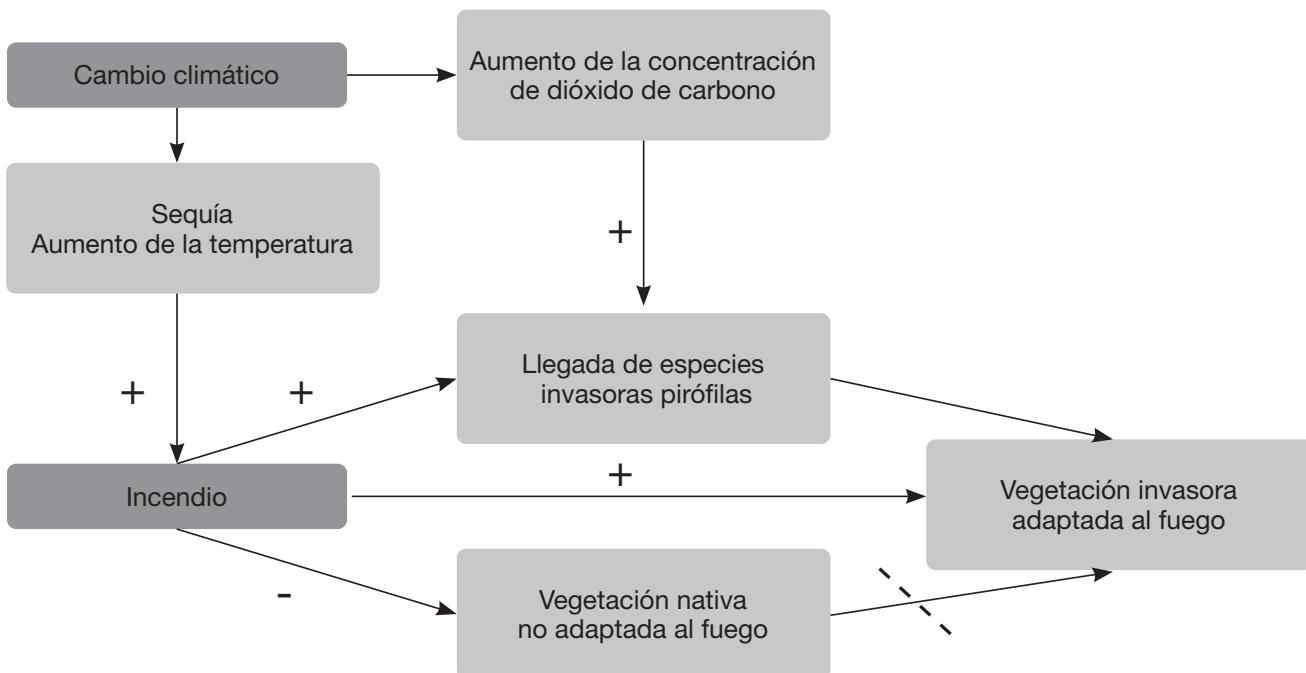


Figura 4. El cambio climático puede aumentar la incidencia de incendios en ecosistemas en los que esta perturbación no es frecuente. Así, la introducción de especies invasoras adaptadas al fuego podría empezar un bucle de retroalimentación positivo y terminar en un cambio radical tanto de la vegetación dominante como del régimen de incendios. Este bucle tendría lugar cuando las especies exóticas favorecieran los incendios acumulando grandes cantidades de biomasa siendo, al mismo tiempo, capaces de recolonizar la zona quemada de forma más eficiente que las especies nativas.

nuevos procesos ecosistémicos creados no las favorecen (Aronson et al., 2007). Por lo tanto, debido a las condiciones particulares de las regiones polares, los impactos producidos como resultado de las interacciones del cambio climático con las especies invasoras son más fuertes que en ninguna otra región del planeta.

En resumen, hay muchas pruebas que demuestran los efectos sinérgicos entre el cambio climático y las especies invasoras. El desafío que se nos presenta ahora es predecir las futuras interacciones para un modelo de gestión de especies invasoras manteniendo el proceso de cambio climático actual. Los primeros modelos predictivos han intentado determinar la posible expansión del territorio que las especies invasoras pueden invadir a partir del estudio de las variables climáticas de los ecosistemas que ya han sido invadidos. Se ha demostrado que estas variables predictivas varían dependiendo tanto de las características de las especies invasoras (por ejemplo, en el caso de las plantas si se trata de una anual o de una perenne, leñosa o herbácea) como de las características de los ecosistemas invadidos (mínima temperatura en invierno, precipitación media en verano, periodo medio de crecimiento) (Beerling, 1993; Nielsen et al., 2008; Pattison y Mack, 2008).

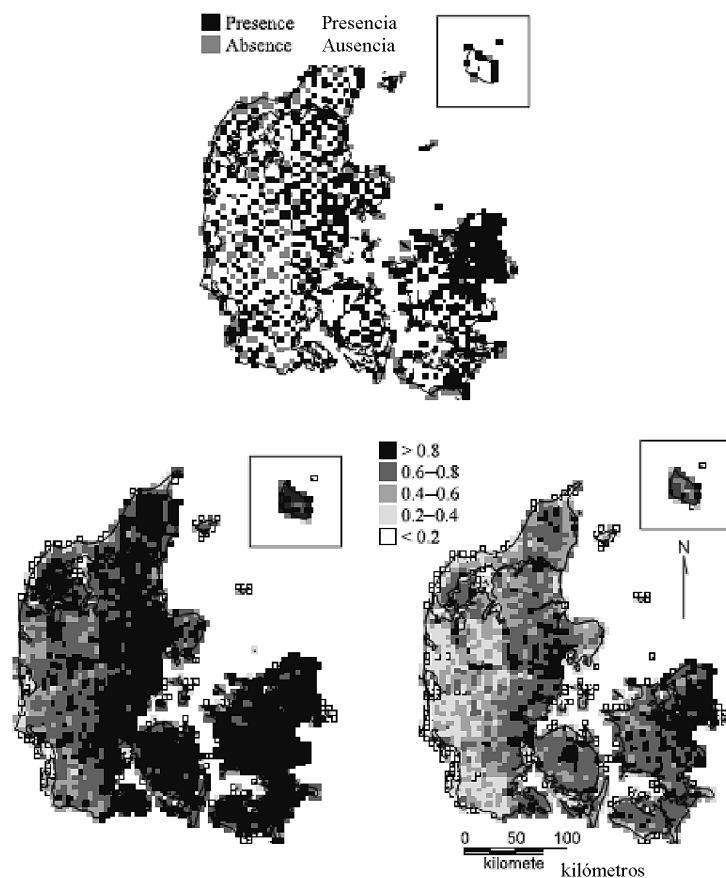


Figura 5. Los modelos que predicen la expansión de las especies invasoras a nuevas zonas gracias al cambio climático son herramientas de gestión muy útiles. En este caso, aquí podemos ver: a) la distribución actual de *Heracleum mantegazzianum* en Dinamarca (mapa superior; las celdas en tono oscuro indican la presencia de la especie, mientras que las de tono claro indican su ausencia), b) probabilidad de que se invadan nuevas zonas (escala de 0 a 1, mapa inferior izquierdo) y c) probabilidad de encontrar entornos favorables para la especie invasora según sus requisitos ecológicos (escala de 0 a 1, mapa inferior derecho). Fuente: Nielsen et al. (2008).

5. CAPACIDAD EVOLUTIVA DE LAS ESPECIES PARA DAR RESPUESTA AL CAMBIO CLIMÁTICO

Actualmente, uno de los desafíos más importantes en relación al cambio climático es comprender si las especies animales y vegetales serán capaces de adaptarse a las nuevas condiciones ambientales (McCarty, 2001; Jump and Peñuelas, 2005; Parmesan 2006; Visser, 2008).

Se han descrito varios tipos de respuestas por parte de las especies al cambio climático: i) migración hacia hábitats nuevos, más favorables en sentido climático; ii) el cambio en la distribución fenotípica gracias a la plasticidad fenotípica; y iii) el cambio genético mediante procesos de microevolución (Parmesan, 2006; Visser, 2008). Los primeros dos mecanismos pueden ocurrir en períodos de tiempo relativamente cortos y varían dependiendo de las poblaciones, motivos por

los que algunos autores han sugerido que el papel de la selección natural y la evolución de nuevos fenotipos adaptados a los nuevos escenarios climáticos será pequeño en comparación con los cambios en la distribución de especies o con el papel de la plasticidad fenotípica (Parmesan, 2006; Lau et al., 2007). Sin embargo, numerosos estudios demuestran que el clima puede ser una fuerza importante de selección natural, y hay muchas evidencias de diferenciación entre poblaciones de la misma especie como respuesta a un factor climático (consultar la revisión de Jump and Peñuelas 2005 sobre los estudios que muestran la diferenciación de la población como respuesta al clima). Además, en un estudio reciente Visser (2008) propuso que la adaptación al cambio climático mediante la plasticidad fenotípica o mediante la dispersión a nuevos hábitats también puede incluir procesos evolutivos, sugiriendo así que los diversos mecanismos de adaptación pueden interactuar. Resumiendo, ello indica que la adaptación de las especies al cambio climático puede tener formas diferentes y que el potencial de adaptación será diferente entre las especies y las poblaciones.

A la vista de los nuevos escenarios, una de las estrategias pronosticadas es el movimiento o migración de las especies hacia latitudes y altitudes mayores, en las que las condiciones ambientales son más favorables para las poblaciones de plantas y animales (Parmesan and Yohe, 2003; Alcamo et al., 2007; Peñuelas et al., 2007). Hoy en día hay muchos estudios que demuestran estos cambios (ver Parmesan et al., 2006 para leer una revisión exhaustiva sobre los cambios en la distribución de las especies). Por ejemplo, Kulman (2001, 2002, 2003) descubrió un desplazamiento de la línea de los árboles (el límite del bosque) hacia altitudes mayores (en torno a unos 120-375 m) en las zonas montañosas de Suecia a lo largo de los últimos 50 años, y Peñuelas et al. (2007) encontraron un desplazamiento similar en un bosque montañoso de la Península Ibérica que presenta algunas de las formaciones de hayas encontradas más al norte de Europa (Figura 6).

Sin embargo, en comparación con las tasas de migración anteriores de especies animales y vegetales, a la velocidad actual de cambio climático muchas especies no son capaces de seguir el rastro del clima al que están adaptadas en la actualidad (Davis and Shaw, 2001). Una consecuencia importante de ello puede ser la formación de nuevas comunidades de plantas como resultado de la capacidad diferente de las especies para migrar con el clima (Walther et al., 2002; Walther, 2003). Esto puede afectar profundamente las interacciones interespecíficas entre especies y modificar la dominancia y la composición de las comunidades vegetales (Bertness and Ewanchuk, 2002). Del mismo modo, las diversas capacidades de las especies para migrar pueden afectar a las relaciones entre predadores y presas, insectos herbívoros y sus plantas anfitrionas, parásitos e insectos anfitriones o insectos polinizadores y plantas (Visser and Both, 2005; Parmesan, 2006). Por ejemplo, Visser y Both (2005) estudiaron la respuesta de varios depredadores y sus presas al cambio climático y observaron que, en la mayoría de los casos, la respuesta de cada sistema de especies era diferente, aumentando la asincronía entre poblaciones de depredadores y sus presas con consecuencias importantes para los ecosistemas.

Por otro lado, las especies pueden enfrentarse al cambio global a través de un cambio en la composición genérica de sus poblaciones (microevolución). En este caso, las poblaciones cambian la distribución de sus fenotipos, de modo que la adaptación (o «adecuación») biológica de la nueva composición es mayor que la de la distribución fenotípica original. Así, la presencia de genotipos con mayor adaptación biológica aumentaría en el nuevo entorno (por ejemplo,

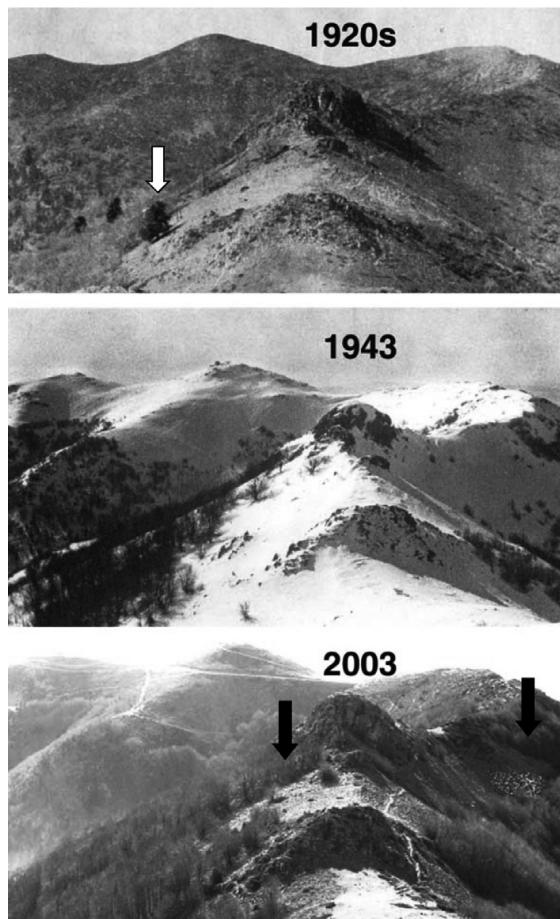


Figura 6. Desplazamiento altitudinal de los bosques de hayas (*Fagus sylvatica*) en Cataluña (España) durante el siglo xx. El cambio más obvio es el aumento del tamaño y la densidad de los árboles, así como su desplazamiento hacia mayores alturas (flechas negras), de varios metros en algunas zonas. Otro cambio evidente es la desaparición de las pocas coníferas que aún estaban presentes en el cambio de siglo (flecha blanca). Fuente: producido por Peñuelas et al. (2007).

genotipos más adaptados al calor o a las sequías), mientras que la presencia de genotipos con una menor adaptación biológica disminuiría (Visser, 2008).

En este sentido, algunos trabajos demuestran que la selección natural puede ocasionar cambios evolutivos solo en algunas generaciones, mientras que el clima es una fuerza selectiva. Se ha observado esta adaptación «rápida» en poblaciones animales y vegetales. Por ejemplo, (Rodríguez-Trelles and Rodríguez, 1998) descubrieron un cambio en la frecuencia de genotipos adaptados al calor en poblaciones naturales de *Drosophila* en España entre 1976 y 1991. Por otro lado, Réale et al. (2003) descubrieron un cambio genético en las poblaciones de ardilla roja ártica: las hembras de esta especie paren antes a sus crías como respuesta al aumento de las temperaturas en primavera. Igualmente, Franks et al. (2007) demostraron una floración temprana como respuesta al aumento de las sequías en las poblaciones de una especie herbácea, cuyas semillas se fueron recogiendo en años diferentes (Figura 7).

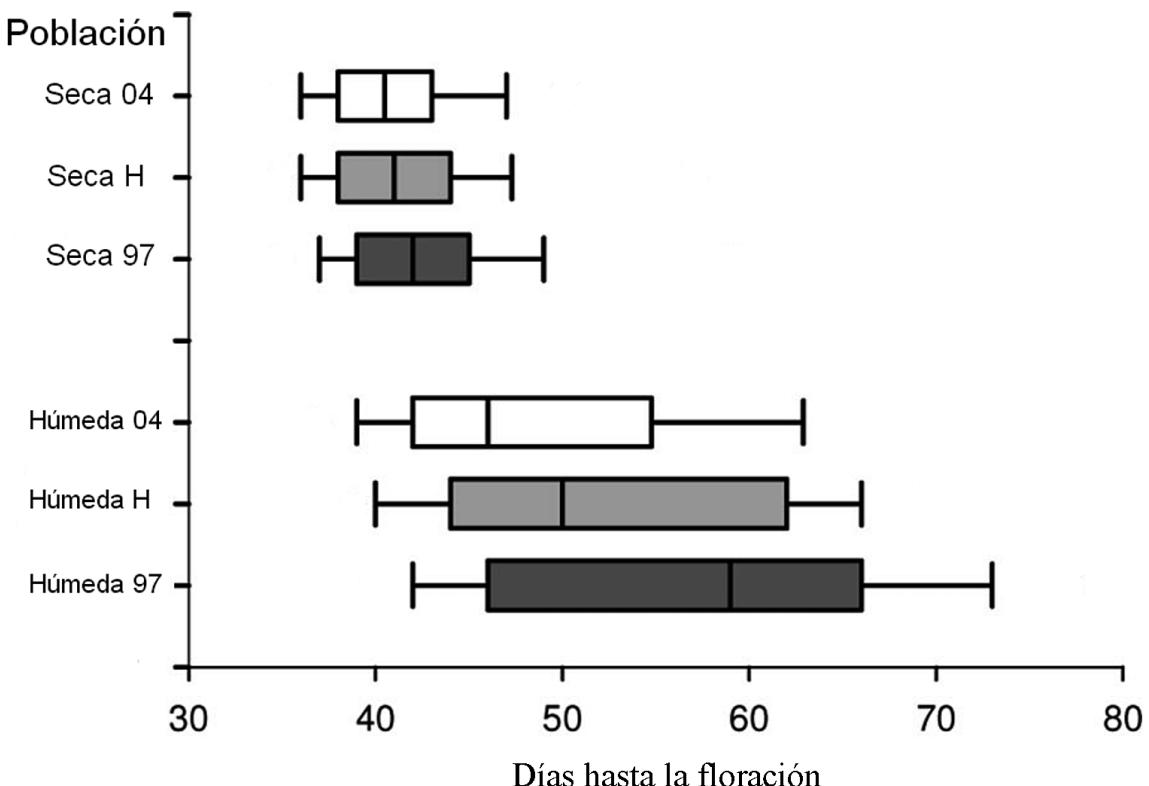


Figura 7. Evolución de la fecha de floración de *Brassica rapa*. En este diagrama de cajas, las cajas muestran los días hasta que se abre la primera flor en una población en entorno seco y en otra en entorno húmedo. Las semillas se recogieron en 1997 (ancestros) y en 2004 (descendientes) de ambas poblaciones. La letra «H» hace referencia a plantas híbridas procedentes de las plantas ancestros y de las descendientes. La banda central de la caja es la mediana de la floración, y las líneas muestran los percentiles 10, 25, 75 y 90. Las plantas de las semillas recogidas en 2004 florecieron antes en todos los casos, tanto las plantas de la población seca como las de la húmeda. Fuente: producido por Franks et al. (2007).

Aunque estos trabajos muestran ejemplos de que la evolución no es siempre un proceso lento, sino que puede tener lugar en escalas relativamente cortas como unas pocas generaciones, esto no siempre se cumple. En general, las especies (o las poblaciones) necesitan series temporales muy largas para que tengan lugar los cambios en las composiciones genéticas y para que estos sean, por tanto, detectables (Parmesan, 2006). Además, hay estudios que demuestran que la capacidad evolutiva de algunas especies no es suficiente si se compara con las tasas de cambio climático, ni siquiera para poblaciones de algunas especies (Tabla 1). Estos ejemplos subrayan las dificultades que encuentran las especies cuando se enfrentan al rápido cambio climático actual. Este hecho puede tener una importancia particular para ciertas especies de plantas en los casos en los que la dispersión hacia nuevos hábitats se ve limitada por la fragmentación del hábitat o por las limitaciones típicas de los mecanismos de dispersión de algunas especies (Jump y Peñuelas, 2005).

Tabla 1. Ejemplos de estudios que demuestran la capacidad evolutiva de algunas especies vegetales. La capacidad de heredar los rasgos, esto es, la proporción de la varianza fenotípica total atribuible a los efectos genéticos aditivos, se muestra resumida en un rango que cubre todos los rasgos estudiados. Fuente: producido por Jump y Peñuelas (2005).

Especie	Rasgos	Capacidad de heredar los rasgos (h^2)	Conclusión
Betula pendula, B. pubescens	Aparición de brotes	0,00-0,65	La tasa de evolución es menor que la tasa prevista de calentamiento, incluso en la población más genéticamente variable.
Pinus sylvestris	Aparición de brotes; endurecimiento de la escarcha	0,20-0,67	La tasa de evolución probablemente es menor que la tasa de cambio climático
Chamaecrista fasciculata	Producción de semillas, cantidad y densidad de hojas, tasa de desarrollo	0,00-0,48	Respuesta extremadamente lenta debido a la necesidad simultánea de evolución de distintos caracteres. La tasa de evolución es mucho menor que la tasa prevista de cambio climático
Brassica juncea	14 caracteres, incluyendo peso y cantidad de hojas, tallo y semillas	0,15-0,55	Falta de respuesta genética o fenotípica en los caracteres reproductivos. Muy pequeña o nula capacidad de adaptación en la mayor parte de los caracteres.
Drosophila birchii	Resistencia a la deshidratación	0,00	Falta de respuesta a la selección. Muy poco potencial de adaptación en respuesta al cambio climático.

Finalmente, merece una mención el papel de la plasticidad fenotípica en la respuesta de la especie al cambio climático. La plasticidad fenotípica es la capacidad de un cierto genotipo para generar diversos fenotipos en distintos entornos (Schlichting, 1986; Pigliucci, 2001). Este concepto se hace patente en la norma de reacción, que es el rango o patrón que sigue la expresión fenotípica de un genotipo expresado en un gradiente de medios ambientales (Schlichting, 1986; Pigliucci, 2001). Hay muchos estudios que muestran ejemplos de cambios en el fenotipo como respuesta al entorno, tanto en las poblaciones vegetales como en los animales (ver, por ejemplo, la figura 8). Sin embargo, aunque la plasticidad fenotípica puede describir sencillamente los cambios morfológicos y fisiológicos en individuos, es más interesante estudiar el valor del potencial de adaptación de estos cambios (Sultan, 1987; Sultan, 1995; Gianoli, 2004; Valladares et al., 2007). Por ejemplo, la plasticidad fenotípica puede actuar modulando la función de la selección natural. Esto ocurriría si se eliminaran las diferencias de adaptación biológica (*fitness* o aptitud) de los distintos genotipos de una población como resultado de las variaciones de su expresión fenotípica en los distintos entornos experimentados por la población (Gianoli, 2004).

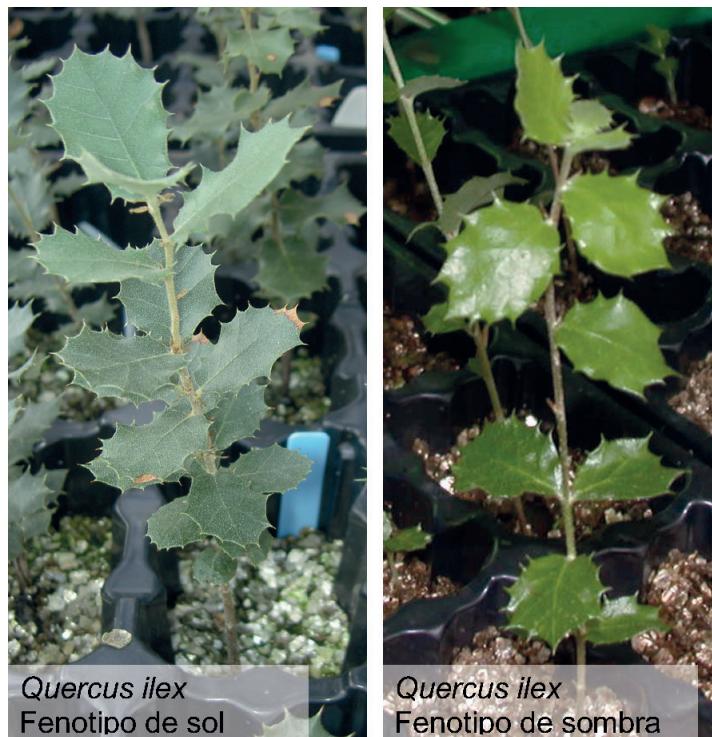


Figura 8. Plasticidad fenotípica a la luz en encinas (*Quercus ilex*). El fenotipo de sol (izquierda) muestra menor Superficie foliar específica (SLA por sus siglas en inglés), con hojas más pequeñas y más densas y una longitud internodal más corta. La plasticidad fenotípica es una estrategia utilizada por las especies para afrontar el cambio climático, siendo una característica que puede evolucionar como respuesta a la selección natural (climática). Elaboración propia. Fotografías cortesía de Elena Beamonte.

La igualdad de *fitness* o aptitud de los diferentes genotipos causada por la plasticidad fenotípica limitaría las posibilidades de selección y mantendría la variabilidad genética dentro de la población (Sultan, 1995). Por ejemplo, dado un escenario de cambio climático, los distintos individuos (y genotipos) de una población de plantas serían capaces de presentar un fenotipo óptimo para las nuevas condiciones climáticas gracias a la plasticidad fenotípica, sin que la variabilidad genética asociada a la tolerancia a las altas temperaturas o a la sequía disminuya.

Además, la plasticidad fenotípica es una característica en sí misma; por lo tanto, se considera que está sujeta a la selección natural y a la evolución (Pigliucci, 2001; Visser, 2008). La plasticidad fenotípica (esto es, la norma de reacción) puede evolucionar si hay variación entre individuos (o poblaciones) en la respuesta al entorno (Sultan, 1987, Sultan, 1995, Visser 2008). En este caso, la evolución de la norma de reacción puede facilitar la adaptación de una especie (o de una población) a las nuevas condiciones del entorno. Por ejemplo, Heschel et al., (2004) descubrieron que algunas poblaciones de *Polygonum persicaria* habían desarrollado diferente plasticidad fenotípica en relación con la sequía, lo que les permitía optimizar su éxito reproductivo en las diversas condiciones experimentadas por cada población.

6. CAMBIO GLOBAL: EL CLIMA NO ES LO ÚNICO QUE CAMBIA

A pesar de la creciente importancia del cambio climático, esta no es la única fuerza ni necesariamente la más importante que impulsa el cambio ambiental de los ecosistemas (Duarte et al., 2007). En general, los efectos del cambio climático son menores y se perciben más tarde que los que se deben a la fragmentación de los hábitats o a la contaminación. No obstante, el cambio climático va cobrando más importancia cada vez. Hoy en día, se considera que de los cinco generadores del cambio climático más importantes reconocidos por las Naciones Unidas en su Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, el cambio en los usos del suelo y el cambio climático son los que ejercen un mayor impacto en la biodiversidad a nivel global. Lógicamente, la importancia relativa de los cinco generadores directos de cambio varía según de qué ecosistema se trate y, por tanto, aunque en ciertas regiones mediterráneas las especies exóticas naturalizadas y las invasoras sean la amenaza más importante para la biodiversidad, los cambios de uso del suelo constituyen una amenaza para ríos y lagos, los compuestos de nitrógeno y fósforo lo son para los ecosistemas templados del hemisferio norte y el cambio climático es el generador más poderoso en las zonas polares y subpolares de los dos hemisferios.

En general, es difícil separar totalmente los procesos ecosistémicos de los impactos en la biodiversidad debido a los efectos de cada uno de los diversos generadores del cambio global. Por ejemplo, en el caso de los ecosistemas terrestres de nuestras latitudes, el cambio climático y los cambios en los usos del suelo operan simultáneamente de tal manera que pocas veces se puede atribuir el impacto a uno de ellos exclusivamente y solo se puede estimar de forma aproximada la contribución relativa a los cambios observados. Hoy en día, hay gran cantidad de información acerca de muchos cambios ambientales que se puede relacionar con los generadores más importantes del cambio global. La fragmentación de los hábitats debido a las carreteras y las vías de comunicación motiva la extinción de las especies que requieren mucho espacio continuo para realizar sus ciclos vitales, habiéndose documentado el empobrecimiento de las poblaciones aisladas y fragmentadas en el caso de muchas especies (Valladares, 2008). El calentamiento global fuerza la migración de muchas especies a distintas altitudes y latitudes, pero esas migraciones están muy restringidas debido a las construcciones humanas y a nuestros usos del suelo, lo que no hace sino aumentar el problema de las extinciones locales. Además, en los ecosistemas de montaña, ricos en especies endémicas, la migración en altitud no es posible, motivo por el cual el impacto del calentamiento en ellas es desproporcionadamente alto.

7. AVANCES Y RETOS EN LA INVESTIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Tras algunas décadas de intensas investigaciones, hemos logrado comprender mucho mejor cómo se produce el cambio ambiental en los sistemas naturales del planeta. Los efectos del cambio climático, el generador de cambio global más preocupante y general en las especies individuales, empieza a estar bien documentado, particularmente en el caso de especies importantes para los seres humanos. Sin embargo, las especies no están solas ni separadas del resto y los efectos del cambio climático tienen relación con todas las especies y con toda la red de

interacciones establecida entre ellas, así como con los ciclos biogeoquímicos, y, con respecto a esta cuestión, nuestro conocimiento es mucho menos profundo. Hay estudios recientes que informan sobre efectos que parecen ir contra el sentido común, como una disminución de la productividad debida a cambios en la temperatura o una reducción de la eficiencia en el uso del agua que hacen las plantas en condiciones crecientes de sequía. Cambios simples en los ritmos estacionales de las especies de un ecosistema alteran sus interacciones de tal manera que se pierden muchas de las sincronizaciones esenciales entre depredadores y presas o entre polinizadores y plantas polinizadas. La creciente escala de incertidumbre que va desde los efectos en la vegetación hasta el ecosistema entero hace que el impacto real del cambio climático en la estructura y el funcionamiento de los sistemas naturales no sea en absoluto predecible en la actualidad. Todo indica que las reacciones en cadena, con sus múltiples sinergias entre los nodos de la red trófica, pueden incluso acelerar los efectos del cambio climático en los ecosistemas y hacerlos más agudos que los efectos estimados en las predicciones basadas en los efectos directos sobre determinadas especies o en niveles tróficos específicos.

Una de las limitaciones de gran parte de nuestro conocimiento actual viene dada por el hecho de que se basa en estudios de observación y en correlaciones entre cambios climáticos y efectos en los sistemas naturales con muy poca base experimental o incluso ninguna. Aunque hay una base de datos experimental incipiente sobre estos efectos, los altos costes de diseño y el coste de las instalaciones capaces de simular el cambio climático en sistemas completos (e incluso en microcosmos) hace que los progresos realizados utilizando este enfoque, tan intrínsecamente ligado al método científico en sí, sean muy lentos. Actualmente, los cinco desafíos más importantes son: 1) integrar el conocimiento fragmentario existente sobre los efectos del cambio climático en los sistemas naturales, 2) profundizar en los efectos del cambio climático en sistemas complejos, caracterizados por redes de interacciones, efectos en cascada, efectos difusos y efectos indirectos, 3) desarrollar equipos de investigación multidisciplinares que sean capaces de combinar herramientas e información procedente de campos como la física, la química, la genética, la ecología y la socioeconomía, 4) mejorar nuestra capacidad para simular experimentalmente el cambio climático con el fin de poder aislar procesos y mecanismos implicados en los efectos, y 5) ser capaz de anticipar los efectos para mitigarlos o para establecer una estrategia de adaptación eficiente.

CLIMATE CHANGE AND NATURAL SYSTEMS

Fernando Valladares, Silvia Matesanz, Oscar Godoy y Teresa Gimeno

Instituto de Recursos Naturales. Centro de Ciencias Medioambientales. CSIC. Madrid. España

1 INTRODUCTION

The anthropogenic emissions of carbon dioxide and other greenhouse effect gases are accelerating the increase of the Earth's superficial temperature, also modifying the hydrological cycle and the distribution of precipitations on regional and global scales (Christensen et al., 2007). Climate change also results in an increase of the frequency and intensity of droughts in many regions of the planet, particularly in areas like the Mediterranean basin (Christensen et al., 2007). All these changes can potentially affect the organization and functioning of the biosphere at such different scales as organisms (morphology, physiology, phenology), populations (demography), communities (composition, interactions among species), ecosystems (structure, functioning, services) and biosphere as a whole (Duarte et al., 2007; Moreno, 2005).

A way to understand the impact that climate change can have on natural systems is by studying the effects of past climate changes similar to the current ones, be it on a geological or historical scale (Velázquez de Castro, 2005). In fact, there are many proofs of important impacts in the vegetation distribution as a result of recent extreme climate events (Valladares et al., 2005; Alcamo et al., 2007). Thus, for instance, Allen and Breshears (1998) documented changes on vegetation on a regional scale in the South of United States caused by the high mortality of *Pinus ponderosa* during the drought of the fifties. Later on, the same authors have observed similar changes in response to a drought occurring in the North American Southwest in 2002-2003 (Breshears et al., 2005), and the global heat wave effects of 2003 that killed some dozens of thousands of Europeans has left a historical imprint in the planet's carbon balance: the 2003 drought is considered as the responsible for one of the biosphere's most important productivity crises (Ciais et al., 2005). Similar changes have been observed in the Australian savanna (Fensham and Holman, 1999; Fensham et al., 2005) and in the steppes of Northern China (Liang et al., 2003). In our country, Peñuelas and Boada (2003) have documented important changes on vegetation in the Montseny Range during the last decades, and Sanz-Elorza et al (2003) documented similar changes in the Guadarrama Range. Both vegetation changes seem linked to a progressive temperature increase as well as to changes in the land uses, two processes occurring during the last four decades and working together in many places of the planet, so that their effects are difficult to separate.

Given that climate affects biogeochemical cycles and the way species making up ecosystems behave, it is easy to understand that a change in climate entails a whole cascade of direct and indirect effects on natural systems (Llebot, 2005; Valladares, 2006; Velázquez de Castro,

2005). From water and nutrients availability, up to ecosystem productivity or biodiversity, climate change affects many processes that have impacts, ranging from the molecule up to the ecosystem (Moreno, 2005; Valladares, 2008). There are two crucial aspects, although very simple ones, that have to be considered when tackling climate change and ecosystems: i) each species integrating ecosystems is affected in a different way by the same environmental change intensity, ii) species composing an ecosystem interact among themselves, i.e. there is a complex relationship network ranging from dependence to competence going through symbiosis or mutual simplification of existence. What can be inferred of these two aspects is that the consequences of climate change on the whole ecosystem are very complex (Duarte et al., 2007). The changes on biodiversity direct or indirectly induced by climate change not only affect ecosystem functioning, but also the ecosystems' ability to render services and to recover from disruptions. Since climate change has impacts not only on species but also on the intensity and nature of interactions among themselves, it generates important alterations that we are merely starting to understand. Something as simple as alterations on phenology or on the seasonal animal and plant rhythms as a consequence of changes in climate results in the loss of many synchronizations among species (Peñuelas and Filella, 2001), examples of which are that a plant is not found on time by its pollinator or the scatterer of its fruits if the warming advances its cycle, or many animals do not find their food or their host species if they respond strongly to climate.

2 CLIMATE CHANGE EFFECTS: FROM SIMPLE TO COMPLEX

A clear case of simple and direct effects of climate change are the changes on the seasonal rhythms of organisms as a result of changes in climate. And, apart from the changes in plant flowering and fruiting dates (e.g. Peñuelas et al., 2002), another good example is given by species like the brown bear (*Ursus arctos*), adapted to endure hard winters hibernating after an intense food consumption in summer and autumn (Swenson et al., 2007). The following have been proved: that the further south the shorter the hibernation, that with global warming bears can be seen further north every time and that in various places hibernation is interrupted or it doesn't take place with warm winters (Doupe et al., 2007). For instance, the few Cantabrian brown bears of the Cantabrian Mountains are more active during the winter, looking for food in an almost uninterrupted way (Palomero et al., 2007). The explanation to this behaviour seems to lie in climatic alterations that have led to bad autumns on the one hand in which fruit production, especially chestnuts, has been very low, so that they cannot store the fat necessary to withstand a long hibernation period; and to soft winters on the other hand, which enables them to search actively for food.

Climate change effects become more complex when we deal with fluctuating or unstable systems. Climatically, Mediterranean wetlands are characterized by high instability, which alternates periods of several rainy years with droughts. The animals of these ecosystems, unlike plants, move by their own means in response to these climate oscillations. This is the case of the Black-winged Stilt, or Common Stilt (*Himantopus himantopus*), which defends itself from adverse climatic conditions moving rapidly to places of Northern Africa and Europe (Figuerola

2007). Black-Winged Stilts represent a large population in the Mediterranean environment, with individuals moving among Morocco, Spain, Portugal, France and Italy, according to water availability in every one of these areas. The dispersion movements of Black-Winged Stilts are related both with local conditions of the Guadalquivir marshes and with the North Atlantic Oscillation (NAO), a pseudocyclic phenomenon affecting the climate of a large part of the Northern Hemisphere (Figuerola, 2007). Current climate change models point to a trend towards a NAO increase in the following decades, which would mean more droughts in the Mediterranean and, in this case, more dispersion of the birds living in its wetlands. The Black-Winged Stilt behaviour before climate changes is representative of the response of aquatic birds living in highly unstable habitats and it still remains to be established to which extent the results can be generalized to forest birds and other more stable habitats.

From here to 2100, climate change and its impacts can become the main direct change generators to determine biodiversity loss and the change of ecosystem services on a worldwide scale. Although it is possible that some ecosystem services in certain regions in the beginning will be benefited from the expected temperature or precipitation increases, an important net negative impact is expected on a worldwide scale on these services once the temperature exceeds over 2° C the preindustrial levels or once the warming increases more than 0.2° C per decade (Valladares et al. 2005, Moreno 2005). We can now remember more in detail the newly acquired information from the European Environment Agency (EEA) report published in 2004 on the impacts of climate change in Europe.

Climate change has affected European terrestrial ecosystems mainly in relation to phenology (seasonal rhythms of the vital cycles of species) and to the distribution of animal and plant species. Many plant species have advanced their production of leaves, flowers and fruits and a good number of insects have been seen in earlier dates. Global warming has increased in 10 days the average length of the growing season between 1962 and 1995. In support of this trend, the measure of ecosystem greenness through satellite imaging (a proved estimation of plant productivity) has increased in 12% during this period. Nevertheless, it must be said that this increase in the length of the growing season does not imply a real increase of growth and productivity in the Mediterranean ecosystems, since warming would be accompanied by less water availability (Valladares et al., 2005; Valladares, 2004). The migration of various thermophile plant species to Northern Europe has increased biodiversity in such areas, but biodiversity has decreased or has not varied in the rest of the continent. Many high mountain endemic species are threatened by altitudinal migration of shrubs and more competitive species typical of low areas and by the fact that temperature forecasts for the next decades are out of their tolerance thresholds.

In the 1990-1998 period, Europe's terrestrial biosphere has been a net carbon drain, partly compensating for the anthropogenic CO₂ emissions and contributing to climate change attenuation. It is unlikely that this positive balance in carbon sequestration, which has been maintained over the last 20 years, be maintained in the near future (or at least not at the current levels) since the temperature increase will reduce the CO₂ sequestration ability of European ecosystems. This carbon sequestration can be increased through reafforestation plans and an

adequate agricultural policy, but this will be a small increase compared to the targets established in the Kyoto protocol.

Survival of the birds that remain in Europe during winter has increased due to softer winter temperatures. This survival will continue increasing in parallel to the forecast temperature increase, but the net effect of this increased survival on bird populations is still unknown. Significant changes in the arrival and departure dates of numerous migratory bird species have been observed. However, in some studies carried out in the Iberian Peninsula, it has been proven that climate change has brought about a decrease in the reproductive success of birds such as the Pied Flycatcher (*Ficedula hypoleuca*), due to the lack of coincidence of arrivals with vegetation rhythms and with the rhythms of the invertebrates that nourish this bird in the Spanish recipient ecosystems (Sanz et al., 2003).

An important aspect of the global change in our latitudes is the increasing relevance of fires. The future warmer and more arid conditions, together with the biomass increase and its inflammability due to land abandonment increase the frequency and intensity of forest fires. The disastrous fires suffered in Spain and Portugal in the summer of 2003 seem to support this trend.

The temperature increase has many and diverse effects on the activity of living organisms. One environmentally important effect is the exponential increase of the biogenic emission of volatile organic compounds (VOC) by plants (Peñuelas, 2004). These emissions affect atmospheric chemistry, not only with respect to the carbon cycle and the aerosol formation, but due to their role in the oxidative balance of the air. VOC emissions are an emerging field of research, since not only the effects of climate change on their emission demand more attention, but new and fascinating ecological functions of the VOC are found periodically, indicating that our understanding of them is still fragmentary. The life cycles of organisms that do not control their body temperature, like invertebrates, amphibians and reptiles are directly affected by global warming. Many studies indicate failures in amphibian and reptile reproduction associated with the warming and the changes in the precipitation regime (Moreno et al., 2005). These failures in the reproduction of amphibians and reptiles are affected by a set of circumstances associated with features (e.g. production of soft-shelled eggs, permeable ones, with no parental care; sex determination depending on the temperature during the embryonic development) and by the combination of different driving forces related to habitat alteration.

Apart from complex, the effects of climate change on natural systems are very varied. This is the reason why we cannot aspire to cover them all in this work. Our purpose has rather been to revise current aspects of general interest, to illustrate some cases more in detail and provide the reader with bibliography and references that allow him to extend his reading with other sources. In particular, here we will focus on the importance of extreme events, on the incidence of climate change on such an important aspect of global change as the impact of invasive exotic species, and on what we already know of the species ability to evolve and adapt to such a rapid environmental change as climate change. We will finish with a brief analysis on why in ecology it is preferable to speak of global change rather than climate change and which are the scientific

challenges to improve our understanding of climate change effects on natural systems. Despite our faster perception and our sensitivity towards the effects on terrestrial systems due to our being essentially terrestrial organisms, the effects on marine systems are as important or more due to the strong impact of marine processes on the functioning and the climate of our planet itself. The effects on marine species and ecosystems are analogous to the ones discussed here for the terrestrial ecosystems, reason by which our mentioning the effects of climate change on marine systems is deliberately brief and incidental. To study this issue more in depth, we recommend reading Duarte et al. (2007) and its references.

3. IMPORTANCE OF EXTREME CLIMATE EVENTS

One of the common aspects of most climate models is that they forecast an increase in the frequency and intensity of extreme climate events. (Christensen and Christensen, 2003, Sillmann and Roeckner, 2008) (see Figure 1). Among these, floods and storms, heat waves, warm and cold spells and extreme droughts are included (Beniston, 2007). All these phenomena have in common the fact of being stochastic perturbations, with the potential of altering the structure of ecosystems or the result of ecological processes at different organization levels (Thibault and Brown, 2008). However, during the last years we have already witnessed various phenomena such as the 2002 and 2005 summer floods in central Europe or the early and late frosts, with devastating effects on plant production. Ecosystems are directly affected by these events, to which interactions with other disturbances (plagues and introduction of invasive species) and indirect effects (like fires and landslides) have to be added.

In spite of the importance of these episodes on ecosystems, their changeable nature makes it difficult to carry out consistent studies, which require repetitiveness, control of variables and replication. Nevertheless, there are numerous studies illustrating the potential of these effects. The ecosystem processes and structure are vulnerable to extreme climate events at all scales. At a population level it may happen that individuals of the same species present different sensitivity to certain parameters. This is what Miriti et al. (2007) observed in the Colorado Desert (EE.UU.), where individuals that showed less growth on the long term were the most sensitive to the severe drought of 2002. In this type of ecosystem recruitment events are very scarce and limited by occasional rains. Therefore, it is mortality of adults what marks this population's dynamics. In this case, the shrubs and cacti studied are characterized by being very longevous species, resistant to adverse conditions, being extreme events (like the 2002 drought) the first mortality cause. These events offer the possibility of rejuvenating the population or even inducing a change in the community.

In a long-term study on the rodent community in another desert, the Chihuahua Desert (Mexico), two torrential rains were observed to have affected differently the community species, suppressing the dominance of one of them and favouring the proliferation of other subdominant ones (Thibault and Brown, 2008). The response of the different species depended on their life strategies and on the rain intensity and duration. For example, the species that had dominated the community up to the torrential rains suffered an important population decline still not recovered eight years

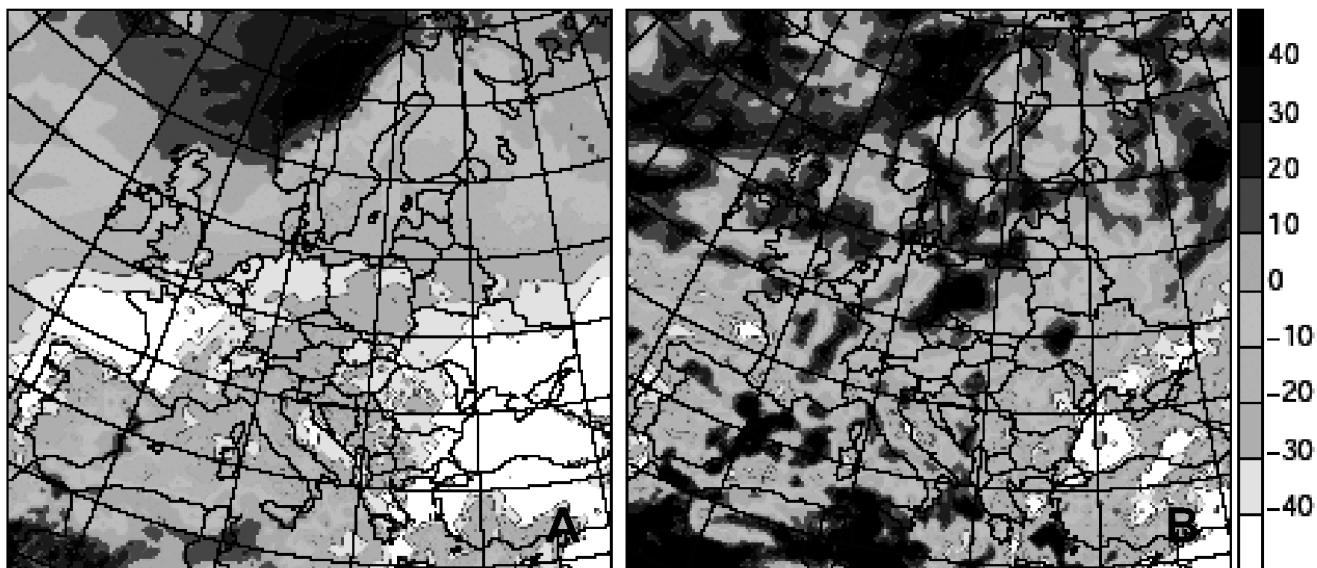


Figure 1. Variation of the July-September precipitation compared with the present, according to the most severe scenario forecast by the IPCC. a) Change of the seasonal average and b) change of extreme precipitation events. Produced from Christensen and Christensen, 2003.

after, due to its poor ability to swim and to climb. However, two other species of small mice, who survived the floods, increased their population thanks to the removal of their competition for common resources. The rodent community recovered its total population in three months after the storms, but the composition changed profoundly (Thibault and Brown, 2008).

Ecological processes can be particularly altered by extreme climate events. For the colder regions some climate models estimate that climate change will stimulate primary production, nutrient recycling and the vegetation's CO₂ drain ability with the average temperature increase forecast (Ciais et al., 2005; Rustad, 2001; Hyvonen, 2007). Nevertheless, these models can underestimate the effect of extreme climate events on these processes. For example, the heat wave that devastated Europe in 2003 significantly affected the vegetation primary production along a latitudinal and aridity gradient (Peñuelas et al., 2007). In this long-term study (1995-2005), carried out in different European scrublands and meadows, a temperature increase and a precipitation reduction were simulated and the effects on the ecological structures and processes were analyzed. The temperature increase stimulated primary production in the coldest places, but the strong aridity increase experienced during the growing season in 2003 caused that in most of the study places biomass accumulation dropped sharply respect to the previous year (Figure 2). In this study, the impact of the heat wave on European scrublands and meadows exceeds the reduction on gross primary production calculated by Ciais et al. (2005) for European forests and crops. He suggests that the carbon assimilation drop, due to the 2003 heat wave, equals what these forests would have assimilated in four years. All these results prove the important role of extreme climate events when it comes to assessing climate change effects on ecosystems and their ability to act as CO₂ drains.

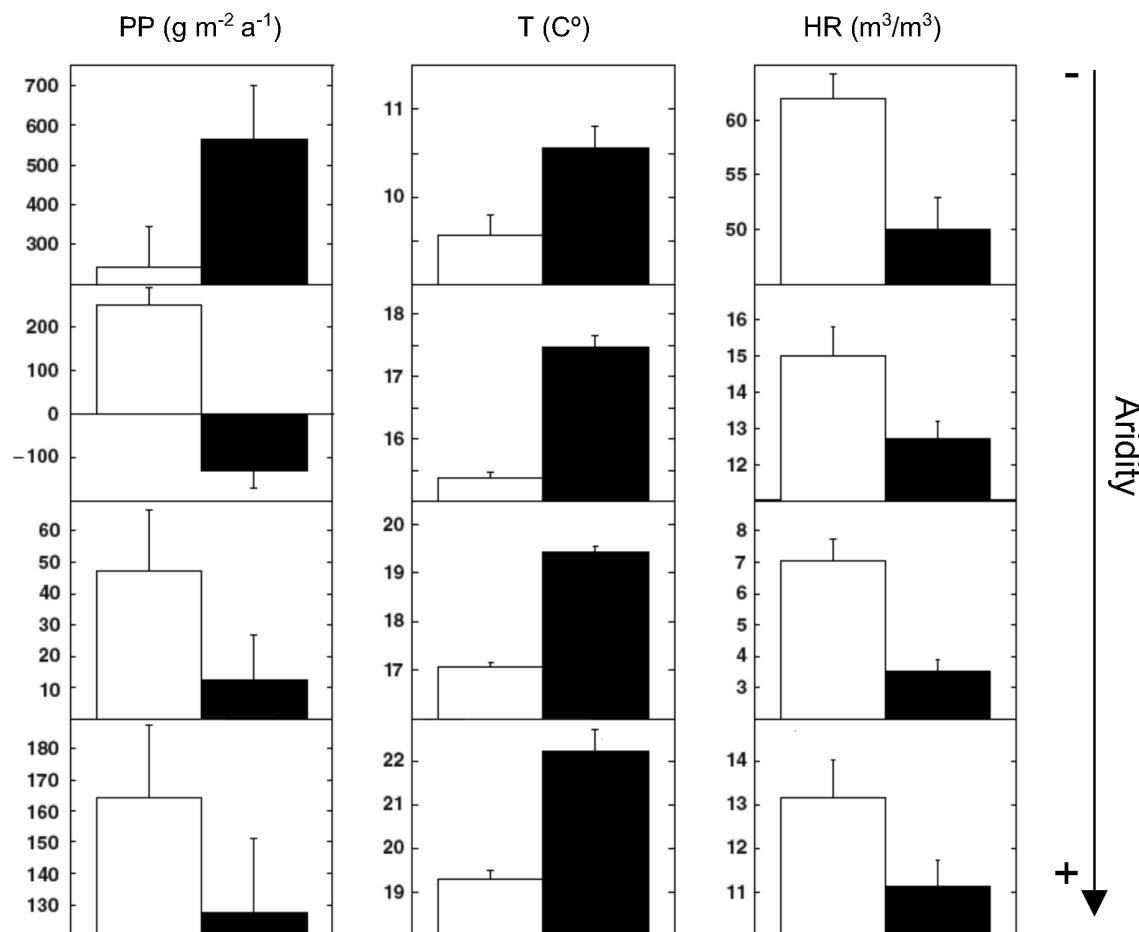


Figure 2. Annual net primary production of the aerial biomass (PP); temperature (T) and soil average relative humidity of the growing season in four European scrubs ordered from lower to higher aridity index. Comparison between the years 2002 (white bars, normal) and 2003 (black bars, heat wave). Produced from Peñuelas et al. 2007.

In addition, extreme climate events can have more subtle and less evident consequences on the natural environment. For instance, Martinho et al. (2007) found that recurrent droughts between 2003 and 2006 altered the species composition in an estuary of the Portuguese coast: the decrease of fresh water contribution favoured salt water species, modifying the community's structure. A side effect associated to extreme climate events is that they mean an opportunity window for the establishment of invasive species after the destruction of a habitat. For example, altering the flood regime can favour floodplain colonization by invasive species, displacing the native ones (Florentine et al., 2006). In this case, the destruction of a habitat not only favours the introduction of non-native species, but these events can also help them spread and disperse. In Japan it was found that in fine sand plains, where sediment accumulations tended to be formed during successive floods, the risk of invasion by an invading herbaceous plant was much higher. The tiny size of the invading plant made it very easy for them to be transported by the river's high waters (Nakayama et al., 2007).

All these examples emphasize the importance of preserving the resilience of ecosystems (ability to recover after a disturbance), which in turn involves preserving habitat and diversity, not only of species, but also of the genetics, of functional groups and ecological processes, as a way to mitigate the negative effects of extreme climate events.

4. CLIMATE CHANGE AND INVASIVE EXOTIC SPECIES

The ecosystemic effects derived from exotic species that settle and become “invasive” are one of the five main driving forces for environmental change on a global level (Vila et al., 2008). Both the expansion of these invasive species and the importance of their effects interact in a complex way with climate change. In the case of tropical invasive species, their expansion is clearly favoured by climate warming. The physiological, morphological and phenological differences among native and invasive species affect their population dynamics, through processes of competence, mutualism and facilitation. If, as a result of this interaction an invasive species becomes successful, it will be able to influence the structure and functioning of ecosystems, altering flows and processes such as the water cycle, the nutrient cycle or the fire perturbation regime (Mack et al., 2000).

It is important to frame the study of invasive species within the context of climate change. On a global level, processes do not occur as isolated cases and interaction among factors is common. In fact, if both global driving forces for change are taken into account together, many studies point out that climate change is increasing, facilitating and accelerating the success of invasive species in various parts of the world and also making their consequences more important (Stachowicz et al., 2002; Theoharides and Dukes, 2007; Ward and Masters, 2007). Not only that, but climate change also represents an opportunity for those exotic species that haven't been considered dangerous yet to increase their invasive potential (Aronson et al., 2007). Two causes that are not mutually exclusive can explain this situation: either invasive species acquire more resources and adapt better to new climatic conditions or climate change effects on ecosystems favour them (Dukes and Mooney, 1999; Theoharides and Dukes, 2007).

To acquire more resources under new climatic conditions is, in short, to show a high competitive ability, be it because invasive species have more efficient mechanisms to capture resources or because they use them more efficiently. For example, as a result of increasing carbon dioxide concentration in experimental conditions, individuals of *Bromus tectorum* and *Cirsium arvense* (native species of the Iberian Peninsula and invasive in North American prairies) are more competitive and harder to eradicate thanks to a high biomass gain (Ziska et al., 2004, 2005). At the same time, this increase of carbon dioxide concentration raises water use efficiency. Invasive species transpire less water when carrying out photosynthesis, which enables them to expand towards more arid areas where the lack of this resource before used to limit their growth (Dukes and Mooney, 1999). However, these experimental results are not the same for all invasive species and they can be rendered void or be the opposite when such factors as the native plant community with which it competes or the invaded ecosystem are taken into account (see Dukes and Mooney 1999 for a review on studies showing different

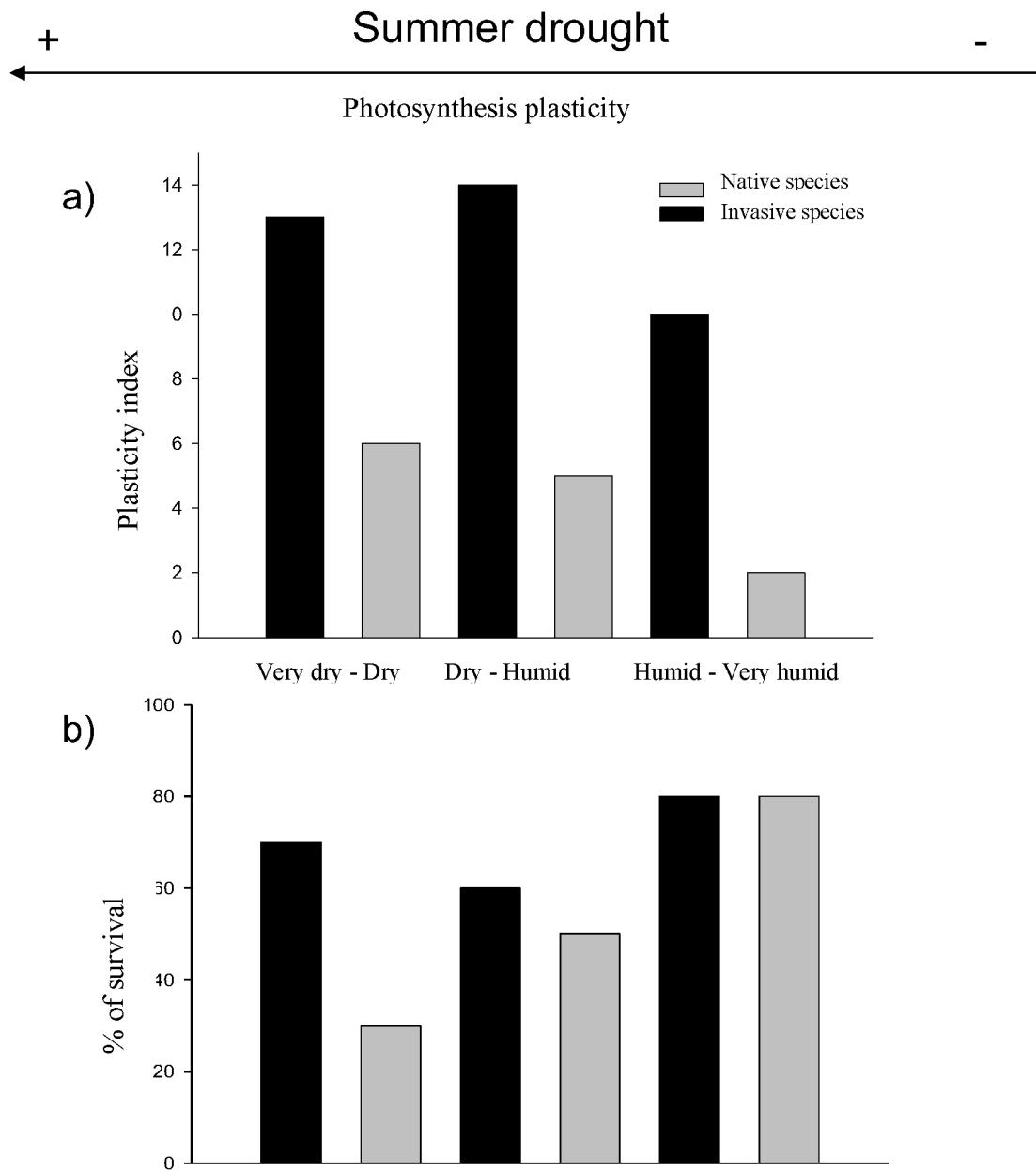


Figure 3. The success of invasive species in different regions with different environmental conditions thanks to their high phenotypic plasticity constitutes an evidence of their adaptation ability to climate change. As an example, here we compare the hypothetical case of an invasive species with a native one along a summer drought gradient. Section a) shows how the invasive species has a more plastic photosynthetic response to confront the summer drought gradient than the native species. As for section b), while climatic conditions are not limiting (humid and very humid areas) the photosynthetic plasticity difference among species does not have an adaptive value and, therefore, the native species as well as the invasive one keep the same percentage of living individuals. However, when conditions are more limiting (dry and very dry areas), the invasive species keeps high individual survival percentages, while the native species does not adapt to environmental conditions and the survival percentage decreases abruptly.

responses of invasive species as a result of carbon dioxide atmospheric concentrations in different environments).

Adapting to other climate scenarios is not something new for invasive species. In fact, introducing them to areas with very different environmental conditions than the source regions represents a climate change in itself. This is the reason why the study of invasive species with wide distribution ranges, which invade very different ecosystems, can be useful to forecast their potential ability to adapt to climate change. If an exotic species does not succeed in reproduction, it will become extinct and will lose the opportunity to invade the region where it has been introduced. Therefore, the invading potential is based on the optimization of reproductive success thanks to the biological adaptation of phenotypes to each particular situation generally through phenotypic plasticity (Hulme, 2008) (Figure 3). The herbaceous plant *Pennisetum setaceum* is a clear example of this. Currently, it has a wide distribution range, being present almost worldwide, and being capable of invading both very humid environments like Hawaiian tropical forests and very arid areas like the California Deserts (Poulin et al., 2005). The low genetic variability of its populations reveals that there have been no local adaptation processes, but the invasion success has been due to the high phenotypic plasticity of the species (Poulin et al., 2007, 2005). Overall, it can be said that the adaptation value given by phenotypic plasticity to invasive species is a double one: on the one hand, it enables them to invade different ecosystems with different environmental conditions and on the other hand, it can help them to adapt better to climate change effects on them.

Although climate change effects on ecosystems are a threat to many species, they also represent an opportunity for others, especially for invasive species (Simberloff, 2000; Theoharides and Dukes, 2007). For instance, in the Mediterranean Basin it can be worrying that the increasing fire disturbances produced as a result of the combined effect of both temperature rise and drought intensity increase favours pyrophilous invasive species (fire adaptive), like those of the *Acacia* gender. This situation can even be worsened when fires increase and the fire occurrence period shortens as follows: after a fire, the seeds of these invasive species germinate before and are more numerous than the seeds of native species, quickly monopolizing space and resources. This early response to fire decreases the resprouting and germinating ability of seeds of the native species, which are not adapted to this disturbance. In addition, the rapid growth of invasive species and their early reproductive age puts at stake both a large amount of biomass, since it can become combustible material, and a high amount of seeds that will germinate after the fire takes place again, the cycle being repeated once more (Figure 4). An important ecological fact derived from the whole process is that a small initial disturbance can lead the community to a new state of balance maintained on the long term (Milchunas and Lauenroth, 1995). The new dynamics of this community allows the persistence of the invasive species and also means an obstacle to the recolonization of native species not adapted to fire.

Equally important than the type of climate change effect that favours invasive species is the moment when it is produced. Stachowicz et al. (2002) observed how an increase in the maximum temperatures of water in winter (warm winters) favoured the reproduction of invasive species of

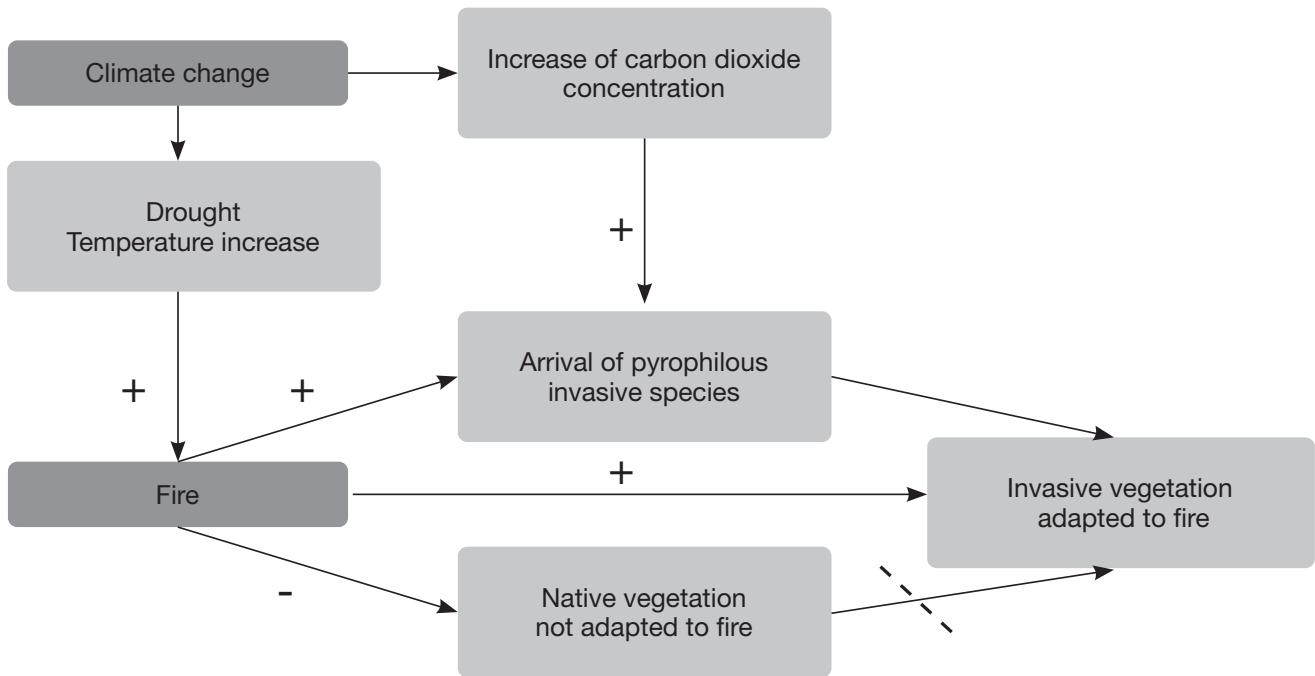


Figure 4. Climate change can increase fire occurrence in ecosystems where this disturbance is not frequent. Thus, to introduce invasive species adapted to fire might start a positive feedback loop and end in a radical change of both the dominant vegetation and the fire regime. This loop would take place when the exotic species favoured fire accumulating large amounts of biomass being, at the same time, capable of recolonizing the burnt area more efficiently than native species.

ascidians (marine invertebrates), while a decrease in the minimum temperatures in winter (cold winters) favoured native species of ascidians. In turn, an increase in the maximum temperatures in summer favoured more growth on the part of invasive species while native species were not affected by it.

The forecast of a global temperature increase can enlarge the distribution areas of certain organisms and turn them into invasive species (Figure 5). When they extend to new territories, these species begin to compete with other organisms, displacing them and sometimes even wiping them out. The clearest case is that of the Polar Regions (Aronson et al., 2007; Frenot et al., 2005). Many species and ecosystemic processes (trophic networks, carbon and energy flows) existing in these regions are unique due to the isolation owed to the cold environmental conditions. When invasive species arrive, these ecosystemic processes are profoundly altered and native species become extinct both because they are not adapted to a high degree of competence and because the new ecosystemic processes created do not favour them (Aronson et al., 2007). Therefore, due to the particular conditions of Polar Regions, the impacts produced as a result of climate change interactions with invasive species are stronger than in any other region of the planet.

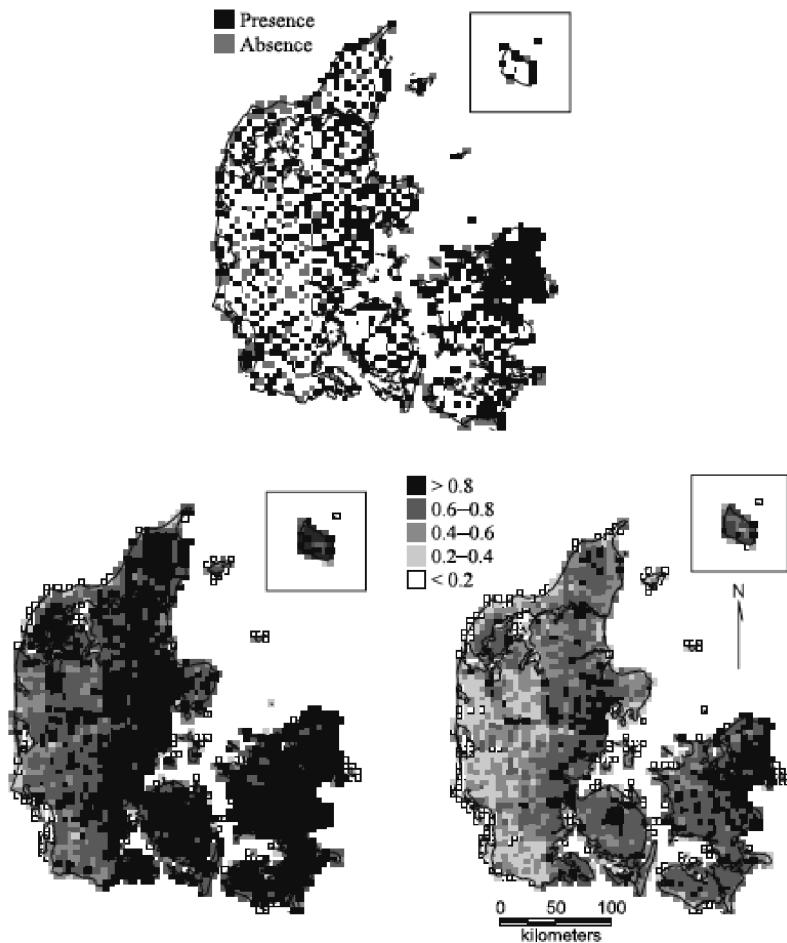


Figure 5. The models that predict the expansion of invasive species to new areas thanks to climate change are very useful management tools. In this case, we can see here: a) the current distribution of *Heracleum mantegazzianum* in Denmark (upper map; dark cells indicate presence, while light cells indicate absence of the species), b) likelihood of invading new areas (scale of 0 to 1, left bottom map) and c) likelihood of finding environments favourable to the invasive species according to its ecological requirements (scale of 0 to 1, right bottom map). Source: Nielsen et al. (2008).

In short, there are many evidences proving the synergic effects between climate change and invasive species. The challenge now is to predict future interactions for a management model of invasive species in keeping with the current climate change process. The first predictive models have tried to determine the possible expansion of the territory to be invaded by exotic species from the study of the climatic variables of ecosystems that have already been invaded. It has been proven that these predictive variables vary depending both on the characteristics of the invasive species (for example in the case of plants if it is an annual or perennial plant, woody or herbaceous) and on the characteristics of the invaded ecosystems (minimum temperature in winter, mean precipitation in summer, average growth period) (Beerling, 1993; Nielsen et al., 2008; Pattison and Mack, 2008).

5. EVOLUTIONARY ABILITY OF SPECIES TO RESPOND TO CLIMATE CHANGE

Currently, one of the main challenges in relation to climate change is to understand if animal and plant species will be able to adapt to the new environmental conditions (McCarty, 2001; Jump and Peñuelas, 2005; Parmesan, 2006; Visser, 2008).

Various types of responses of species to climate change have been described: i) migration towards new, more favourable habitats in climatic terms; ii) the change in phenotype distribution through phenotypic plasticity; and iii) genetic change through microevolutionary processes (Parmesan, 2006; Visser, 2008). The first two mechanisms can occur in relatively short periods of time and vary depending on the populations, which are the reasons why some authors have suggested that the role of natural selection and the evolution of new phenotypes adapted to new climate scenarios will be small compared with the changes in the distribution of species or with the role of phenotypic plasticity (Parmesan, 2006; Lau et al., 2007). However, numerous studies prove that climate can be an important force of natural selection, and there are many evidences of differentiation among populations of the same species as a response to a certain climatic factor (see Jump and Peñuelas 2005 for a review on studies showing population differentiation as a response to climate). In addition, in a recent study Visser (2008) proposes that the adaptation to climate change through phenotypic plasticity or through dispersion to new habitats can also include evolutionary processes, thus suggesting that the different adaptation mechanisms can interact. All in all, this suggests that adaptation of species to climate change can have different forms, and that the adaptive potential will be different among species and among populations.

In view of the new climate scenarios, one of the forecast strategies is species movement or migration towards higher latitudes and altitudes, where environmental conditions are more favourable for plant and animal populations (Parmesan and Yohe, 2003; Alcamo et al., 2007; Peñuelas et al., 2007). Nowadays there are many studies proving these changes (see Parmesan et al. 2006 for a thorough review on species distribution changes). For example, Kulman (2001, 2002, 2003) found a displacement of the tree line towards higher altitudes (ranging some 120-375 m) in mountainous areas of Sweden over the last 50 years, and Peñuelas et al. (2007) found a similar displacement in a mountainous forest of the Iberian Peninsula that presents some of the most northerly beech formations in Europe (Figure 6).

Nevertheless, in comparison with the past migration rates of animal and plant species, at the current speed of climate change many species are not capable of tracking the climate to which they are adapted nowadays (Davis and Shaw, 2001). An important consequence of this can be the formation of new plant communities as a result of the different capacity of species to migrate with climate (Walther et al., 2002; Walther, 2003). This can profoundly affect interspecific interactions among species and modify the dominance and composition of plant communities (Bertness and Ewanchuk, 2002). In the same way, different species abilities to migrate can affect relationships between predators and prey, herbivorous insects and their host plants, parasites and host insects or pollinating insects and plants (Visser and Both, 2005; Parmesan, 2006). For instance, Visser and Both (2005) studied the response of various predators and their prey to climate change and observed that, in most of the cases, each system species' response

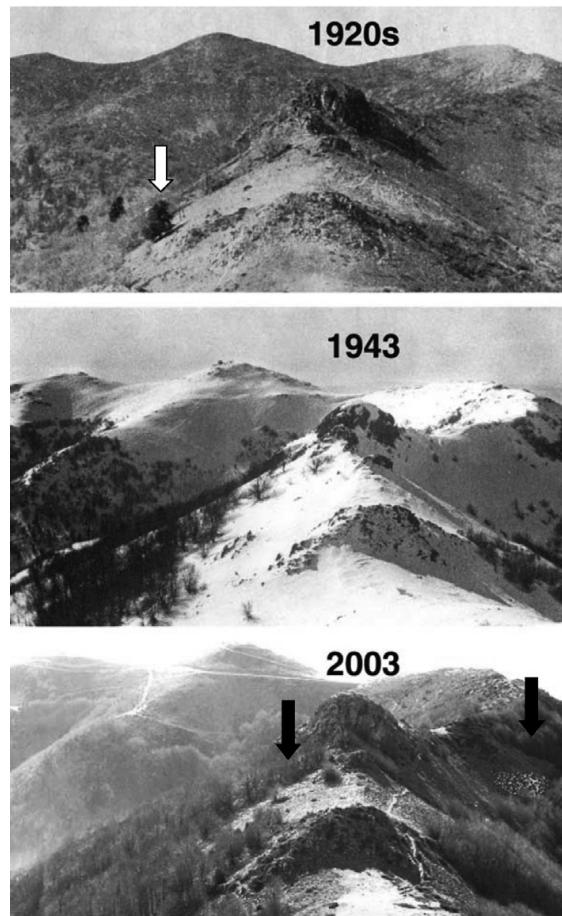


Figure 6. Altitudinal displacement of beech woods (*Fagus sylvatica*) in Catalonia (Spain) during the 20th century. The most obvious change is the increase of tree size and density and their displacement toward higher altitudes (black arrows) of various metres in some areas. Another obvious change is the disappearance of the few conifers that were still present at the turn of the century (white arrow). Source: produced from Peñuelas et al. (2007).

was different, increasing the asynchrony between populations of predators and their prey with relevant consequences for the ecosystems.

On the other hand, species can face global change through a change in the genetic composition of its populations (microevolution). In this case, populations change the distribution of their phenotypes so that the biological adaptation (or “fitness”) of the new composition is higher than that of the original phenotypic distribution. Thus, the frequency of genotypes with more biological adaptation would increase in the new environment (for example, genotypes more adapted to heat or to droughts) while the frequency of genotypes with less biological adaptation would decrease (Visser, 2008).

In this sense, some works show that natural selection can cause evolutionary changes only in some generations, while climate is the selective force. This “rapid” adaptation has been

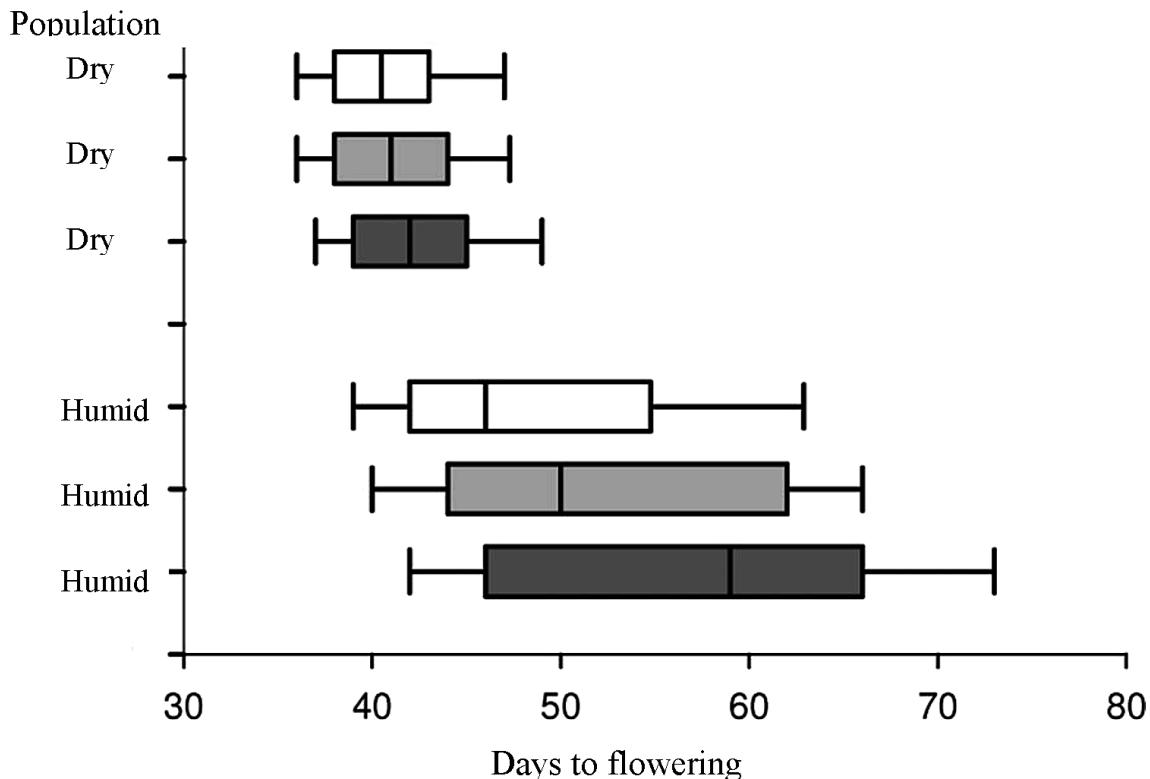


Figure 7. Evolution of the flowering date in *Brassica rapa*. In this box plot, the boxes show the days up to the blooming of the first flower in a dry population and in a humid population. Seeds were collected in 1997 (ancestors) and in 2004 (descendants) in both populations. “H” refers to hybrid plants from the ancestor plants and the descendants. The central band of the box is the flowering median, and the lines show the 10th, 25th, 75th and 90th percentiles. The plants of seeds collected in 2004 bloomed before in all cases, both dry and humid population plants. Source: produced from Franks et al. (2007).

observed in animal and plant populations. For example, (Rodríguez-Trelles and Rodríguez, 1998) found a change in the frequency of genotypes adapted to heat in natural populations of *Drosophila* in Spain between 1976 and 1991. On the other hand, Réale et al. (2003) found a genetic change in the populations of Arctic red squirrel: the females of this species bring labour forward as a response to spring temperature increase. Equally, Franks et al. (2007) showed early flowering as a response to the increase of drought in populations of an herbaceous species, the seeds of which were collected in different years (Figure 7).

Although these works show examples of the fact that evolution is not always a slow process, but it can take place at such relatively short scales as just some generations, this is not always the case. In general, species (or populations) need very long temporal series for the changes in genetic composition to take place and to be, therefore, detectable (Parmesan, 2006). In addition, there are studies showing that the evolutionary ability of some species is not enough compared to climate change rates, not even existing for populations of some species (Table 1). These

examples highlight the difficulties that species have when faced with the current rapid climate change. This fact can be particularly relevant to certain plant species, in the cases in which dispersal to new habitats is limited due to habitat fragmentation or to the typical limitations of dispersal mechanisms in some species (Jump and Peñuelas, 2005).

Table 1. Examples of studies showing the evolutionary capacity of some plant species. The inheritability of traits, that is, the proportion of total phenotypic variance attributable to additive genetic effects, is shown summarized in a range covering all the traits studied. Source: produced from Jump and Peñuelas (2005).

Species	Traits	Inheritability of traits (h ²)	Conclusion
<i>Betula pendula</i> , <i>B. pubescens</i>	Appearance of buds	0,00-0,65	The evolution rate is less than the forecast warming rate, even in the most genetically variable population
<i>Pinus sylvestris</i>	Appearance of buds; frost hardening	0,20-0,67	The evolution rate is probably less than the climate change rate
<i>Chamaecrista fasciculata</i>	Seed production, leave number and thickness, development rate	0,00-0,48	Extremely slow response due to the simultaneous evolution need of different traits. The evolution rate is much slower than the climate change rate forecast.
<i>Brassica juncea</i>	14 traits, including leave, stem and seed weight and number	0,15-0,55	Lack of genetic or phenotypic response in reproductive traits. Very little or no adaptive capacity at all in most of the traits
<i>Drosophila birchii</i>	Resistance to drying	0,00	Lack of response to the selection. Very little adaptation potential in response to climate change.

Lastly, the role of phenotypic plasticity in the species response to climate change is worth mentioning. Phenotypic plasticity is the capacity of a certain genotype to generate different phenotypes in different environments (Schlichting, 1986; Pigliucci, 2001). This concept can be seen in the reaction norm, which is the range of phenotypic responses of a genotype expressed in an environmental gradient (Schlichting, 1986; Pigliucci, 2001). There are many studies that show examples of changes in the phenotype as a response to the environment, both in animal and plant populations (see, for instance, Figure 8). However, although phenotypic plasticity can simply describe morphological and physiological changes in individuals, it is more interesting to study the potential adaptive value of these changes (Sultan, 1987; Sultan, 1995; Gianoli, 2004; Valladares et al., 2007). For example, phenotypic plasticity can act modulating the role of natural selection. This would happen if the biological adaptation differences (*fitness*) of the different genotypes of a population were removed as a result of variations of their phenotypic expression in the different environments experienced by the population (Gianoli, 2004). The fitness equality of the

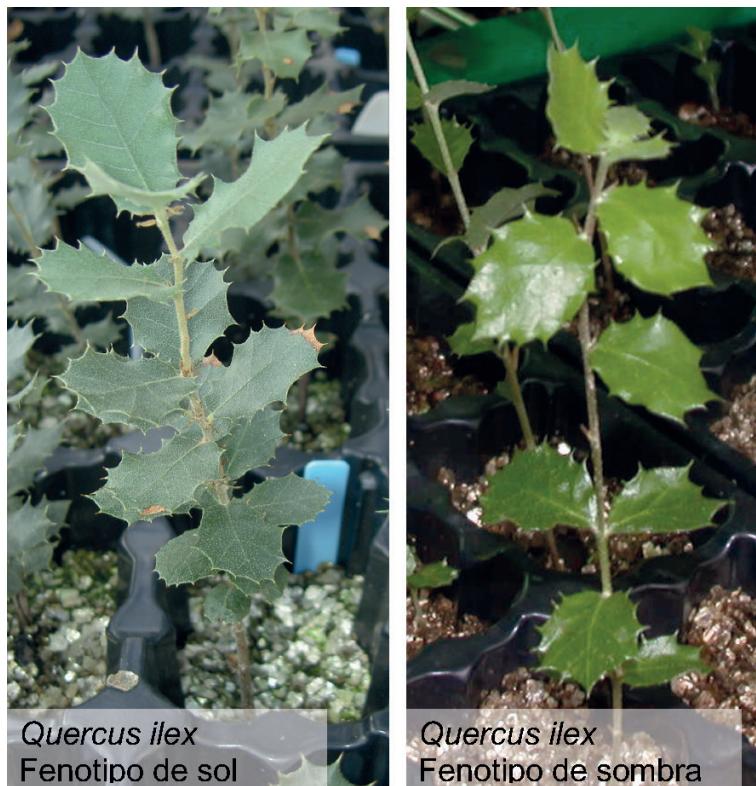


Figure 8. Phenotypic plasticity to light in holm oaks (*Quercus ilex*). The sun phenotype (left) shows less Specific Leaf Area (SLA), with smaller and thicker leaves and shorter internode length. Phenotypic plasticity is a strategy used by species to face climate change, being a trait that can evolve as a response to natural (climatic) selection. Own elaboration. Photographs courtesy of Elena Beamonte.

different genotypes caused by phenotypic plasticity would limit the selection possibilities and would keep genetic variability within the population (Sultan, 1995). For instance, given a climate change scenario, the different individuals (and genotypes) of a plant population would be able to present an optimum phenotype for the new climatic conditions through phenotypic plasticity, thus not decreasing genetic variability associated to the tolerance to high temperatures or to drought.

In addition, phenotypic plasticity is a trait in itself; therefore, it is considered to be subject to natural selection and to evolution (Pigliucci, 2001; Visser, 2008). Phenotypic plasticity (that is, the reaction norm) can evolve if there is variation among individuals (or populations) in the response to the environment (Sultan, 1987; Sultan, 1995; Visser, 2008). In this case, the evolution of the reaction norm can facilitate the adaptation of one species (or one population) to the new environmental conditions. For example, Heschel et al. (2004) found that some populations of *Polygonum persicaria* had developed different phenotypic plasticity in relation to drought, enabling them to optimize their reproductive success in the different conditions experienced by each population.

6. GLOBAL CHANGE: CLIMATE IS NOT THE ONLY THING THAT CHANGES

In spite of the increasing importance of climate change, it is neither the only nor necessarily the most important driving force for the environmental change of ecosystems (Duarte et al., 2007). In general, the effects of climate change are minor and are perceived later than the ones resulting from habitat fragmentation or pollution. Nevertheless, the importance of climate change is increasing. Nowadays, it is considered that of the five main driving forces of global change recognized by the United Nations in its Millennium Ecosystems Assessment, land uses change and climate change are the ones with more impact on biodiversity on a global level. Logically, the relative importance of the five direct driving forces of change varies with the ecosystem and thus, while in certain Mediterranean areas naturalized exotic species and invasive ones are the main threat to biodiversity, land use changes are a threat to rivers and lakes, nitrogen and phosphorous compounds are a threat to the temperate ecosystems of the Northern Hemisphere and climate change is the main driving force in polar and subpolar areas of both hemispheres.

In general, it is difficult to totally separate the effects on biodiversity and the ecosystemic processes due to each of the various driving forces of global change. For example, in the case of the terrestrial ecosystems in our latitude, climate change and land use changes operate simultaneously in such a way that the impact is seldom attributable exclusively to one of them and the estimation of the relative contribution to the changes observed is just a rough one. Nowadays, there is a lot of information on many environmental changes that can be related to the main driving forces of global change. The habitat fragmentation due to roads and communication ways leads to the extinction of species that require plenty of continuous space for their vital cycles, the genetic impoverishment of isolated and fragmented populations having been documented for many species (Valladares, 2008). Global warming forces migrations of many species to different altitudes and latitudes, but these migrations are very restricted due to human constructions and land uses, which increases the problem of local extinctions. In addition, in mountain ecosystems, which are rich in endemic species, altitude migration is not possible, reason by which the impact of warming on them is disproportionately high.

7. ADVANCES AND CHALLENGES IN THE RESEARCH OF CLIMATE CHANGE EFFECTS

Our understanding of global environmental change on natural systems has increased a lot after some decades of intense research. Climate change effects, the most worrying and general global driving force for change on individual species start to be well documented, particularly in the case of important species for the human being. However, species are not alone and climate change effects have a bearing on all the species and on the whole network of interactions established among them, as well on biogeochemical cycles. And here our knowledge is much less thorough. Recent studies reveal counter-intuitive effects such as productivity decrease because of changes in temperature or efficiency decrease in the use of water by plants in increasing drought conditions. Simple changes in the seasonal rhythms of the species of an ecosystem alter

interactions among them in such a way that many of the essential synchronizations between predator and prey or between pollinator and pollinated plant are lost. The increasing uncertainty ladder that goes from the effects on vegetation up to the whole ecosystem makes the real impact of climate change on the structure and functioning of natural systems currently no predictable at all. All indicates that chain reactions, with multiple synergies among trophic network nodes, can even accelerate the effects of climate change on ecosystems and make them more acute than the effects estimated in forecasts based on direct effects on certain species or on specific trophic levels.

One limitation of a large part of our current knowledge is that it is based on observational studies and on correlations between climate changes and effects on natural systems with a little or no experimental base at all. Although there is an incipient experimental database on these effects, the large design costs and the cost of facilities capable of simulating climate change in complete systems (and even in microcosms) render progress through this approach, so intrinsically linked to the scientific method itself, very slow. Currently, the five main challenges are: 1) integrating the existing fragmentary knowledge about climate change effects on natural systems, 2) deepening in climate change effects on complex systems, characterized by networks of interactions, cascade effects, diffuse effects and indirect effects, 3) developing multidisciplinary research teams capable of combining tools and information of such fields as physics, chemistry, genetics, ecology and socio-economy, 4) improving our ability to experimentally simulate climate change in order to be able to isolate processes and mechanisms involved in the effects, and 5) being able to anticipate effects so as to mitigate them or to establish an efficient adaptation strategy.

REFERENCIAS / REFERENCES

- Alcamo, J., J. M. Moreno, B. Nováky, M. Bindi, R. Corobov, R. J. N. Devoy, C. Giannakopoulos, E. Martin, J. E. Olesen, and A. Shvidenko (2007). Europe: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pages 541-580 in M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. v. d. Linden, and C. E. Hanson, editors. *Climate Change 2007*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Allen, C. D., and D. D. Breshears (1998). Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. *Proceedings of the National Academy of Science USA* 95:14839-14842.
- Aronson, R.B., Thatje, S., Clarke, A., Peck, L.S., Blake, D.B., Wilga, C.D., and Seibel, B.A. (2007). Climate change and invasibility of the antarctic benthos. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 38: 129-154.
- Beerling, D.J. (1993). The Impact of Temperature on the Northern Distribution-Limits of the Introduced Species *Fallopia-Japonica* and *Impatiens-Glandulifera* in North-West Europe. *Journal of Biogeography*, 20: 45-53.
- Beniston, M. (2007). Linking extreme climate events and economic impacts: Examples from the Swiss Alps. *Energy Policy* 35: 5384-5392.

- Bertness, M. D. and Ewanchuk, P. J. (2002). Latitudinal and climate-driven variation in the strength and nature of biological interactions in New England salt marshes. *Oecologia* 132:392-401.
- Breshears, D. D., N. S. Cobb, P. M. Rich, K. P. Price, C. D. Allen, R. G. Balice, W. H. Romme, J. H. Kastens, M. L. Floyd, J. Belnap, J. J. Anderson, O. B. Myers, and C. W. Meyer (2005). Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. Pages 15144-15148.
- Christensen, J. H., and O. B. Christensen (2003). Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe. *Nature* 421: 805-806.
- Christensen, J. H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. M. Rueda, L. Mearns, C. G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, and A. S. P. Whetton (2007). Regional Climate Projections. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pages 847-943 in S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, editors. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ciais, P., M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogee, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, C. Bernhofer, A. Carrara, F. Chevallier, N. De Noblet, A. D. Friend, P. Friedlingstein, T. Grunwald, B. Heinesch, P. Kerönen, A. Knöhl, G. Krinner, D. Loustau, G. Manca, G. Matteucci, F. Miglietta, J. M. Ourcival, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, G. Seufert, J. F. Soussana, M. J. Sanz, E. D. Schulze, T. Vesala, and R. Valentini (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529-533.
- Davis, M. B. and Shaw, R. G. (2001). Range shifts and adaptive responses to quaternary climate change. *Science* 292:673-679.
- Doupe, J.P., England, J.H., Furze, M., and Paetkau, D. (2007). Most northerly observation of a grizzly bear (*Ursus arctos*) in Canada: Photographic and DNA evidence from Melville Island, northwest territories. *Arctic*, 60: 271-276.
- Duarte, C. M., S. Alonso, G. Benito, J. Dachs, C. Montes, M. P. Buendía, A. F. Ríos, R. Simó, and F. Valladares (2007). Cambio global: impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra CSIC, Madrid.
- Dukes, J.S. and Mooney, H.A. (1999). Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 14: 135-139.
- Fensham, R. J., R. J. Fairfax, and S. R. Archer (2005). Rainfall, land use and woody vegetation cover changes in semi-arid Australian savanna. *Journal of Ecology* 93:596-606.
- Fensham, R. J., and J. E. Holman (1999). Temporal and spatial patterns in drought-related tree dieback in Australian savanna. *Journal of Applied Ecology* 36:1035-1050.
- Figuerola, J. (2007). Climate and dispersal: Black-winged Stilts disperse further in dry springs. PLoS ONE, 20 June 2007. www.plosone.org. DOI 10.1371/journal.pone.0000539.
- Figuerola, J. (2007). Climate and Dispersal: Black-Winged Stilts Disperse Further in Dry Springs. PLoS ONE, 2(6), e539.
- Florentine, S. K., M. E. Westbrooke, K. Gosney, G. Ambrose, and M. O'Keefe (2006). The land invasive weed Nicotiana glauca R. Graham (Solanaceae): Population and soil seed bank dynamics, seed germination patterns and seedling response to flood and drought. *Journal of Arid Environments* 66: 218-230.

- Franks, S. J., Sim, S. and Weis, A. E. (2007). Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104:1278-1282.
- Frenot, Y., Chown, S.L., Whinam, J., Selkirk, P.M., Convey, P., Skotnicki, M., and Bergstrom, D.M. (2005). Biological invasions in the Antarctic: extent, impacts and implications. *Biological Reviews*, 80: 45-72.
- Gianoli, E. (2004). Plasticidad fenotípica adaptativa en plantas. In: H. M. Cabrera (ed) *Fisiología Ecológica en Plantas*. Editorial de la Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp 13-26.
- Heschel, M. S., Sultan, S. E., Glover, S. and Sloan, D. (2004). Population differentiation and plastic responses to drought stress in the generalist annual *Polygonum persicaria*. *International Journal of Plant Sciences* 165:817-824.
- Hulme, P.E. (2008). Phenotypic plasticity and plant invasions: is it all Jack? *Functional Ecology*, 22: 3-7.
- Hyvonen, R., G. I. Agren, S. Linder, T. Persson, M. F. Cotrufo, A. Ekblad, M. Freeman, A. Grelle, I. A. Janssens, P. G. Jarvis, S. Kellomaki, A. Lindroth, D. Loustau, T. Lundmark, R. J. Norby, R. Oren, K. Pilegaard, M. G. Ryan, B. D. Sigurdsson, M. Stromgren, M. van Oijen, and G. Wallin (2007). The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 173: 463-480.
- Jump, A. S. and Peñuelas, J. (2005). Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters* 8:1010-1020.
- Kullman, L. (2001). 20th century climate warming and treelimit rise in the southern Scandes of Sweden. *Ambio* 30:72-80.
- Kullman, L. (2002). Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of ecology* 90:68-77.
- Kullman, L. (2003). Recent reversal of Neoglacial climate cooling trend in the Swedish Scandes as evidenced by mountain birch tree-limit rise. *Global and Planetary Change* 36:77-88.
- Lau, J. A., Shaw, R. G., Reich, P. B., Shaw, F. H. and Tiffin, P. (2007). Strong ecological but weak evolutionary effects of elevated CO₂ on a recombinant inbred population of *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist* 175:351-362.
- Llebot, J. E., J. J. Sánchez, A. Queralt, J. Rodó, and J. Roca. (2005). Informe del cambio climático en Cataluña: resumen ejecutivo. Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- Mack, R.N., Simberloff, D., Lonsdale, W.M., Evans, H., Clout, M., and Bazzaz, F.A. (2000). Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications*, 10: 689-710.
- Martinho, F., R. Leitao, I. Viegas, M. Dolbeth, J. M. Neto, H. N. Cabral, and M. A. Pardal (2007). The influence of an extreme drought event in the fish community of a southern Europe temperate estuary. *Estuarine Coastal And Shelf Science* 75: 537-546.
- McCarty, J. P. (2001). Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology* 15:320-331.
- Milchunas, D.G. and Lauenroth, W.K. (1995). Inertia in Plant Community Structure - State Changes after Cessation of Nutrient-Enrichment Stress. *Ecological Applications*, 5, 452-458.

- Miriti, M. N., S. Rodriguez-Buritica, S. J. Wright, and H. F. Howe (2007). Episodic death across species of desert shrubs. *Ecology* 88: 32-36.
- Moreno, J. M. (2005). Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Moreno, J., E. Galante, and M. A. Ramos (2005). Biodiversidad animal. Pages 65-112 in J. M. Moreno, editor. Evaluación de los impactos del cambio climático en España. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Nakayama, N., J. Nishihiro, Y. Kayaba, T. Muranaka, and I. Washitani (2007). Seed deposition of *Eragrostis curvula*, an invasive alien plant on a river floodplain. *Ecological Research* 22: 696-701.
- Nielsen, C., Hartvig, P., and Kollmann, J. (2008). Predicting the distribution of the invasive alien *Heracleum mantegazzianum* at two different spatial scales. *Diversity and Distributions*, 14, 307-317.
- Palomero, G., Ballesteros, F., Nores, C., Blanco, J.C., Herrero, J., and Garcia-Serrano, A. (2007). Trends in number and distribution of brown bear females with cubs-of-the-year in the Cantabrian Mountains, Spain. *Ursus*, 18, 145-157.
- Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37 637-669.
- Parmesan, C. and Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421:37-42.
- Pattison, R.R. and Mack, R.N. (2008). Potential distribution of the invasive tree *Triadica sebifera* (Euphorbiaceae) in the United States: evaluating CLIMEX predictions with field trials. *Global Change Biology*, 14, 813-826.
- Peñuelas, J. (2004). Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles como paradigma de la interacción del bosque con la atmósfera. Pages 281-308 in F. Valladares, editor. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Organismo Autónomo de parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Peñuelas, J., and I. Filella (2001). Phenology - Responses to a warming world. *Science* 294:793
- Peñuelas, J., and M. Boada (2003). A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9:131-140.
- Peñuelas, J., I. Filella, and P. Comas (2002). Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 8:531-544.
- Peñuelas, J., Ogaya, R., Boada, M. and Jump, A. (2007). Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia. *Ecography* 30:830-838.
- Peñuelas, J., P. Prieto, C. Beier, C. Cesaraccio, P. de Angelis, G. de Dato, B. A. Emmett, M. Estiarte, J. Garadnai, A. Gorissen, E. K. Lang, G. Kroel-Dulay, L. Llorens, G. Pellizzaro, T. Riis-Nielsen, I. K. Schmidt, C. Sirca, A. Sowerby, D. Spano, and A. Tietema (2007). Response of plant species richness and primary productivity in shrublands along a north-south gradient in Europe to seven years of experimental warming and drought: reductions in primary productivity in the heat and drought year of 2003. *Global Change Biology* 13: 2563-2581.
- Pigliucci, M. (2001). *Phenotypic Plasticity: Beyond Nature and Nurture*. The Johns Hopkins University Press.

- Poulin, J., Sakai, A.K., Weller, S.G., and Nguyen, T. (2007). Phenotypic plasticity, precipitation, and invasiveness in the fire-promoting grass *Pennisetum setaceum* (poaceae). *American Journal of Botany*, 94, 533-541.
- Poulin, J., Weller, S.G., and Sakai, A.K. (2005). Genetic diversity does not affect the invasiveness of fountain grass (*Pennisetum setaceum*) in Arizona, California and Hawaii. *Diversity and Distributions*, 11, 241-247.
- Réale D, McAdam A, Outin G, and Berteaux S. (2003). Genetic and plastic response of a northern mammal to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 270:591-96.
- Rodríguez-Trelles, F. and Rodríguez, M. A. (1998). Rapid micro-evolution and loss of chromosomal diversity in *Drosophila* in response to climate warming. *Evolutionary Ecology* 12:829-838.
- Rustad, L. E., J. L. Campbell, G. M. Marion, R. J. Norby, M. J. Mitchell, A. E. Hartley, J. H. C. Cornelissen, and J. Gurevitch (2001). A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126: 543-562.
- Sanz, J. J., J. Potti, J. Moreno, S. Merino, and O. Frias (2003). Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region. *Global Change Biology* 9:1-12.
- Sanz-Elorza, M., E. D. Dana, A. Gonzalez, and E. Sobrino (2003). Changes in the high-mountain vegetation of the central Iberian Peninsula as a probable sign of global warming. *Annals of Botany* 92:273-280.
- Schlichting, C. D. (1986). The evolution of phenotypic plasticity in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17:667-693.
- Sillmann, J., and E. Roeckner (2008). Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climatic Change* 86: 83-104.
- Simberloff, D. (2000). Global climate change and introduced species in United States forests. *Science of the Total Environment*, 262, 253-261.
- Stachowicz, J.J., Terwin, J.R., Whitlatch, R.B., and Osman, R.W. (2002). Linking climate change and biological invasions: Ocean warming facilitates non-indigenous species invasions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, 15497-15500.
- Sultan, S. E. (1987). Evolutionary implications of phenotypic plasticity. *Evolutionary Biology* 21:127-178.
- Sultan, S. E. (1995). Phenotypic plasticity and plant adaptation. *Acta Botanica Neerlandica* 44:363-383.
- Swenson, J.E., Adamic, M., Huber, D., and Stokke, S. (2007). Brown bear body mass and growth in Northern and Southern Europe. *Oecologia*, 153, 37-47.
- Theoharides, K.A. and Dukes, J.S. (2007). Plant invasion across space and time: factors affecting non-indigenous species success during four stages of invasion. *New Phytologist*, 176, 256-273.
- Thibault, K. M., and J. H. Brown. (2008). Impact of an extreme climatic event on community assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 3410-3415.

- Valladares, F. (2006). Consecuencias del cambio climático en España. *Quercus* 243:22-30.
- Valladares, F. (2008). A mechanistic view of the capacity of forests to cope with climate change. In F. Bravo, V. L. May, R. Jandl, and K. v. Gadow, editors. *Managing forest ecosystems: the challenge of climate change*. Springer-Verlag, Berlin.
- Valladares, F. (2004). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Valladares, F., Gianoli, E. and Gómez, J. M. (2007). Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *Tansley Review. New Phytologist* 176:749-763.
- Valladares, F., J. Peñuelas, and E. L. Calabuig (2005). Ecosistemas terrestres. Pages 65-112 in J. M. Moreno, editor. *Evaluación de los impactos del cambio climático en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Velázquez de Castro, F. (2005). 25 preguntas sobre el cambio climático. Ediciones Libertarias. Mundo Vivo, Madrid.
- Vila, M. Valladares, F. Traveset, A. Santamaría, L. and Castro, P. (2008). Invasiones biológicas. Serie de Divulgación Científica. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid.
- Visser, M. E. 2008. Keeping up with a warming world; assessing the rate of adaptation to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 275: 649-659.
- Visser, M. E. and Both, C. (2005). Shifts in phenology due to global climate change: the need for a yardstick. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 272:2561-2569.
- Walther, G.-R. (2003). Plants in a warmer world. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 6:169-185.
- Walther, G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J. M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg, and F. Bairlein (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature* 426:389-395.
- Ward, N.L. and Masters, G.J. (2007). Linking climate change and species invasion: an illustration using insect herbivores. *Global Change Biology*, 13, 1605-1615.
- Ziska, L.H., Faulkner, S., and Lydon, J. (2004). Changes in biomass and root: shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious, invasive weed, with elevated CO₂: implications for control with glyphosate. *Weed Science*, 52, 584-588.
- Ziska, L.H., Reeves, J.B., and Blank, B. (2005). The impact of recent increases in atmospheric CO₂ on biomass production and vegetative retention of Cheatgrass (*Bromus tectorum*): implications for fire disturbance. *Global Change Biology*, 11, 1325-1332.

CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Eduardo Zorita

GKSS Forschungszentrum, Max-Planck, Geesthacht. Germany

1. INTRODUCCIÓN

La reciente tendencia al aumento de la temperatura global ha sido interpretada como una señal de la influencia de la actividad del hombre sobre el clima por el aumento de la concentración de dióxido de carbono y metano originados por la actividad económica humana. Las predicciones de los cambios climáticos futuros están basadas esencialmente en simulaciones con modelos numéricos climáticos que han ido alcanzando un nivel de sofisticación muy considerable teniendo en cuenta en relativamente corto tiempo de desarrollo de las simulaciones climáticas, apenas unos 20 años. Sin embargo, a pesar de este nivel de complejidad, los modelos climáticos todavía no son perfectos y especialmente a escalas regionales (precisamente las escalas a las que es necesario estimar los posibles impactos del cambio climático sobre los ecosistemas) estos modelos todavía precisan de mejoras importantes.

En esta ponencia intentaremos primeramente dar una visión muy general sobre el desarrollo del clima de la tierra en el pasado, para seguidamente pasar a analizar más detalladamente los problemas que se presentan al tratar de simular el cambio climático regional, presentando las incertidumbres que se derivan de los resultados de diferentes modelos. Este último aspecto suele desafortunadamente ser presentado solo de una manera parcial en la discusión pública sobre el cambio climático antropogénico.

2. EVOLUCIÓN DEL CLIMA DEL PLANETA

La temperatura global de la tierra presenta desde hace unos 100 millones de años (por brevedad no comentaremos sobre climas terrestres anteriores a este periodo) una tendencia al enfriamiento. Así, por ejemplo, la temperatura de la superficie del Océano Ártico en este periodo podría haber rondado los 15 C (Zachos et al., 2001), habiéndose descubierto esqueletos fósiles de reptiles a latitudes árticas. Esta tendencia de largo plazo fue interrumpida por algunos cortos periodos de calentamiento súbito del Eoceno al Paleoceno, aproximadamente hace 55 millones de años. Estos periodos, aunque geológicamente distantes al periodo actual, son de interés para la climatología porque se supone que fueron causados por un degaseamiento súbito de metano almacenado en el fondo de mares poco profundos, y se ha discutido a veces que un degaseamiento similar podría ocurrir también en el futuro si se dieran ciertas circunstancias.

Acercándonos a periodos más recientes, deberíamos citar como suceso climatológico y geológicamente importante el comienzo de la glaciación en la Antártida hace unos 35 millones de años, y en Groenlandia, hace unos 4-5 millones de años, con la que dio comienzo la serie de intensas glaciaciones del Pleistoceno, en la que nos encontramos actualmente, y que a estas escalas geológicas de millones de años, podría ser uno de los períodos más fríos de toda la historia de la tierra. El máximo de la última glaciación tuvo lugar hace unos 20 mil años, cuando la temperatura media global podría haber sido unos 7 grados menos que la actual, acompañada de una concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de aproximadamente 180 ppm, y un nivel del mar de aproximadamente 130 m más bajo que el actual. La temperatura se ha recuperado desde estos valores mínimos hasta hace unos 6 mil años, en los que se alcanzó probablemente un máximo dentro del Holoceno. Reconstrucciones climáticas basadas en concentraciones de polen fósiles en sedimentos lacustres parecen indicar que en Europa la temperatura estival podría haber sido unos 2 grados más alta que actualmente, si bien la temperatura invernal era probablemente parecida o ligeramente inferior a la actual (Davis et al., 2003).

Uno de los aspectos más sorprendentes de la última época glacial han sido los cambios súbitos de temperatura en el hemisferio norte conocidos como los sucesos Dansgaard-Oeschger (Alley, 2000). En estos sucesos, la temperatura del hemisferio norte podría haber sufrido un calentamiento súbito desde el nivel glacial hasta el nivel interglacial, es decir del orden de 5 a 7 grados, en períodos tan cortos como unas pocas décadas. Este aumento de la temperatura se habría mantenido típicamente durante 1000 años. Se cree que el origen de estos sucesos está en un efecto conjunto de la circulación termohalina del Atlántico Norte y el aporte de agua dulce en las latitudes altas del Atlántico Norte por parte de Océano Ártico o de Groenlandia. Aunque todavía no existe una explicación completa del origen y evolución de estos sucesos, solamente su existencia es relevante en la discusión actual sobre el cambio climático antropogénico por dos razones. La primera, porque demuestran que el sistema climático puede sufrir cambios bruscos que podrían repetirse ante determinadas perturbaciones externas. En segundo lugar, porque también indican que los ecosistemas terrestres ya han conocido en el pasado cambios climáticos bruscos como los que podrían producirse en el futuro.

En el último milenio, diversas reconstrucciones de la temperatura del hemisferio norte basadas principalmente en datos dendroclimáticos indican que el milenio experimentó dos fases cálidas, al comienzo y la época actual, y una fase fría - la llamada Pequeña Edad de Hielo, en los siglos centrales del milenio (Jones and Mann, 2004). No existe todavía un acuerdo claro sobre los detalles de esta evolución de la temperatura del hemisferio norte. Y es un hecho desafortunado, porque precisamente la evolución climática de los últimos siglos podría dar datos cuantitativos muy relevantes para estimar la posible evolución futura de la temperatura global. Por una parte, la situación geológica del último milenio es esencialmente la misma que en la actualidad, con lo que la evolución climática descrita anteriormente se ha debido muy probablemente a las variaciones de factores externos que afectan el balance energético de la tierra. Estos factores han sido las variaciones de la actividad solar, las erupciones volcánicas, y las concentraciones de gases de dióxido de carbono y metano (Crowley, 2000). Efectivamente, si conociéramos con precisión como han variado estos factores en los siglos pasados y simultáneamente también conociéramos con exactitud la evolución de la temperatura sería posible realizar una estimación

empírica sencilla de la posible evolución futura de la temperatura ante cambios de estos factores (Hegerl et al. 2006).

De la diversas reconstituciones de la temperatura en el último milenio, algunas indican que las variaciones entre valores máximos y mínimos fueron del orden de 0.4 K y otras reconstrucciones sin embargo indican valores en torno a 1 K. las diferencias son debidas esencialmente a los diferentes métodos aplicados para traducir la información climática contenida en los datos dendroclimáticos en unidades de temperatura, teniendo en cuenta que el crecimiento de los árboles no solo está influenciado por la temperatura en su época de crecimiento, sino también por la disponibilidad de agua y otros factores ecológicos, que empañan la señal climática (Briffa y Osborn, 2002).

A partir del comienzo de los registros instrumentales, aproximadamente hacia 1850 (aunque existen serie más largas de algunas estaciones que sin embargo no permiten un cálculo de temperaturas globales o hemisféricas) los datos muestran un calentamiento de unos 0.6 grados de la temperatura media global entre 1850 y 2000, que sin embargo no ha ocurrido de una forma monótona. Después de alcanzar un máximo alrededor del 1930 la temperatura global disminuyó ligeramente para iniciar a partir de 1980 un fuerte calentamiento hasta aproximadamente el año 2000. En la primera década del siglo XXI la temperatura global se ha mantenido en los niveles más altos desde que se dispone de un registro instrumental suficiente, aunque la tendencia en lo que llevamos de siglo XXI es más pequeña que la observada en el periodo 1980-2000- dentro de la incertidumbre inevitable en un cálculo de tendencias en un periodo de 7 años (Brohan et al., 2006).

3. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Las proyecciones de la evolución futura de la temperatura están esencialmente basadas en las simulaciones con complejos modelos numéricos que incluyen una representación matemática de los componentes principales del sistema climático: la atmósfera, el océano, el hielo marino, la corteza superficial de la tierra. Los modelos más modernos tienden a incluir también una representación de procesos geo-químicos. Por ejemplo, en la estratosfera los procesos foto-químicos asociados a la presencia de ozono pueden tener una gran importancia para la dinámica y la termodinámica de las capas bajas de la estratosfera e indirectamente en la dinámica de la troposfera. Asimismo, los procesos geo-químicos que modulan la concentración de dióxido de carbono y metano en la atmósfera son de carácter global. En ellos interaccionan, por mencionar solo algunos de ellos, el plancton marino y la biosfera terrestre, sistemas cuya evolución e interacción en escalas de tiempo de décadas es difícil de modelizar, entre otras razones, por falta de observaciones que cubran este rango de tiempo.

Por ello, en las proyecciones de cambio climático futuro actuales se utilizan los modelos climáticos para simular la respuesta del clima a hipotéticas, pero posibles, evoluciones de las emisiones de gases de invernadero en la atmósfera. Estos escenarios de emisiones se traducen a posibles evoluciones de las concentraciones en la atmósfera utilizando modelos bio-geo-químicos. Los escenarios de concentraciones de gases de invernadero son entonces los utilizados en

las simulaciones con modelos climáticos, generalmente hasta el horizonte del año 2100, aunque algunas simulaciones se han continuado hasta el año 3000 asumiendo ciertos escenarios simples de concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera.

Los modelos climáticos son construcciones informáticas complejas que están basadas en las representaciones numéricas de las leyes físico-químicas ampliamente conocidas, pero que también incluyen aproximaciones y representaciones groseras de procesos de pequeña escala espacial de los que no se puede dar perfecta cuenta debido a la limitada resolución espacial y temporal de los modelos climáticos. Existe por tanto una incertidumbre en la capacidad de los modelos climáticos en simular el clima futuro. Una forma de acotar esta incertidumbre es cotejar los resultados de las simulaciones climáticas para el clima presente y compararlas con las observaciones climáticas (también ellas lastradas por errores en los instrumentos de medida y por el número limitado de puntos de observación). Sin embargo, la simulación de la evolución temperatura media global en el siglo XX por los modelos incluidos en el IPCC es bastante realista cuando se incluyen todos los factores externos climáticos conocidos, siendo los más importantes los cambios en la concentración de dióxido de carbono y metano, cambios en la actividad solar, erupciones volcánicas, concentración de aerosoles industriales en la troposfera (Knutson et al., 2006). Cuando en estas simulaciones se omiten los cambios en la concentración de gases de invernadero de origen antropogénico, los resultados no coinciden con la evolución observada de la temperatura global, lo que constituye una fuerte indicación de la influencia de estos factores en el clima global. En este punto, sin embargo, hay que indicar cautamente también que este acuerdo entre simulaciones y observaciones es en cierto punto artificial: el efecto de los aerosoles troposféricos no es conocido con la suficiente exactitud, y este puede entonces variarse dentro de ciertos límites para conseguir un mejor ajuste entre simulaciones y observaciones (Kiehl, 2007).

Aunque el cambio climático antropogénico es detectable en la evolución de la temperatura media global, los impactos climáticos siempre estarán relacionados con la evolución de la temperatura o precipitación local o regional. Las decisiones encaminadas a paliar los posibles efectos del cambio climático deberán tener en cuenta la incertidumbre que todavía lastra las predicciones climáticas a estas escalas más pequeñas, que es desafortunadamente todavía muy grande.

El tercer informe del IPCC recoge una comparación con la temperatura observada de la simulación de la temperatura media actual en grandes regiones (IPCC, 2001). Para la Península Ibérica la región relevante definida por el IPCC es la región Mediterránea. Para esta región, el error cometido por los modelos incluidos en este informe, es decir la diferencia entre simulación y observación, varía entre -1 y 3 Kelvin para los meses de invierno (diciembre-febrero) y entre -1 y 2 Kelvin para los meses de verano (julio-agosto) (Figura 1). Estas cifras deben considerarse como el trasfondo en el que se insertan las simulaciones del cambio de temperatura en esta región, que se sitúan en un rango de entre 4 y 5.5 Kelvin para el invierno y entre 4 y 7 Kelvin para el verano para el periodo 2070-2100 asumiendo un aumento anual de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de 1% (Figura 2). Existe por tanto acuerdo entre todos los modelos de que la temperatura media en esta región aumentaría al aumentar las concentraciones de dióxido de carbono, y este aumento es mayor que el error cometido por los modelos en la simulación de la temperatura actual.

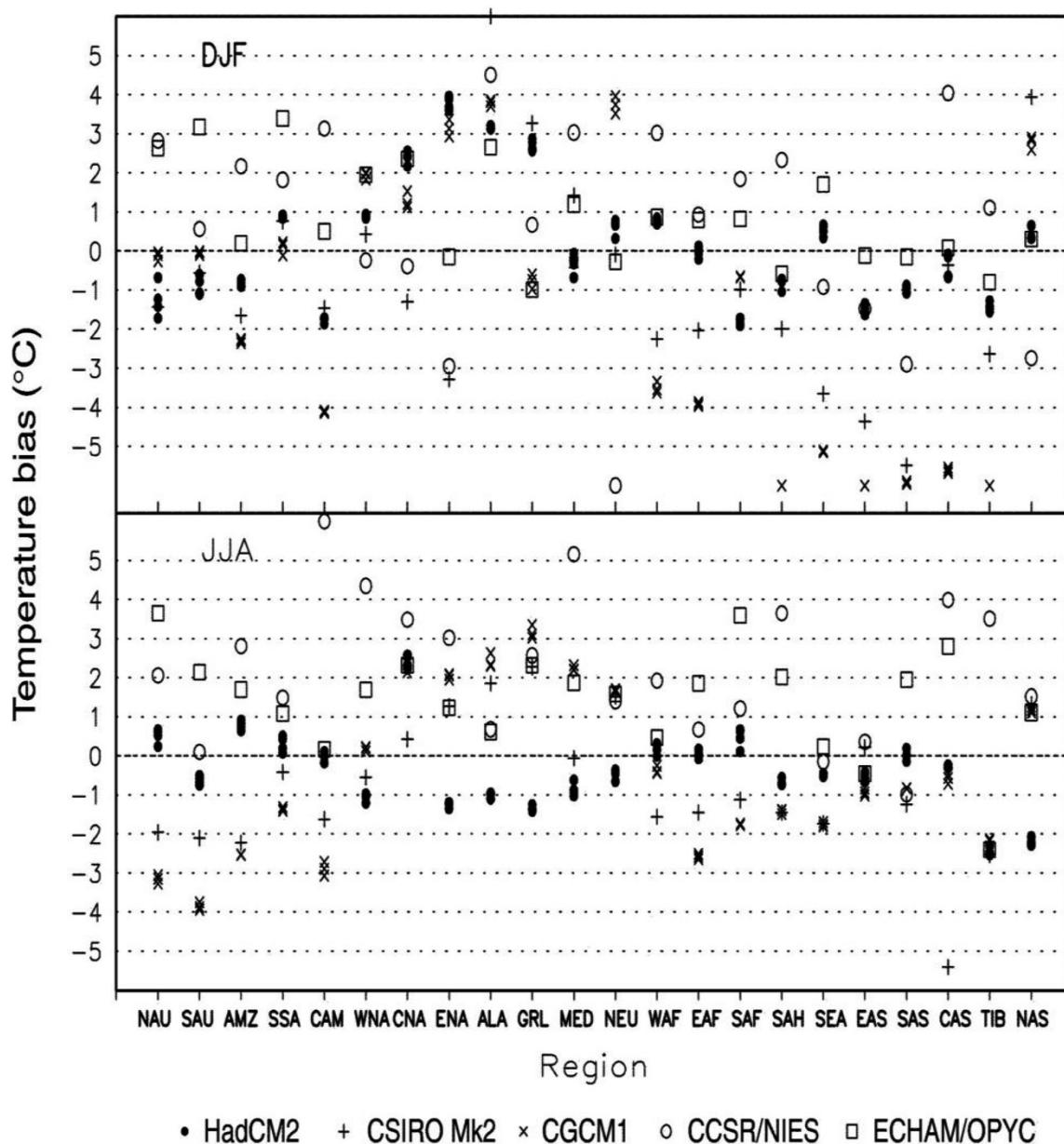


Figura 1. Diferencia entre la temperatura media observada y simulada por los modelos incluidos en el Tercer Informe del IPCC en diferentes regiones del globo en la estación Diciembre-Febrero (DJF) y Junio-Agosto (JJA). La región mediterránea es la indicada por MED.

No existen, desafortunadamente, numerosos análisis del grado de realismo de las simulaciones de la evolución de la temperatura en la superficie a escala regional en el siglo xx. Ello es debido a que a escalas regionales el nivel de variabilidad climática interna es mayor que a escala global, y por tanto no debe esperarse un acuerdo perfecto entre la evolución de la temperatura regional una simulación particular y la temperatura observada. Para este tipo de análisis se requieren un conjunto de simulaciones con el mismo modelo y el mismo forzamiento externo,

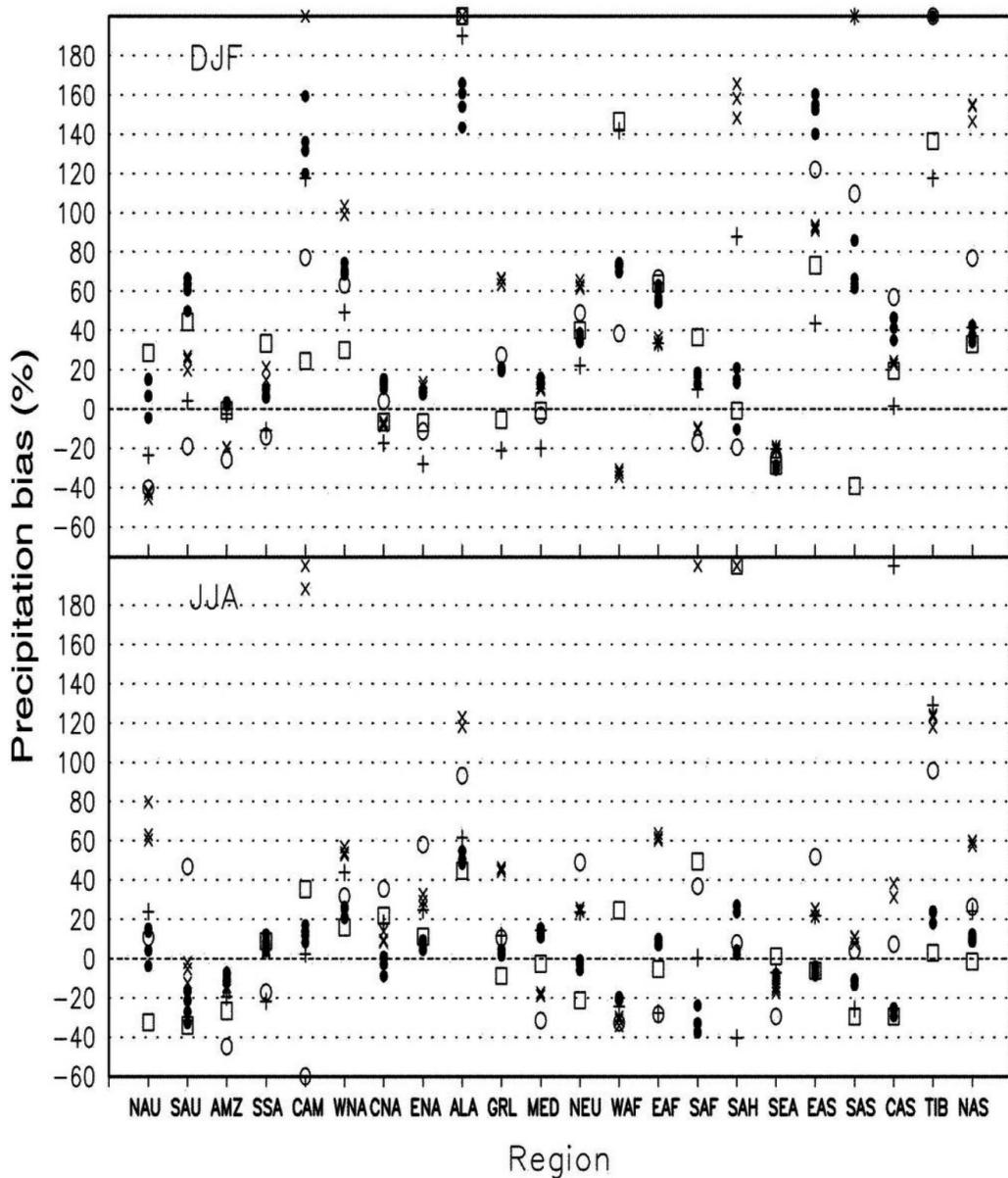


Figura 2. Diferencias medias de la temperatura entre 2070-2100 y 1960-1990 simulados por los diferentes modelos incluidos en el Tercer Informe del IPCC para diferentes regiones del globo y para las estaciones Diciembre-Febrero (DJF) y Junio-Agosto (JJA). La región mediterránea es la indicada por MED.

y que solo se diferencian en sus condiciones iniciales. Idealmente, la curva de temperatura observada debería entonces encontrarse dentro de rango de temperaturas simuladas en el conjunto de simulaciones. Sin embargo, no siempre es así (Knutson et al., 2006). Ello puede ser debido a deficiencias en los modelos o a la presencia de procesos regionales, como puede ser la utilización del suelo, que no están contemplados por los modelos. Estos factores añaden entonces un grado de incertidumbre a las proyecciones climáticas a escala regional, dado que es difícil estimar como se desarrollarán en el futuro.

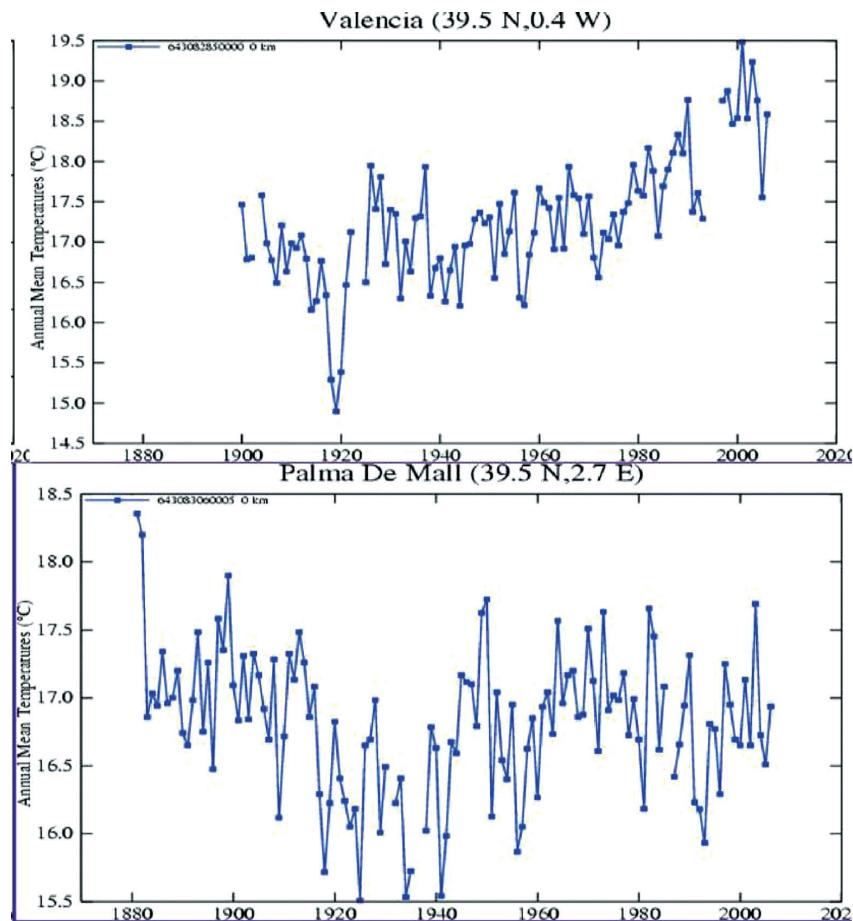


Figura 3. Temperatura media anual medida en las estaciones de Valencia y Palma de Mallorca obtenidas de la base de datos del centro GISS (Goddard Institute for Space Studies, NASA).

Efectos regionales o locales pueden ser fácilmente identificados en series de temperatura en la Península Ibérica. Por ejemplo, en los últimos 60 años la temperatura media anual en la ciudad de Valencia ha aumentado aproximadamente en 2 K, un aumento considerable, mientras que en Palma de Mallorca, una localidad próxima y con un clima similar, se ha producido una ligera disminución, apenas perceptible (Figura 3). Esta diferencia podría ser debido a efectos de urbanización, que desvirtúan las medidas en las estaciones meteorológicas urbanas, o también a efectos climatológicos locales. Estos últimos deberían ser entonces considerados para la estimación de posibles cambios futuros de la temperatura.

La precipitación es una variable que generalmente es simulada de forma más deficiente por los modelos climáticos, ya que es debida principalmente a procesos que no están explícitamente representados en los modelos, como la formación de nubes, y el proceso de precipitación en si. Estas deficiencias pueden ilustrarse para la región Mediterránea citando el rango de error en la simulación de la precipitación media actual de entre -20% y +20% para los meses de invierno, y entre -20% y +15% para los meses de verano por los modelos climáticos incluidos en el informe.

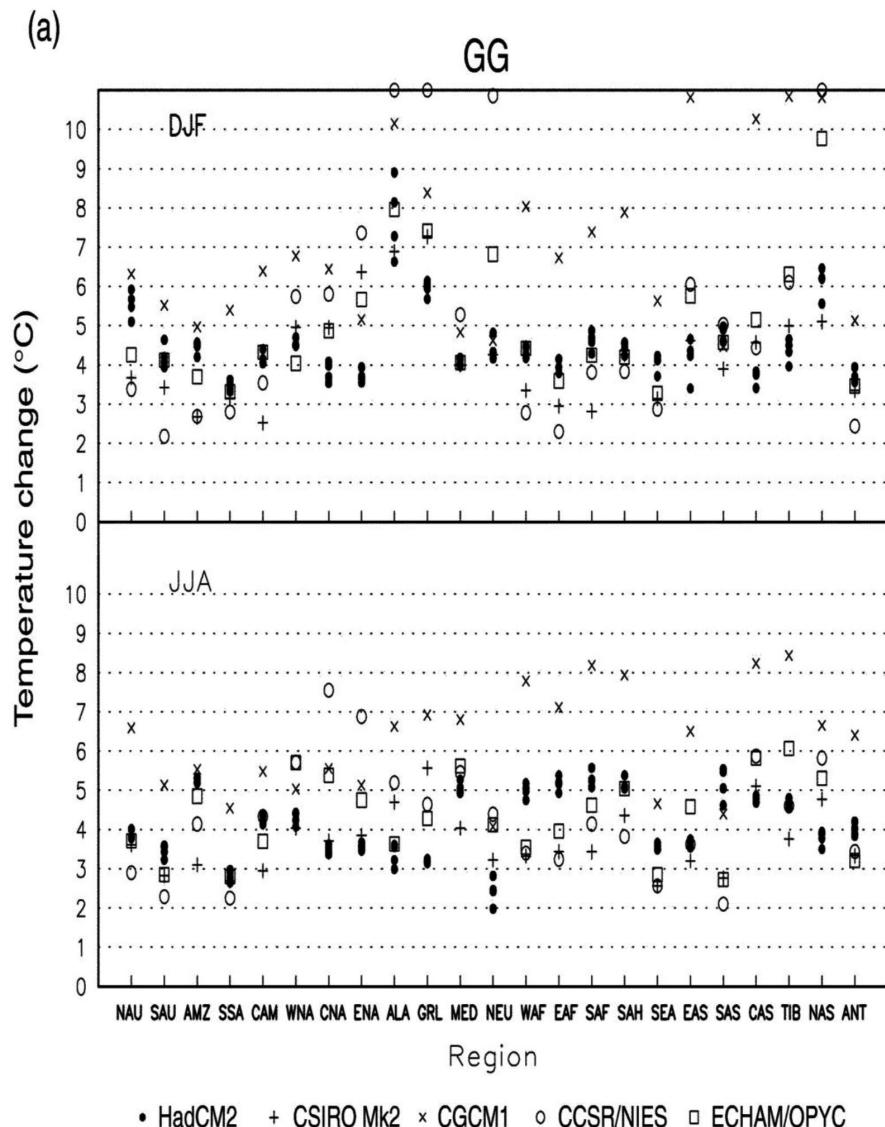


Figura 4. Diferencia entre la precipitación media observada y simulada por los modelos incluidos en el Tercer Informe del IPCC en diferentes regiones del globo en la estación de Diciembre-Febrero (DJF) y Junio-Agosto (JJA). La región mediterránea es la indicada por MED.

me del IPCC (Figura 4). Los cambios simulados de precipitación media, asumiendo el mismo escenario de concentraciones de dióxido de carbono, sería de -10% y 20% para la precipitación invernal y entre -40% y +10% para la precipitación estival (Figura 5). Estas cifras requieren una consideración especial, puesto que ilustran la falta de acuerdo entre los modelos sobre del posible cambio en la precipitación invernal en el área Mediterránea, un aspecto crucial para la estimación de impactos climáticos en la Península Ibérica. El origen de la falta total de acuerdo de los futuros cambios en la precipitación invernal en el área Mediterránea es en parte debido a las diferencias en las simulaciones del futuro comportamiento de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) (Miller et al., 2006) que en este contexto se puede interpretar como un índice de

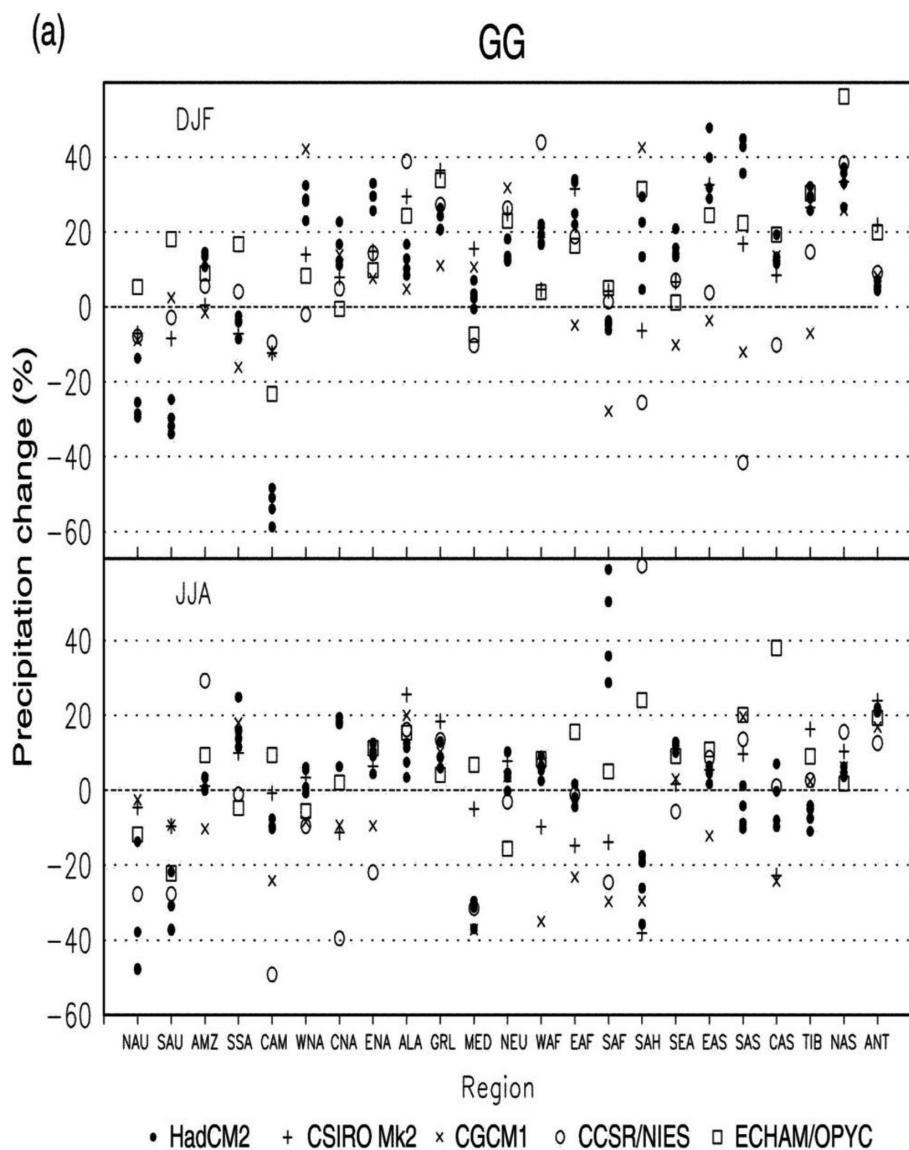


Figura 5. Diferencias medias de la precipitación entre 2070-2100 y 1960-1990 simulados por los diferentes modelos incluidos en el Tercer Informe del IPCC para diferentes regiones del globo y para las estaciones de Diciembre-Febrero (DJF) y Junio-Agosto (JJA). La región mediterránea es la indicada por MED.

la intensidad del anticiclón de las Azores. En general, existe un desacuerdo mucho más grande en la simulación de los cambios en la circulación atmosférica que en otros aspectos climáticos, como la temperatura. Es posible que las variaciones en la circulación atmosférica sean debidas en gran parte a los procesos climáticos internos y solo en una pequeña parte este originada en los factores de forzamiento externo. De hecho, ningún modelo climático es capaz de simular ni la amplitud de las variaciones de la NAO observadas en el siglo xx, ni la fuerte tendencia ascendente de la NAO observada entre 1970 y 1995 aproximadamente (Osborn, 2004). Asimismo, las proyecciones del futuro comportamiento de la NAO debidas a un aumento de las concentraciones de gases de invernadero se diferencian claramente en los diversos modelos

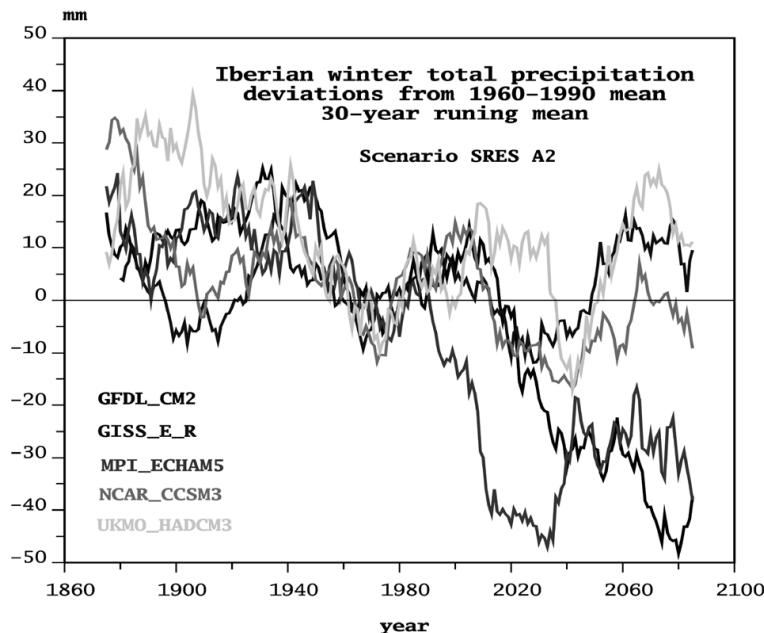


Figura 6. Evolución de los cambios (referidos al promedio 1960-1990) en la precipitación estacional invernal (Diciembre-Febrero) media en la Península Ibérica simulada por 5 modelos incluidos en el Cuarto Informe del IPCC en el periodo 1860-2100, asumiendo el escenario A2 de concentraciones futuras de gases de invernadero.

climáticos. Mientras que en algunos se simula una clara tendencia hacia la intensificación, en otros modelos no se aprecia ninguna tendencia futura (Miller et al., 2007).

No es clara la razón por la que los diferentes modelos predicen evoluciones distintas para la NAO en el futuro. El problema esencial es que tampoco se conoce bien cual o cuales son los mecanismos que afectan a la variabilidad multidecenal de la NAO. Algunas hipótesis apuntan al efecto que la temperatura de la superficie del mar puede tener en la circulación atmosférica (Rodwell et al., 1999), y en este sentido, de una forma un tanto sorprendente, se han encontrado en análisis de simulaciones conexiones entre el Océano Índico y la NAO (Hoerling et al, 2001). Cuando en una simulación climática, se prescriben las temperaturas de la superficie mar del observadas en el Océano Índico, este modelo es capaz de simular con más realismo la evolución de la NAO en las últimas décadas. Otras hipótesis se centran en la influencia de los vientos zonales en estratosfera inferior sobre la circulación en la troposfera (Scaife et al., 2005). Cuando se prescribe en un modelo climático los vientos observados en la estratosfera, también se pueden simular de forma más realista las tendencias multidecenales de la NAO. También se han encontrado que las temperaturas de la superficie del mar en el Atlántico Norte pueden tener una influencia en la NAO, aunque en este caso es más difícil separar la causa del efecto, ya que la circulación atmosférica también modifica fuertemente el campo de temperaturas de la superficie del mar (Rodwell et al., 1999). En muchas variables en la región del Atlántico Norte muestran variaciones coherentes con un periodo de aproximadamente

70 años, aunque dada la limitada longitud de los datos instrumentales, es difícil determinar con seguridad si este tipo de variaciones de periodo tan largo existen, y cuál es el periodo exactamente. Esta quasi-oscilación, denominada la Oscilación Atlántica Multidecenal (Knight et al., 2005), tiene su origen pre visiblemente en la circulación meridional termohalina del Océano Atlántico Norte, pero se detecta también en la circulación atmosférica y en las temperaturas de Europa Occidental.

Por último, podríamos citar también las relaciones estadísticas que se han encontrado entre la NAO y el fenómeno de El Niño en el Océano Pacífico Tropical. Al parecer, los fenómenos de El Niño, es decir, un aumento de la temperatura de la superficie en el Pacífico Tropical, va acompañada estadísticamente de una NAO más débil y por tanto de más precipitación invernal en la Península Ibérica (Pozo-Vázquez et al., 2005). El fenómeno de El Niño también se ha puesto en relación con periodos de sequía en todo el cinturón subtropical (Hoerling y Kumar, 2003).

No es fácil determinar cuál de estas hipótesis se acerca más a la realidad, y podría ser que todas ellas explicaran un aspecto parcial de la variabilidad de la NAO en el clima presente. Si ello, fuera así, y ningún proceso fuera dominante en la determinación de los cambios futuros de la NAO, la predicción de los cambios de precipitación en la Península Ibérica se tornaría aun más difícil, ya que habría que estimar de forma correcta la evolución futura varios procesos climáticos, cada uno de ellos de naturaleza diferente. Actualmente, los diferentes modelos utilizados por el IPCC en su cuarto informe del año 2007, no ofrecen una proyección unívoca (Figura 6). Algunos de ellos predicen para el invierno una reducción clara de la precipitación invernal para la Península, mientras que otros no producen una tendencia apreciable. Para el verano, las predicciones son más coherentes, apuntando todas ellas hacia una reducción de la precipitación (Figura 7).

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que la resolución de los modelos climáticos globales no es adecuada para las estimaciones de la precipitación escala regional, dado que en ellos muchos procesos regionales no están bien representados. No es posible, por tanto, determinar a partir de las simulaciones con modelos globales determinar cómo podría cambiar la precipitación a escalas espaciales de unos pocos cientos de kilómetros. Para ello, se requieren modelos climáticos regionales que cubren una cierta región del globo, por ejemplo Europa Occidental, o incluso regiones más pequeñas. En su dominio de simulación, estos modelos regionales utilizan una resolución espacial muy alta, del orden de 20-50 km, y son alimentados en los bordes de su dominio por las simulaciones obtenidas con los modelos globales. Al aumentar la resolución tanto la topografía de la región como su interacción con la dinámica de la atmósfera están mejor representadas lo que conduce a una mejor simulación de los campos de temperatura y precipitación media en comparación con las simulaciones con modelos globales. Aun así, las diferencias entre observaciones y simulaciones pueden ser todavía considerable.

Más importante que conocer el error cometido por los modelos regionales en la simulación de la precipitación media actual sería la estimación de los posibles errores en la simulación de

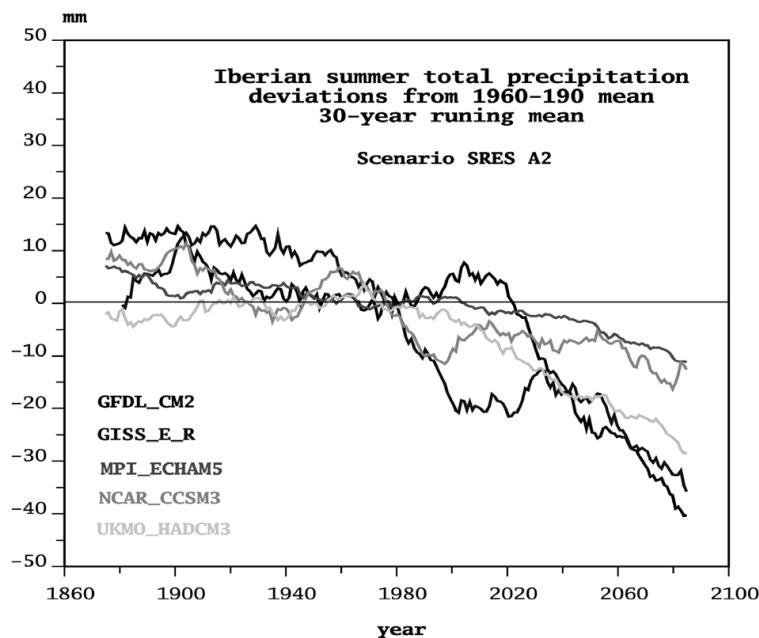


Figura 7. Evolución de los cambios (referidos al promedio 1960-1990) en la precipitación estacional estival (Junio-Agosto) media en la Península simulada Ibérica por 5 modelos incluidos en el Cuarto Informe del IPCC en el periodo 1860-2100, asumiendo el escenario A2 de concentraciones futuras de gases de invernadero.

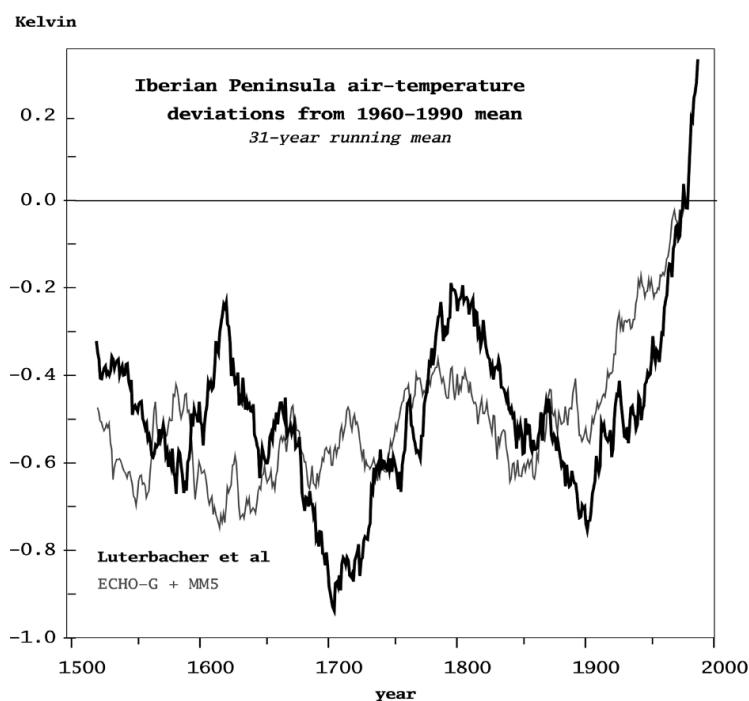


Figura 8. Temperatura invernal en la Península Ibérica simulada por modelo climático global ECHO-G regionalizado con el modelo regional MM5 en comparación con la temperatura reconstruida a partir de datos proxy en el periodo 1500-1990 (Luterbacher et al. 2004).

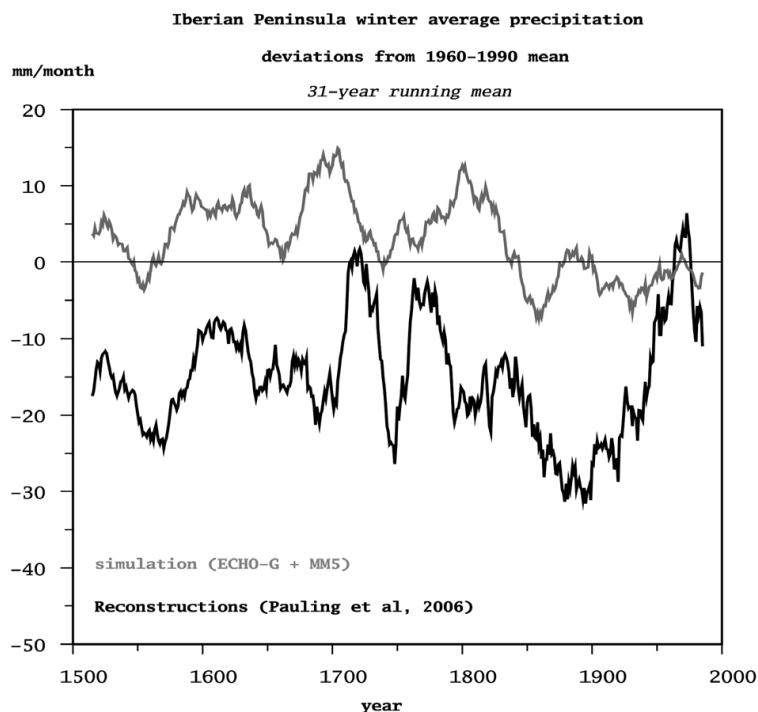


Figura 9. Precipitación invernal en la Península Ibérica simulada por modelo climático global ECHO-G regionalizado con el modelo regional MM5 en comparación con la precipitación reconstruida a partir de datos proxy en el periodo 1500-1990 (Pauling et al. 2006).

cambios de precipitación producidos por nuevos forzamientos externos, como un aumento de la concentración de gases de invernadero. La única forma de estimar este error es la comparación entre simulaciones y observaciones en periodos pasados en los que las condiciones de forzamiento climático externo eran diferentes a las de ahora, como la mostrada en las figuras 8 y 9. La temperatura y precipitación en invierno Península Ibérica simulada por el modelo global ECHO-G y el modelo regional MM5 en el periodo 1500-1990 se compara con las mismas variables reconstruidas partir de informaciones extraídas de registros documentales y biológicos, como anillos de árboles. Se puede apreciar que mientras que para la temperatura existe en líneas generales un acuerdo entre simulaciones y reconstrucciones, en el caso de la precipitación el desacuerdo es evidente. Se debe, por tanto, profundizar en este análisis para explicar estas discrepancias que pueden ser debidas tanto como a deficiencia de los modelos como a errores en el proceso de reconstrucción de las variables climáticas pasadas. Esta es una línea de investigación muy activa actualmente porque, como hemos indicado, es la única forma de poner a prueba las simulaciones de cambio climático.

CLIMATE CHANGE AND CLIMATE VARIABILITY

Eduardo Zorita

GKSS Forschungszentrum, Max-Planck, Geesthacht. Germany

1. INTRODUCTION

The recent trend towards the global temperature increase has been interpreted as a sign of the influence of man's activities on climate due to the increase of both carbon dioxide and methane concentration originated by human economic activity. The forecasts of the future climate changes are essentially based on simulations with climate numerical models that have been reaching a very significant sophistication level taking into account the relatively short time in which these climate simulations have been developed-hardly some 20 years. However, despite this level of complexity, climate models are still far from perfect and especially on regional scales (precisely the scales at which it is necessary to estimate the possible impacts of climate change on ecosystems) these models still need important improvements.

In this paper we will try to give an overview on the Earth's climate development in the past and then we will analyze in detail the problems encountered when trying to simulate regional climate change, presenting the uncertainties derived from the results of different models. Unfortunately, the latter aspect tends to be presented only in a biased way in the public discussion on anthropogenic climate change.

2. THE CLIMATE OF THE RECENT PAST

Since some 100 million years—for reasons of brevity we will not comment on climates before this period—the Earth's global temperature presents a trend toward cooling. Thus, for instance, the Arctic Ocean's surface temperature in this period might have been about 15 degrees Celsius (Zachos et al., 2001), due to the discovery of fossil skeletons of reptiles in arctic latitudes. This long-term trend was interrupted by some short and sudden warming periods from the Eocene to the Palaeocene, approximately 55 million years. These periods, although geologically distant from the current period, are interesting for climatology because they are supposed to be caused by a sudden emission of methane stored at the bottom of shallow seas. It has sometimes been said that a similar emission could also happen in the future if certain circumstances took place.

If we take a look at more recent periods, we should mention the beginning of the glaciation in the Antarctic some 35 million years ago, due to its climatological and geological importance, and the one in Greenland, 4-5 million years ago, which was the first one in the series of intense glaciations of the Pleistocene, the current epoch, that could become one of the coldest periods of

the whole history of the Earth on these geological scales of millions of years. The Last Glacial Maximum took place some 20 thousand years ago, when the average global temperature could have been 7 degrees less than the current one, accompanied by a carbon dioxide concentration in the atmosphere of approximately 180 ppm, and a sea level of some 130 m lower than the current one. The temperature has recovered from these minimum values up to more or less 6 thousand years ago, when there probably was a maximum during the Holocene. Climate reconstructions based in fossil pollen concentrations in lake sediments seem to indicate that in Europe summer temperature could have been some 2 degrees higher than now, although winter temperature was probably similar or slightly lower than the current one (Davis et al., 2003).

One of the most surprising aspects of the last ice age has been the sudden temperature changes in the Northern hemisphere known as the Dansgaard-Oescher events (Alley, 2000). During these events, the temperature in the Northern hemisphere could have suffered a sudden warming from glacial level up to interglacial level, that is, in the order of 5 to 7 degrees, in such short periods as a few decades. This increase of the temperature would typically have been maintained for 1000 years. It is believed that the origin of these events lies in a joint effect of the thermohaline circulation of the North Atlantic Sea and the fresh water contribution from the Arctic Ocean or Greenland in the high latitudes of the North Atlantic Sea. Although there isn't yet a complete explanation for the origin and evolution of these events, their sole existence is relevant in the current discussion on anthropogenic climate change because: firstly, they prove that the climate system can suffer sudden changes that might be repeated in case of certain external disturbances. Secondly, they also indicate that terrestrial ecosystems have witnessed sudden climate changes in the past like those that might take place in the future.

Over the last millennium, various reconstructions of the Northern Hemisphere temperature mainly based on dendroclimatological data indicate that the millennium experimented two warm phases—at the beginning and in the current era—, and a cold phase—the so-called Little Ice Age—in the central centuries of the millennium (Jones and Mann, 2004). There is still no clear consensus on the details of this temperature evolution in the Northern Hemisphere. And this is an unfortunate fact, because it is precisely the climate evolution of the last centuries what could give very relevant quantitative data to estimate the possible future evolution of global temperature. On the one hand, the geological situation of the last millennium is essentially the same as now. Therefore, the climate evolution described was probably due to variations in the external factors affecting the Earth's energy balance. These factors have been: variations in solar activity, volcanic eruptions and carbon dioxide and methane concentrations (Crowley, 2000). Indeed, if we knew accurately how these factors have changed in the last centuries and if simultaneously we also knew for certain the temperature evolution, it would be possible to carry out a simple empiric estimation of the possible future evolution of temperature in case these factors change (Hegerl et al. 2006).

Among the various temperature reconstructions over the last millennium, some point out that variations between minimum and maximum values were about 0.4 K and other reconstructions, however, indicate values around 1 K. The differences are mainly due to the various methods used to translate the climate information contained in the dendroclimatological data into temperature

units, taking into account that tree growth is not only affected by temperature during the growing period, but also by water availability and other ecological factors that may hinder climate signal (Briffa and Osborn, 2002).

From the start of instrumental records, approximately toward 1850—although there are longer series coming from some observatories that, nevertheless, do not allow reckoning global or hemispheric temperatures—data show a warming of some 0.6 degrees of the average global temperature between 1850 and 2000, which, however, has not occurred in a monotonous way. After reaching a maximum around 1930, global temperature decreased slightly and then started strong warming in 1980 until approximately 2000. During the first decade of the 21st century, global temperature has remained at the highest levels since there are enough instrumental records, although the trend in the 21st century years that have passed is lower than the one observed in the 1980-2000 period—of course within the unavoidable uncertainty in a trend calculation of a seven-year period (Brohan et al., 2006).

3. PROJECTIONS OF THE FUTURE CLIMATE

The future temperature evolution forecasts are essentially based on simulations with complex numerical models that include a mathematical representation of the main components of the climate system: atmosphere, oceans, sea ice and the Earth's surface crust. The most modern models tend to include a representation of the geochemical processes too. For instance, in the stratosphere the photochemical processes associated to the presence of ozone can have great importance in the dynamics and the thermodynamics of the low layers of the stratosphere and, indirectly, in the dynamics of troposphere. Also, the geochemical processes modulating the concentration of carbon dioxide and methane in the atmosphere are of a global nature. Among these processes we can mention marine plankton and the Earth's biosphere, systems the evolution and interaction of which in decades are difficult to model, among other reasons, due to lack of observations that cover such short time scales.

This is the reason why in the current prospects on future climate change, climate models are used to simulate the climate answer to the hypothetical but possible evolution of greenhouse effect gas emissions to the atmosphere. These emission scenarios are translated into possible evolutions of atmosphere concentrations using biogeochemical models. The greenhouse effect gas concentration scenarios are then used in simulations with climate models, generally until 2100, although some simulations continue up to the year 3000 assuming certain simple scenarios of greenhouse effect gas concentrations in the atmosphere.

Climate models are complex computer constructions based on numerical representations of the well-known physicochemical laws, also including rough approaches and representations of small-scale processes that cannot be well accounted for given the limited spatio-temporal resolution of climate models. Therefore, the ability of climate models to simulate future climate is uncertain. A way to reduce this uncertainty is by comparing the results of current climate simulations with climate observations these also burdened by errors in the measurement

instruments and by the limited number of observation points. Nevertheless, the global average temperature evolution simulation of the 20th century carried out by models included in the IPCC is fairly realistic when all known climate external factors are included, the most important ones being changes in carbon dioxide and methane concentrations, changes in solar activity, volcanic eruptions, concentration of industrial aerosols in the troposphere (Knutson et al., 2006). When changes in the concentration of greenhouse effect gases of anthropogenic origin are omitted in these simulations, the results do not coincide with the global temperature evolution observed, which constitutes a strong indication of the influence of these factors on global climate. However, in this point it must also be cautiously indicated that this agreement between simulations and observations is somehow artificial: the precise effect of troposphere aerosols is still unknown and it then can be altered within certain limits in order to get a better adjustment between simulations and observations (Kiehl, 2007).

Although anthropogenic climate change can be detected in the global average temperature evolution, climate impacts will always be related to the local or regional evolution of temperature or precipitation. Decisions aimed at mitigating the possible effects of climate change will have to take into account the unfortunately large uncertainty that is still burdening climate predictions on these smaller scales.

The third IPCC report shows a comparison of the temperature observed with the simulation of the current mean temperature in large regions (IPCC, 2001). For the Iberian Peninsula, the relevant region defined by the IPCC is the Mediterranean region, in which the error made by the models included in this report, i.e., the difference between simulation and observation, varies between -1 and 3 degrees Kelvin for the winter months (December - February) and between -1 and 2 degrees Kelvin for the summer months (July - August) (Figure 1). These figures should be considered as the background of temperature change simulations in this region, ranking from 4 to 5.5 degrees Kelvin in winter and between 4 and 7 degrees Kelvin in summer for the 2070-2100 period assuming an annual carbon dioxide increase in the atmosphere of 1% (Figure 2). Therefore, all models agree on the fact that the mean temperature in this region would increase if carbon dioxide concentrations increase, and this is a greater increase than the error made by models in the current temperature simulation.

Unfortunately, there are few analysis on the degree of realism of surface temperature evolution simulations on a regional scale in the 20th century. This is due to the fact that on regional scales the level of internal climate variability is higher than on global scales and, therefore, a perfect agreement among the regional temperature evolution, a particular simulation and the temperature observed must not be expected. For this type of analysis a set of simulations with the same model and the same external forcing are required, only their initial conditions being different. Ideally, the temperature curve observed should then be located within the range of temperatures simulated. However, this is not always so (Knutson et al., 2006). It can be owed to model deficiencies or to the presence of regional processes, such as land use, usually neglected by models. As a result, these factors add some uncertainty to climate projections on a regional scale, given that it is difficult to assess how they are going to develop in the future.

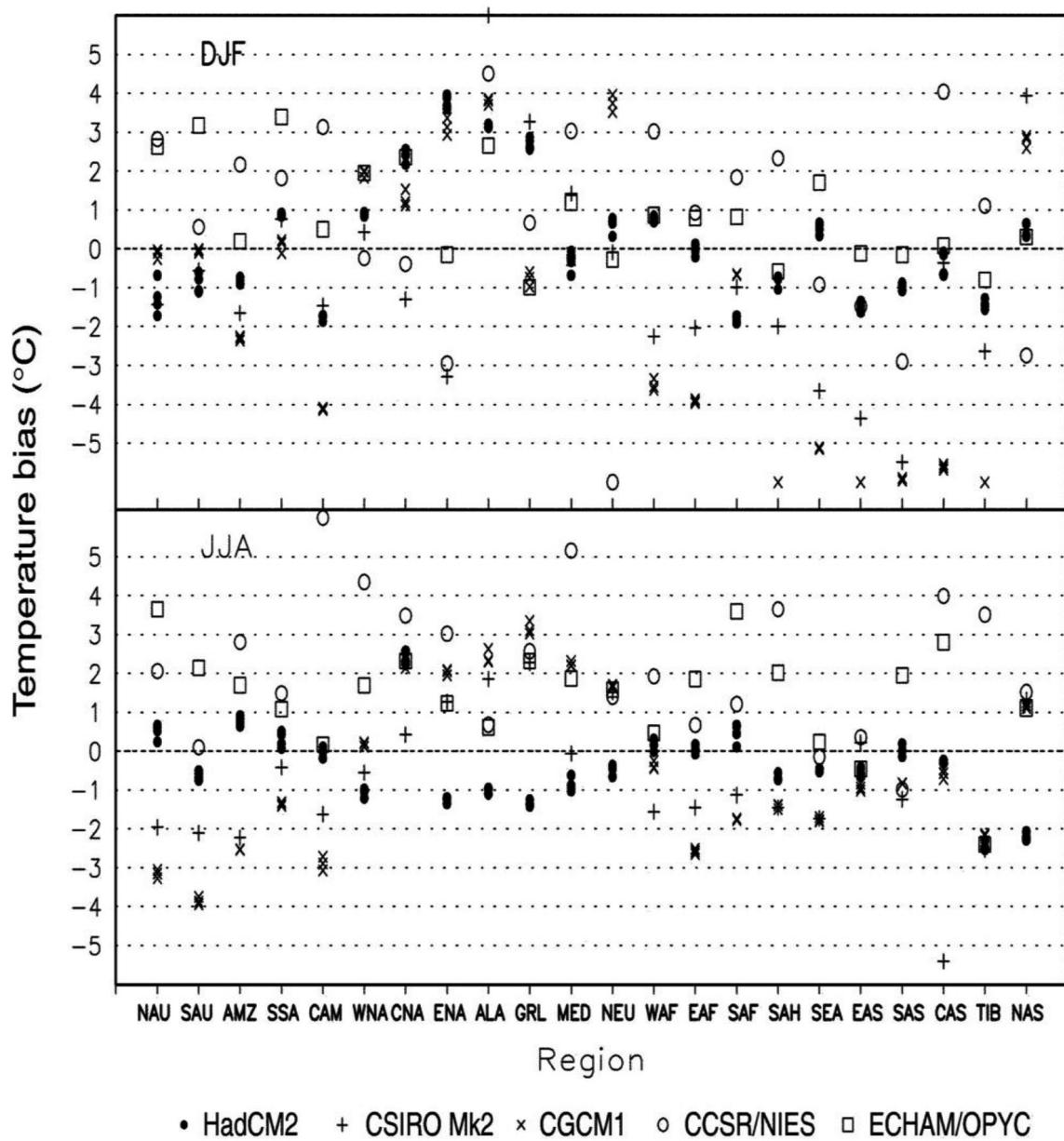


Figure 1. Difference between the mean temperature observed and the temperature simulated by the models included in the Third IPCC Report in various regions of the world in the December–February period (DJF) and the June–August period (JJA). MED indicates the Mediterranean region.

Regional or local effects can be easily identified in temperature series in the Iberian Peninsula. For instance, over the last 60 years the mean annual temperature in the city of Valencia has increased approximately 2 K, a considerable increase, while in Palma de Mallorca, another city nearby with a similar climate, a slight and hardly perceptible decrease has occurred (Figure 3). This difference could be due to development effects, which distort urban weather

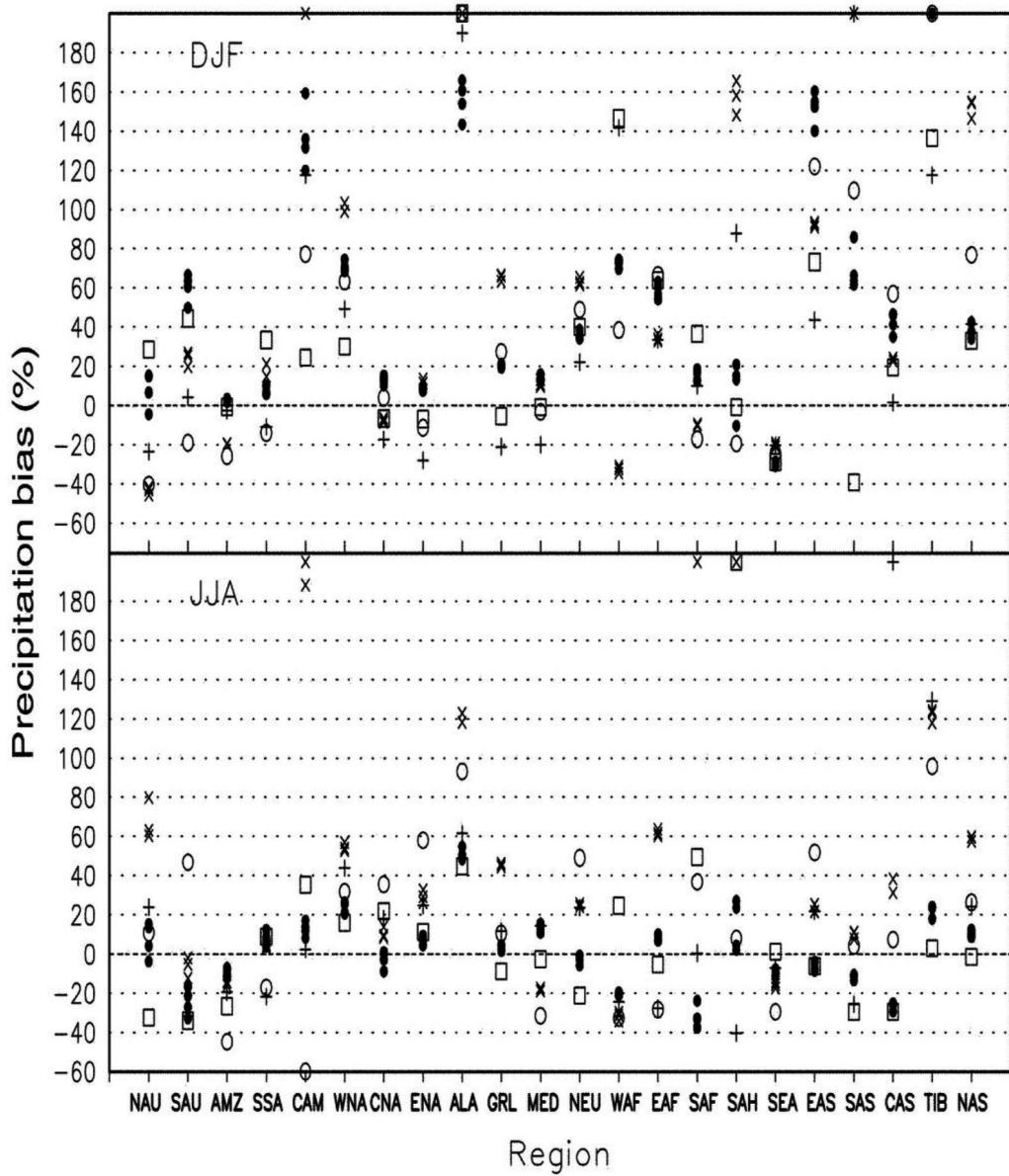


Figure 2. Mean temperature differences between 2070-2100 and 1960-1990 simulated by the different models included in the Third IPCC Report for various regions of the world and for the December-February period (DJF) and the June-August period (JJA). MED indicates the Mediterranean region.

stations measurements, or also due to local climatological effects, which should be, therefore, considered for the estimation of possible future temperature changes.

Precipitation is generally a poorly simulated variable in climate models, since its occurrence is mainly due to processes that are not explicitly represented in models, like cloud formation and the precipitation process in itself. These deficiencies can be seen in the Mediterranean region, with an error range in the current mean precipitation simulation of between -20%

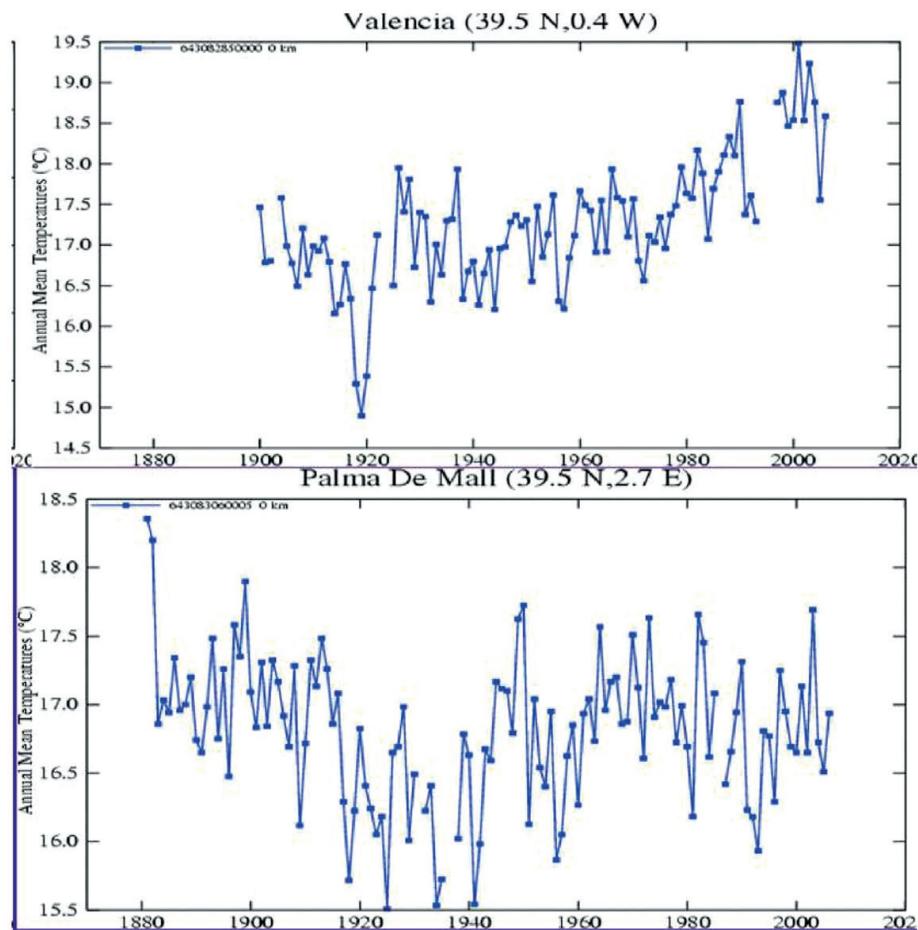


Figure 3. Annual mean temperature measured in the Valencia and Palma de Mallorca stations obtained in the data base of the GISS (Goddard Institute for Space Studies, NASA) centre.

and +20% for the winter months and between -20% and +15% for the summer months, in the climate models included in the IPCC report (Figure 4). The changes simulated in mean precipitation, assuming the same carbon dioxide concentrations scenario, would be -10% and 20% for winter precipitation and between -40% and +10% for summer precipitation (Figure 5). These figures require a special consideration, as they are an example of the lack of agreement among the models on the possible change in winter precipitation in the Mediterranean area, a crucial aspect for the assessment of climate impacts in the Iberian Peninsula. The origin of the total lack of agreement on the future changes of winter precipitation in the Mediterranean area is partly due to differences in the simulations of the North Atlantic Oscillation (NAO) future behaviour (Miller et al., 2006), which in this context can be interpreted as an index of the Azores High (North Atlantic High) intensity. In general, there is much more disagreement on the simulation of changes in atmospheric circulation than on other climate aspects, such as temperature. It is possible that atmospheric circulation variations may be largely due to internal climate processes and only to a small extent to external forcing factors. In fact, no climate model is able to simulate neither the NAO variations range observed during the 20th

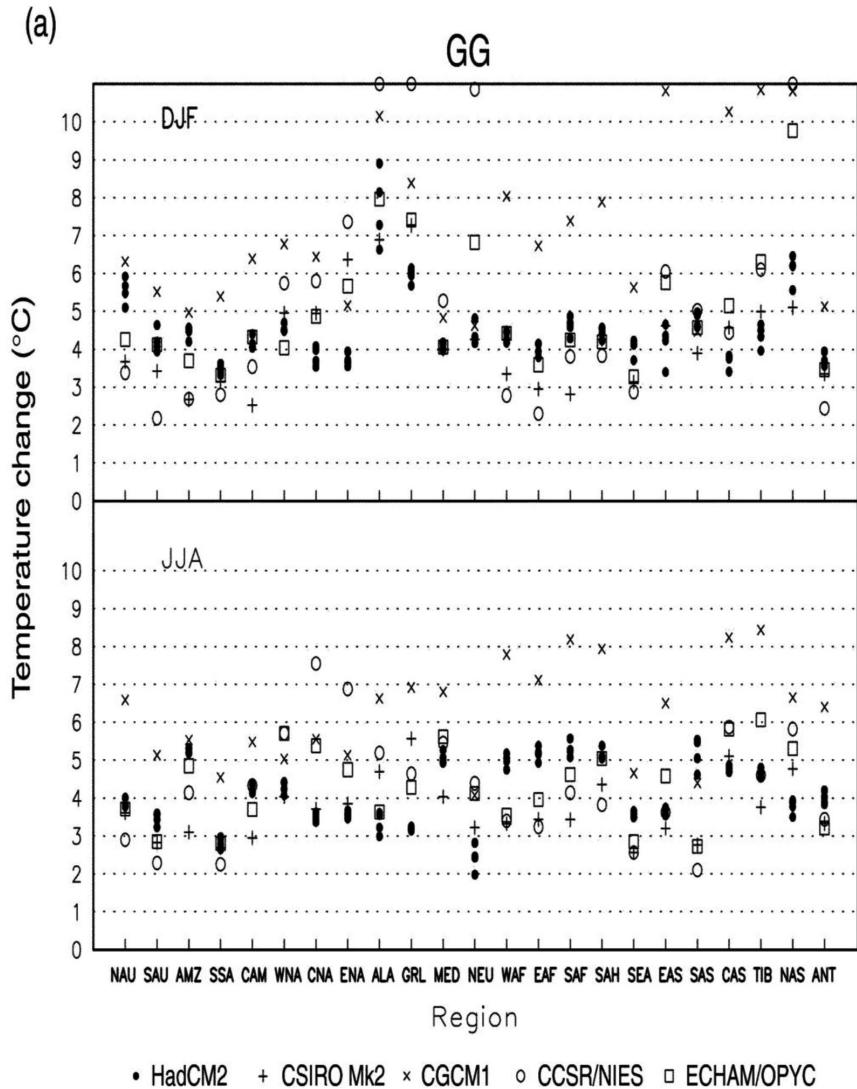


Figure 4. Difference between the mean precipitation observed and the precipitation simulated by the models included in the Third IPCC Report in various regions of the world in the December–February period (DJF) and the June–August period (JJA). MED indicates the Mediterranean region.

century, nor its strong upward trend observed approximately between 1970 and 1995 (Osborn, 2004). Likewise, the NAO future behaviour projections due to an increase of greenhouse gas concentrations are clearly different in the various climate models. While in some of them there is a slight trend toward intensification, some others do not show any future trend (Miller et al., 2007).

The reason why different models forecast different NAO evolutions in the future is not clear. The main problem is that the mechanism or mechanisms affecting NAO multidecadal variability is/are not well known either. Some hypothesis points out the effect that sea surface temperature

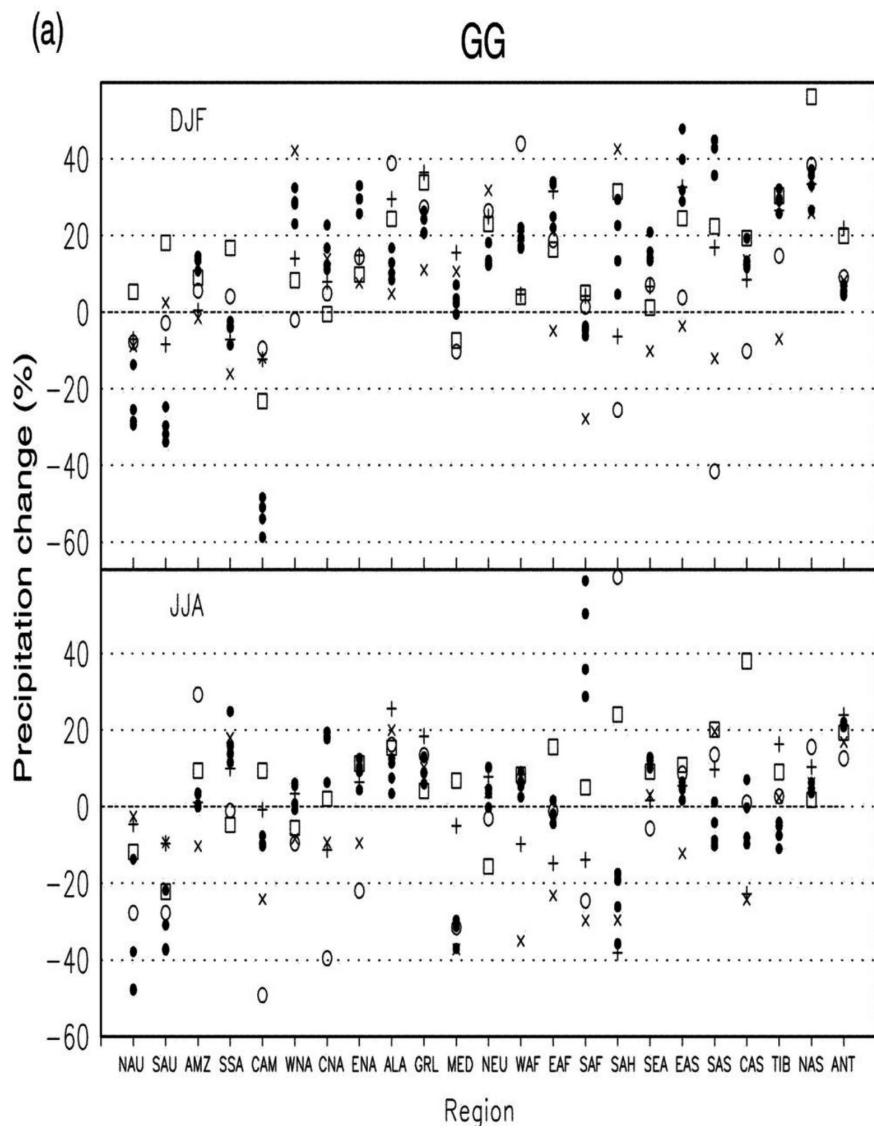


Figure 5. Mean precipitation differences between 2070-2100 and 1960-1990 simulated by the models included in the Third IPCC Report in various regions of the world and for the December-February period (DJF) and the June-August period (JJA). MED indicates the Mediterranean region.

can have in the atmospheric circulation (Rodwell et al., 1999); in this sense, in a rather surprising way, connections between the Indian Ocean and the NAO have been found in simulation analyses (Hoerling et al, 2001). When the temperatures of the sea surface observed in the Indian Ocean are entered in a climate simulation, the model will be able to simulate the NAO evolution over the last decades with more realism. Other hypotheses focus on the influence of zonal winds of the lower stratosphere on the troposphere circulation (Scaiffe et al., 2005). When the winds observed in the stratosphere are included in a climate model, the NAO multidecadal trends can be simulated in a more realistic way too. North Atlantic sea surface temperatures can also have

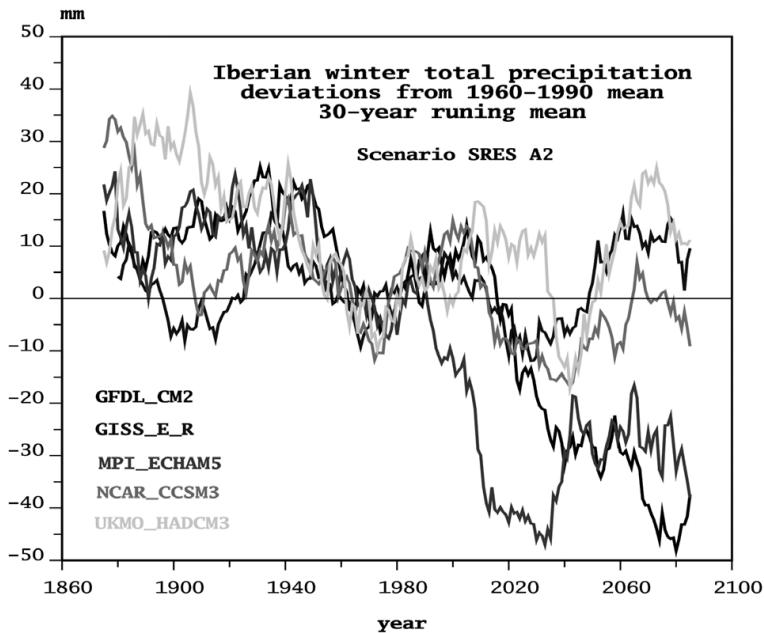


Figure 6. Evolution of changes (referred to the 1960-1990 average) in mean winter seasonal precipitation (December- February) in the Iberian Peninsula simulated by 5 models included in the Fourth IPCC Report in the 1860-2100 period, assuming the future A2 greenhouse gas concentration scenario.

an influence on the NAO, although in this case it is more difficult to separate cause and effect, as atmospheric circulation strongly modifies the sea surface temperature range too (Rodwell et al., 1999). Many variables in the North Atlantic region show consistent variations with a period of approximately 70 years, although given the limited length of instrumental data, it is difficult to determine with any degree of certainty whether these variations with such a long period exist and exactly how long the period is. This quasi-oscillation, called the Atlantic Multidecadal Oscillation (Knight et al., 2005), possibly originates in the meridional thermohaline circulation of the North Atlantic Ocean, but it is also detected in the atmospheric circulation and in the Western European temperatures.

Finally, we could also mention the statistical relationships found between the NAO and the El Niño phenomenon in the Tropical Pacific Ocean. The El Niño phenomena, i.e. an increase in the sea surface temperature in the Tropical Pacific Ocean, seems to be statistically accompanied by a weaker NAO and, therefore, by more winter precipitation in the Iberian Peninsula (Pozo-Vazquez et al., 2005). The El Niño phenomenon has also been related to drought periods in the whole subtropical belt (Hoerling and Kumar, 2003).

It is not easy to determine which one of these hypotheses gets closer to reality and all of them could explain a partial aspect of the NAO variability in the current climate. If no process was dominant in the determination of the NAO future changes, forecasting the precipitation

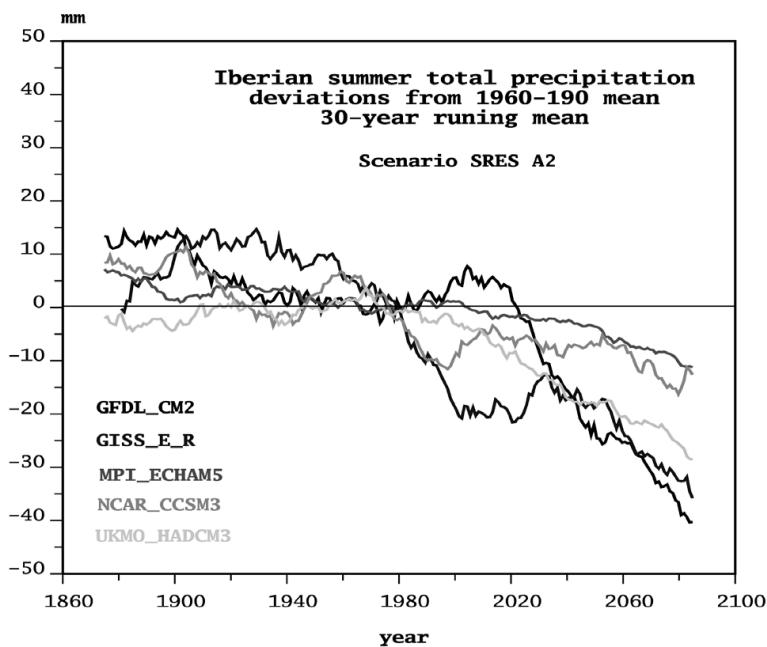


Figure 7. Evolution of the changes (referred to the 1960-1990 average) in mean summer seasonal precipitation (June-August) in the Iberian Peninsula simulated by 5 models included in the Fourth IPCC Report in the 1860-2100 period, assuming the future A2 greenhouse gas concentration scenario.

changes in the Iberian Peninsula would be even more difficult, since the future evolution of various climate processes should have to be correctly estimated, each of them being of different nature. Currently, the different models used by the IPCC in its fourth 2007 report, do not offer a unanimous projection (Figure 6). For the winter, some of them predict a clear reduction of winter precipitation for the Peninsula, while others do not produce a substantial trend. For the summer, predictions are more consistent, all of them pointing out towards a reduction in the precipitation (Figure 7).

However, it must be taken into account that the resolution of global climate models is not the adequate for precipitation estimations on a regional scale, since many regional processes are not well represented in them. Therefore, it is not possible to determine how precipitation could change on scales of a few hundred kilometers from simulations with global models. To this purpose, it is necessary to have regional climate models covering a certain region of the world, for instance Western Europe, or even smaller regions. In their simulation scope, these regional models use very high spatial resolution, of some 20-50 km, and they are fed in their scope limits by the simulations obtained with global models. When increasing the resolution, both the region's topography and its interaction with the atmosphere dynamics are better represented, which leads to better average temperature and precipitation simulations compared to global model simulations. Nevertheless, the differences between observations and simulations can still be considerable.

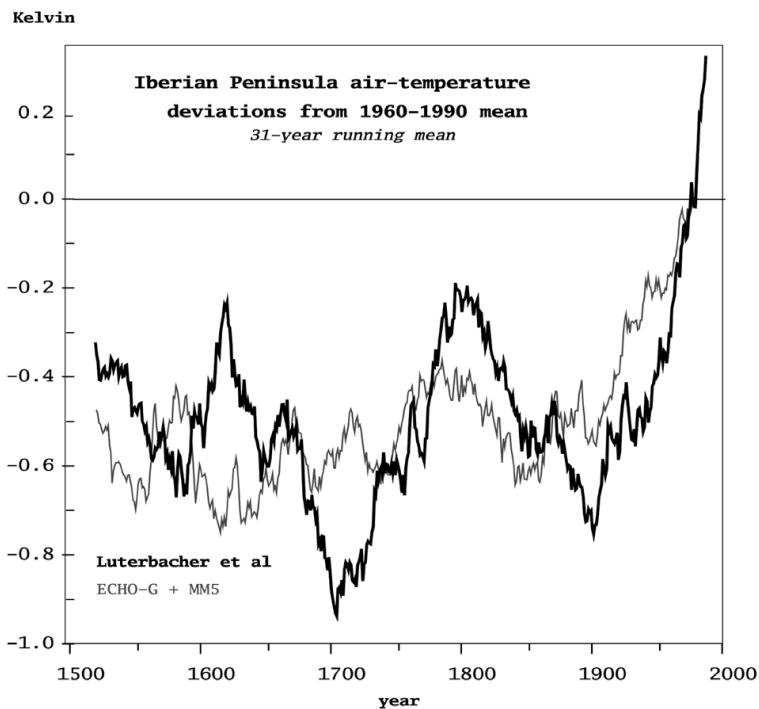


Figure 8. Winter temperature in the Iberian Peninsula simulated by the ECHO-G global climate model regionalized with the MM5 regional model compared to the temperature reconstructed from proxy data in the 1500-1990 period (Luterbacher et al. 2004).

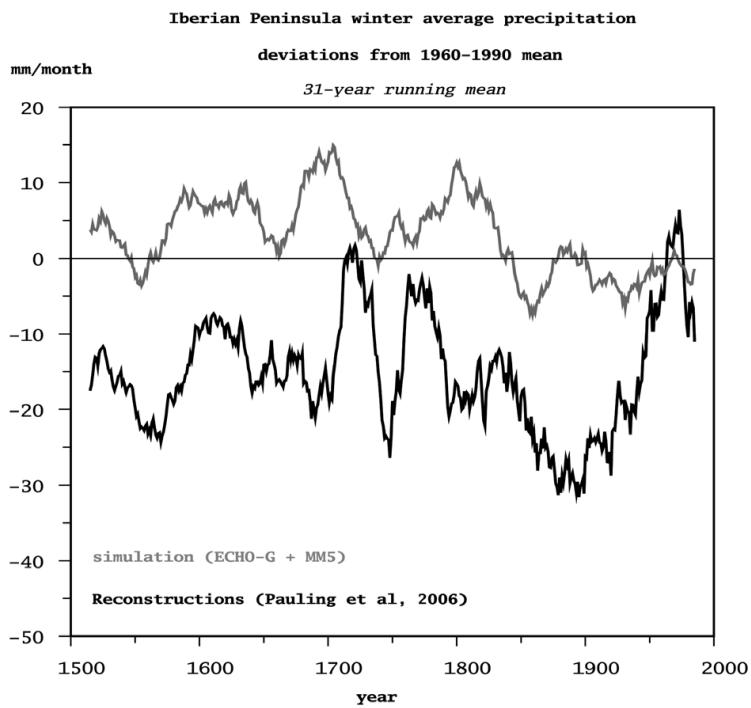


Figure 9. Winter precipitation in the Iberian Peninsula simulated by the ECHO-G global climate model regionalized with the MM5 regional model compared to the precipitation reconstructed from proxy data in the 1500-1990 period (Pauling et al. 2006).

More important than getting to know the error made by regional models when simulating current mean precipitation is the assessment of possible errors in the simulation of precipitation changes produced by new external forcing, such as an increase in greenhouse gas concentration. The only way to assess this error is to make a comparison between simulations and observations in past periods during which the external climate forcing conditions were different than the current ones, as it is shown in Figures 8 and 9. The winter temperature and precipitation in the Iberian Peninsula simulated by the global model ECHO-G and the regional model MM5 in the 1500-1990 period is compared with the same variables reconstructed from information extracted from documentary and biological records, such as tree rings. It can be observed that, while for temperature by and large there is an agreement between simulations and reconstructions, in the case of precipitation the disagreement is obvious. Therefore, this analysis must be carried out in greater depth in order to explain these discrepancies, which can be due to both model deficiencies and errors in the reconstruction process of past climate variables. This is currently a very active line of research because, as mentioned before, it is the only way to put climate change simulations to the test.

REFERENCIAS / REFERENCES

- Alley R. B. (2000). Ice-core evidence of abrupt climate changes. PNAS 97, 1331-1334
- Briffa K. R. and Osborn, T. (2002). Blowing Hot and Cold Science 295, 2227-2228
- Crowley T. J. (2000). Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. Science 289, 270-277
- Brohan P., J. J. Kennedy, I. Harris, S. F. B. Tett, P. D. Jones (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. J. of Geophys. Res. 111, D12106, doi: 10.1029/2005JD006548
- Davis B.A.S., S. Brewer, A.C. Stevenson, J. Guiot (2003). The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. Quaternary Science Reviews 22, 1701-1716
- Jones, P. D. and Mann, M.E. (2004). Climate over past millennia. Rev. Geophys., 42, RG2002, doi: 10.1029/2003RG000143
- Hegerl G. C., T. J. Crowley, W. T. Hyde, D. J. Frame (2006). Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. Nature 440, 1029-1032
- Hoerling M. P., J. W. Hurrell, T. Xu (2001). Tropical Origins for Recent North Atlantic Climate Change. Science 292, 90-92
- Kiehl J.T. (2007). Twentieth century climate model response and climate sensitivity. Geophys. Res. Lett., 34, L22710, doi: 10.1029/2007GL031383
- Knight, J. R., R. J. Allan, C. K. Folland, M. Vellinga, M. E. Mann (2005). A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate, Geophys. Res. Lett., 32, L20708, doi: 10.1029/2005GL024233
- Knutson T.R., T. L. Delworth, K. W. Dixon, I. M. Held, J. Lu, V. Ramaswamy, M. D. Schwarzkopf (2006). Assessment of Twentieth-Century Regional Surface Temperature Trends Using the GFDL CM2 Coupled Models. J. Climate 19, 1625-1651.
- Luterbacher J., D. Dietrich, E. Xoplaki, M. Grosjean, H. Wanner (2004). European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since 1500. Science 303, 1499-1503

- Miller, R. L., G. A. Schmidt, D. T. Shindell (2006). Forced annular variations in the 20th century Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report models, *J. Geophys. Res.*, 111, D18101, doi: 10.1029/2005JD006323
- Osborn T. J. (2004). Simulating the winter North Atlantic Oscillation: the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics* 22, 605-623
- Pauling A., J. Luterbacher, C. Casty, H. Wanner (2006). Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Climate Dynamics* 26, 387-405
- Rodwell M. J., D. P. Rowell, C. K. Folland (1999). Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature* 398, 320-322
- Scaife, A. A., J. R. Knight, G. K. Vallis, C. K. Folland (2005). A stratospheric influence on the winter NAO and North Atlantic surface climate, *Geophys. Res. Lett.* 32, L18715, doi: 10.1029/2005GL023226
- Zachos J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas, K. Billups (2001). Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science* 292, 686-693

