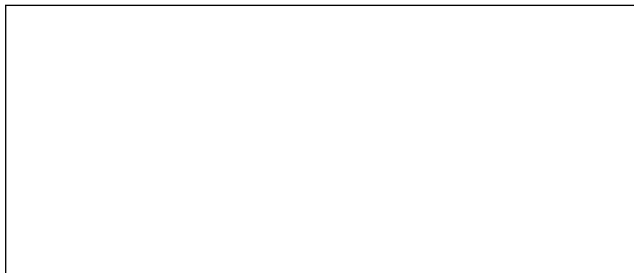


¿HABLAMOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO?

¿Hablamos del cambio climático?

Sergio Alonso Oroza

Fundación **BBVA**



Primera edición, diciembre 2011

© Sergio Alonso Oroza, 2011

© Fundación BBVA, 2011

Plaza de San Nicolás, 4. 48005 Bilbao

www.fbbva.es

publicaciones@fbbva.es

IMAGEN DE CUBIERTA:

© Eduardo Núñez Valbuena, 2011

Sobre cambios, 2011

Al publicar la presente Conferencia Magistral, la Fundación BBVA no asume responsabilidad alguna sobre su contenido ni sobre la inclusión en la misma de documentos o información complementaria facilitada por el autor.

EDICIÓN Y PRODUCCIÓN: Grupo Ibersaf

ISBN: 978-84-92937-17-2

DEPÓSITO LEGAL: M-48231-2011

Impreso en España - *Printed in Spain*

Impreso por Ibersaf Industrial, S.A.

sobre papel con un 100% de fibras recicladas

y elaborado según las más exigentes normas ambientales europeas.

Índice

Introducción.....	9
1 Para empezar	
1.1 ¿De qué hablamos cuando se habla de cambio climático?	13
1.2 ¿Cómo se hace ciencia?.....	17
1.3 Cambio climático y ciencia.....	26
1.4 Breve historia del Planeta Vivo hasta la historia del cambio climático...	33
1.5 Una historia del cambio climático.....	48
2 Observaciones y proyecciones globales	
2.1 ¿Por qué la Tierra tiene el clima que tiene?.....	59
2.2 El clima en el Antropoceno. Observaciones del cambio climático	73
2.3 La simulación del clima.....	85
2.4 Diferencia entre las simulaciones del tiempo y del clima.....	93
2.5 Proyecciones globales para el clima futuro.....	96
3 De lo general a lo particular	
3.1 De lo global a lo local.....	107
3.2 Consecuencias del cambio climático	116
3.3 Una mirada particular hacia el turismo.....	126
3.4 ¿Mitigación o adaptación?.....	138
3.5 Clima, política y medios de comunicación.....	142
3.6 Cambio climático y sociedad	146
Bibliografía.....	151
Índice de cuadros.....	155

Índice de figuras, gráficos y mapas.....	157
Nota sobre el autor.....	159

Introducción

El libro que tienen en sus manos debe su origen al ciclo Conferencias Magistrales que pronuncié los días 22, 23 y 24 de marzo de 2011 en la sede madrileña de la Fundación BBVA. Se le ha dado el mismo título y está estructurado de igual forma, identificándose cada conferencia allí con un capítulo aquí. Asimismo, se pretendía entonces y se pretende ahora hablar del cambio climático con el máximo rigor científico, compatible con el necesario carácter divulgador.

Para tratar sobre el cambio climático con un colectivo amplio y heterogéneo como el que constituyen los lectores de este libro, es conveniente delimitar el significado de la expresión *cambio climático*. Es importante siempre que se estudia cualquier disciplina, pero más en este caso, en el que existe cierta confusión en el empleo del término. En consecuencia, se denomina así al cambio de clima reciente de la Tierra debido, en parte, a la actividad humana.

Por otro lado, al tratarse de un tema de alta relevancia social y gran atención mediática, muchas veces no se lo considera disciplina científica especializada; también esto se pretende aclarar. Más que explicar qué es la ciencia, se darán algunas indicaciones sobre el método que emplea para trabajar y generar conocimiento, así como algunas particularidades que presenta el estudio del cambio climático.

Dando por sentado que la humanidad ha tenido algo que ver con el clima presente del planeta, se efectúa un brevísimo resumen de su evolución en la Tierra desde su formación hasta la aparición del *Homo sapiens*, con el fin de situar en su contexto lo que representamos en la historia del planeta. También se lleva a cabo una revisión, igualmente

sucinta, de la historia del cambio climático, situando el origen en el descubrimiento por Fourier, en el siglo XIX, de algo que después hemos llamado *efecto invernadero* en el siglo XX.

Si pudiéramos prescindir de la actividad humana, la Tierra tendría un clima, digamos, natural. Ello se debe, en primer lugar, al hecho de ocupar en el espacio una posición relativa al Sol y moverse a su alrededor, aunque finalmente queda determinado por una multitud de factores. La conjunción de todos ellos difícilmente podría dar lugar a un clima homogéneo e inalterable; esto es, el clima natural presenta variabilidad, pues existen diferencias y cambios no causados por la actividad humana. Y si se pasa revista a las observaciones climáticas de nuestra era, denominada por muchos Antropoceno, pueden observarse precisamente cambios determinados por la presencia del hombre. El más conocido de ellos es el aumento de la temperatura media de las capas bajas de la atmósfera, lo que habitualmente se conoce como *calentamiento global*, pero eso no es más que una de las manifestaciones del cambio climático. Existen muchas otras observables, como la distribución de la precipitación, el régimen de vientos, los hielos que cubren el planeta, el nivel del mar, etc. El conocimiento obtenido sobre las causas de los fenómenos observados —sobre los *motores* del clima—, aunque parcial, permite representarlo a través de ecuaciones que pueden ser resueltas con potentes ordenadores. Se trata de los llamados *modelos de clima* que, mediante una metodología adecuada (modelización físico-matemática), permiten simular el clima presente del planeta y algunos rasgos del clima del pasado. Si la comparación con el clima real es suficientemente fidedigna, que lo es, se puede abordar el problema del clima futuro. Se trata de un proceso muy interesante, diferente del de la previsión del tiempo. Para buscar una solución al problema, para poder *proyectar* el clima hacia el futuro, hay que introducir los denominados *escenarios*, que ofrecen las condiciones para poder formular la pregunta «¿Qué ocurriría si...?», cuya respuesta se encuentra en las proyecciones climáticas.

De igual forma que el clima en el planeta se presenta como un rico mosaico y sus efectos sobre ciertas actividades son dispares, lo mismo

ocurre con el cambio climático. Se percibe de manera desigual en diferentes lugares y en distintos momentos, y sus efectos —denominados generalmente *impactos*— también son muy variados. Para poder restringir estos impactos del cambio climático a escala regional o local, se debe realizar un tratamiento de las proyecciones globales de modo que sean útiles a escalas más pequeñas. Dicho procedimiento se denomina internacionalmente *downscaling* y en castellano se está imponiendo el uso del término *regionalización*. Aplicado el proceso de regionalización, se pueden analizar los impactos esperables desde un punto de vista tanto regional como sectorial, lo que pone en evidencia, como es previsible, una gran variedad de efectos o resultados.

Para responder a los impactos existen, en principio, dos estrategias: la *mitigación* y la *adaptación*. Sin embargo, lo más eficaz es su acción simultánea a fin de poder combatir el origen del problema y, al mismo tiempo, ir trabajando progresivamente para que sus efectos sean lo menos perjudiciales posible. No cabe ninguna duda de que, sea cual sea la acción por la que se opte, su desarrollo tiene un coste. Y sin embargo, según estudios económicos realizados, no hacer nada es bastante más caro. Se trataría entonces de actuar ya, y todos.

Es evidente que cada uno de nosotros podemos contribuir a título individual, pero es imprescindible una coordinación. Existen acuerdos internacionales, como el Protocolo de Kioto, que los gobernantes deben transformar en políticas y medidas concretas. Científicos, políticos, medios de comunicación, organizaciones sociales, toda la sociedad, en fin, debemos trabajar conjuntamente para conseguir que nuestro mundo, el que tenemos que dejar a nuestros descendientes, siga siendo habitable.

Quiero agradecer a la Fundación BBVA y, en particular, a su director, el profesor Rafael Pardo, el haberme dado la posibilidad de difundir a través de las Conferencias Magistrales 2011 y este libro algo de lo que la ciencia sabe sobre el cambio climático. La redacción se llevó a cabo parcialmente durante mi reciente estancia de sabático en las universidades de Lisboa y Aveiro. Agradezco a los profesores Filipe D. Santos y Carlos Borrego las atenciones que allí recibí. Son también de agradecer

las facilidades dadas por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), para poder modificar las figuras, gráficos y cuadros que incluye este libro, así como la diligencia de la señora Laura Biagioni. Parte de la información que aparece en esta obra se ha generado en el seno del Grup de Meteorologia de la Universitat de les Illes Balears (UIB); sin su permanente trabajo no habiéramos podido llegar allí adonde hemos llegado. Gracias a todos. Finalmente, doy las gracias a las más próximas y a los más próximos, y a todos los que hayan sentido que no les he dedicado la debida atención, por el apoyo y la comprensión que han tenido hacia mí durante el tiempo necesario para poder hablar del cambio climático con todos ustedes.

1 Para empezar

1.1 ¿De qué hablamos cuando se habla de cambio climático?

Tienen en sus manos un librito cuyo objetivo es difundir conocimiento científico relativo a aspectos sobre el cambio climático. Dar respuesta a la pregunta «qué es el cambio climático» debe ser, por tanto, el primer paso.

Para empezar, no es ocioso dedicar algún espacio a puntualizar terminología empleada; pues existe bastante confusión en el uso, sobre todo coloquial, del término. Aunque parezca cuestión de matiz, se ha de empezar por distinguir entre *cambio de clima* y *cambio climático*. En parte, en mi opinión, ahí está el origen del problema en lengua castellana, pero también el punto de partida de su solución.

Hay que clarificar la idea de *clima*, del clima de nuestro planeta, la Tierra. Es curioso, aparentemente todo el mundo sabe lo que es. Para expresar este hecho, un prestigioso colega portugués, el profesor Peixoto, dijo parafraseando a San Agustín: «Si no me preguntan qué es el clima, lo sé; si me lo preguntan, no lo sé».

El planeta, para el estudio del clima, recibe el nombre de *sistema climático*, y está formado por la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera (figura 2.1). El clima de la Tierra hace referencia al estado del sistema climático, determinado por valores medios de variables ambientales en intervalos de tiempo largos y referencias a la variabilidad, tanto temporal como espacial. La Organización Meteorológica Mundial (OMM, o WMO para sus siglas en inglés) establece 30 años para ello. La OMM es un organismo especializado dependiente de

Naciones Unidas, y un portavoz autorizado acerca del estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre, su interacción con los océanos, el clima que produce y la distribución resultante de los recursos hídricos.

En el sentido expresado más arriba, el clima cambia porque el estado del sistema climático es imposible que sea inalterable; el clima actual es diferente del clima del pasado (con sus glaciaciones y periodos interglaciares, por ejemplo) y, con toda seguridad, el clima futuro será diferente del presente. Esto sería en pocas palabras el cambio de clima. Muchas veces se simplifica el sistema climático para referirse al clima solo como la parte atmosférica, y en lo que se refiere a la temperatura y la precipitación. Pero, insisto, esto es una simplificación. Hay otras muchas variables que se han de considerar, como el viento, la humedad, la temperatura de la superficie del mar, el nivel del mar, la extensión de los hielos, los tipos y usos del suelo o la cobertura boscosa, por poner solo algún ejemplo.

El hecho de que el clima, referido al estado del sistema climático, se determine mediante valores medios permite diferenciarlo del tiempo. El *tiempo* hace referencia, en principio, al estado de la atmósfera, pero con un alcance temporal mucho más corto, digamos de hasta unos pocos días. Es muy corriente que popularmente se confunda *tiempo* y *clima*. No es correcto, por ejemplo, difundir una noticia a través de un medio de comunicación en la que se manifieste: «La climatología obligó a cerrar el aeropuerto». Y hay varios errores en ese tipo de aseveración. Se está empleando *climatología* indebidamente (pues es la ciencia del clima), cuando posiblemente el comentarista quería decir *condiciones climáticas*, o sea, *clima*, aunque también eso es incorrecto. La expresión correcta debería haber sido: «El tiempo obligó a cerrar el aeropuerto», o si se quiere algo más retórico: «Las condiciones meteorológicas obligaron a cerrar el aeropuerto». Meteorología y climatología son dos ciencias hermanas que utilizan las mismas variables pero trabajan con ellas de forma distinta; incluso a veces emplean las mismas herramientas, aunque las usan de forma diferente.

Debe hacerse notar que no se ha hablado en ningún momento de cuáles son los *motores* del clima ni del origen de su cambio. Por otra parte, los *motores* son esencialmente conocidos como se verá más adelante y, si habláramos del clima pasado, también se conocen las razones del cambio, al menos las principales.

Otra cosa sería el *cambio climático*. Para empezar, en inglés se usa de forma genérica *climate change*, y tiene dos acepciones. La primera estaría en concordancia con lo indicado anteriormente: cambio del clima de la Tierra, o sea, cambio del estado del sistema climático, independientemente de las causas que produzcan ese cambio; es la acepción usada normalmente por los científicos y por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, dependiente de Naciones Unidas) en todos sus documentos. La segunda acepción apareció definida en 1992, en la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC; UNFCCC, en sus siglas en inglés) y se empezó a extender tras la celebración de la llamada *Cumbre de Río*, celebrada al mes de aprobada la Convención. Allí se dice, en resumen, que el *cambio climático* se entiende como un cambio de clima inducido directa o indirectamente por la actividad humana, y superpuesto a la variabilidad natural. Esta segunda acepción, además de ser utilizada en todos los documentos y reuniones de la Convención, es la preferida por los políticos, ONG y medios de comunicación. No quiero decir con esto que la acepción naciera en 1992; apareció escrita en un documento oficial en ese año, pero se usaba con anterioridad.

En un artículo que publiqué en *El País* (Alonso 2010) criticaba el uso indebido, incluso en el ámbito científico, del término *calentamiento global* (*global warming*, en inglés). Creo que vale la pena incorporar aquí alguno de los argumentos allí empleados porque, a la confusión de conceptos que ya se da en relación al término *cambio climático*, se viene a acentuar el problema con *calentamiento global*.

El término fue introducido por Broecker (1975) en un célebre artículo en la revista *Science*. Por cierto, la calidad de su obra permitió a Broecker obtener la primera edición del Premio Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento en su categoría Cambio Climático.

Para interpretar el concepto de *calentamiento global* hay que comenzar diciendo que *global* es un calificativo que deriva de *globo* que, por supuesto, está referido al planeta Tierra. Su sinónimo más próximo sería *mundial* pero, además, hay que entender que en *calentamiento global* hay implícito un promedio, ya que sería realmente una casualidad que el mundo se calentara por igual en todas sus partes. No tiene sentido pensar que el planeta, que posee un rico mosaico de climas (recordemos la variabilidad espacial señalada anteriormente), experimentara, como por arte de magia, un cambio, un calentamiento, igual en todas partes.

La siguiente aclaración necesaria está relacionada con lo que significa la *temperatura* en ese contexto. Cuando se dice que la temperatura en Palma es de 21,5 °C se interpreta, sin excepción y correctamente, que esa temperatura corresponde al aire cerca del suelo. Volviendo al objeto del término que origina estos comentarios, debería entonces interpretarse como calentamiento medio mundial del aire cerca del suelo. Y es importante esta acotación espacial pues, simultáneamente a ese calentamiento, se está produciendo un enfriamiento en niveles superiores de la atmósfera, en la capa denominada *estratosfera*.

Cuando tras un verano fresco o un invierno riguroso se oyen comentarios como «a ver qué explicación dan ahora los del calentamiento global», tengo que decir que me siento mal, que me exaspero. Esa fue la razón por la que me decidí a escribir el artículo —que ahora comento— en *El País*. Pienso que uno de los errores que hemos cometido los científicos, y también el IPCC, es haber basado, incluso con abuso, casi todas las descripciones sobre el cambio de clima reciente en la evolución de la temperatura, cuando se observan cambios en otras muchas variables. Por eso proponía, y propongo —a pesar de no ser habitual en el mundo académico— reservar *cambio climático* para lo que está ocurriendo ahora con el clima de la Tierra, del cual sabemos que está experimentando alteraciones provocadas, en parte, por la actividad humana y que, de continuar así, se va a producir una acentuación de todo lo que ya estamos observando.

En consecuencia, al aumento medio de la temperatura del aire junto al suelo, que además es mayor en las regiones polares y sobre los con-

tinentes que en el resto, junto con otras manifestaciones, entre las que destacan que la temperatura media de la estratosfera presenta tendencia negativa; que los patrones de viento están cambiando, lo mismo que el régimen mundial de precipitación, con un incremento medio; que la humedad media va en aumento; que los ciclones tropicales atlánticos se muestran cada vez más potentes; que se están fundiendo los hielos continentales; que se eleva el nivel medio del mar, como consecuencia de la dilatación del agua y del exceso de escorrentía producida por la fusión del hielo continental... y otras muchas evidencias que, en parte, son consecuencia de la actividad humana, le llamaremos *cambio climático*, que resulta más corto y cómodo de decir que *cambio de clima de origen antrópico del planeta Tierra*. Eso, al fin y al cabo, es lo que significa.

A veces se habla también del *cambio de clima natural* como contrapunto a aquel que es inducido, aunque sea en parte, por la actividad humana. Es evidente que, en el pasado, cuando la especie humana no existía, o no tenía capacidad de alterar el entorno de forma global, el cambio de clima era solo de origen natural (es el caso de las glaciaciones, por ejemplo).

Para explicar cómo la actividad humana puede llegar a inducir el cambio climático, es necesario hablar del *efecto invernadero* y de su intensificación, lo cual representa una parte muy importante de este libro. La explicación física del fenómeno, en concreto, está en el capítulo segundo. Uno de los aspectos que debe quedar claro ya desde el principio es que el *efecto invernadero* no es ninguna invención moderna, ni de los ecologistas, ni de los catastrofistas. Esto se tratará un poco más adelante, en el epígrafe 1.5 de este mismo capítulo.

1.2 ¿Cómo se hace ciencia?

Decía al comienzo del epígrafe anterior que uno de los objetivos de este libro era difundir el conocimiento científico acerca del cambio climático. Seguramente, si nuestra sociedad fuera poseedora de suficiente cultura científica no haría falta abordar un apartado como

este. La verdad es que la relevancia social del cambio climático está siendo tan grande y hay tantos y tantos comentarios desacertados, desde un punto de vista científico, que me incliné, al diseñar el contenido de este libro, por dejar en negro sobre blanco algunas reflexiones sobre la ciencia. En un principio pensé titular el apartado con un rotundo «¿Qué es ciencia y qué no lo es?». El objetivo era intentar desenmascarar a algunos personajes, que se consideran actores de una obra de teatro a la que no han sido invitados, y que se dedican a poner en duda el conocimiento que se ha generado por métodos científicos desde hace más de un siglo. Lo malo no es el hecho de poner en duda un resultado, que, en ciencia, no solo es normal sino necesario; eso, como veremos, forma parte del método de trabajo de los científicos. Lo malo es que una buena parte de estos personajes no son científicos, no hacen ciencia.

Y, ¿por qué me decidí a cambiar el título? Pues fue una decisión inducida al dar una nueva lectura, para preparar este apartado, al muy interesante libro de mi amigo Federico García Moliner, *La ciencia descolocada* (García Moliner 2001). Allí se dice, entre otras muchas cosas, que los científicos lo que debemos hacer es explicar a la gente cómo trabajamos, cómo se hace ciencia, cómo se genera el conocimiento. Eso es justamente lo que pretendo realizar aquí, aunque en unas pocas páginas. Al lector interesado le recomiendo el libro anteriormente mencionado, lleno de ejemplos y exquisitos comentarios, brillantemente escrito por el profesor García Moliner.

Decía un poco más arriba que, si se dispusiera de una *cultura científica* suficiente, este apartado sería seguramente innecesario. Lo curioso es que, una vez decidido que iba a escribir lo que viene a continuación, no resulta fácil llevarlo a cabo. Lo mejor va a ser empezar por lo enfatizado en *cultura científica*.

En la acepción que nos interesa, acerca de *cultura*, dice el Diccionario de la Real Academia Española, «conjunto de conocimientos que permite a alguien desarrollar su juicio crítico». Y sobre *ciencia*, «conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales». Supongo que la primera reacción de algún lector, al

analizar estas dos definiciones, es de sorpresa. Esta sorpresa se produce porque en nuestro país, a diferencia de lo que ocurre en otros muchos, se ha extendido la creencia de que la cultura y la ciencia son dos cosas diferentes, incluso contrapuestas. Se produce, a veces, la paradoja de que personas consideradas cultas (sobre todo por ellas mismas) declaren su más absoluta ignorancia en temas científicos. Miren, la ciencia, como fija claramente la Real Academia Española, es una parte de la cultura, y eso es justamente lo que se tiene asumido en muchos países del mundo; precisamente los más avanzados, aquellos a los que nos gustaría llegar a parecernos. Otra de las acepciones de *cultura* lo indica más explícitamente: «conjunto de modos de vida y costumbres, conocimientos y grado de desarrollo artístico, científico, industrial, en una época, grupo social, etc.». No quiero continuar esta precisión terminológica discutiendo la falacia que representa basar las carencias culturales en la formación en ciencias o letras. Tan inculta debería ser considerada una *persona de letras* que no conozca la diferencia entre la segunda ley de Newton y el segundo principio de la Termodinámica como una *persona de ciencias* que no distinga entre los estilos de la Catedral de León y de la Basílica de la Sagrada Familia.

Parte de la existente incompreensión social hacia la ciencia tiene que ver con lo anterior, con la pretendida separación entre lo cultural y lo científico. Mientras la mayor parte de la gente puede imaginar cómo se pinta un cuadro, es una minoría la que conoce cómo se hace ciencia. Y lo peor no es que la mayoría no lo conozca, es que muchos no tienen ningún interés en conocerlo.

Bueno, y ¿cómo se hace? Es evidente que no es posible explicarlo a fondo por medio de unos pocos párrafos pero, por lo menos, pretendo dar unas cuantas pinceladas. Lo primero que hay que decir es que el modo de trabajar de los científicos se aprende; se necesita un tiempo de trabajo, muchas veces de duro trabajo, junto a maestros, como en la antigua formación gremial. Esto lo ha aprendido a hacer la humanidad desde que somos *Homo sapiens*. Todo empieza con la curiosidad, con el querer descubrir, con el observar, con el saber explicar lo que se ve, con la comparación entre realidades parecidas, con la abstracción,

con la realización de experiencias, con hipótesis, con errores, con críticas y, sobre todo, con la transmisión de aquello que se ha descubierto con unas reglas que todos los científicos aceptamos. Eso es, en grandes rasgos, la generación y la transmisión del conocimiento.

Posiblemente, lo más importante del desarrollo científico es que la humanidad descubrió, ya muy al principio, que el conocimiento le era útil, que lo podía emplear en su beneficio. Así, podemos decir, nació la técnica; primero muy rudimentaria, para fabricar hachas, para producir fuego, para fabricar vasijas, pero luego para construir viviendas, barcos y aviones, generar energía o instrumentar servicios médicos. La ciencia y su consecuencia práctica, la técnica, han sido una invención, una brillante invención de la humanidad. Sería imposible vivir como lo estamos haciendo sin ellas; otra cosa diferente sería el buen o el mal uso que se puede hacer de este invento humano.

La ciencia no es la única invención humana; hay otras, como la filosofía, el arte o la religión, pero, a diferencia de la ciencia, no llevan en asociación ninguna *consecuencia* que represente un beneficio práctico para la humanidad, como lo es la técnica. Tienen otros beneficios, que resultan muy importantes para los diferentes ámbitos de la vida, pero ninguno equivalente a la técnica. Por otra parte, como consecuencia de lo anterior no debería quedar la idea de la supremacía de unas *invenciones* sobre otras, ya que corresponden a ámbitos distintos, aunque no disjuntos. Existen zonas de solapamiento entre unas áreas y otras. El lector puede seleccionar cualquier combinación de dos o más de ellas.

El binomio ciencia-técnica ha sido fundamental para el avance del conocimiento científico. De hecho, no es posible avance efectivo en el conocimiento si no van las dos en paralelo. Si se piensa en la abstracción, que ha sido citada anteriormente como una de las características del *modus operandi* de la ciencia, podemos decir que los líderes fueron los pensadores griegos. Prácticamente todo lo observable fue convertido en idea abstracta. Sin embargo, se olvidaron de las aplicaciones prácticas. Lo mismo se podría decir del uso de técnicas sin profundizar en aspectos teóricos. No hay que entender con esto que el avance del conocimiento implique el progreso simultáneo de este binomio. Normalmente, se

produce primero el descubrimiento, permítaseme decirlo así, científico, teórico y, posteriormente, la aplicación práctica. Y, a veces pasa mucho tiempo...

Hay que dejar bien sentado la importancia de la observación. La ciencia trata de dar explicación a todo lo que observa, en la naturaleza, en el laboratorio y, hoy día, también a la gran cantidad de resultados que se pueden generar mediante los ordenadores. Todo merece explicación. Encontrar, descubrir, inventar para algo una explicación que no existía es muy importante, es cruzar una línea imaginaria entre el conocimiento y la ignorancia, es poner conocimiento allí donde había ignorancia, y esto es un avance tremendo; en términos matemáticos, es como un cambio infinito. El ser consciente de estar trabajando en ese límite imaginario es muy emocionante y el saber transmitir a las nuevas generaciones de científicos la sensación, esa agradable sensación, de vértigo que se siente, es algo muy satisfactorio.

Pero la importancia de la observación no acaba ahí. Una vez el científico ha encontrado una explicación a algo, lo difunde —luego, ya veremos cómo— para que los colegas lo conozcan. Caben entonces varias posibilidades. Comentaré las más importantes, aunque el orden no implica que ocurra secuencialmente una detrás de la otra. Hay quien dice que es un proceso semejante a la selección natural. Al igual que las especies, hay ideas que avanzan, que triunfan, y otras que no. En el árbol de la vida se producen bifurcaciones y puede haber cruces entre especies, lo mismo que entre las diferentes teorías que se puedan haber planteado. La ciencia tiene un modo característico de desarrollar su particular proceso de *evolución*. Veamos.

El científico ha comunicado un hallazgo. Por una parte, hay colegas que lo miran con curiosidad, con sorpresa, incluso con dudas científicas, lo quieren verificar; el descubrimiento es sometido a crítica. Aquí vuelve a jugar un papel importante la observación. Como lo que se pretende, en el fondo, con una teoría nueva es llegar a conseguir una generalización, una ley, el observar algo que contradiga una nueva teoría es de crucial importancia. La puede dejar sin validez, o bien dar pistas para reorientar el proceso de investigar alternativas. En otros ámbitos de

la vida, o en otros modos de razonamiento, el estar siempre sometido a crítica puede llegar a ser insoportable. En ciencia es una característica intrínseca al avance del conocimiento.

Otra de las características es la reproducibilidad de los hallazgos. Cualquier nueva propuesta debe poder ser reproducida por otros científicos de tal forma que, la no superación de esta prueba, la pone en crisis. Muchas veces, este tipo de prueba se ha de realizar en el laboratorio, donde las condiciones del problema son más fácilmente controlables que las del ambiente donde se haya podido observar el fenómeno bajo estudio, del cual se ha encontrado una explicación. Además, en el laboratorio, es posible repetir la experiencia tantas veces como se quiera. Ocurre con frecuencia que, planteado el problema en el laboratorio, es posible modificar las condiciones del experimento, lo cual genera nuevos fenómenos que se han de estudiar. De esta forma, se está en condiciones de generalizar la propuesta inicial, lo que también representa un avance en el conocimiento, para iniciar un camino que podría conducir al establecimiento de una ley. Algo parecido se puede realizar por medio de los ordenadores. Si se conocen las leyes que rigen un determinado proceso, representadas mediante ecuaciones, es posible resolverlas numéricamente mediante computación. En este caso, lo que hay que hacer es interpretar los resultados (muchas veces ¡millones y millones de números!) de la simulación del proceso y, a continuación, contrastarlos con la realidad, con la observación. También nos permite modificar las condiciones de la simulación, suprimir determinadas partes de las ecuaciones y simular de nuevo, analizar los resultados y tratar de darles explicación; es un proceso que no acaba nunca.

En resumen, nada es definitivo, todo se pone en duda; así se hace ciencia.

Se podría pensar en la inutilidad del procedimiento, en un esfuerzo estéril. Craso error; así ha trabajado la ciencia desde que la ciencia es ciencia y la mejor prueba de que se está en el buen camino es la aplicabilidad, la técnica. Comento yo a veces a mis colaboradores que empecé a escribir, como seguro que alguno de los lectores, en la edad de piedra, digamos. Aprendí a escribir sobre una pizarra individual, que llevaba en

mi cartera de p rvalo, de pizarra; s , de piedra. Y escribía con un pizarrón, también de pizarra, que afilaba en los bordillos de las aceras para que la letra quedara «elegante».  Les digo adónde hemos llegado en algo más de medio siglo, o no hace falta?

Habíamos dejado por el camino el procedimiento para difundir los hallazgos, las nuevas propuestas, teorías, etc. No pasar  a describir cómo se ha ido haciendo en el trascurso de la historia; me detendr  en la forma en que se hace ahora; por lo menos, todavía, antes de que las tecnologías de la información y la comunicación trastoquen también lo que ahora describir . Cuando eso ocurra, en la sociedad de la información y del conocimiento, la ciencia habrá encontrado un procedimiento más eficiente que el actual, con toda seguridad.

Las vías científicas de difusión de la ciencia son las reuniones y congresos científicos y las revistas especializadas. En el primer caso, el científico expone ante los colegas sus resultados de investigación y cómo los ha obtenido. Puede haber comentarios, sugerencias y críticas in situ, pero, cuando cada uno se va a su lugar de procedencia, también reflexiona sobre lo que ha oído y visto. Es corriente el intercambio posterior de ideas, el planteamiento de colaboraciones y también, cómo no, la crítica más feroz. La segunda vía de difusión es la publicación de artículos, *papers*, en la terminología al uso. La revista, una vez llega el trabajo del científico (solo o en colaboración), lo somete a revisión anónima por iguales, por otros científicos; se habla de *peer review*; en castellano hablamos de *revisión por pares*. Ningún científico lo entiende como una censura previa; en el fondo, lo que se trata de hacer, es convencer a los revisores (*referees*) de que se está proponiendo algo original y que representa un avance en el conocimiento. Aquí aparece el primer nivel de crítica. En algunos casos, con sorpresa de los autores, algún *referee* realiza incluso la primera prueba sobre la reproducibilidad de lo propuesto. Cuando, si es el caso, el artículo aparece finalmente publicado (a veces con idas y venidas para convencer al editor de la revista de que se ha respondido adecuadamente a todas las críticas de los revisores) empieza la fase, digamos, de *barra libre*. Ha llegado el momento de que todos los científicos puedan opinar sobre el trabajo, aceptando o rebatiendo métodos y/o resultados. Solo

cuando se llega a una aceptación por consenso (aunque sea implícito) entre todos los expertos, la propuesta del científico es incorporada como conocimiento.

En artículos posteriores, otros autores citan los trabajos previamente publicados. El número de citas de los artículos de una revista se usa para elaborar el denominado *factor de impacto*,¹ que permite establecer un *ranking* entre las revistas de un determinado ámbito científico. El conseguir publicar en las revistas mejor clasificadas es un mérito, una medida indirecta de la calidad del trabajo realizado, como también lo es el número de citas que ha logrado recoger cada uno de los *papers* publicados por un científico, o por un equipo de investigación.

Este procedimiento está aceptado por todos los científicos, sea cual sea la rama del saber; nos permite, en cierto modo, compararnos y medir la calidad del trabajo que se desarrolla. También nos proporciona confianza hacia el trabajo de los demás. Por el contrario, desconfiamos de las comunicaciones de logros que se hacen por otras vías; por ejemplo, empleando los medios de comunicación de masas. Una parte de los fraudes científicos han aparecido de esta manera, puede que buscando la efímera notoriedad del momento o tratando de que la noticia del hipotético descubrimiento llegue a las instancias pertinentes para conseguir financiación. Los fraudes, y los errores —que, cómo no, también los cometemos los científicos— finalmente acaban descubriéndose sea cual sea el medio de difusión empleado. El método que la ciencia ha inventado, en su particular evolución, resulta demoledor. Pero no debe extrañar; como se trata de encontrar una descripción creíble de lo observado, del mundo, del universo, que conduzca a desarrollos prácticos, tecnológicos, hay que convencer de que eso es así al resto de los científicos.

Lo descrito anteriormente debe servir para entender que este método tiene que ser aplicado por científicos; nadie sin experiencia, sin formación, sin aprendizaje previo, lo puede hacer. Y, es más, hoy día es incluso difícil que científicos de una especialidad puedan aplicarlo a fondo a especialidades diferentes de la suya, habida cuenta del nivel

¹ Viene a ser el número de veces que, por término medio, se cita cada artículo de una revista dada en un intervalo de tiempo determinado.

de especificidad que se ha alcanzado. Sería como si un dermatólogo pretendiera realizar una intervención a corazón abierto. No se entienda con esto que tengo algún tipo de animadversión hacia los dermatólogos; en absoluto. Un cirujano cardíaco también se vería comprometido si tuviera que diagnosticar y decidir intervenir, o no, a un paciente con lesiones cutáneas originadas por la radiación ultravioleta de origen solar.

Sentado lo anterior, la crítica puede ser ejercida por cualquier científico independientemente de su nivel de experiencia. Es posible que un científico de renombre y de gran prestigio tenga equivocaciones, cometa errores. Inicialmente su prestigio conferirá a su propuesta una gran credibilidad, pero la ciencia es inexorable. La puesta en evidencia del fallo no la tiene por qué realizar otro científico de experiencia. Puede ser un joven investigador, no hay problema. Incluso este joven puede haber intervenido en el proceso anónimo de revisión del trabajo enviado a publicar por el prestigioso científico y haber descubierto, por esa vía, el error cometido.

Si se pregunta a un historiador de la ciencia cuándo se sitúa el origen efectivo de esta forma de trabajar, la contestación es en el Renacimiento. La razón hay que atribuirla al hecho de que en esta época se produjo un paso decisivo: se comenzó a pensar en libertad. Se empezaron a romper muchas ligaduras impuestas por el poder, civil y religioso, y los científicos decidieron dar a conocer lo que pensaban, su visión del mundo y del universo, gustara o no a las autoridades. Curiosamente, la fundamentalista intransigencia religiosa impidió el desarrollo de la ciencia en unos países y las ideas más abiertas florecieron en otros. Esa sería una de las razones por las que, en ciertos lugares de la Europa occidental, se tiene un mayor conocimiento sobre la realidad de la ciencia, y esta ha alcanzado un alto nivel de desarrollo, mientras que en otros no; habría dependido de la religión cristiana influyente, la protestante o la católica. También lo anterior explicaría, en parte, el desigual desarrollo científico alcanzado en otras culturas y creencias religiosas.

Otra característica de la ciencia es que se desarrolla, en cada época, en consonancia con las tendencias de todo tipo que imperan en la sociedad. No debe generar sorpresa que así sea; es evidente que *científico*

es una persona, que tiene vida social y que está inmerso en el mismo ambiente que todos los demás ciudadanos. Hoy día, la preocupación ambiental es una de los rasgos sociales más característicos. En sintonía con ello, una buena parte de las actividades científicas y tecnológicas se llevan a cabo tratando de respetar el entorno al máximo; caminando hacia la sostenibilidad, pero sin olvidar lo que constituye el objetivo práctico de la ciencia, que no es otro que mejorar la calidad de vida de la humanidad. Se busca preservar la biodiversidad, que las industrias sean lo menos contaminantes posible, se habla de química verde, se tiene preocupación por el clima, se promueven las energías renovables, etc.

Hay quien podría pensar que la consideración realizada sobre el trabajo de los científicos significa que su libertad está coartada, socialmente coartada. No es mi opinión. El científico que decide trabajar en un tema diferente, lo puede hacer; de hecho, muchos lo hacen y ningún otro científico le pone ninguna objeción.

Por otra parte, no hay que olvidar que los científicos nos debemos a la sociedad, existimos porque la sociedad lo quiere y nuestra financiación, en la mayor parte de los casos, proviene de sus impuestos. Aunque solo fuera por esta razón la ciencia se debe desarrollar en consonancia con las ideas y los anhelos de los ciudadanos; asimismo, los científicos tenemos que esforzarnos en explicar a la gente lo que hacemos y es —desafortunadamente sería más realista decir «debería ser», ya que muchos piensan que no lo es— muy importante darles a conocer nuestros descubrimientos. Además, pienso, esta labor de divulgación es mejor que la hagamos los propios científicos, y no otras personas.

1.3 Cambio climático y ciencia

El objetivo de este apartado es describir cómo se refleja el método científico, comentado anteriormente, en el proceso de generar conocimiento, y las consecuencias prácticas en relación con el cambio climático; también se señalarán algunos rasgos diferenciales, característicos de la temática que nos ocupa.

El campo científico en que enmarcaría el cambio climático sería en las Ciencias de la Tierra, lo que es mucho más amplio que el ámbito de cada una de las disciplinas clásicas de las ciencias experimentales: Matemáticas, Física, Química, Biología y Geología. Además, en la actualidad, hay una contribución no despreciable, y en algunos casos incluso fundamental, de la Economía, Sociología y Política, sobre todo por lo que respecta a las consecuencias prácticas del avance del conocimiento. Este hecho se pondrá de manifiesto en los contenidos de los siguientes capítulos, incluyendo el tercero los apartados más relacionados con las Ciencias Sociales.

El amplio abanico de disciplinas que pueden aportar conocimiento al cambio climático le confiere una gran complejidad temática, lo que, como veremos, hace que, en ciertos aspectos, su propia evolución sea singular en relación con la de las ciencias en general. En el apartado 1.5 de este capítulo veremos que los científicos que inicialmente identificaron el problema poseían una amplia experiencia en Física y Matemáticas. Posteriormente, al buscar explicaciones a las edades de hielo, se amplió el campo temático, para llegar a la situación en nuestros días en que, el cambio climático, puede ser considerado como un claro ejemplo de multi e interdisciplinariedad. Espero aclarar esta aseveración en los siguientes capítulos.

Para introducir las siguientes reflexiones vamos a pensar en un área científica muy restringida. Por ejemplo, en la astrofísica o, si quieren restringir más, en la física solar. Los científicos que trabajan en este campo están bastante bien delimitados en relación con toda la población científica. Podríamos decir —aunque no es cierto, obviamente— que constituyen un grupo social cerrado, lo cual facilita la comparación con el cambio climático. Los especialistas en física solar publican sus resultados de investigación en revistas científicas concretas, pensemos que, en unas pocas, asisten a reuniones y congresos científicos, también unos pocos y, en el límite, podrían llegar a conocerse todos. Está claro que no es cierto, pero nos sirve para reflexionar. Cuando se produce un descubrimiento, o se realiza una propuesta de interpretación de un detalle bajo estudio, la difusión se realiza desde dentro del propio grupo social

de los físicos solares, y es muy fácil llegar a conocer el hecho en un congreso o leerlo publicado en alguna de las revistas de la especialidad. El avance del conocimiento, por medio del método científico, se produce de una forma nítida.

¿Y en cambio climático? Pues la cosa no está tan clara; veamos algún ejemplo. Para estudiar el afloramiento, en superficie, de aguas oceánicas profundas, que son frías y que enfrían el aire por debajo (lo cual influye en el clima de un lugar), se puede utilizar conocimiento teórico establecido en meteorología y resolver ecuaciones diferenciales mediante métodos numéricos deducidos en matemáticas. Si además el afloramiento modifica la pigmentación del agua superficial —al cambiar la concentración de microorganismos—, lo cual influye en la reflectividad de la superficie, y esta, a su vez, en el balance de energía..., comprenderá el lector que las cosas no están en absoluto claramente delimitadas. Pueden ustedes contar el número de especialistas implicados en este breve párrafo. Si se ha producido un avance científico en un campo concreto, se tardará meses y, a veces, años, en ser conocido por el climatólogo responsable del cálculo de la contribución al clima de un determinado proceso. Los especialistas de cada una de las partes en que se desglosa el problema del clima y del cambio climático, suelen publicar los resultados de sus trabajos de investigación en las revistas propias y acostumbran a asistir a los congresos y reuniones de su propia especialidad, lo que viene a dificultar el flujo de ideas y la evolución del conocimiento sobre cambio climático. Cosas así han ocurrido en el estudio de los procesos que tienen que ver con el clima.

Otra particularidad de la investigación del cambio climático, aunque no exclusiva, es que la mayor parte de los procesos no se pueden simular en un laboratorio. Es imposible, por ejemplo, construir una Tierra a escala y estudiar en ella los factores que intervienen para establecer el mosaico de climas del planeta. Eso quiere decir que la mayoría de los avances teóricos se tienen que verificar esperando a que el fenómeno bajo estudio se produzca de forma natural. Casi ningún fenómeno se puede provocar en la naturaleza a voluntad del investigador ni reproducir en el laboratorio. En resumen, la verificación de una teoría por experimentación directa o por comparación con la observación está bas-

tante limitada. Afortunadamente, como espero que quede patente en diferentes partes de este libro, hoy día existe la posibilidad de recurrir a la simulación numérica que, aunque no puede sustituir completamente al laboratorio, permite avanzar en el conocimiento de los procesos determinantes del clima del planeta y, por ende, del cambio climático.

De la lectura del apartado anterior, referido a la ciencia en general, se deduce que la confianza es muy importante en el trabajo de los científicos. Confianza, fundamentalmente, en dos sentidos:

1. El primero es que no se trata de engañar a los demás cuando se difunde la consecución de un logro. Cuando hay un engaño de por medio, nos encontramos ante otro problema, muchas veces de fraude, lo que, evidentemente, no es un comportamiento científico correcto. Con esto no quiero decir que no exista el fraude; sí, existe, por varias razones, entre las cuales son las económicas las que están detrás de una gran parte de los casos. La confianza en este primero de los sentidos no entra en contradicción con la existencia de dudas científicas, con la crítica. Precisamente esta primera versión de la confianza fortalece el método científico. No tendré que hacer un esfuerzo muy grande para que les llegue a convencer de que esta confianza es más fácilmente asumible cuando se trata de un grupo social bien definido, como el ejemplo comentado de los astrofísicos, y más difícil si se trata de una temática interdisciplinaria.
2. En este punto es cuando entra en juego la otra vertiente de la confianza. Como de una disciplina a otra es tremendamente difícil llegar a establecer la duda científica hacia un hallazgo, ejercer la crítica, se debe tener la confianza de que, en las otras disciplinas, se emplea el método científico de forma equivalente a como se emplea en la propia disciplina. Como se vio en el anterior apartado, todos los científicos aceptan el modo de funcionar de la ciencia; esto nos permite, en cierto modo, compararnos pero, sobre todo, tener confianza en los demás científicos, especialmente en aquellos que no comparten con nosotros el campo de especialización. Lo que no tendría sentido es que, por ejemplo, un fisiólogo vegetal, que tiene

confianza plena en cómo se trabaja en su área, tuviera dudas de lo realizado por un climatólogo, y viceversa, aunque la verdad es que a veces ocurre. En muchas ocasiones existe una barrera terminológica, que hace difícil comprender por el otro lo que uno hace y dice; pero la confianza implica, tanto confiar en los propios procedimientos y logros científicos como, también, en los de los demás.

El IPCC ha representado, en este sentido, un hito en la ciencia del cambio climático. Quiero remarcar, de antemano, que no existe precedente ni equivalente en ningún otro ámbito científico. El IPCC se creó, en 1988, por acuerdo entre la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Jugó ya un papel decisivo en el establecimiento de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y en la Cumbre de Río. Pero hay otras convenciones y ninguna de ellas tiene su IPCC equivalente. Sin embargo, cuando decía que marcaba un hito, no me refería a esto, sino a que el IPCC ha sido el gran promotor para que se pueda llegar a considerar a la comunidad de científicos del cambio climático como grupo social. Los informes del IPCC incluyen resultados de investigación, en todos los campos del saber, con la condición de que hayan sido publicados en revistas de las respectivas especialidades, incluidas, por supuesto, las de climatología. Todo el conocimiento aceptado se pretende que esté incluido en el informe correspondiente. A punto de celebrar los veinte años de su creación, en 2007, la Fundación Nobel distinguió al IPCC con el premio Nobel de la Paz «por sus esfuerzos en aumentar y difundir el conocimiento sobre el cambio de clima inducido por el hombre, y por poner la base para las medidas que son necesarias para contrarrestar dicho cambio», según rezaba el anuncio oficial de su concesión. El premio de ese año lo compartió Al Gore, que gozó de un mayor, y posiblemente injusto, reconocimiento popular y mediático, cuando, en realidad, había utilizado gran parte de la información del propio IPCC.

Dicho lo dicho del IPCC, hay que indicar que, sin embargo, no todo es positivo, científicamente hablando. El proceso de elaboración de cada informe dura varios años y, cuando finalmente ve la luz, hay in-

formación que ya está anticuada. Además, descubrimientos últimos no aparecen incluidos aunque se hayan producido antes de hacer público el informe. Algunos casos serán comentados en el siguiente capítulo. Por otra parte, al ser un panel intergubernamental, hay una cierta injerencia política en parte de los documentos que se hacen públicos, aunque no en los textos completos de los informes que son elaborados por los expertos con total libertad.

Una de las consecuencias del impacto social del cambio climático es la proliferación de los llamados escépticos, o también *contrarians*. Evidentemente, críticos los hay siempre en ciencia, ya se ha señalado anteriormente, pero en cambio climático llama la atención la cantidad de personas que pretenden hacer oír su voz sin tener la adecuada formación científica. O sea, opinan sobre el cambio climático, sobre los científicos, sobre el IPCC, cuando en ciencia las opiniones no valen. Si no se está conforme con una propuesta hay que probar por qué es incorrecta y, si se plantea una alternativa, se debe someter, igualmente, a la rigurosidad del método científico.

Sin embargo, no existe solo este tipo de escépticos. Los hay dentro de la propia comunidad científica. A aquellos que lo son por intereses económicos, por ejemplo, por estar muy vinculados al modelo actual de desarrollo, no les voy a dedicar ni un solo comentario. Me interesan los otros, los que son científicos, incluso buenos científicos, tanto los que investigan en temas relacionados con el clima como los que no.

De los científicos que forman parte del colectivo cuyo campo de especialización es el clima hay que señalar que, normalmente, basan su escepticismo en aspectos concretos mal conocidos y que generan incertidumbres, de las que, por otra parte, se conoce su existencia. Incluso pueden estar de acuerdo con la presencia de un cambio de clima inducido por el hombre, pero desconfían del uso de modelos, que consideran incapaces de resolver problemas importantes relacionados con el clima, con lo cual no aceptan que se puedan usar para obtener proyecciones de clima futuro. Pero, por encima de todo, desconfían del IPCC.

Otro grupo de escépticos se enmarcaría en otras especialidades de las Ciencias de la Tierra. Defienden, por lo general, que el cambio de clima

presente es natural. Normalmente se refieren en su argumentación a glaciaciones, concentraciones pretéritas de CO₂ y actividad solar, cuando la actividad humana, evidentemente, no juega ni ha jugado nunca ningún papel. Defienden, muchas veces, que el aumento de concentración de CO₂ es positivo. Su posición en relación al IPCC es obviamente contraria. En otro orden de cosas, al constituir la preocupación por el cambio climático una tendencia popular de plena actualidad en la sociedad, las agencias de financiación de la investigación destinan fondos importantes para el desarrollo de la disciplina. A veces, curiosamente, acceden a estos fondos este tipo de grupos que, desde el punto de vista del cambio climático, son además marginales. Pueden ser buenos especialistas, pero sus intereses directos no están en la investigación de los diferentes aspectos del cambio climático sino en sus propios objetivos. Obtienen, de esta manera, financiación que, de otra forma, les resultaría difícil conseguir.

Un tercer grupo estaría integrado por científicos ajenos al campo de las Ciencias de la Tierra. Como no entienden, o no quieren hacer el esfuerzo de entender, las particularidades inherentes a la ciencia del cambio climático desconfían de todo. De los métodos, de los científicos y, cómo no, del IPCC.

Como se ve, la desconfianza en el IPCC es común a todos los tipos de *contrarians* comentados. Consideran que es como una especie de gueto, manejado por unos cuantos fanáticos que imponen a los miles de científicos colaboradores (autores, editores, revisores, de todas las parte del mundo) su fantasía sobre el cambio climático, que consideran una falsedad. Nada más alejado de la realidad; basta conectarse a la web del IPCC² para ver que el procedimiento que se emplea para la elaboración de los informes, incluida la selección de los colaboradores, es totalmente diáfana.

En relación al primer grupo de los considerados, y con respecto al uso de los modelos, hay que decir que estos son capaces de reproducir el clima presente suficientemente bien, que simulan las consecuencias de las erupciones volcánicas, que explican características climáticas del

² www.ipcc.ch.

pasado aceptablemente. Todo esto se verá en el capítulo segundo. Solo añadir, para rematar el comentario, que si algo de lo que desconocemos fuera realmente importante para la simulación del clima, la investigación lo habría detectado.

Con respecto al segundo grupo, el problema fundamental es la escala temporal del cambio de clima actual en relación con los cambios del pasado. El cambio climático ha ganado tal notoriedad, aparte del interés científico intrínseco que tiene, por su escala temporal. Se *nota* durante la vida de una persona. Podemos decir que la escala temporal es del orden de magnitud de cien años. Si no fuera así, no habría alcanzado interés político, por ejemplo. Los que defienden que el cambio de clima presente es un proceso natural, no pueden explicar la escala temporal de cambio climático.

En el tercer grupo estarían encuadrados aquellos científicos que carecen de la confianza necesaria en el trabajo realizado por los demás. Resulta paradójico que estén absolutamente convencidos de lo bien que se trabaja en su campo y absolutamente convencidos de lo mal que se hace en la especialidad de cambio climático, ¿o quizás en todas aquellas especialidades que no sean la suya? Si es así, no hay más comentario posible que proclamar la evidencia de que ellos se consideran de primera división y los demás no les llegan, no les llegamos, a la suela de sus zapatos. Curiosamente en España hay bastantes científicos de este grupo. Perdonen, pero es que había olvidado que nuestro país es una primera potencia en la consecución de premios Nobel en disciplinas científicas...

Para finalizar este apartado, les propongo un tiempo de reflexión. ¿Conocen otro ámbito del saber donde hayan florecido los *contrarians* como ha ocurrido en el cambio climático?

1.4 Breve historia del Planeta Vivo hasta la historia del cambio climático

Hay que ser conscientes, al hablar del clima de la Tierra, que este es consecuencia de circunstancias, de muchas vicisitudes, que se han

producido en la evolución del universo. Lo que ha ocurrido en los 13.700 millones de años después del llamado *Big Bang* (Spergel et al. 2003) ha conducido a nuestro planeta a la situación actual, de la cual el clima forma parte. La formación de la Tierra, la aparición de la vida, la aparición de los humanos, el desarrollo de habilidades, el alcanzar la capacidad de alterar el funcionamiento de la precisa máquina que es el planeta, son hitos importantes en esta historia, que se desarrollarán a continuación. Han pasado desde la formación del planeta unos 4.600 millones de años y se piensa que *Homo sapiens* iniciaba sus andanzas por África hace tan solo unos 200.000 años (aunque *Homo* ya existía desde algo más de 2 millones de años antes). En este tiempo tan ridículo, si pensamos en los miles de millones de años transcurridos para el universo, hemos llegado a superar los 6.000 millones de habitantes³ sobre el planeta (oficialmente llegamos a esa cifra el 12 de octubre de 1999, según se declaró en Naciones Unidas) y nos hemos convertido en un auténtico problema, al menos ambientalmente hablando. Por otra parte, lo anterior tiene que permitir relativizar lo que representamos en el tiempo de existencia de la Tierra y más, todavía, tras lo que sigue en este apartado. Precisamente, lo que sigue es, en parte, consecuencia de conversaciones mantenidas con mi colega y amigo Filipe Duarte Santos, catedrático de la Universidad de Lisboa, y de la lectura de su libro *Que futuro?* (Santos 2009) durante el tiempo que permanecí en su grupo con motivo de una reciente licencia de sabático.

El Sistema Solar (incluyendo el planeta Tierra) se piensa que se formó a partir de una gran nube de polvo y gas interestelar en rotación, llamada nebulosa solar, que orbitaba en torno al centro de la Vía Láctea, nuestra galaxia. Estaba compuesta por hidrógeno y helio, que aparecieron poco después del *Big Bang*, y elementos pesados expulsados en explosiones estelares (supernovas). Aproximadamente hace 4.600 millones de años, la nebulosa solar se empezó a contraer, posiblemente debido a la onda de choque producida por una supernova cercana. Esa onda de choque también habría causado la aceleración de la rotación de la nebulosa, lo

³ Se estima que al inicio de este año 2011 hemos superado los 7.000 millones de habitantes.

que condujo a su aplanamiento y evolución hacia un disco protoplanetario orientado perpendicularmente a su eje de rotación. La mayoría de la masa, que se encontraría concentrada en la parte central, se empezó a calentar y, como consecuencia de las interacciones con restos de la explosión, se formaron *protoplanetas* orbitando el centro de la nebulosa. Fue ahí, en el centro de la nebulosa, donde acabó formándose el Sol, cuya energía proviene de reacciones termonucleares de fusión de dos átomos de hidrógeno para producir helio. Los planetas, entre ellos la Tierra, se formaron posteriormente, a partir de una fase en la que existían anillos de materia y que pudo durar de 10 a 20 millones de años.

Simulaciones numéricas, realizadas con ordenador, reproducen el proceso de formación de los planetas indicado anteriormente y, lo que es muy interesante, sugieren que el mismo proceso que dio lugar a la formación de los planetas en el sistema solar se puede producir en prácticamente cualquier estrella del universo.

Volviendo al Sol, se estima que permanecerá en periodo de estabilidad, en cuanto a su emisión de energía, unos 11.000 millones de años. Esto quiere decir que aún no habría alcanzado el centro de dicho periodo y le quedarían unos 6.400 millones de años para transformarse en una gigante roja, con una emisión energética aproximadamente tres mil veces superior a la actual. Pese a que se habla de periodo de estabilidad no hay que pensar que, en ese periodo, la producción y emisión de energía es constante. Hace 4.600 millones de años su luminosidad era el 70% del valor actual y en los próximos 1.000 millones de años aumentará hasta superar en un 10% a la actual. Esa estabilidad relativa en la producción de energía ha sido fundamental para la evolución de la vida desde formas microbianas a las más complejas de plantas y animales, aunque el crecimiento de dicha producción en el camino a la transformación en una gigante roja tiene consecuencias negativas para la propia vida en la Tierra.

En la fase inicial del Sistema Solar era corriente que se produjeran impactos de objetos de grandes dimensiones sobre los planetas recién formados como consecuencia de la actuación de la fuerza de atracción gravitatoria. La Tierra no podía ser una excepción. Parte de los impac-

tos eran debidos a cometas, con composición química muy diferente a la de la Tierra; en concreto, pobre en carbono y agua, sustancias que sí están presentes en los cometas. Al producirse el impacto, la Tierra las retendría y las incorporaría, lo que podría ser el origen de la presencia de agua en el planeta que, junto con el carbono, han sido fundamentales en la existencia de vida en la Tierra. Un segundo tipo de impacto destacable es el que daría lugar al único satélite de nuestro planeta, la Luna. Cuando la Tierra tenía solo 100 millones de años un gran objeto, de radio aproximadamente mitad de la Tierra, habría impactado con ella y, junto con el material procedente del choque, habría quedado atrapado en órbita gracias a la gravedad terrestre. En el transcurso del tiempo se iría aglutinando todo el material en lo que hoy día es nuestra Luna. Se estima que, durante 600 millones de años, la frecuencia de los impactos sobre la superficie del planeta era grande. Si representáramos idealmente el tiempo transcurrido desde la formación de la Tierra con un reloj de 24 horas, puesto en hora a medianoche al formarse la Tierra, acabaríamos de pasar hace 8 minutos las 3 de la madrugada.

La existencia de la Luna junto a la Tierra tiene algunas implicaciones importantes. Por una parte genera, junto con el Sol, las mareas y tiende a reducir la rotación de la Tierra. Por otra, ayuda a estabilizar la inclinación del eje del mundo, lo que tiene importancia, como se verá, en el paso de las estaciones.

Dando un salto en el tiempo, hace 65 millones de años se produjo probablemente la última gran colisión. Un objeto de unos 10 km de diámetro —es posible que un cometa— golpeó la Tierra en un punto que se ha logrado identificar. Se trata de Chicxulub, en la península del Yucatán, donde se descubrió un cráter de 180 km de diámetro. Por efecto del impacto se alcanzaron temperaturas muy elevadas, que produjeron la evaporación del equivalente a 30 cm de agua de todos los océanos que cubren el planeta, se produjeron grandes incendios, se inyectaron a la atmósfera grandes cantidades de polvo y ceniza, que redujeron considerablemente la radiación solar y, consecuentemente, la temperatura, y se generó un tsunami con una altura de ola de 1 km que depositó arena

y detritus en un radio de 3.000 km. Se piensa que en este episodio se extinguieron entre el 40% y el 75% de las especies.

Como nuestro objetivo es hablar del clima de la Tierra no podemos dejar de tratar la formación de la atmósfera y de los océanos, u *océano planetario*, como muchos prefieren decir. La atmósfera primigenia de la Tierra estaba formada por los gases que pudo retener durante su proceso de formación y durante la época de impactos frecuentes. Los principales eran dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), nitrógeno (N_2), vapor de agua (H_2O), amoníaco (NH_3) e hidrógeno (H_2). A medida que la Tierra se fue enfriando (no hay que olvidar que partía de unas condiciones de elevada temperatura) se produjo la condensación del vapor de agua, lo que condujo a la formación del océano. Inicialmente, el agua oceánica era dulce pero, como consecuencia de la interacción con la corteza planetaria, se tornó salada.

En la escala de tiempo que estamos hablando, de muchos millones de años, la composición y comportamiento de la atmósfera de la Tierra, o de cualquier otro planeta, dependen de la gravedad planetaria en superficie, de la temperatura de la atmósfera y de la masa de las moléculas gaseosas que la constituye. A mayor temperatura y menor masa molecular, mayor es la velocidad media de las moléculas y, si esta fuera muy grande, podría llegar a escapar del planeta venciendo la gravedad. La velocidad a la que eso se consigue se llama velocidad de escape del planeta que, en el caso de la Tierra, es de 11,2 km/s. Los elementos más ligeros han tenido posibilidad de escapar del campo gravitatorio terrestre (hidrógeno y helio), pero no así los demás. Como comparación, Mercurio no pudo retener una atmósfera como consecuencia de su pequeña masa y, por tanto, gravedad, así como de su elevada temperatura. El caso de Venus es más complicado. Inicialmente su atmósfera sería muy parecida a la de la Tierra, pero su mayor proximidad al Sol hace que su temperatura sea mayor y no habría permitido la condensación del agua, como en el caso de la Tierra donde se formaron los océanos. La radiación solar ultravioleta se habría encargado de disociar el vapor de agua en hidrógeno, con capacidad de escapar de la atracción gravitatoria, y oxígeno, que habría sido consumido en

reacciones de oxidación producidas en las rocas. El resultado sería una atmósfera, la actual, muy rica en CO_2 (97%), con implicaciones en el efecto invernadero que se verán más adelante, en el epígrafe 2.1. El caso de Marte es, en cierto modo, *misterioso*. No en vano ha atraído la atención de los científicos, pero también hay que decirlo, de los artistas. Lo único que está claro, aparte de su tamaño, es que su distancia al Sol, más alejado que la Tierra, provoca que su temperatura sea más fría (en la actualidad -65°C) y el agua no pueda encontrarse en fase líquida, aunque sí se ha podido observar como hielo. No obstante, se piensa que pudieron, en alguna época pasada, haberse dado las condiciones para que existiera agua líquida. La realidad actual es que su atmósfera, sin que haya acuerdo en el porqué, es casi tan rica en CO_2 como la de Venus (95%).

La atmósfera que iba resultando en la Tierra, con agua líquida presente, con frecuentes e intensas erupciones volcánicas y recibiendo radiación electromagnética del Sol, la hacían propicia para que se pudiera producir la síntesis de compuestos orgánicos. Se piensa que los primeros organismos vivos se formaron en los océanos. Lo que sí estamos en condiciones de asegurar es que los vestigios de vida más antiguos tienen unos 3.800 millones de años y fueron encontrados en rocas metamórficas en Groenlandia. La conclusión derivada del análisis de estas rocas confirma la presencia de bacterias fotosintéticas.

La fotosíntesis provocada por la radiación solar permite transformar el CO_2 atmosférico en derivados del carbono, que aprovechan los organismos vivos, y moléculas de oxígeno, O_2 , que acaban finalmente en la atmósfera. Llegado a este importante punto, puede haber quien se pregunte: «¿Qué hora es?», en nuestro reloj virtual de 24 h, naturalmente. Pues serían solo las 4 h 5 min de la madrugada, y ya hemos llegado al Planeta Vivo.

La presencia de O_2 en la atmósfera, aparte de ser un indicador de la existencia de vida en el planeta, es importante por otras razones. La primera, obvia, es que es esencial para la vida de los animales que respiramos, pero hay otra no menos importante: la radiación ultravioleta procedente del Sol, que forma parte del espectro de la radiación elec-

tromagnética que emite, es la responsable de los procesos de creación y destrucción de ozono, cuyas moléculas de oxígeno triatómico (O_3) se encuentran en la estratosfera. Por una parte, dicha radiación ultravioleta disocia, rompe, las moléculas de oxígeno molecular (O_2), dando lugar a átomos de oxígeno (O). Parte del oxígeno O se combina con moléculas de oxígeno O_2 para formar O_3 , ozono. Al mismo tiempo, la radiación ultravioleta rompe las moléculas de ozono para dar lugar a O_2 y O, átomos que se pueden combinar entre sí, para producir moléculas de oxígeno, O_2 . El proceso de creación-destrucción de ozono es, en realidad, más complicado que lo aquí expuesto, pero lo anterior es suficiente dado el carácter de esta obra.

Entre unos 15 km y 60 km de altitud, en la estratosfera, predomina, aunque en diferente medida, el proceso de creación sobre el de destrucción. Aparece, entonces, en la atmósfera una capa con concentración de ozono elevada, la ozonósfera, que presenta un máximo a unos 20 km de altitud. La radiación ultravioleta que interviene en la creación y destrucción de ozono no alcanza el suelo, lo cual es de gran importancia. La capa de ozono actúa, por así decirlo, como una sombrilla que impide la llegada de radiación ultravioleta a la superficie del planeta que, si se produjera, sería perjudicial para la vida. Y esta protección —se piensa— tuvo un papel fundamental para que los organismos vivos pudieran alcanzar los continentes. Completando lo anterior, la presencia de oxígeno y ozono en la atmósfera se puede entender como una huella de la existencia de vida en la Tierra.

Siguiendo con el hilo de la narración, que lo habíamos dejado en los primeros indicios de vida, los fósiles más antiguos encontrados en la Tierra datan de hace unos 3.500 millones de años, es decir, 300 millones de años después de lo que se estima como inicio de la vida en el planeta. Según Schopf (1999), se trataría de colonias de algas azules o cianobacterias, organismos unicelulares sin núcleo (procariotas) que tendrían capacidad para realizar la fotosíntesis. A partir de esa época, los registros fósiles de organismos vivos son progresivamente más abundantes y diversificados. Estaríamos llegando a las 5 h 45 min de la mañana en nuestro reloj virtual.

La existencia de organismos vivos que realizaban la función fotosintética continuamente (bueno, solo durante el día ya que se requiere la presencia de luz) y que producían O_2 para el Planeta Vivo, no quedó reflejada inmediatamente en la atmósfera. Parece que empezó a aumentar de forma significativa hace 2.300 millones de años, época en que se piensa que se produjo la primera gran glaciación. Pero ¿qué ocurrió con el oxígeno durante estos 1.500 millones de años?

La respuesta, en principio, es fácil; como en una cuenta bancaria. Si ganamos dinero y el saldo no aumenta, solo se puede deber a flujos de dinero que salen de la cuenta, a gastos. Entonces la pregunta es: ¿En qué se consumía el oxígeno producido?

La respuesta definitiva todavía no existe, pero una explicación plausible vendría de la mano de las formaciones de hierro en bandas (BIF, siglas en inglés), originadas en el fondo oceánico. Sin entrar en detalles, el O_2 se habría consumido, al menos en parte, en la oxidación del hierro presente en el agua marina. De hecho, la datación de estas formaciones indica una antigüedad entre 1.700 y 3.800 millones de años. Eso quiere decir que se empezarían a formar al aparecer los primeros organismos vivos, al ir agotándose el hierro comenzaría a aumentar el oxígeno en la atmósfera y quedaría detenido el proceso hace unos 1.700 millones de años por alguna razón, ambiental por supuesto (Wang et al. 2009). Por otra parte, no hay explicación admitida todavía para la aparición de la glaciación, pero se sugiere que se podría deber a la disminución de la concentración de metano (CH_4) en la atmósfera al reaccionar con el oxígeno para producir CO_2 y vapor de agua (Lunine 1999).

Las formas iniciales de vida producían oxígeno, pero no lo necesitaban; es más, sería más bien como un *veneno* (organismos anaerobios). Mientras el hierro actuaba como un sumidero de oxígeno, no había problema. Los problemas aparecieron cuando aumentó la concentración de O_2 . Este hecho está íntimamente relacionado con la aparición de células eucariotas, con citoplasma y núcleo, que consiguieron adaptarse a una vida con oxígeno (organismos aerobios). Así, no tendrían una antigüedad mucho mayor de 2.300 millones de años y predominarían desde hace 1.700 millones de años. Son las células eucariotas las que

dieron lugar a organismos pluricelulares, como hongos, plantas y animales. Con la formación de hierro en bandas habríamos sobrepasado con creces el mediodía: serían las 15 h 8 min de la tarde cuando el proceso se detuvo.

El siguiente hito que se ha de comentar es la aparición de la reproducción sexual. Aquí son muchas las incógnitas y no todas con respuesta generalmente aceptada. Empecemos por el cuándo. Del análisis de fósiles encontrados en fondos marinos cerca de Australia se ha podido deducir que hace 570 millones de años ya existían organismos que se reproducían de esta forma (Droser y Gehling 2008). En realidad, no se sabe cuándo se inició, sino, a partir de cuándo ya no. Más problemas presenta el porqué. Se han propuesto diferentes explicaciones, pero ninguna parece definitiva (capacidad de reparar los errores en la información genética del ADN, tomar ventaja de la diversidad al tener descendientes no idénticos a los progenitores, posibilidad de mejorar a los progenitores, etc.). Lo que sí es cierto es que la reproducción sexual ha triunfado en la evolución: casi todos los organismos vivos nos reproducimos de esta forma; tenemos dos padres, a los que nos parecemos, pero no somos una copia idéntica de una parte de cada uno de ellos.

Hace 550 millones de años, al iniciarse el llamado periodo Cámbrico, se produjo una aceleración en la aparición de nuevas formas de vida, ya pluricelulares. Las células se especializaron para realizar funciones específicas, aparecen artrópodos, equinodermos, conchas y esqueletos, los primeros peces, algunos de ellos de gran tamaño... Esto ha quedado reflejado en la gran variedad de restos fósiles encontrados. Este fenómeno se denomina *explosión del Cámbrico* y contrasta con los pequeños cambios que debieron producirse en la evolución desde la proliferación de las células eucariotas. Todo ocurrió como si la vida, al producir oxígeno, alterara las condiciones ambientales para mejorar su desarrollo y evolución. Con esto hemos sobrepasado en 8 minutos las 21 horas de la noche, siete octavas partes de nuestra historia y han pasado otras dos grandes glaciaciones.

El momento en que los seres vivos pasaron de los océanos a los continentes no se conoce con precisión. Es posible que organismos procario-

tas ocuparan zonas de tierra, antes que los eucariotas, hace 2.600 millones de años. Los primeros fósiles de hongos y plantas desarrollados en bordes con el agua datan de hace 480 a 460 millones de años, aunque hay evidencias de que los primeros colonizarían los continentes hace 1.000 millones de años, y las plantas, hace 700 millones. Los primeros animales en realizar el tránsito entre agua y tierra serían, posiblemente, los artrópodos, hace unos 450 millones de años. Conviene no olvidar que la colonización de los continentes se pudo realizar, entre otras cosas, gracias a la escasa llegada a la superficie del planeta de radiación ultravioleta, consumida en la estratosfera en los procesos de creación y destrucción de ozono. Sin embargo, no todo son facilidades. Hay que pensar que el paso de los seres vivos del agua a tierra firme implica unas cuantas dificultades. Por ejemplo, dejar de sentir el efecto de flotabilidad que proporciona el agua y, en consecuencia, sentir una mayor gravedad en el seno del aire; recibir en la atmósfera mayor intensidad de radiación solar que en el mar; tener peligro de deshidratación y, en general, estar sometidos a las inclemencias de los vientos o de cambios de temperatura importantes. Con respecto al papel del agua en el organismo, y de una forma gráfica, los seres vivos estaban inicialmente rodeados de agua mientras que, ahora, retemos el agua internamente y tenemos que hacer verdaderos esfuerzos para que eso continúe siendo así.

El transcurrir de la vida en el planeta no es comparable a una línea y, menos, a una recta. La evolución se asemeja, más bien, a un árbol: de un tronco principal van surgiendo ramificaciones, que tienen un final, pero un poco más arriba podemos encontrar otra rama, que a su vez se separa en varias, y así sucesivamente. A lo largo del paso del tiempo, en la vida hay bifurcaciones y extinciones; unas especies aparecen y otras desaparecen. Al menos ha habido cinco grandes extinciones en la evolución de la vida en la Tierra (Raup y Sepkoski 1982). De ellas, la más popular es aquella en la que se produjo la extinción de los dinosaurios hace unos 65 millones de años (entre el Cretáceo y el Terciario, límite K-T), pero no ha sido la mayor. La causa, como ya se comentó, sería el impacto de un objeto exógeno.

La mayor extinción de vida en la Tierra se produjo hace unos 250 millones de años en la transición Pérmico-Triásico (casi a las 22 h 40 min de la noche de nuestro día virtual, aproximadamente una hora antes que la extinción del límite K-T) con una pérdida del 96% de las especies marinas y del 70% de las terrestres, incluidos vertebrados, insectos y, posiblemente, plantas. Los vertebrados tardaron unos 30 millones de años en recuperarse.

Las otras tres grandes extinciones se produjeron hace 440-450, 360-375 y 205 millones de años, aunque no se debe pensar que hayan sido las únicas: hay identificadas unas quince de menor efecto destructivo sobre la vida. Existen diferentes propuestas para sus causas. Por supuesto los impactos de meteoritos, pero también grandes erupciones volcánicas, formación de depósitos basálticos, deriva de los continentes o pronunciados descensos del nivel del mar, junto con cambios en el clima de la Tierra, relacionados o no con lo anterior.

Uno de los mecanismos reproductivos más eficientes que han aparecido en el planeta es el correspondiente a los vegetales por medio de las semillas. Permitió la colonización de tierra firme y superar las extinciones. Primero surgieron las plantas gimnospermas, con semillas desnudas, y 200 millones de años después, hace 150 millones de años, las angiospermas, con flores y frutos, muchas veces comestibles, que protegen a las semillas. Con ello, los mecanismos iniciales de dispersión de las semillas, viento y agua, se extendieron al reino animal que, de esta forma, pasaron a ser también diseminadores de las semillas, además de agentes de polinización de las flores. La diversificación, sobre todo de las angiospermas, resultó muy rápida y contribuyó a un aumento muy importante de la biodiversidad.

Pasando ahora a la fauna, habíamos dejado a los artrópodos llegando a los continentes hace unos 450 millones de años. En el Carbónico, de aproximadamente 360 a 300 millones de años atrás, los anfibios evolucionaron hacia reptiles que, a su vez, dieron lugar a mamíferos y aves. Los mamíferos aparecieron en el Triásico, hace unos 225 millones de años. Esta evolución permitió la protección del cuerpo, por pelos y plumas, de las inclemencias ambientales, y se pasó de los reptiles, poiquilotermos

(popularmente, de *sangre fría*), que cambian su temperatura según la variabilidad de la temperatura del aire, a aves y mamíferos, homeotermos (popularmente, de *sangre caliente*), que consiguen mantener aproximadamente su temperatura constante, casi independientemente de lo que ocurra con la temperatura en la atmósfera. Este logro se piensa que fue crucial para sustentar un metabolismo más activo que permitió asegurar el crecimiento de la masa encefálica.

Después de las 23 h 40 min de la noche, acabando nuestro día virtual, tras producirse el impacto que dio lugar a la popular extinción del límite K-T, los mamíferos se vieron beneficiados. Posiblemente, los dinosaurios se extinguieron debido a la falta de aislamiento térmico y a las dificultades para conseguir alimentos en un planeta con la vegetación muy destruida. Este hecho favoreció la rápida proliferación de mamíferos y aves, sobre todo de los pequeños. En el mundo vegetal se produjo un predominio de las gimnospermas, dando lugar a una flora variada, y generando bosques, con abundancia de insectos. Esta era la distribución de la vida cuando se produjo la sorprendente evolución hacia los primates, con cerebros comparativamente grandes, pero con un consumo elevado de energía que obliga a una alimentación muy superior a la de otros animales con la misma masa. Su vida inicialmente era arborícola, lo que obligó a evolucionar y a desarrollar habilidades para facilitar el difícil desplazamiento entre las ramas de los árboles. Hace unos 25 millones de años la evolución separó a los pequeños primates de los grandes (orangutanes, gorilas y chimpancés) que, hace unos 20 millones de años, empezaron a descender de los árboles. La separación de los orangutanes de la línea evolutiva de los homínidos se produjo hace 14 millones de años; después, hace 9 millones de años, tuvo lugar la bifurcación con los gorilas; y hace 6 o 7 millones de años, una nueva que separó los primeros homínidos, los australopitecos, de los chimpancés. Y faltan unos ¡2 minutos! para que lleguen las doce de la noche.

Recientemente, se han descubierto fósiles en Sudáfrica de *Australopithecus sediba*, que vivieron hace algo más de 2 millones de años y que se les propone como los primeros ancestros del hombre actual (Berger et al.

2010), aunque existen detractores de esta opinión. Su cerebro era del orden de un tercio de los presentes.

De cualquier forma, se piensa que aproximadamente en esa época ya existía el *Homo erectus*, que serían los primeros en migrar fuera de África. Lo sorprendente es que el tamaño de su cerebro sería aproximadamente el doble del indicado para *sediba* y superior en un 50% a los 600 cm³ de *Homo habilis*, que parece existía ya hace 2 millones y medio de años. Con todo, fue *Homo heidelbergensis*, con un volumen cerebral de cerca de 1.200 cm³, el que estaba más cerca de los 1.350 cm³ de *Homo sapiens*. Este aumento tan considerable del volumen cerebral ha sido trascendental para desarrollar la capacidad de producir utensilios—origen de la tecnología y diferencia fundamental con los no humanos—, de usar el fuego, alcanzar la facultad de comunicarse por medio del lenguaje o aceptar las organizaciones sociales para obtener beneficio con respecto a los simples individuos. Aunque no está claro cómo actuó la selección natural para el desarrollo del cerebro, se piensa que es precisamente la organización social necesaria para defenderse de otros animales, u otras tribus humanas, lo que pudo ser el motor de la evolución. Hay que tener en cuenta, además, que en la época en que esto ocurría se produjo un enfriamiento del clima con aparición de hielos permanentes. A partir de entonces se sabe que se han ido produciendo alternadamente, cada aproximadamente 100.000 años, periodos glaciares e interglaciares, como consecuencia de las variaciones de los parámetros orbitales de la Tierra. Más adelante se tratará esto con más detalle.

Hay autores (Calvin 2002) que consideran que los cambios de clima provocaron la pérdida de áreas boscosas en la sabana africana. La desaparición de los árboles como refugio hacía más difícil la defensa de nuestros antepasados, que se vieron abocados a organizarse socialmente para sobrevivir. La encefalización progresiva se debió producir en paralelo con el aumento de la complejidad en la organización social, hasta llegar un momento en que el proceso se tornó irreversible.

La gran cantidad de yacimientos fósiles encontrados, así como su dispersión y la casi imposibilidad de establecer conexiones entre ellos,

hace muy difícil establecer una narración secuencial de lo que aconteció para la llegada de *Homo sapiens*. O quizá es imposible...

¿Y Atapuerca? Según los líderes del equipo de investigación —Arzuaga, Bermúdez de Castro y Carbonell— en el importante yacimiento de Atapuerca se han encontrado los restos más antiguos del poblador europeo. Aunque no está internacionalmente reconocido, hablan de una nueva especie, *Homo antecessor*, y datan su presencia entre 800.000 años y 1.200.000 años antes del presente. También se han encontrado restos de *Homo heidelbergensis*, considerado el antecesor de *Homo neanderthalensis*, contemporáneo de *Homo rhodesiensis* que vivía en África entre 250.000 y 600.000 años antes y que está considerado como nuestro antecesor.

No deja de ser curioso que *Homo neanderthalensis*, especie extinguida, tuviera un volumen cerebral (entre 1.300 y 1.600 cm³) superior a *Homo sapiens*. ¿Por qué la evolución no continuó por la vía de permitir el mayor crecimiento del cerebro? ¿Por qué no ha continuado la evolución del cerebro de *Homo sapiens*? Se acepta que la razón es cultural, es decir, nuestra especie fue capaz de adquirir conocimiento, tecnología, dotes artísticas, desarrollo social, aceptación de creencias, etc., que actuaban de forma selectiva, semejante a la evolución simplemente biológica, capaz de determinar grupos de ganadores y perdedores en las sociedades humanas.

Hace unos 30.000 años, cuando faltaba algo más de medio segundo para llegar a la media noche de nuestro reloj virtual, se produjo una expansión muy importante de la cultura *Homo sapiens*. La tecnología para la caza fue suficiente para producir un impacto ambiental considerable en su colonización de la tierra firme. El muchas veces llamado *cazador-recolector* fue responsable de la extinción de un gran número de especies animales, sobre todo en su avance de América del Norte hacia la del Sur. Más recientemente, hace unos 12.500 años, se inició un periodo climático frío y seco, *Younger Dryas*, de unos 1.000 años de duración, posiblemente debido a cambios o interrupciones en la circulación oceánica del Atlántico Norte, incluida la Corriente del Golfo. La reducción de los recursos alimentarios que provocó el episodio se considera desencadenante de la invención de la agricultura. No se tiene claro dónde se inició, aunque hay indicios de que pudo iniciarse *simultáneamente* en

lugares diversos (América, Oriente próximo, India o China). Lo que sí está claro es que los usos agrícolas han traído una modificación de la superficie del planeta, lo que representa un impacto ambiental de escala global.

Hechos importantes en el desarrollo de la civilización han sido:

- La fabricación de objetos de cobre hace unos 6.000 años, luego vinieron otros metales.
- La aparición en Mesopotamia de estructuras sociales, denominadas *ciudades-estados*, algo anterior al año 3000 a. C.
- La invención de la escritura, hacia el año 3200 a. C., por los sumerios.
- La pronta aparición de los primeros registros escritos de prácticas religiosas, aunque dichas prácticas se remontarían a decenas de miles de años antes, según parece deducirse de enterramientos tanto de *Homo neanderthalensis* como de *Homo sapiens*.

La práctica religiosa en todas las civilizaciones antiguas —como Mesopotamia y Egipto—, con la aparición del judaísmo, hinduismo, cristianismo, budismo, islamismo, taoísmo, sintoísmo, etc., ha llevado a investigar sobre la naturaleza de la religiosidad. Un hecho tan extendido, e inicialmente inconexo, con muchas características comunes solo puede ser explicado por alguna razón vinculada al cerebro humano (Milthen 1996). Lo que está fuera de toda duda es que las religiones han tenido un marcado papel en la evolución de las sociedades humanas, constituyen el sistema sociocultural más antiguo y han fomentado alguna de nuestras capacidades, como la conceptualización y el desarrollo de la abstracción.

También es cierto, sin embargo, que las religiones han originado, y siguen generando, muchos conflictos. Se han desencadenado guerras, invasiones, atentados terroristas que, de una u otra forma, responden a un trasfondo religioso. La humanidad no ha conseguido todavía resolver del todo este tipo de conflictividad y, en nuestros días, este asunto resulta, cuando menos, preocupante.

Otro tipo de conflictividad, más conceptual, se produce entre ciencia y religión. Hoy día parece que se tiene claro, al menos en muchas sociedades, que las visiones que cada una ofrece del mundo corresponden a ámbitos bien diferenciados. Esto no ha sido siempre así; y es más, como se ha visto, no es posible entender el desarrollo de la ciencia sin la religión. De hecho, la mayor parte de científicos en Europa, cuna de la ciencia moderna como ya hemos visto, eran cristianos; tuvo que llegar el final del siglo XVIII para que el ateísmo emergiera como una concepción poderosa. En este capítulo hemos hablado del origen del universo, de la formación de la Tierra, de la aparición de los primeros signos de vida, de la evolución, de la aparición del hombre... Todo eso es ciencia, y han sido muchas las personas que han contribuido a su establecimiento. En gran parte del proceso se han puesto de manifiesto conflictos entre ciencia y religión; baste poner como ejemplo a Charles Darwin y a Stephen Hawking.

El objetivo aquí era dejar una visión, evidentemente muy limitada, de la historia de nuestro Planeta Vivo y relativizar la existencia del hombre en la Tierra. Por el camino se han tenido que dejar muchas cosas y a muchas personas. En primer lugar merecen una referencia los pensadores griegos, en concreto, Aristóteles. Sus libros introdujeron los términos *Física* y *Meteorología*, pero también algunos conceptos elementales ciertamente interesantes. Y finalmente Newton, cuyas leyes han sido la base, entre otras muchas cosas, de la Física de Fluidos que ha permitido la aparición de la Meteorología moderna y la posibilidad de simular el clima de la Tierra. Aunque con un importante salto en el tiempo, ahora estamos preparados para la llegada de los primeros hallazgos científicos que permiten explicar lo que está pasando con el clima de la Tierra.

1.5 Una historia del cambio climático

En un tema tan complejo, que hace referencia al Planeta —ya en sí de naturaleza compleja—, es muy difícil poner un origen a algo que ha nacido a partir de una gran cantidad de contribuciones diferentes,

muchas veces aisladas y muy distantes temáticamente del clima, e, incluso, muy anteriores a que existiera la preocupación por el cambio climático. El intentar asignar un principio sería como preguntarnos el origen de un exquisito plato de comida tradicional que haya llegado a nuestros días. ¿Por qué con tales o cuales ingredientes? ¿En qué orden se cocinan? ¿Dónde y cuándo se inició su uso?... Seguro que pensamos poco en los errores que se pudieron cometer y en sus consecuencias, a veces fatales.

La historia de la ciencia, y del cambio climático en particular, no es una línea recta. Existen —ya se ha comentado— muchas ramificaciones, de las cuales unas no han prosperado, y otras se han desarrollado con éxito; hasta que se ha construido un entramado que da explicación al fenómeno bajo estudio.

Si me viera obligado a poner un origen diría que se encuentra en el siglo XIX. Bien es verdad que en el primer capítulo del Informe 2007 del IPCC se dan algunas referencias anteriores, pero no se refieren a la atmósfera. En concreto, Mariotte en el siglo XVII señaló que la luz y el calor del Sol podían pasar a través del cristal y otros materiales transparentes, pero, sin embargo, el calor procedente de otras fuentes (del fuego, por ejemplo) no lo podía hacer. Asimismo, Saussure, ochenta años más tarde, ya en el XVIII, probó que en los llamados *heliotermómetros* se producía un aumento de temperatura al ser iluminados por el Sol.

El primero que entendió el papel de la atmósfera fue Fourier, que por los años veinte del siglo XIX, dio cuenta de la absorción diferenciada de la radiación que proviene del Sol y de la que emite la Tierra (infrarroja, calor). Introdujo la idea de lo que luego —hacia mitad del siglo XX— se popularizó con el inapropiado, pero triunfante nombre, incluso entre los científicos, de *efecto invernadero*. Unos treinta años más tarde, Tyndall identificó, experimentando en el laboratorio, algunos de los gases atmosféricos responsables del efecto invernadero. En primer lugar, el más importante, el vapor de agua; pero también el dióxido de carbono (CO₂), a pesar de encontrarse en la atmósfera unas pocas moléculas en cada 10.000. Son, por lo tanto, los primeros gases de efecto invernadero, como ahora los llamamos (GEI). O sea, que hace más de

150 años se habían sentado las bases para llegar a postular en nuestros días que una intensificación del efecto invernadero conduce al cambio climático.

Los primeros resultados numéricos se deben a Arrhenius (Premio Nobel de Química en 1903) que, a finales del siglo XIX, evaluó cómo los cambios de concentración de CO₂ en la atmósfera podían alterar el clima. En principio, como muchos científicos de la época, estaba interesado en la explicación de las glaciaciones, en entender las *edades de hielo*. En este sentido, llegó a identificar los cambios de concentración de CO₂ en la atmósfera como una de las causas, pero lo más sorprendente es que tuvo en cuenta dos procesos, que se denominan de *retro* o *realimentación* (en inglés, *feedback*) importantes:

1. El primero, que ya había sido intuido anteriormente por Croll, se conoce hoy con el nombre de *realimentación hielo-albedo*. La explicación es la siguiente. El *albedo* es la fracción de energía procedente del Sol que es devuelta desde la Tierra al espacio por reflexiones y que, por lo tanto, no es aprovechada en el sistema climático. Si la cobertura de hielo del planeta aumenta, también lo hace el albedo, con lo que más energía es devuelta al espacio y, en consecuencia, una menor cantidad es aprovechada en la Tierra. El descenso de temperatura que se originaría tendría como respuesta un aumento adicional de la cobertura de hielo y, entonces, del albedo. El proceso de realimentación sería como un ciclo sin fin donde la consecuencia de un proceso influye en la causa, y así sucesivamente. Como el efecto se iría intensificando progresivamente, el proceso se denomina de *retroalimentación positiva*. Es fácil ver lo que ocurriría si se partiera de una reducción de la cobertura de hielo, en lugar de un incremento.
2. La otra realimentación que consideró Arrhenius es la denominada *realimentación del vapor de agua*. Vamos a considerar ahora las dos posibilidades simultáneamente. Si se produjera aumento/disminución de la temperatura, aumentaría/disminuiría el contenido de vapor de agua en la atmósfera lo que amplificaría el

aumento/la disminución inicial de temperatura, al ser el vapor de agua un gas con efecto invernadero. Se trata también de una realimentación positiva.

Arrhenius llegó a calcular, muy acertadamente para la época, el efecto que tendría en la temperatura el duplicar la concentración de CO_2 en la atmósfera y —diríamos hoy día— si se intensificara el efecto invernadero. Indicó que serían unos 5 o 6 °C, incremento razonable (aunque algo elevado) si se compara con los valores que se obtienen en la actualidad, un siglo más tarde, con modelos de simulación muy sofisticados frente al simple balance de energía utilizado por Arrhenius.

Los científicos de la época no prestaron mucha atención a lo postulado por Arrhenius. Se dedicaron durante varias décadas a buscar mecanismos que demostraran que el clima se autorregulaba —como si la atmósfera fuera un gran termostato— mientras que las glaciaciones, cuyo interés en buscar una explicación había conducido prácticamente toda la investigación sobre el clima en la época, eran otra cosa. La realidad, no obstante, es que muchos de los mecanismos introducidos entonces forman parte, hoy día, del conocimiento incluido en la ciencia del clima y del cambio climático.

Con el paso de los años y, evidentemente, con herramientas mucho más desarrolladas que las que podía emplear Arrhenius —y no digamos Fourier y Tyndall— se ha replicado parte de su trabajo, que resulta, al menos cualitativamente, correcto. Posiblemente, en el avance del estudio del cambio climático se ha hecho poca justicia a lo que hace más de un siglo el científico sueco planteó.

Con respecto a las glaciaciones, a mitad del siglo XIX Croll lanzó la idea de que el movimiento del Sol, la Luna y los planetas afectaban ligeramente a la Tierra y que cambios en la órbita y en la inclinación del eje del mundo podrían ser la causa del inicio de una edad de hielo. No se dio mucho crédito a lo que Croll decía, incluyendo aquí a Arrhenius, pero el serbio Milankovitch, tras años de cálculos siguiendo sus ideas, publicó los resultados a partir de 1920. Sus trabajos constituyen hoy día el punto de partida de la explicación de las edades de hielo.

Se ha de comentar que Arrhenius consideraba que el incremento de la temperatura como consecuencia de la intensificación del efecto invernadero sería favorable para algunos lugares del planeta, como, por ejemplo, su propio país. Un aumento de la temperatura podría ser beneficioso desde un punto de vista económico. Incluso, se realizaban conjeturas sobre la rentabilidad, por ejemplo, en los cultivos, de que el hombre pudiera regular la concentración del CO₂ en la atmósfera, introduciéndolo o retirándolo a voluntad. Han pasado más de cien años y no hemos aprendido a hacerlo, aunque ahora apuntemos a otro fin: lo que llamamos *mitigación*.

Este tipo de reflexiones pueden sorprender hoy día ya que lo que se oye comentar continuamente son los impactos negativos (por otra parte más y más importantes que los positivos) del cambio climático. La razón es que se trata de un fenómeno de escala global y es, por eso, problemático, con independencia de que local o sectorialmente puedan producirse impactos positivos, que, por supuesto, los hay. Continuaremos ahora con la historia que tenemos iniciada (aunque será, obligadamente, parcial), pero haciendo referencia no solo a logros, a avances del conocimiento, sino a científicos que llamaron la atención, a veces entre la incompreensión de sus colegas, de las consecuencias para el clima del desarrollo y aumento de población incontrolados que quedan reflejados en el consumo progresivo de energía.

Para situar este momento en contexto, hay que tener en cuenta que la investigación que comentaremos se desarrollaba al mismo tiempo que la humanidad estaba sumida en otros problemas, ciertamente preocupantes: dos guerras mundiales, arsenales nucleares, guerra fría, etc. Y también en una época de gran competencia (científica y tecnológica) entre las dos superpotencias, de la que la carrera espacial es un buen ejemplo. En la sociedad se llegó a instalar el convencimiento de que el hombre podría llegar a hacer casi todo, como provocar la lluvia para convertir desiertos en verdegales. Entonces, aun admitiendo el efecto en todo el planeta de la actividad humana, no había que preocuparse, se decía, pues la propia humanidad sería capaz de solucionarlo. Estos detalles, y otros muchos, ponen de manifiesto la dificultad

de hacer llegar las alertas —ciertamente preocupantes— a los ámbitos social y político.

Para iniciar esta nueva etapa en nuestra historia, es preciso destacar la presentación por Callendar en 1938 en la *Royal Meteorological Society*, y posterior publicación, de evidencias de que, como consecuencia de la quema de combustibles fósiles, los coeficientes de absorción de radiación del CO₂ y del vapor de agua podrían explicar el incremento en la temperatura media de la atmósfera. Hoy día se diría que la intensificación del efecto invernadero es responsable del calentamiento global. El mismo autor siguió publicando sobre este tema hasta la década de los sesenta.

En los años cincuenta se empieza a poner de moda la posibilidad de modificar la precipitación mediante *siembra de las nubes con partículas* y, en otro orden de cosas, se tiene conocimiento del poder destructor del arsenal nuclear. Aunque se pone de manifiesto en publicaciones, especializadas y no, así como en declaraciones públicas el incremento de la temperatura, se piensa más en intervenciones concretas del hombre o en las pruebas nucleares como responsables. Solo se achacaban a la actividad industrial los efectos sobre la salud de los episodios de contaminación que se producían en las grandes ciudades (Londres o Los Ángeles, eran dos casos importantes). Nadie sabía que la población humana del principio al final del siglo xx se iba a multiplicar por tres, y que el consumo de carbón per cápita (en diferentes formas) lo iba a hacer por cuatro. Las proyecciones de población de Naciones Unidas apuntan a una población de 9.000 millones de habitantes entorno a 2050, cerca de los 10.000 millones, que muchos opinan que es el límite de la capacidad del planeta. En realidad, este es el problema, y el cambio climático no es más que una manifestación, obviamente muy importante; un componente del cambio global, consecuencia de lo anterior.

Mientras tanto, estando los climatólogos y meteorólogos más centrados en tratar de explicar la autorregulación del clima, el interés en la explicación de las edades de hielo —que lo había conducido todo— pasó a concentrarse en especialistas (geólogos, astrónomos, oceanógrafos, geógrafos...) de otros subsistemas del sistema climático.

En los años cincuenta, Revelle, interpretando resultados de los efectos de las pruebas nucleares a unos 300 m por debajo del nivel del mar, pensó que si la radiatividad quedaba *atrapada* podría ocurrir lo mismo con el CO₂ atmosférico. Se trata del inicio del estudio del océano como sumidero de CO₂. Los resultados dejaron preocupado a Revelle, que acuñó una frase que ha llegado a nuestros días: «La humanidad está realizando inadvertidamente un enorme *experimento* sobre la atmósfera»; y se refería al aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y no a las pruebas nucleares, como mucha gente pensó. En un periódico, comentando diferentes intervenciones de Revelle en distintos ámbitos, apareció por primera vez *Global Warming*, casi por primera vez, *Climate Change*. El uso de *Global Warming* (Broecker 1975) se generalizó a partir de 1975, tras la publicación por Wallace S. Broecker —primer Premio Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento en su categoría Cambio Climático— del famoso artículo «Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?», aunque, en el ámbito de la prensa mundial, la frase del científico soviético Mikhail I. Budyko en 1976, «un calentamiento global se ha iniciado», tuvo inicialmente mucho más eco. Se puede decir, además, que fue precisamente Budyko uno de los científicos que más intervino mostrando su preocupación por el cambio climático. En 1961 ya aseguraba que el uso de energía inevitablemente calentaría el planeta. A mediados de los años sesenta planteó un modelo muy simplificado para estudiar el balance de calor en la Tierra que le permitió vislumbrar que podía haber diferentes estados de glaciación en la Tierra. Si eso fuera así, podía llegar un momento en que toda la nieve se fundiera para dar lugar a una Tierra absolutamente sin hielo. En el otro extremo, podría surgir un planeta completamente helado. Esta ideas atrajeron el interés de otro reputado climatólogo, Sellers, que, empleando ecuaciones diferentes de las de Budyko, llegó aproximadamente a las mismas conclusiones. Sellers llegó a decir a finales de los años sesenta que el incremento de las actividades industriales podría conducir a un clima mundial mucho más caluroso que el de la época actual.

Algo casual pero de consecuencias relevantes, por no decir revolucionarias, ocurrió en los años sesenta. Lo que a continuación describiré

puede servir para enlazar con el estado actual del conocimiento sobre el clima y el cambio climático, que veremos en el siguiente capítulo. He leído diferentes versiones de lo ocurrido pero pienso que no son contradictorias. Daré mi propia interpretación, aunque, evidentemente no estaba allí. Debo reconocer que yo me sumergí en este campo, también casualmente, en la década de los ochenta, aunque no he llegado a ser más que un curioso que he utilizado este conocimiento en mis facetas docente y de divulgación, pero no directamente en el ámbito de la investigación.

El personaje es Lorenz, Edward N. Lorenz. Posiblemente se trata del meteorólogo más conocido fuera del ámbito de la especialidad, donde gozaba, inicialmente, de un merecido reconocimiento por sus trabajos sobre la circulación general de la atmósfera, razón primera del rico mosaico de climas que tenemos en la Tierra.

En aquel momento estaban muy de moda los experimentos en laboratorio sobre la circulación general de la atmósfera, con tanques en rotación sometidos a calentamiento diferencial, y sobre la convección. Uno de sus colegas, Saltzman, trabajaba en la llamada convección de Rayleigh-Benard y había encontrado un comportamiento aparentemente anómalo de algunas variables características del problema. Lorenz trató de darle ayuda y lo hizo por dos vías. Por una parte, simplificó las ecuaciones del problema de forma parecida a como se hace con las ecuaciones de la dinámica atmosférica (ambas son casos particulares de las ecuaciones, más generales, de Navier-Stokes). El resultado fue un sistema de ecuaciones muy sencillo, identificado muchas veces como *el problema de Lorenz* o, siendo más justos, de Saltzman-Lorenz. El análisis de las propiedades de ese sistema de ecuaciones condujo al resultado de que la solución presenta sensibilidad a las condiciones iniciales y que las evoluciones temporales de las soluciones, una para cada valor inicial, convergen hacia formas o puntos denominados *atractores*. Hoy día se dice que esas propiedades son un reflejo del comportamiento caótico. Por otra parte, probó que el comportamiento anómalo no era tal, sino que las variables se comportaban de una forma no periódica pero determinista, y en

esta línea tituló su trabajo (Lorenz 1963). Esto lo pudo hacer gracias a haberse dado cuenta de que el comportamiento de las ecuaciones, no lineales, era parecido a lo que ocurría con los cálculos realizados en las computadoras de la época, que iban truncando el número de decimales en cada operación y hacían aparecer resultados insospechados.

Lorenz, con un gran prestigio entre los especialistas por sus investigaciones sobre la circulación general, paso a ser muy conocido por científicos de otros ámbitos a partir del estudio comentado. Tanto es así que muchas veces se dice que fue el padre del caos, que su análisis representó un enfoque absolutamente novedoso de los fenómenos observados que se rigen —digámoslo así— por las leyes de Newton y que sus trabajos suponen una de las tres revoluciones científicas del siglo xx: relatividad, mecánica cuántica y caos.

Desde el punto de vista meteorológico la sensibilidad a las condiciones iniciales pone un límite a la previsibilidad, pues pequeñas diferencias en las variables meteorológicas de partida pueden dar lugar a predicciones totalmente diferentes. Popularmente, y gráficamente, se habla del *efecto mariposa*. Como apareció en la nota necrológica del MIT, en abril de 2008 («Edward Lorenz, padre de la teoría del caos y del *efecto mariposa*, fallece a los 90 años»), el término se debe a la popularización del título de una conferencia pronunciada en 1972, donde se preguntaba si el vuelo de una mariposa en Brasil podría desencadenar un tornado en Texas.

Las consecuencias del trabajo de Lorenz en la predicción meteorológica han sido cruciales. Hoy día, se aborda la predicción por un método, denominado *por conjuntos*, que permite —digámoslo así— contrarrestar el *efecto mariposa* y aportar predicciones del tiempo probabilísticas. Desde el punto de vista de la simulación del clima futuro, implica que no se puede abordar de la misma forma que la predicción meteorológica, pero eso se verá más adelante, en el próximo capítulo.

El comportamiento caótico no es exclusivo de la atmósfera, se produce en otros muchos sistemas, a veces llamados *dinámicos*, que se comportan de forma semejante a ella: con realimentaciones; con evolucion-

nes que son descritas por ecuaciones no lineales; con sensibilidad a las condiciones iniciales; con existencia de *atractores*, a veces denominados *extraños* o *fractales*; con la posibilidad de que se produzcan transiciones a estados de equilibrio muy diferentes, transiciones a partir de las llamadas *bifurcaciones*; con coexistencia de fenómenos de muy diferentes escalas, etc. Todo eso se resume muchas veces como *carácter complejo*, característico de los fenómenos caóticos. Fuera de la meteorología y de la climatología, que evidentemente tienen que lidiar con comportamientos de ese tipo, también se han identificado, por ejemplo, en láseres, dinámica de poblaciones, mercados financieros o en la propia teoría de la evolución.

La última parte de esta historia es más reciente, pertenece ya a nuestros días. Volveremos a ella en el siguiente capítulo, pero vale la pena acabar este con una referencia a Crutzen, uno de los ganadores del Premio Nobel de Química en 1995 por sus trabajos sobre la química del *agujero de ozono*. Crutzen, muy sensibilizado por las consecuencias de la actividad humana en el funcionamiento del sistema Tierra, por lo que se ha venido en llamar *cambio global*, preconiza que el planeta se encuentra en una nueva era, caracterizada por el impacto antrópico. La propuesta terminológica ha sido introducir *Antropoceno* (Crutzen y Stoermer 2000). Para tener mayor información sobre el cambio global en general y su relación con el cambio climático, consúltese Duarte et al. (2009).

2 Observaciones y proyecciones globales

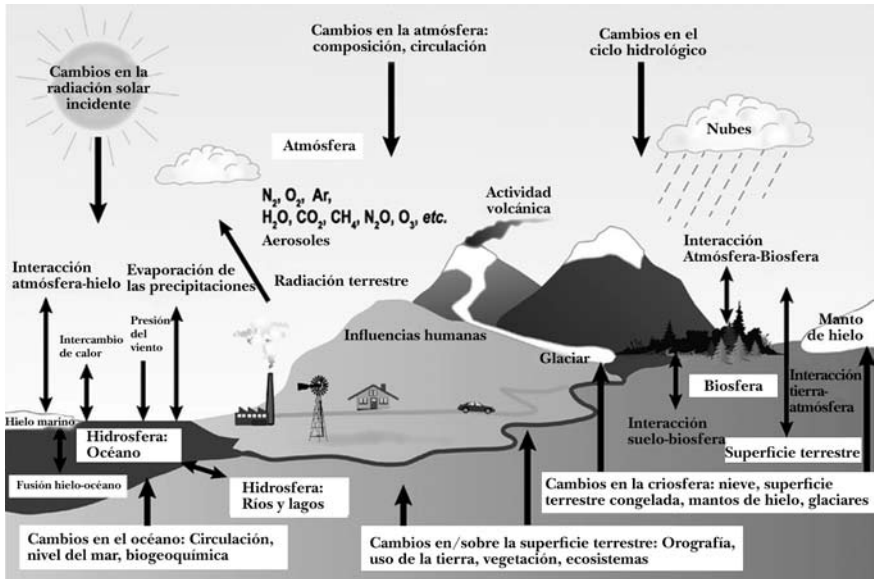
2.1 ¿Por qué la Tierra tiene el clima que tiene?

El clima, que es algo dinámico, cambiante, incluso irreplicable, es consecuencia de la energía que la Tierra recibe del Sol y de los intercambios de energía entre partes diferentes de lo que se llama *sistema climático*, que podemos entender como sinónimo de *planeta Tierra*. Esas partes o subsistemas (véase figura 2.1) son las siguientes:

- a) La *atmósfera*, que es la envoltura gaseosa del planeta y allí donde percibimos el clima.
- b) La *hidrosfera*, formada por el agua presente en fase líquida en la Tierra: océanos, mares, lagos, ríos, etc.
- c) La *litosfera*, corteza sólida emergente de los continentes, o sea, allí donde vivimos.
- d) La *biosfera*, formada por todos los seres vivos.
- e) La *criosfera*, formada por los hielos que cubren parte de océanos y continentes.

El *clima* se puede definir como el estado del sistema climático, caracterizado por sus propiedades estadísticas (valores medios, medidas de la variabilidad, etc.). Se trataría pues de una descripción estadística de las variables ambientales (por ejemplo, temperatura, viento, humedad en superficie o precipitación) usando para ello valores medios y medidas de dispersión (tanto espacial como temporal) en intervalos de tiempo largos, muy superiores a los típicos del tiempo atmosférico.

Figura 2.1 Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones



Fuente: Adaptada de IPCC 2007b, PF 1.2. Figura 1.

Los diferentes subsistemas del sistema climático no presentan tiempos de respuesta a las perturbaciones iguales, ni siquiera en muchos casos parecidos; tienen dinámicas muy diferentes. Mientras unos sufren cambios continuos apreciables (la atmósfera, por ejemplo, con su sucesión de tiempos —soleados, nubosos, ventosos, lluviosos, etc.— tan diferentes), otros lo hacen muy lentamente; tan lentamente, en algunos casos, que, para la vida de una persona o de varias generaciones humanas, no tiene sentido considerar su variabilidad (como sería el caso de la litosfera, a excepción de la capa de suelo más superficial; digamos, allí hasta donde llegan las raíces).

Cuando la energía que se origina en el Sol alcanza la Tierra se distribuye entre todos los subsistemas y se intercambia entre unos y otros, de manera que cada uno de ellos responde de acuerdo con su propia dinámica. De la diferencia entre estos intercambios surge la gran variedad de climas de las distintas regiones de nuestro planeta, que tan bien

conocemos y que son la manifestación de la variabilidad espacial del clima.

Además, el clima presenta también variabilidad temporal. La energía que proviene del Sol no llega en igual cantidad en momentos diferentes, ni los subsistemas del sistema climático se comportan siempre exactamente igual. En consecuencia, no hay que esperar que los flujos de energía que se establecen coincidan exactamente en el transcurso del tiempo. En ciertos intervalos de tiempo, sus estadísticos pueden, más o menos, coincidir, pero no tiene sentido pensar que eso tenga que ser siempre así.

Pero ¿a qué se debe la variabilidad del clima de la Tierra? En principio se puede decir que hay dos tipos de causas; unas son naturales, pero hay otras que no. Estas últimas tienen que ver con la actividad humana. El nivel de conocimiento que se posee sobre los mecanismos que veremos a continuación es, en general, elevado, pero no hay que perder de vista que siempre que hay déficit de conocimiento —y, de hecho, siempre existe déficit en mayor o menor grado— se mantiene un cierto nivel de ignorancia, lo que da lugar a incertidumbres en la interpretación de los fenómenos observados.

Todos los procesos que se producen en el sistema climático, en el planeta, tienen su fuente casi exclusiva de energía en el Sol. La energía emitida viaja por el espacio como radiación electromagnética (denominada *solar* o *de onda corta*) y alcanza la Tierra, que la intercepta, aunque no siempre en igual cantidad ya que la energía interceptada depende de la posición en que el planeta se encuentra en su órbita en las diferentes épocas del año. Además, no toda esa energía es aprovechada por el sistema climático, pues una fracción de ella (denominada *albedo*) es devuelta al espacio por la reflexión que se produce en las nubes y en la superficie de la Tierra. El albedo planetario resulta ser del orden de un 30%. La radiación que no se absorbe a su paso por la atmósfera alcanza la superficie y parte de ella, la que no es reflejada, sirve para calentarla, lo que hace que la superficie emita radiación (en este caso, denominada *radiación terrestre* o *de onda larga*). Una buena parte de esa radiación es absorbida por la atmósfera que la reemite

hacia la superficie o hacia arriba, devolviendo así energía al espacio. En conjunto, para todo el planeta y por término medio en el tiempo, existe balance de energía; sin embargo, no es así en sus diferentes partes ni en todo momento. Son justamente esos desajustes los que condicionan el clima.

Por otra parte, el balance de energía se puede alterar por tres motivos:

1. *Cambios en la energía interceptada por la Tierra.* Estos pueden ser debidos a cambios en la emisión de radiación por el Sol, como consecuencia de su propia actividad, y a cambios en la posición de la Tierra en su órbita alrededor del Sol.
2. *Cambios en el albedo terrestre.* Se deberían tanto a cambios en la nubosidad (ya sea en cobertura o en tipología), como a cambios en las propiedades reflectoras del suelo (tipos de suelos o vegetación) y en la concentración de *aerosoles*, materia particulada que se encuentra en suspensión en la atmósfera.
3. *Cambios en el flujo de energía de onda larga de la Tierra al espacio.* En este caso los cambios serían debidos a la modificación de las propiedades absorbentes de la atmósfera como consecuencia de alteraciones en la composición atmosférica.

En cuanto a la actividad solar se conocen cambios acontecidos en el pasado. Posiblemente el más popular sea el denominado *Mínimo de Maunder*. Se estima que ocurrió entre 1350 y 1850, y fue coincidente con la denominada *Pequeña Edad de Hielo*. Estudios realizados indican que, desde esa época, la radiación puede haber aumentado entre un 0,04% y un 0,08%, con un incremento del 0,05% de 1750 a la actualidad.

Por otra parte, la Tierra no ocupa una posición fija en relación al Sol; describe aproximadamente una trayectoria elíptica, la órbita, con el Sol en un foco. La excentricidad de dicha elipse cambia en el transcurso del tiempo con una periodicidad de unos 100.000 años. Esto hace que la Tierra se encuentre a una distancia del Sol que no viene a ser igual año tras año al recorrer su órbita y que, además, no

está fija en el espacio sino que va cambiando. Asimismo, la inclinación del eje del mundo con respecto al plano de la órbita —inclinación que se denomina *oblicuidad*— no es constante, sino que, como si la Tierra fuera una gran peonza, la prolongación de su eje de rotación señala puntos diferentes de la cúpula celeste en ciclos de alrededor de 41.000 años. Además, la elipse orbital cambia de orientación en el espacio, dando lugar a lo que se llama *precesión de los equinoccios*. Esto hace que las estaciones astronómicas sucedan en diferentes lugares de la órbita con periodicidades aproximadas de 19.000 y 23.000 años. El resultado final es que, aunque fuera constante la energía emitida por el Sol, es diferente la energía incidente en el sistema y, además, se distribuye de forma diferente sobre la superficie del planeta. Lo anterior es la base de la llamada *teoría de los ciclos* de Milankovitch, la cual permite explicar, junto con algún mecanismo interno, la sucesión de las eras geológicas, con glaciaciones y periodos interglaciares (Berger 1988). Como ya se vio en el capítulo anterior esta posibilidad fue introducida, ya en el siglo XIX, por Croll.

Los procesos descritos son externos al sistema climático y no dependen en absoluto del hombre, existiera o no sobre la faz de la Tierra, o tuviera o no capacidad de modificar su entorno. Otra posible causa de cambio de clima en el planeta, también externa y también natural, pero que no guarda inicialmente ninguna relación con la radiación solar recibida en la Tierra, es el impacto de meteoritos o cometas; se sabe que han ocurrido con frecuencia en el pasado, como ya se indicó en el capítulo primero. Se trata de algo difícilmente predecible, pero de consecuencias importantes si el tamaño del objeto es suficientemente grande. Su impacto contra la superficie del planeta puede originar una nube de polvo y/o de agua de tal magnitud que la radiación solar incidente no alcance el suelo con la intensidad anterior al impacto. En esas condiciones, la temperatura puede descender de una forma apreciable, dando lugar a un cambio en el clima. La extinción de los dinosaurios en el llamado *límite K-T*, ya se indicó que se explica a causa del impacto de un meteorito —puede que un cometa— en Chicxulub.

El impacto de un objeto exógeno, aun siendo excepcional en nuestros días, nos puede servir para introducir los cambios relacionados con el albedo. Tras un impacto, se produce un aumento considerable del albedo al aumentar la cantidad de aerosoles (materia particulada) en la atmósfera, lo cual hace que una fracción muy elevada de la radiación solar incidente vuelva al espacio por reflexión. En consecuencia, el sistema climático dispondría repentinamente de menos energía o, incluso, mucha menos, para calentar el suelo con lo cual se alteraría el anterior balance de radiación. El resultado es una disminución de la temperatura del suelo y de la atmósfera próxima al suelo. Sin llegar a esos extremos, cada vez que se produce una erupción volcánica ocurre algo similar. Su efecto sobre la temperatura se ha observado tras las grandes erupciones; la disminución de su valor medio global depende de la intensidad de la erupción y de la altura que alcanzan en la atmósfera las partículas generadas, las cuales pueden permanecer varios años en suspensión.

Los aerosoles considerados hasta el momento son de origen natural, pero en la atmósfera terrestre se encuentran, junto a los naturales, otros muchos que han sido originados por la actividad humana. En general, hacen disminuir la calidad del aire y, además, bastantes de ellos ocasionan problemas de salud. Desde un punto de vista climático, los aerosoles tienen dos efectos. Uno directo, sobre el albedo, que da como consecuencia una disminución de la temperatura, y otro, indirecto, al modificar las condiciones en que se forman las nubes y su duración. La razón es que muchos de los aerosoles actúan como *núcleos de condensación* para iniciar el proceso de formación de gotas de agua en las nubes. El resultado final de este efecto indirecto no es bien conocido y constituye, hoy por hoy, una causa de incertidumbre.

El papel de las nubes en cuanto al albedo depende de la cobertura nubosa, del tipo de nube y de su tiempo de vida. Así, las nubes altas —como, por ejemplo, los cirrostratos— dejan pasar la radiación solar, pero absorben la terrestre, mientras que las nubes medias —por ejemplo, los altocúmulos— impiden casi completamente el paso de la radiación solar. En el primer caso, el efecto sobre la temperatura

sería un incremento, mientras que, en el segundo, daría lugar a un enfriamiento.

El albedo también depende, como se ha dicho, de las propiedades reflectoras de la superficie del planeta. No es lo mismo considerar una superficie helada —posee alto albedo, del 70% al 90%—, que un suelo desnudo, una pradera, o la superficie marina —poseen bajo albedo, inferior al 10%—. La diferente tipología de terreno y de uso del suelo hace que el tratamiento climático de la superficie sea un problema complejo y también fuente de incertidumbre. Dicho esto, hay que recordar aquí la realimentación hielo-albedo comentada en el epígrafe 1.5. Fue identificada en el siglo XIX por Croll y fue considerada por Arrhenius en los primeros cálculos sobre las consecuencias de un cambio de concentración de CO₂ en la atmósfera.

La última forma de modificar el balance de radiación que resta por comentar, bien podría haber sido la primera. De hecho, podemos decir que históricamente lo fue y que se trata de la principal para explicar el cambio de clima que está experimentando el planeta en nuestros días. En primer lugar, se considerará el papel que juega la atmósfera en los intercambios de radiación solar y terrestre, lo que se conoce con el nombre de *efecto invernadero*.

Ya se ha comentado que parte de la radiación que proviene del Sol, aproximadamente un 30%, es reflejada hacia el espacio. Si la Tierra no dispusiera de atmósfera, la superficie del planeta se encontraría a una temperatura media de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, justo la necesaria para mantener el equilibrio energético resultante del balance entre la radiación solar que penetra y la radiación terrestre (infrarroja) que la Tierra emitiría a esa temperatura. Este valor se puede deducir de forma sencilla aplicando la física, en concreto la ley de Stefan-Boltzmann, al balance de radiación descrito.

Por término medio, la energía⁴ que intercepta la Tierra representa la cuarta parte de la llamada *constante solar*, S_0 , cuyo valor aproximado

⁴ En realidad se expresan los términos energéticos por medio del flujo de energía en una unidad de tiempo (potencia) para cada unidad de área.

es de 1.400 Wm^{-2} . Si representamos por α el albedo planetario,⁵ la parte de energía que se aprovecha es $1 - \alpha$, con lo que la potencia que, por término medio, absorbe cada unidad de área de la Tierra es

$$S_0(1 - \alpha) / 4$$

Como estamos considerando que no se tiene atmósfera, esa energía se emplearía para calentar el suelo, que emitiría radiación de onda larga de acuerdo con su temperatura (absoluta), que designamos con T_e y que recibe el nombre de *temperatura de equilibrio*. La ley de Stefan-Boltzmann establece que la potencia emitida por unidad de superficie a esa temperatura es

$$\sigma T_e^4$$

donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, es la constante de Stefan.

El balance de energía implica que se deba cumplir

$$S_0(1 - \alpha) / 4 = \sigma T_e^4$$

expresión mediante la que se puede calcular, con un albedo $\alpha = 0,3$, la temperatura absoluta de emisión del suelo, que resulta aproximadamente, $T_e = 255 \text{ K}$, lo que equivale, expresando esa temperatura en grados Celsius, a $-18 \text{ }^\circ\text{C}$.

La Luna, que no posee atmósfera, se encuentra a una temperatura media como la indicada. Sin embargo, en la Tierra al existir atmósfera, las cosas son radicalmente diferentes. Los constituyentes atmosféricos absorben relativamente poca radiación solar (sobre todo en ausencia de nubes) pero algunos son muy buenos absorbentes para la radiación infrarroja que emite la Tierra y la propia atmósfera. En consecuencia, se produce un calentamiento en las capas bajas de la atmósfera, que modifica el balance de radiación, y alcanza una temperatura media de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ al nivel de la superficie. Este comportamiento de la atmósfera, radiactivamente diferente para la radiación solar que para la terrestre —como había ya anticipado Fourier—, es el *efecto invernadero*. Se trata

⁵ Se trata de una fracción; α tendría valor 1 para un albedo del 100%.

de un nombre popular recibido por guardar cierta semejanza con el comportamiento de esa estructura, pese a que físicamente son muy diferentes. En los invernaderos la cobertura física favorece el calentamiento del aire al impedir la convección, cosa que no ocurre en la atmósfera. Pese a eso, el término está ahora científicamente aceptado.

El principal responsable del efecto invernadero, coincidiendo con las deducciones experimentales de Tyndall, es el vapor de agua (aproximadamente en un 80% del efecto total) y, el segundo, a bastante distancia, el dióxido de carbono, CO_2 . El efecto invernadero —al que muchas veces se le añade el calificativo *natural*— es decisivo en el clima que posee el planeta y ha permitido la vida, al menos en la forma que la conocemos. Como ya se indicó, los gases que contribuyen al efecto invernadero se llaman *gases con o de efecto invernadero* (GEI). Tras lo dicho, debe resultar evidente que el papel de los aerosoles y de las nubes se puede discutir también en términos del efecto invernadero, al contribuir a potenciarlo o a debilitarlo, según el caso.

Cualquier cambio que se produzca en la composición atmosférica, o en la concentración de sus componentes, altera las propiedades de absorción y, en consecuencia, el efecto invernadero. La composición de la atmósfera desde el origen de Tierra ha sido cambiante, como ya se indicó en el apartado 1.4. Ahora predominan nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), aunque los mayores contribuyentes al efecto invernadero son el vapor de agua (cuya concentración no supera el 4% en volumen de la atmósfera) y el CO_2 (con una concentración mucho menor, en la actualidad del orden de unas 385 ppm).⁶ Si la composición atmosférica cambia, se modifica el efecto invernadero y, en consecuencia, la temperatura media superficial del planeta. Anteriormente a la revolución industrial, la concentración media global del dióxido de carbono era del orden de 280 ppm mientras que en la actualidad es, como se ha

⁶ Partes por millón, medida de concentración para constituyentes poco abundantes. Equivale a una fracción molar de $\mu\text{mol}/\text{mol}$. De forma semejante, una fracción molar de nmol/mol se representa por ppb (partes por billion —‘mil millones’—) y pmol/mol por ppt (partes por *trillion* —‘billón’ en castellano—). Si se toma en consideración el comportamiento no ideal de los gases, a veces se utilizan concentraciones en volumen (ppmv, ppbv, pptv) diferentes de las anteriores. Intuitivamente equivale, aproximadamente, a una molécula de entre un millón.

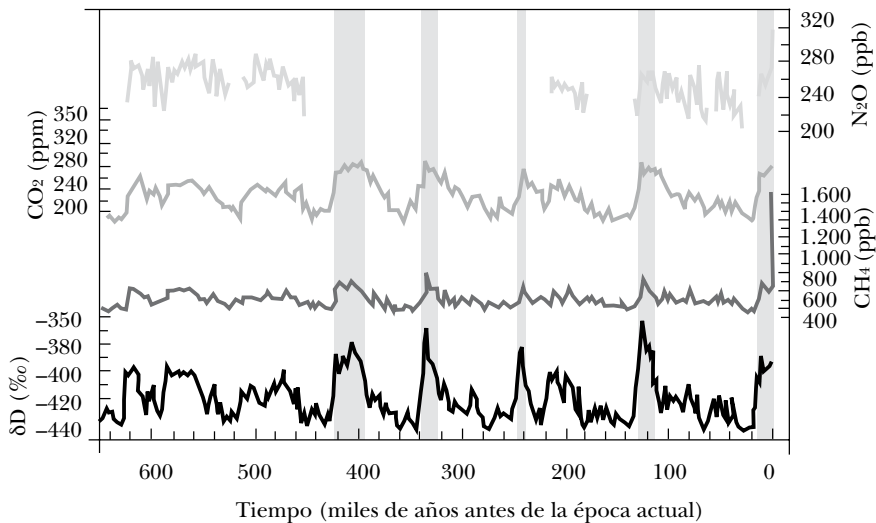
dicho, de unas 385 ppm. En estas condiciones, el efecto invernadero natural que se produce en el planeta está siendo modificado desde la revolución industrial. Como la concentración de CO_2 ha aumentado (pero también la de otros GEI, como metano, óxido nitroso, CFC, etc.), el efecto invernadero se ha intensificado, ha habido más energía disponible en las capas bajas de la atmósfera y, por tanto, se han venido creando las condiciones para que se produzca un calentamiento planetario. Esto —hay que repetirlo— no se trata de una especulación moderna; como ya se comentó, a finales del siglo XIX Arrhenius llegó a hacer una estima cuantitativa de las consecuencias sobre la temperatura.

Analizando el aire de las burbujas atrapadas en los testigos extraídos del hielo polar se puede obtener información sobre la evolución de la concentración de algunos gases de efecto invernadero en épocas pasadas y compararla con la actual. En el gráfico 2.1 están representados los valores de las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4) para los últimos 650.000 años. Se observa que los valores actuales exceden, por mucho, a los previos, incluso en los periodos cálidos de las glaciaciones, marcados en bandas sombreadas en la gráfico 2.1. En la parte baja de ese gráfico se representa también la variación de deuterio, δD , en el hielo ártico, que se utiliza como medida indirecta de las variaciones de temperatura. Nótese el valor de δD para los anteriores periodos cálidos y el actual, y la gran diferencia en las concentraciones de gases de efecto invernadero.

A diferencia del presente, en que la relación GEI-temperatura está claramente establecida y el origen antrópico del cambio en los gases con efecto invernadero probado, en el pasado hay muchos aspectos de esa relación que aún se están investigando. Se piensa que en el Cuaternario los cambios en la concentración de CO_2 se pudieron producir por la actuación simultánea de procesos biológicos y químicos en el océano y también conducidos por cambios de temperatura. En épocas anteriores, hace millones de años, en que sí se dieron situaciones con concentraciones de CO_2 muy superiores a las actuales, se piensa que fueron procesos tectónicos, como la actividad volcánica, los que determinaron los cambios de concentración.

Con posterioridad a la publicación de del informe del IPCC de 2007, se amplió el horizonte temporal del gráfico 2.1. La interpretación de los resultados referidos a las concentraciones de GEI hasta 800.000 años (Lüthi et al. 2008; Loulergue et al. 2008) coincide con lo visto más arriba para los últimos 650.000 años.

Gráfico 2.1 Evolución de la concentración de gases de efecto invernadero en el hielo ártico para los últimos 650.000 años



Variaciones de deuterio (δD) en el hielo ártico, representativo de la temperatura local, y las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nítrico (N_2O) en el aire, atrapadas en los testigos de hielo y de mediciones atmosféricas actuales. Los datos cubren 650.000 años y las líneas sombreadas representan períodos interglaciares cálidos, el actual y los pasados.

Fuente: Adaptado de IPCC 2007b, Gráfico RT.1.

Como se indicó en el epígrafe 1.4, la atmósfera de Venus era inicialmente muy parecida a la de la Tierra, pero la imposibilidad de formación de agua líquida, debido a su mayor proximidad al Sol, provocó una evolución diferente de los dos planetas en cuanto al efecto invernadero, evidentemente. La atmósfera de Venus ha llegado a estar constituida

casi por completo (97%) por CO_2 y se ha ido produciendo una intensificación del efecto invernadero, de forma natural en este caso, muy considerable. Como resultado se ha alcanzado una temperatura media en su atmósfera, a nivel de la superficie, del orden de $460\text{ }^\circ\text{C}$, extraordinariamente superior a la que sería su temperatura de equilibrio entre la radiación solar, de onda corta, y la radiación de onda larga. La determinación de su valor, aplicando también la ley de Stefan-Boltzmann, nos lleva a unos $-50\text{ }^\circ\text{C}$. Estando Venus más cerca del Sol que la Tierra, no debe sorprender esta temperatura tan baja, comparada con la de nuestro planeta, ya que Venus presenta un albedo del 80%, muy superior al terrestre, como ya se ha dicho del 30%.

Pero volvamos a la Tierra. Hemos visto cómo funciona el sistema climático planetario y también hemos visto cómo se puede alterar el balance de energía, lo que explicaría una parte de la variabilidad del clima, insisto, a escala planetaria, globalmente. Para descender a otras escalas hay que considerar aspectos de la llamada *circulación general*; en principio, de la atmósfera, pero también oceánica. Solo daremos aquí un par de tenues pinceladas.

Para empezar, es necesario volver a poner de manifiesto que son muchas las variables que intervienen en la caracterización del clima. De ellas, algunas permanecen en su conjunto inalterables; decimos que se conservan. La energía, aunque no es la única, es una de estas variables y, de hecho, en parte ya hemos considerado anteriormente esta propiedad al hablar del balance de energía. Ahora veremos otro aspecto.

La energía procedente del Sol que intercepta la Tierra no llega por igual a todos los puntos del planeta, en parte como consecuencia de su forma esférica (mejor dicho, casi esférica). Tampoco la energía disipada por la Tierra, que devuelve al espacio, se emite por igual desde todos los puntos, al depender, como ya hemos visto, de la temperatura. Por término medio, en cada hemisferio, hay una ganancia neta de energía en latitudes bajas (entre unos 40° N y 40° S), al aprovecharse más energía procedente del Sol de la que disipa la Tierra como radiación infrarroja, y una pérdida en el resto, ya que se disipa al espacio más energía de la

que llega como radiación solar. La tendencia natural a uniformizar heterogeneidades, aunque no se consiga, hace que se establezca un flujo de energía desde las latitudes bajas hacia los polos, lo que constituye un componente de la circulación general. En la literatura se describe de forma elemental mediante un modelo conceptual constituido por las llamadas *célula de Hadley* (en latitudes bajas), *célula de Ferrel* (en latitudes medias) y *célula polar*. Tres células para cada hemisferio, por término medio, que no se encuentran ancladas a la Tierra sino que se ven modificadas en su conjunto al pasar de la estación de verano a la de invierno de cada hemisferio. Podemos decir que su situación determina los denominados centros de acción, zonas de altas o bajas presiones, los sistemas de vientos y, en parte, también las corrientes oceánicas.

La contraparte oceánica de la circulación general de la atmósfera la constituyen las corrientes oceánicas (mapa 2.1) que, asimismo, participan en el transporte de energía en colaboración con las células atmosféricas.

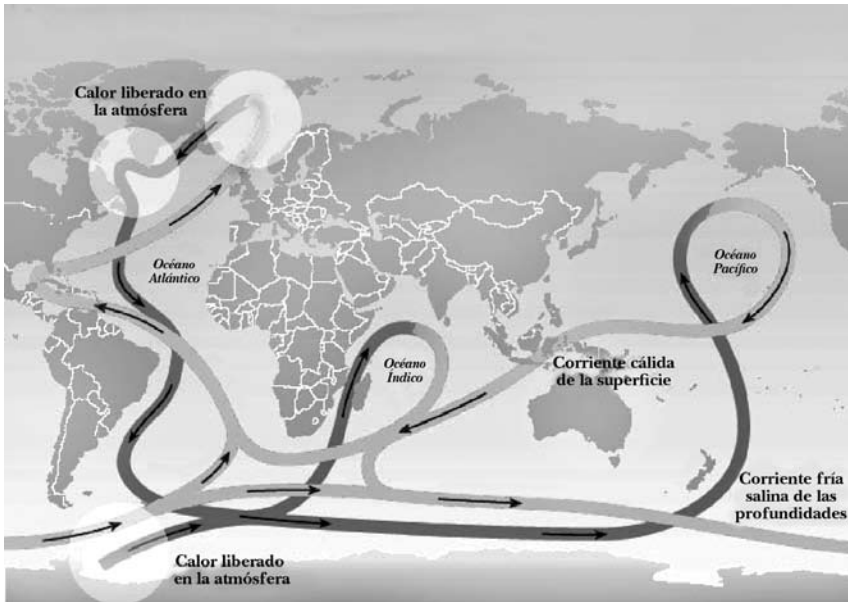
Las corrientes oceánicas también intercambian energía con la atmósfera, dependiendo de las temperaturas de ambas. El sistema de corrientes recibe el nombre de *circulación termohalina* (CTH) y, más popularmente, también *cinta transportadora oceánica*. El adjetivo *termohalino* hace referencia al hecho de que la densidad del agua depende tanto de la temperatura (*termo*) como de la salinidad (aunque no es de uso generalizado, *halino*).

La rama cálida de la CTH en el Atlántico Norte recibe el nombre de *corriente del Golfo* y es una de las responsables del flujo de energía que, como se describió anteriormente, tiende a homogeneizar la heterogeneidad existente en el balance de energía. Las implicaciones climáticas de dicha corriente las notamos en Europa occidental que goza de un clima más suave que el equivalente en la costa Este del subcontinente norteamericano.

La CTH participa del transporte de energía, junto con la atmósfera, pero también del ciclo hidrológico, como se verá después. Es interesante hacer notar que la densidad del agua oceánica cambia no solo al intercambiar energía en forma de calor sino también por evaporación y

al incorporar agua dulce, ya sea de la precipitación sobre su superficie o de la aportada por los ríos. Por evaporación aumenta la salinidad, mientras que esta se reduce al recibir agua dulce.

Mapa 2.1 La gran cinta transportadora de los océanos



La imagen ilustra de manera esquemática el sistema mundial de circulación oceánica, formado por las principales vías de circulación termohalina norte-sur en cada cuenca oceánica, que se juntan en la circulación circumpolar antártica. Las corrientes cálidas de la superficie y las frías en la profundidad se conectan en las escasas zonas de formación de aguas profundas en latitudes altas del Atlántico y alrededor del Antártico (gris oscuro), en donde tienen lugar las principales transferencias de calor del océano a la atmósfera. Este sistema de corrientes contribuye en gran medida al transporte y redistribución del calor (como las corrientes que fluyen hacia el Polo en el Atlántico Norte, que aumentan la temperatura en el noroeste de Europa hasta en 10 °C). Las simulaciones indican que la rama de este sistema de circulación correspondiente al Atlántico Norte es especialmente vulnerable a cambios en la temperatura atmosférica y en el ciclo hidrológico. Dichas perturbaciones causadas por el calentamiento mundial podrían desestabilizar el sistema actual, lo que tendría graves impactos en el clima regional o incluso hemisférico. Conviene observar que se trata de un diagrama esquemático y no proporciona los emplazamientos exactos de las corrientes de agua que forman parte de la CTH.

Fuente: Adaptada de IPCC 2001b, Figura 4-2.

De modo semejante a la energía se podría razonar con respecto a otras propiedades conservativas del sistema climático, aunque solo se hará aquí referencia al agua. La conservación de su masa —considerando el total

en sus fases sólida, líquida y gaseosa— establece el denominado *ciclo del agua* o *ciclo hidrológico*. Primeramente, es necesario aclarar que no es independiente del ciclo de la energía, pues cada vez que se produce un cambio de fase, por ejemplo, en la evaporación o en la condensación, entra energía en juego. Pues bien, la evaporación y la precipitación tampoco están uniformemente distribuidas sobre la superficie de la Tierra. Hay lugares donde la precipitación supera a la evaporación, mientras que en otros la evaporación es mayor que la precipitación. Si se habla también por término medio, la evaporación supera a la precipitación en latitudes intermedias, mientras que ocurre lo contrario en bajas y altas latitudes. Por otra parte, la precipitación supera a la evaporación sobre la tierra emergida, mientras que ocurre lo contrario sobre la superficie oceánica. En principio, las corrientes atmosféricas deben transportar vapor de agua de donde lo hay en exceso a allí donde falta. Eso es lo que ocurre precisamente desde latitudes intermedias hacia las tropicales y hacia las polares, por término medio y gracias a la circulación atmosférica. Asimismo, el régimen de vientos debe, también por término medio, soplar de océanos a continentes. Después, las corrientes fluviales, subterráneas y marinas deben transportar agua líquida hacia donde sea necesaria para alimentar la evaporación. Esta es la forma en que se cierra el ciclo.

En conjunto, la conservación de la energía y la conservación de la masa de agua establecen un esquema simple, aunque empieza ya a poseer una cierta complejidad, de la circulación general tanto para la atmósfera como para el océano. En última instancia, junto con particularidades geográficas de diferentes escalas espaciales, así es como se dibuja el mosaico de climas del planeta Tierra.

2.2 El clima en el Antropoceno. Observaciones del cambio climático

En el apartado anterior se ha visto cómo funciona el sistema climático, cuáles son los *motores* del clima, las causas de su variabilidad natural y también la razón por la que puede cambiar como consecuencia de las actividades humanas. Sin embargo, las actividades humanas no solamen-

te producen cambios en el clima, lo hacen en todo el planeta; unas veces de forma directa y otras de forma indirecta, como consecuencia, por ejemplo, del cambio climático. Todo eso se engloba con el nombre de *cambio global*, del que el cambio climático sería un componente. Vale la pena leer la pequeña descripción de Crutzen y Stoermer (2000) para introducir su propuesta del *Antropoceno*⁷ y consultar Duarte et al. (2009).

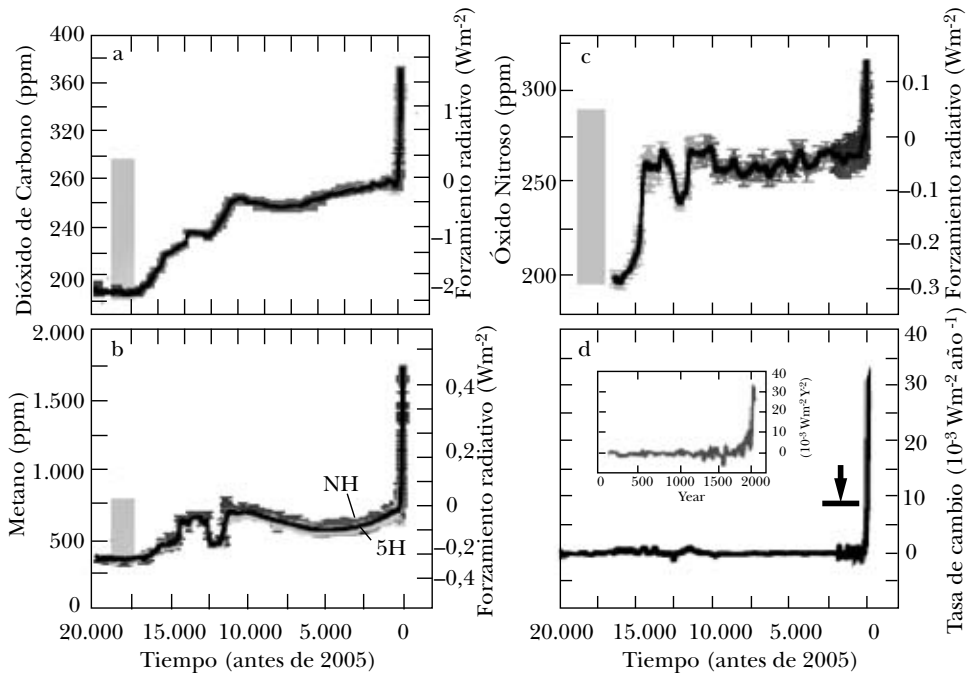
Si hubiera que decidir una única causa del cambio global y, por lo tanto, del cambio climático, habría que inclinarse por el consumo de energía. Escuché en una ocasión un comentario neomaltusiano por el que la evolución de la población humana presentaba características de *plaga*. El crecimiento de una especie se dispara, apareciendo una plaga, cuando se produce un desequilibrio; por ejemplo, al desaparecer un depredador. Si pensamos en la humanidad ¿cuál sería el depredador? O mejor, ¿qué actuaría como depredador? Sin lugar a dudas, la energía. El *Homo sapiens* utilizaba inicialmente la energía de sus músculos, que en el fondo es solar. Más tarde, y hasta hace relativamente poco (tan poco que en algunos lugares aún es así), utilizaba también la de los animales domésticos que, por la misma razón que en los humanos, seguía siendo solar. El cambio radical surge con la invención de la máquina de vapor en 1784 por Watt. ¡Ahí es justamente donde Crutzen y Stoermer sitúan el inicio del Antropoceno! Y sería entonces cuando se habría empezado a romper el control que la energía imponía a la humanidad. La quema de carbón, de combustibles fósiles y la energía atómica han permitido tener mucha más energía disponible, es cierto, pero forman parte del problema. Desde el punto de vista climático, la quema de combustibles ha generado gases de efecto invernadero, lo que ha llevado a que se alterara el efecto invernadero natural y a evolucionar el clima de una forma distinta a como lo hubiera hecho de forma natural. Esto es, en pocas palabras, lo que está pasando en el Antropoceno.

En el gráfico 2.2 están representadas (paneles a, b y c, respectivamente) las variaciones de concentración de CO₂, metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) desde hace unos 20.000 años. En la escala de la izquier-

⁷ También puede consultarse en www.mpch-mainz.mpg.de/~air/anthropocene/.

da de esos paneles aparece la concentración del correspondiente GEI, mientras que en la escala de la derecha se representa el denominado *forzamiento radiativo*, equivalente de la intensificación del efecto invernadero que implica el aumento de concentración de los gases indicados, expresado en las mismas unidades que la radiación (Wm^{-2}).

Gráfico 2.2 Variaciones en las concentraciones de CO_2 , CH_4 y N_2O desde hace 20.000 años



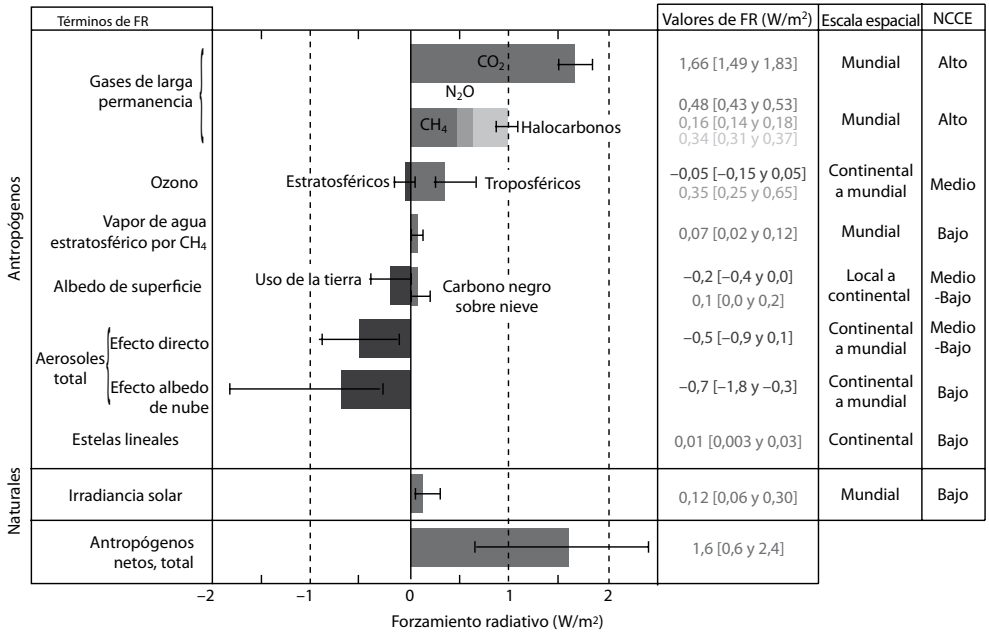
El gráfico ilustra las concentraciones y forzamiento radiativo del (a) dióxido de carbono (CO_2), (b) metano (CH_4), (c) óxido nitroso (N_2O) y (d) la tasa de cambio de su forzamiento radiativo combinado durante los últimos 20.000 años reconstruida a partir del hielo antártico y de Groenlandia y de datos de nieve granular y mediciones atmosféricas directas (paneles a, b, c). Las barras grises (a la izquierda, en los paneles a, b, c) muestran los niveles de variabilidad natural reconstruidos durante los últimos 650.000 años. La tasa de cambio del forzamiento radiativo (panel d) se calculó mediante una curva de ajuste *spline* de los datos de concentración. La resolución temporal varía desde aproximadamente 20 años para lugares con gran acumulación de nieve como Law Dome, Antártida, hasta aproximadamente 200 años para lugares con poca acumulación como Dome C, Antártida. La flecha muestra el pico en la tasa de cambio del forzamiento radiativo que resultaría si las señales antropogénicas de CO_2 , CH_4 y N_2O se suavizaran de acuerdo con las condiciones de baja acumulación en el Dome C. La tasa de cambio negativa del forzamiento, aproximadamente en 1.600, en el panel de alta resolución insertado en d, es debido a una disminución del CO_2 de unas 10 ppm en el registro del Law Dome.

Fuente: Adaptada de IPCC 2007b, Gráfico RT.2.

De esos tres paneles se deduce que el cambio experimentado por los gases de efecto invernadero tras la revolución industrial no tiene precedente reciente: mientras que la concentración atmosférica de CO_2 aumentó solo 20 ppm durante los 8.000 años previos a la industrialización, a partir de 1750 la concentración de CO_2 ha aumentado más de 100 ppm. Aproximadamente las dos terceras partes de ese incremento se deben a la quema de combustibles fósiles, y el tercio restante, al cambio de usos de la tierra. En el panel *d* se representa el ritmo de cambio del forzamiento combinado de los mismos tres gases, lo cual da como valor integrado $1,6 \text{ Wm}^{-2}$ desde 1750. Ya se vio en el apartado 2.1 que tampoco existe precedente de las concentraciones de GEI en la atmósfera desde al menos 800.000 años.

Se puede utilizar el forzamiento radiativo para comparar las diferentes contribuciones —naturales y antrópicas— a la intensificación o debilitamiento, según el caso, del efecto invernadero. En la figura 2.2 se pueden ver los forzamientos de cada componente considerado. La mayor contribución al forzamiento es debida a cambios en los gases de efecto invernadero que permanecen un largo tiempo en la atmósfera (CO_2 , N_2O , CH_4 y derivados halogenados del carbono, también conocidos por CFC). En conjunto, en la mejor estimación realizada, se les asigna un forzamiento de $2,64 \text{ Wm}^{-2}$, con márgenes de variabilidad que aparecen también en la figura 2.2. Es interesante comentar el caso del ozono (O_3), pues el que está presente en la capa más baja de la atmósfera, troposfera, actúa intensificando el efecto invernadero, mientras que el estratosférico, implicado en el llamado *agujero de ozono*, actúa debilitándolo. Por esta razón, como se verá después, existe una tendencia al enfriamiento en la estratosfera.

El cambio de concentración del vapor de agua estratosférico, originado a partir de metano (CH_4), intensifica también el efecto invernadero. Del resto de la contribución antrópica, el cambio de albedo contribuye ligeramente a la moderación del efecto invernadero, mientras que los aerosoles representan el principal forzamiento negativo ($-1,2 \text{ Wm}^{-2}$), frente a la contribución positiva de las estelas de los aviones, que resulta irrelevante.

Figura 2.2 Componentes del forzamiento radiativo

Promedio mundial del forzamiento radiativo (FR) en 2005 (estimaciones óptimas y horquilla de incertidumbres del 5 al 95%) respecto de 1750 para CO₂, CH₄, N₂O y otros agentes y mecanismos importantes, extensión geográfica típica (escala espacial) del forzamiento y nivel de conocimiento científico (NCCE) evaluado. Los aerosoles procedentes de erupciones volcánicas explosivas añaden un término de enfriamiento episódico durante cierto número de años después de una erupción. En el intervalo de valores de las estelas de condensación lineales no se incluyen otros posibles efectos de la aviación sobre la nubosidad.

Fuente: Adaptada de IPCC 2007b, Figura RRP.2.

En cuanto al forzamiento natural solo aparece en la figura el cambio de radiación solar, cuantificado en 0,12 Wm⁻². No aparece representada, sin embargo, la contribución de las grandes erupciones volcánicas.

Hay dos aspectos del cambio de clima actual, del cambio climático, que conviene remarcar. El primero es que, a diferencia de los anteriores, el cambio climático tiene una escala temporal tan corta que se pueden apreciar los cambios en el clima en un periodo de tiempo comparable con el de la vida de una persona. El segundo es que nunca antes la

humanidad había tenido capacidad para perturbar el clima en todo el planeta. Se da la circunstancia de que el clima de la Tierra permitió la vida, incluida la humana y, finalmente, la especie humana ha sido capaz de modificarlo. Estas dos características permiten asegurar que, estrictamente hablando, no existe en los cambios de clima del pasado precedentes del cambio de clima actual.

Señala el IPCC en su cuarto y último informe (IPCC 2007) que en relación con el tercer informe (se emplean los acrónimos TAR para el tercero y AR4 para el cuarto) se tienen ahora mejores bases de datos, más evidencias, mayor cobertura geográfica y mejor comprensión de las incertidumbres. En consecuencia, se indica en AR4 que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como se deduce de las observaciones de aumento de las temperaturas medias a escala planetaria del aire y del océano, fusión general de nieve y hielo, y elevación global del nivel medio del mar.

Con respecto a la temperatura media, a escala planetaria, del aire junto al suelo, en TAR (IPCC 2001) se había calculado el calentamiento para el intervalo 1901-2000 y se obtuvo una tendencia lineal de $0,6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ por siglo, valor que se ve superado por el calculado en AR4 para 1906-2005, de $0,74 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,18 \text{ }^\circ\text{C}$ por siglo. Esta aceleración del calentamiento se pone más claramente de manifiesto si se emplean solo los últimos 50 años de los cien indicados (1956-2005) y, más aún, con los últimos 25. En estos casos la tendencia lineal resultante es $1,28 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,26 \text{ }^\circ\text{C}$ por siglo, y $1,77 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,52 \text{ }^\circ\text{C}$ por siglo, respectivamente.⁸ Muy probablemente los aumentos de temperatura reseñados no tienen precedente en la Tierra durante los últimos 16.000 años, por lo menos.

Una forma de poner en evidencia la mencionada aceleración del calentamiento es por medio de los *records* de temperatura que se batan con frecuencia. Cuando se presentó el informe AR4 se dijo que anali-

⁸ El calentamiento se ha observado en la temperatura media global en superficie y en la troposfera. En niveles superiores, por ejemplo, en la estratosfera se ha observado un enfriamiento desde 1979 entre $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ y $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$ por década, aunque se ha reducido en los últimos años.

zados los doce años más calurosos, desde que existen valores registrados hasta 2006, diez correspondían a los más recientes. Por orden eran 1998, 2005, 2003, 2002, 2004, 2006, 2001, 1997, 1995, 1999, 1990 y 2000, exceptuando únicamente 1996 y 1994. Considerando los cuatro últimos años, todos ellos están entre los doce más calurosos de la historia, incluso es así para el año más frío del siglo, el 2008. Sin embargo aún no se ha conseguido el *pleno* de doce sobre doce. La relación ordenada es ahora: 1998, 2005, 2010, 2003, 2002, 2004, 2009, 2006, 2001, 2007, 1997, 2008. En este caso no aparecen en la lista 2000 y 1999, que sí estaban en la anterior.

Se han observado, asimismo, cambios en la frecuencia de valores extremos de la temperatura, que resultan consistentes con el calentamiento en las capas bajas de la atmósfera. Así, ha disminuido el número de noches frías y con escarcha, mientras que ha aumentado la frecuencia de días y noches cálidos y de olas de calor.

Si se analizan la distribución espacial de las tendencias (mayores sobre tierra que sobre los océanos) y los valores estacionales, se encuentran diferencias importantes en comparación con las tendencias globales indicadas anteriormente. Lo mismo ocurre si se calculan las tendencias por separado para temperaturas máximas y mínimas.

A modo de ejemplo, se ofrecen los resultados de un análisis de la tendencia de la temperatura en Illes Balears a partir de una serie de 32 años, hasta 2008, todavía inéditos.⁹ Para la temperatura máxima se ha obtenido una tendencia de $4,01\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,93\text{ }^{\circ}\text{C}$ por siglo, mientras que para la mínima se alcanza $4,80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,86\text{ }^{\circ}\text{C}$ por siglo. Los máximos valores se han encontrado en primavera: para la máxima resulta $6,78\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ por siglo, mientras que para la mínima es $6,67\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ por siglo. Es importante señalar las grandes diferencias encontradas con respecto a los valores globales, incluso con el mayor de los citados anteriormente que corresponde a una serie de 25 años.

⁹ Los últimos valores publicados y el método de cálculo se pueden encontrar en Homar et al. (2010).

La temperatura media en el océano también ha aumentado, al menos hasta profundidades de unos 3.000 m. Se estima que desde 1955 el océano ha absorbido del orden del 80% del exceso de calor consecuencia de la intensificación del efecto invernadero. De lo anterior deriva como consecuencia una dilatación del agua marina y una importante contribución a la elevación del nivel del mar.¹⁰

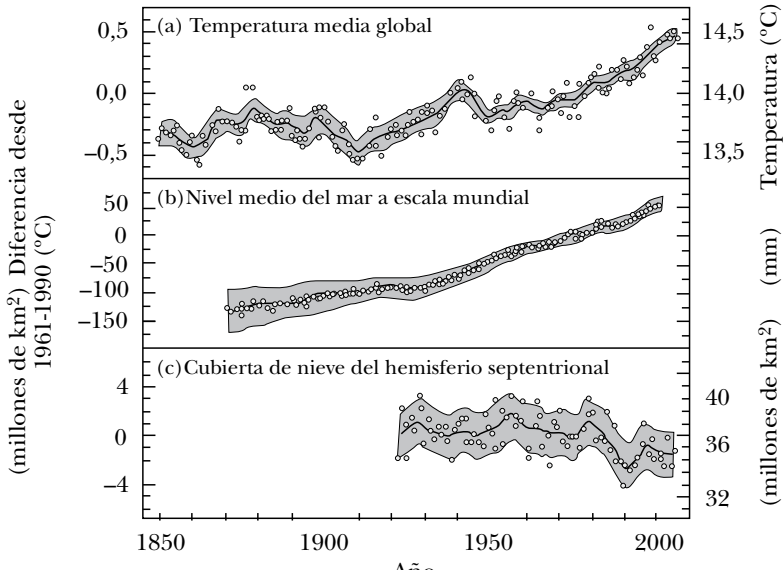
Además, hay que señalar cambios importantes en la criosfera. Por ejemplo, el hielo marino ártico ha disminuido su superficie por término medio un 2,7% por década, y se ha intensificado esta reducción en los veranos del hemisferio norte, donde ha sido del 7,4%. Especialmente notable fue la reducción de superficie cubierta por hielo —por lo menos con un 15% de hielo— en el verano de 2007, una vez elaborado AR4. El valor medio de la superficie cubierta presenta un mínimo en verano de 7,04 millones de km² (media en 1979-2000) mientras que en septiembre de 2007 se llegó a solo 4,28 millones de km², la menor superficie desde que existen satélites de observación de la Tierra. Los valores para los veranos siguientes siguen estando por debajo de la media anteriormente indicada, y han alcanzado el verano de este año una superficie muy próxima al récord.¹¹

En el gráfico 2.3 se resumen los cambios observados en el último siglo y medio, para el valor medio global de la temperatura en superficie (panel *a*), para el nivel medio del mar (panel *b*) y para la superficie del hemisferio norte cubierta de nieve (panel *c*). En la escala de la izquierda de cada panel de la figura se presenta la variación experimentada en cada caso con respecto al valor medio 1961-1990.

¹⁰ La variación del nivel del mar es un problema complejo, fuera del alcance de este libro. Desde un punto de vista climático las principales contribuciones, casi por igual, se deben a la dilatación del agua marina (incluyendo el efecto de la salinidad) y a la fusión de los hielos continentales. En escalas de tiempo geológicas se han producido cambios del nivel del mar muy importantes; por ejemplo, se estima que en las glaciaciones el mar se encontraba al menos 100 m por debajo del nivel actual.

¹¹ Información extraída de <http://nsidc.org/arcticseaicenews/index.html>, consultada el 6/10/2011.

Gráfico 2.3 Cambios en temperatura, nivel del mar y manto de nieve en el hemisferio septentrional



Cambios observados en (a) la temperatura media de la superficie mundial, (b) el promedio del nivel del mar mundial según datos de mareógrafos y de satélites y (c) la cubierta de nieve del hemisferio septentrional en marzo-abril. Todos los cambios son respecto a los promedios correspondientes al periodo 1961-1990. Las curvas suavizadas representan los valores promedio por decenio mientras que los círculos muestran los valores anuales. Las áreas sombreadas indican los intervalos de incertidumbre estimados por un análisis integral de las incertidumbres conocidas (a y b) y de las series de tiempo (c).

Fuente: Adaptada de IPCC 2007b, Figura RRP.3.

El régimen pluviométrico mundial también se está viendo afectado por el cambio climático. En primer lugar hay que decir que se ha producido un incremento continuo del contenido total de vapor de agua en la atmósfera, coherente con el aumento de temperatura en la troposfera. La precipitación se ha visto desigualmente modificada en diferentes áreas geográficas. Mientras ha aumentado de forma significativa en zonas orientales de América del Norte y del Sur, Europa septentrional y Asia septentrional y central, el clima es ahora más seco en el Sahel, Mediterráneo, África meridional y parte de Asia meridional. Si se atiende a los extremos, por una parte, la ocurrencia de episodios

de lluvias fuertes ha aumentado de frecuencia sobre la mayor parte de áreas de la Tierra, pero, por otra, se han observado sequías más intensas y duraderas desde la década de los setenta, particularmente en trópicos y subtropicos, a veces combinadas con inundaciones en las mismas zonas geográficas.

Es difícil obtener tendencias globales para la precipitación debido, sobre todo, a la característica discontinuidad de la variable y a los métodos de medida. Como ejemplo, de escala mucho menor, se ofrecen a continuación resultados inéditos de un análisis de la tendencia de la precipitación en Illes Balears a partir de una serie de 57 años, hasta 2008. Suavizando la serie de precipitación anual mediante acumulaciones de 5 años, se ha obtenido una tendencia de -50 mm por siglo, aunque con un nivel de confianza muy bajo (inferior al 33%, improbable según la clasificación que emplea el IPCC). Si se divide el periodo de análisis en dos intervalos, la media 1951-1979 de la precipitación anual estaba aproximadamente en 639 mm, mientras que en 1980-2008 ha sido de cerca de 570 mm. Esto representa una disminución de la precipitación de unos 24 mm por década que, extendida a un siglo, representaría una pérdida relativa de más del 37% de la precipitación. Esta reducción no se ha dado por igual en todas las estaciones del año ni para todos los tipos de precipitación. Las disminuciones han sido mayores en primavera y, sobre todo, en invierno, pero menores en otoño y verano, ligadas a una disminución del número de días con lluvias moderadas, aunque ha aumentado el número de días con lluvias débiles y, en menor medida, los de lluvias fuertes.

Los cambios observados en el régimen pluviométrico se explican, en parte, por el aumento indicado del contenido de vapor de agua en el aire, pero también por el cambio que se ha producido en patrones de circulación atmosférica característicos de la variabilidad natural del clima, entre otros la oscilación del Atlántico Norte (NAO, de su nombre en inglés) y el fenómeno de El Niño/oscilación austral (ENSO, de El Niño/*Southern Oscillation*). Estos dos modos de variabilidad natural del clima, y otros que no se van a comentar aquí, influyen

en el clima de diferentes lugares del planeta, digamos, a distancia. En términos generales se denomina *teleconexión* a este tipo de influencia. Por ejemplo, con diferente intensidad tanto NAO como ENSO tienen su reflejo en el clima en nuestro entorno. El primero, influye en la precipitación, sobre todo en la vertiente atlántica de la Península Ibérica, de forma clara ya que los centros de acción origen de esta variabilidad (anticiclón de las Azores y baja de Islandia) se encuentran próximos a la Península. Es menos clara la influencia ENSO en nuestras latitudes. El origen de la variabilidad se halla en el Pacífico tropical y, en consecuencia, la señal llega ya muy debilitada. Sin embargo, parece haber en la intensidad de los ciclones mediterráneos alguna influencia con este modo tropical. Es evidente, que la influencia mayor de ENSO tiene lugar en la cuenca del Pacífico, donde se producen variaciones muy importantes de la precipitación en escala de varios años, concordantes con la periodicidad del fenómeno de El Niño/oscilación austral.

De algunos otros fenómenos, no comentados hasta aquí, se tiene certidumbre en los cambios observados (por ejemplo, el aumento en el número e intensidad de los ciclones tropicales atlánticos), pero de otros (tornados, rayos, granizo, hielo marino antártico y tormentas de polvo) no se tiene por el momento confianza suficiente en los resultados para asegurar que hayan experimentado variación en el clima presente. El cuadro 2.1 incluye una relación de fenómenos extremos para los que se tiene algún indicio valorable de la influencia antrópica, así como lo que se puede deducir de proyecciones para el clima del futuro.¹²

Para poder interpretar en términos estadísticos las verosimilitudes que aparecen en el cuadro 2.1 se incorporan en el cuadro 2.2 las equivalencias cuantitativas, si pudieron ser deducidas mediante cálculo probabilístico.

¹² Los aspectos sobre proyecciones serán comentados en el apartado 2.5.

Cuadro 2.1 Fenómenos extremos (observados y simulados) con indicio valorable de la influencia antrópica

Fenómeno y dirección de la tendencia	Verosimilitud de que la tendencia ocurrió a finales de siglo xx (típicamente después de 1960)	Verosimilitud de aportes humanos a la tendencia observada	D	Verosimilitud de una tendencia futura basada en proyecciones para el siglo XXI utilizando escenarios IE-EF*
Días y noches frías menos frecuentes y más cálidos en la mayoría de las zonas terrestres	<i>Muy probable</i>	<i>Probable</i>	*	<i>Virtualmente cierto</i>
Días y noches calientes más frecuentes y más cálidos en la mayoría de las zonas terrestres	<i>Muy probable</i>	<i>Probable (noches)</i>	*	<i>Virtualmente cierto</i>
Periodos de tiempo cálidos/olas de calor: la frecuencia aumenta en la mayoría de las zonas terrestres	<i>Probable</i>	<i>Más probable que no</i>		<i>Muy probable</i>
Fenómenos de fuertes precipitaciones. La frecuencia (o proporción del total de lluvia caída en lluvias fuertes) aumenta en la mayoría de las zonas terrestres	<i>Probable</i>	<i>Más probable que no</i>		<i>Muy probable</i>
Zonas afectadas por el aumento de las sequías	<i>Probable en muchas regiones a partir de los años setenta.</i>	<i>Más probable que no</i>	*	<i>Probable</i>
Aumento de la actividad de ciclones tropicales intensos	<i>Probable en muchas regiones a partir de los años setenta.</i>	<i>Más probable que no</i>		<i>Probable</i>
Aumento de la incidencia de la altura del nivel del mar extrema (excluye tsunamis)	<i>Probable</i>	<i>Más probable que no</i>		<i>Probable</i>

Tendencias recientes, evaluación de la influencia humana en las tendencias y proyecciones de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos mediante pruebas de una tendencia observada a finales del siglo xx. El asterisco de la columna D indica que se utilizaron estudios formales de detección y atribución unidos al juicio de expertos para evaluar la probabilidad de percepción de influencia humana. Donde no hay disponibilidad, la evaluación de probabilidades de influencia humana se basa en la atribución de resultados para cambios en la media de una variable o cambios en variables relacionadas físicamente y/o en la similitud cualitativa de cambios observados y simulados junto con el criterio de los expertos.

Fuente: Adaptado de IPCC 2007b, Tabla RT.4.

Cuadro 2.2 Términos utilizados en IPCC (2007) para definir la probabilidad de un resultado siempre que se pueda calcular de manera probabilística

Probabilidad cualitativa	Probabilidad estadística
Prácticamente cierto	> 99% de probabilidad
Sumamente probable	> 95% de probabilidad
Muy probable	> 90% de probabilidad
Probable	> 66% de probabilidad
Más probable que improbable	> 50% de probabilidad
Tan probable como improbable	De 33% a 66% de probabilidad
Improbable	< 33% de probabilidad
Muy improbable	< 10% de probabilidad
Sumamente improbable	< 5% de probabilidad
Excepcionalmente improbable	< 1% de probabilidad

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Para una mayor información sobre los cambios observados en el clima presente es imprescindible consultar AR4 (IPCC 2007).

2.3 La simulación del clima

El conocimiento de los mecanismos que determinan el clima de la Tierra, algunos de los cuales fueron descritos en el epígrafe 2.1 de este capítulo, es parcial pero suficiente para poderlo simular (¡no en el laboratorio, por supuesto!, pero sí mediante complejos modelos ejecutados¹³ en potentes ordenadores). Ha sido posible reproducir con garantías suficientes el clima actual y el del pasado más reciente, así como rasgos fundamentales conocidos del clima en eras geológicas pretéritas. Gracias a esto se han podido realizar ejercicios de atribución del cambio climático y estamos en condiciones también de inferir las posibilidades de clima futuro incluyendo el papel del hombre, como se verá más adelante.

¹³ En realidad existe en la frase una cierta redundancia pues la RAE indica para *ejecutar*: 'Realizar las operaciones especificadas por un programa de un ordenador'.

Veamos ahora con un cierto detalle qué son los modelos que permiten la simulación del clima. Hay que indicar, en primer lugar, que los modelos no son una invención de los investigadores del clima; en Física, y en otras ciencias, se emplean modelos con mucha generalidad y han resultado ser extraordinariamente útiles para el avance del conocimiento. En términos generales, un modelo es una simplificación de la realidad que se utiliza como herramienta para describir y explicar fenómenos de interés científico. A veces los modelos se construyen mediante ecuaciones matemáticas que resumen relaciones empíricas entre variables características del sistema objeto de estudio. Por ejemplo, se pueden obtener esas relaciones a partir de un adecuado tratamiento estadístico de las variables. Otras veces son las leyes físicas, previa e independientemente establecidas, las que proporcionan la relación entre las variables. En este caso, además, permiten conocer la razón de esa relación ya que, de hecho, es lo que las leyes de la Física expresan. Finalmente también son ecuaciones matemáticas las que relacionan las variables, pero ahora basadas en leyes físicas.

Así, independientemente del procedimiento por el que se hayan establecido, se dispone de un conjunto de ecuaciones matemáticas que permite describir de forma aproximada (no se olvide que se trata de una simplificación) la realidad. Es precisamente este hecho el que va a permitir explicar, al menos en parte, las discrepancias que aparezcan entre una descripción simulada de la realidad mediante un modelo y la realidad de la observación de un fenómeno. O sea, lo que muchas veces recibe el nombre de *incertidumbre*.

Una vez se dispone del conjunto de ecuaciones que constituyen un modelo hay que escribirlas de forma adecuada para poder obtener información cuantitativa referida al sistema estudiado. En el caso que nos ocupa, habría que obtener, por lo menos, los valores de temperatura y precipitación para conocer los rasgos fundamentales del clima. Pero, además, habría que hacerlo sobre toda la superficie del planeta y, dependiendo de la variable, en diferentes niveles de la atmósfera, desde los más bajos, en contacto con el suelo o los mares, a los más altos, como sería en el caso de la temperatura.

Y esto solo por lo que hace referencia a la atmósfera porque, en los otros subsistemas, haría falta conocer otras muchas variables (a modo de ejemplo, salinidad y temperatura en el océano, masa de hielo, propiedades de los suelos y de la vegetación, entre otras) y también en diferentes niveles o profundidades, dependiendo de la variable y el subsistema.

La conclusión que se debe sacar de lo anterior es que se han de aplicar las ecuaciones del modelo a una gran cantidad de puntos del espacio. O sea, son muchas las operaciones matemáticas que se han de realizar para determinar todas las variables que describen el estado del sistema climático en un solo instante; pero, para caracterizar al clima, debe conocerse lo que ocurre, no en un instante concreto, sino a lo largo de intervalos de tiempo suficientemente largos, es decir, formados por una enorme sucesión de instantes individuales. Después, ya que estamos interesados en el clima, se debe proceder al adecuado tratamiento estadístico de los resultados obtenidos mediante los modelos de simulación.

¿Cómo se puede abordar esta tremenda tarea? La contestación no es inmediata. En primer lugar, si se quiere obtener información climática útil en un tiempo razonable, se deben usar ordenadores muy potentes; de hecho, los más potentes del mundo. Para poderlos utilizar hay que volver a simplificar el modelo, escribiéndolo en una forma que resulte adecuada para trabajar con ordenador; digamos, para que el ordenador, que es una máquina, nos entienda a los científicos. Una vez hecho esto, serían las máquinas las encargadas de realizar los millones y millones de operaciones numéricas necesarias para obtener, en un tiempo razonable, simulaciones del clima para varias décadas, siglos, etc. Muchas veces se habla de simulaciones numéricas del clima para recoger con el calificativo el modo en que se obtiene la información climática que se desea, ejecutando los modelos en ordenadores.

Los modelos más avanzados de simulación climática incluyen: el tratamiento de procesos atmosféricos, oceánicos, en la superficie terrestre y en la criosfera, la química atmosférica y la modelización de aerosoles. También tratan de forma acoplada las interacciones atmósfera-océano.

Hasta hace un tiempo, los modelos disponían de mecanismos para controlar los flujos de energía en valores razonables, pero hoy día, de-

bido a los avances en la investigación, no se necesita este ajuste pues los flujos obtenidos directamente en la simulación son ya realistas.

Se utiliza el nombre genérico de *modelos de circulación general atmósfera-océano* (AOGCM, acrónimo correspondiente a su denominación en inglés) para referirse a los modelos de simulación del clima que incorporan ecuaciones para el tratamiento de los procesos mencionados.

Los muchos modelos que existen, normalmente vinculados a los centros de investigación punta en el mundo, dan resultados de simulación climática diferentes, aunque todos ellos plausibles. Existen campañas de intercomparación de resultados para verificar su comportamiento que, además, permiten establecer niveles de confianza para los resultados. El IPCC basa precisamente en las simulaciones gran parte de sus informes de evaluación (véanse, por ejemplo, los capítulos 8 y 9 de AR4, IPCC 2007). Parcialmente, la confianza en la simulación numérica del clima se ha alcanzado verificando que los resultados son suficientemente realistas cuando se comparan con las observaciones. Estos resultados afectan no solo a la atmósfera sino también a los otros subsistemas del sistema climático y a modos conocidos de variabilidad del clima actual, entre ellos el fenómeno de El Niño/oscilación austral (ENSO), la oscilación del Atlántico Norte (NAO), las situaciones de bloqueo anticiclónico y la variabilidad de los monzones. Además, ha sido posible simular rasgos importantes del clima de los últimos 2.000 años y de cambios de clima anteriores, como el periodo cálido en el Holoceno hace 6.000 años y la variabilidad en las glaciaciones. Ni que decir tiene que los resultados obtenidos, mediante simulación, son adecuados para tener confianza en el uso de los modelos pese a que, todavía, permanecen fuentes de incertidumbre. Sin embargo, no es la verificación frente al clima presente y pasado la única fuente de confianza. Desde un punto de vista conceptual, la fuente primera es el uso que se hace en los modelos de leyes físicas establecidas previa e independientemente de la simulación del clima y de la preocupación por el cambio climático. Además, los modelos incorporan los métodos matemáticos más recientes para poder resolver las ecuaciones incluidas, que en la mayoría de los casos son analíticamente irresolubles.

Una de las principales ventajas de la simulación del clima mediante modelos es que se pueden activar o desactivar a voluntad algunos de los procesos incluidos. Para ello se eliminan del conjunto de ecuaciones del modelo aquellas que afectan al proceso en cuestión. El modelo es capaz entonces de simular el clima del planeta actuando o no el proceso (o procesos) bajo estudio. De esta forma, por ejemplo, se puede incluir, tras una erupción volcánica, el efecto adicional de los aerosoles expulsados o se puede eliminar la intensificación del efecto invernadero y considerar concentraciones preindustriales de gases de efecto invernadero. En esto precisamente está basada la atribución del cambio climático, que discutiremos más adelante.

Si no se quiere, o no se puede, recurrir a grandes ordenadores, también hay soluciones más modestas, pero no por ello menos útiles. Se puede acceder a una segunda vía de simulación del clima por medio de una nueva simplificación del sistema climático. Es decir, simplificar la complejidad del modelo, que ya era de por sí una simplificación de la realidad, de forma que se pueda ejecutar en ordenadores de tipo personal o similares. Lo que se trata entonces de conseguir con los modelos sencillos es que sus simulaciones sean compatibles con aquellas que se realizan con los AOGCM.

Para hacerse una idea, en el máximo extremo de la sencillez, se podría considerar la Tierra como una esfera sólida que recibiera energía del Sol y que mantuviera el equilibrio de esa energía con la energía que se refleja y la que la propia Tierra disipa hacia el espacio. En estas condiciones se determina una temperatura, llamada de equilibrio, que resulta ser aproximadamente $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y que es muy diferente de la temperatura media en la Tierra, unos $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Anteriormente vimos cómo se podía resolver este problema mediante leyes físicas al introducir, en el epígrafe 2.1, el efecto invernadero natural. O sea, la temperatura de equilibrio se obtiene simplificando al máximo el sistema (en concreto prescindiendo de la atmósfera), con lo que esas condiciones se parecen más a las de la Luna que a las de la Tierra. La toma en consideración de la atmósfera permite asignar al efecto invernadero un aumento de temperatura de unos $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ lo cual, si se piensa bien, es espectacular. Sirva como

comparación, por ejemplo, que la oscilación de temperatura asociada a periodos glaciares e interglaciares, o a cambios climáticos abruptos, no llegan ni a la mitad de lo indicado para el calentamiento debido al efecto invernadero natural (Masson-Delmotte et al. 2005).

Con otros modelos sencillos, por supuesto no tanto como el anterior, es posible calcular la distribución de la temperatura de equilibrio para diferentes latitudes de la Tierra, considerar de forma elemental el papel de las nubes, determinar otros climas potenciales con todo el hielo fundido o con la Tierra totalmente cubierta de hielo, las transiciones entre ambos, etc. Una ventaja de los modelos sencillos sobre los más complejos es que se pueden realizar un gran número de experimentos diferentes, cambiando algunas de las condiciones de la simulación, ya que necesitan mucho menos tiempo para resolver las ecuaciones que los modelos más complejos.

Desde que la problemática del cambio climático empezó a tener impacto social, y fundamentalmente entre los gobiernos, se ha pedido a los científicos que se identificara la causa, o causas, de los cambios observados y, sobre todo, del incremento de la temperatura en las capas bajas de la atmósfera. En otras palabras, tal y como se usa en la literatura, de lo que estamos hablando es de la *atribución* del cambio climático.

En el segundo informe de evaluación del IPCC, publicado en 1995, se indicaba que había sospechas razonables de la influencia de la actividad humana en los cambios observados del clima del planeta. O en los términos entonces publicados, «sugieren una discernible influencia humana en el clima global». Del segundo al cuarto informe, publicado en 2007, se ha producido un cambio sustancial, que a continuación se describe.

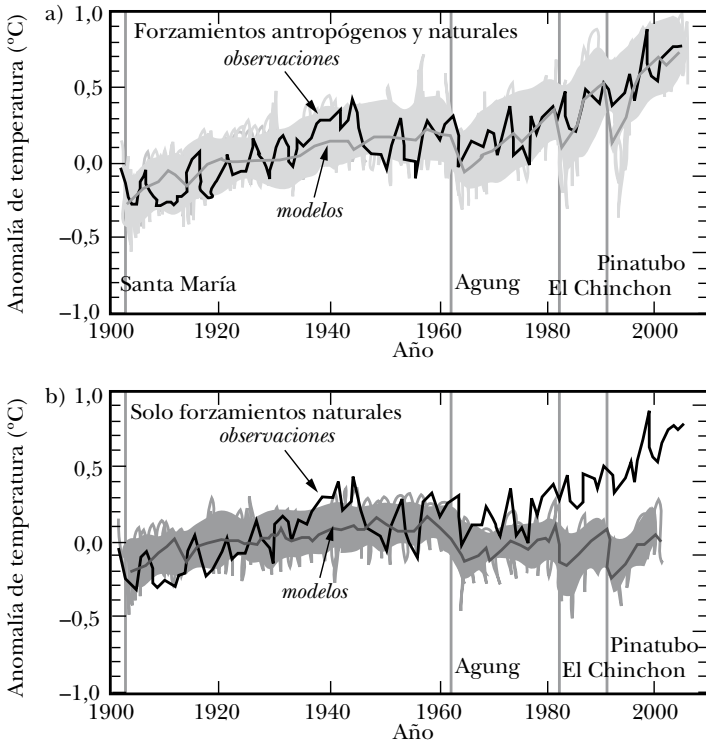
Anteriormente se han señalado las razones por las que los científicos tenemos confianza en los modelos de simulación del clima. Entre ellas está la posibilidad de replicar el clima presente; para ello se parte de condiciones conocidas en el pasado y se van resolviendo las ecuaciones hasta llegar a nuestros días. No todos los modelos que se emplean para la simulación del clima dan los mismos resultados, pero se puede decir que, en conjunto, la simulación es más que satisfactoria, por ejemplo, para la temperatura.

Como ejemplo, en el gráfico 2.4 se pueden ver los resultados de la comparación de la temperatura media global con la que simulan, en diferentes circunstancias, los modelos climáticos para el siglo xx. Tanto en el panel *a*) como en el *b*), la curva negra representa la evolución de la temperatura media en superficie para todo el planeta. Los valores numéricos deducidos de la escala de la izquierda son las diferencias de temperatura con respecto a la media en el periodo 1901-1950. La curva gris del panel *a*) representa la evolución media de la temperatura simulada. Para obtenerla, se promedian los resultados de cada uno de los modelos individuales, cuyas diferentes realizaciones aparecen representadas por medio del sombreado gris. En esta simulación los modelos incluyen las causas conocidas del cambio de clima reciente; en concreto, las naturales, con inclusión de las erupciones volcánicas y aquellas que son consecuencia de la actividad humana, mediante las evoluciones conocidas de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera y también de aerosoles. El resultado de este experimento de atribución se puede resumir diciendo que existe una buena correlación entre las evoluciones de la temperatura observada y simulada, que la envolvente de las simulaciones individuales incluye casi por completo la curva de observaciones y que la media de los modelos sería una buena aproximación de la observación, convenientemente filtrada por un promedio temporal (no mostrado en la figura).

En el panel *b*) se presenta el resultado de simular la evolución de la temperatura, pero solo empleando las causas naturales del cambio de clima. Como antes, se representan las realizaciones individuales de los modelos, sombreado en gris, y la media de todas las simulaciones, por la curva gris. En este caso no se pueden sacar las mismas conclusiones. Los forzamientos naturales solo pueden explicar la evolución de temperatura aproximadamente hasta mitad del siglo pasado. De hecho, si se comparan los dos paneles no se observan grandes diferencias entre ambas simulaciones durante ese intervalo. Las diferencias aparecen en la segunda mitad del siglo xx. Es necesario introducir en las simulaciones las causas antrópicas para poder explicar la evolución de la temperatura en la segunda mitad del siglo.

En el tercer informe del IPCC ya se habían realizado este tipo de experimentos pero las conclusiones no eran de tanta confianza como en el cuarto. Además, ahora se han realizado estudios equivalentes para los diferentes continentes, para tierras y océano por separado y para otras variables distintas de la temperatura. Los resultados, que no se muestran aquí, han sido coherentes con lo anteriormente expuesto.

Gráfico 2.4 Resultados de la comparación de la temperatura media global con la simulada por los modelos climáticos para el siglo xx



a) Anomalías en la temperatura superficial media mundial relativas al periodo de 1901 a 1950, según observaciones (línea negra) y como resultado de simulaciones con forzamientos antropogénicos y naturales. La curva gris muestra la media del conjunto de varios modelos, y el sombreado agrupa a las diferentes simulaciones individuales. Las líneas grises verticales indican importantes fenómenos volcánicos. b) Igual que en a), solo que las anomalías simuladas de la temperatura media mundial son solamente para los forzamientos naturales. La curva gris muestra la media del conjunto de modelos, y el sombreado el conjunto de las simulaciones con modelos. Cada simulación fue realizada para que la cobertura temporal correspondiera con la de las observaciones.

Fuente: Adaptado de IPCC 2007b, Gráfico RT.23.

La investigación climática debe tender siempre a reducir incertidumbres y, paralelamente, a conseguir que las simulaciones sean más realistas. Si se observa el gráfico 2.4, existe una discrepancia importante entre las simulaciones y la temperatura media en superficie, calculada a partir de medidas directas, en torno a 1940. Se ha verificado que el pronunciado descenso de temperatura observado no se debió a ninguna causa relacionada con la variabilidad natural del clima ni fue consecuencia de ninguna erupción volcánica. Descartado lo anterior, se estudió el origen de los datos y se comprobó que existía un sesgo en los valores observados como consecuencia del método usado para la medida de la temperatura superficial del mar que se emplea para calcular la temperatura media global. Si se corrigieran los valores observados¹⁴ se reduciría la discrepancia, acercándose la evolución observada de la temperatura a la simulada (Thompson et al. 2008). En este caso ha sido la simulación la que ha permitido detectar errores en la observación, lo cual es un muy importante logro, aunque inesperado.

En el momento de hacerse público el cuarto informe del IPCC (2007) lo anterior no se conocía, pero, según el conocimiento del momento, se consideraban los resultados de los experimentos de atribución lo suficientemente realistas para indicar que «la mayor parte del aumento observado del promedio mundial de temperatura desde mediados del siglo xx se debe muy probablemente¹⁵ al aumento observado de las concentraciones de GEI antropógenos».

2.4 Diferencia entre las simulaciones del tiempo y del clima

Se decía en el epígrafe 1.1 que Meteorología y Climatología eran dos ciencias hermanas que usan las mismas variables pero trabajan con ellas de forma distinta y que, a veces, emplean las mismas herramientas, pero

¹⁴ Señalan los autores que la corrección no afectaría a las estimas de las tendencias globales de la temperatura media en la escala de un siglo aunque sí, obviamente, a la variabilidad de la temperatura a mitad del siglo pasado.

¹⁵ Indica con este término el IPCC que la probabilidad supera el 90%.

las usan de forma diferente. En este apartado se desarrollará precisamente este hecho por medio de la simulación, tanto del tiempo como del clima.

La modelización del clima descrita anteriormente es, en cierto modo, heredera de la predicción del tiempo. Si hubiera que poner un origen a la predicción del tiempo, basada en leyes físicas, sería necesario referirse primero al físico noruego Vilhelm F. Bjerknes y a la llamada escuela de Bergen, que creó y lideró en los primeros años del siglo xx. Con las bases teóricas sentadas, la primera predicción —por cierto, fallida— del tiempo la realizó hacia 1913, y publicó, en 1922, un meteorólogo inglés, Lewis F. Richardson. Acabada la Segunda Guerra Mundial tuvo lugar el primer uso no militar de un ordenador —hoy día haría reír a nuestros más jóvenes usuarios de informática— para realizar la primera simulación del tiempo por métodos numéricos. Se trataba de una predicción de 24 h y se consiguió disponer de ella poco antes de transcurrido ese intervalo de tiempo (para más detalles se puede consultar Alonso y Puigcerver 2001). La evolución de los modelos ha sido impresionante desde entonces y se emplean, de forma generalizada, para la predicción del tiempo y para la simulación del clima.

Hace unos años se hizo muy famosa una aseveración en la que se señalaba la imposibilidad de predecir el clima para dentro de unas décadas ya que era imposible predecir el tiempo de un día para otro. Son necesarios varios comentarios en relación con la frase. El primero, se trataría de una muestra de algo que señalaba en el apartado 1.1. Todo el mundo tiene la impresión de que entiende de clima, y de tiempo también. Como en cualquier ámbito científico concreto, se trata en realidad de conocimiento especializado, de tal forma que, a veces, incluso especialistas de otras áreas tienen dificultades para comprender los entresijos de lo que hacemos en Meteorología y Climatología. Y la simétrica también vale y se nos aplica a nosotros.

El siguiente comentario es más profundo y tiene que ver con el uso diferente que se hace de herramientas semejantes para simular

el tiempo o el clima. Empezaremos con la predicción del tiempo. En un principio, los modelos eran utilizados de forma determinista; parecido a como se podría determinar la trayectoria de un objeto si se conoce su localización inicial, cómo se mueve en ese momento y las leyes que rigen el movimiento de ese objeto (en esencia las leyes de Newton y consecuencias de ellas). Se partiría, para la predicción del tiempo, del estado de la atmósfera en un momento dado (determinado por las observaciones) y el modelo, que incluye todo el conocimiento de las leyes que gobiernan el comportamiento de la atmósfera, se encargaría de proporcionar el nuevo estado atmosférico al cabo de un cierto intervalo de tiempo, por ejemplo 24 h. En esto consiste la predicción del tiempo. El problema es —como se sabe después de los trabajos de Lorenz—, que el llamado *efecto mariposa* no permite que el proceso sea totalmente determinista. Para poner una semejanza aclaradora, si lanzamos un dado al aire desde el mismo punto y con la misma velocidad no estamos seguros de que siempre vaya a salir la misma cara en la parte superior del dado. Más bien estaríamos seguros de lo contrario.

Este tipo de comportamiento caótico de la atmósfera no impide realizar predicciones; se puede aprovechar el conocimiento de esta particularidad, por otra parte no exclusiva de la atmósfera, para realizar lo que se llama predicción probabilística del tiempo, mediante la cual se deduce qué puede ocurrir y con qué probabilidad. Lo anterior quiere decir que, lógicamente, nadie sabe exactamente el tiempo que va a hacer de un día para otro, pero la información que se deduce de los modelos de predicción es muy, pero que muy fiable, por no hablar de su utilidad.

Otro asunto diferente es el de las proyecciones climáticas. Y fíjense que digo *proyecciones climáticas* y no *predicciones climáticas*. En la predicción del tiempo se parte de la observación del estado atmosférico, en un momento pasado, para deducir lo que se piensa que puede ocurrir en un instante futuro y en una zona concreta. El clima no se trata así, como ya sabemos. Viene a ser, por decirlo de alguna manera, un *resumen* estadístico de las diferentes condiciones que determinan el tiem-

po, en escala temporal larga (mucho mayor que las escalas temporales cortas, de unos pocos días, relacionadas con el tiempo). Algo parecido se hace con los modelos climáticos. Tratan de dar *resúmenes* a horizontes temporales largos. Pero hay más. De hecho no se deducen (al menos solamente) del presente o del pasado climático. Es necesario conocer cómo pueden cambiar hacia el futuro los *motores* que mueven el clima, lo cual, obviamente, no se sabe. Por esta razón se emplea, como veremos en el próximo apartado, la alternativa de los llamados *escenarios*, que se deducen a partir de evoluciones plausibles, y no diferenciadas probabilísticamente, de todo lo que condiciona el clima (población, consumo energético, tecnología, políticas ambientales, etc.). En base a los escenarios se obtienen las proyecciones climáticas; por ejemplo, con el horizonte temporal del final del siglo presente, o sea, de cerca de cien años.

En el límite, podríamos equivocarnos todos los días en la predicción del tiempo y, no obstante, ser correctas las simulaciones climáticas. Eso es precisamente lo que se trata de verificar en las simulaciones del clima presente, como ya se indicó anteriormente. Hay que ver si los resultados estadísticos de las simulaciones y de las observaciones se parecen o no; no tiene la menor importancia el hecho de ser o no semejante, día a día, la simulación y la observación. Sí lo tiene, sin embargo, en la predicción del tiempo.

También se señaló anteriormente que los experimentos de verificación constituyen una de las razones por las que se confía en los modelos de simulación climática. En las simulaciones hacia el futuro, o sea, en las proyecciones climáticas, hay que valorar también los escenarios, pero eso se tratará en el siguiente apartado.

2.5 Proyecciones globales para el clima futuro

Como debe haber quedado claro, los modelos climáticos son la herramienta más importante, por no decir la única, para llevar a cabo simulaciones del clima del planeta. Para poder utilizarlos con garantía,

ya se ha comentado que se realizan experimentos con el objetivo de reproducir el clima presente, el clima del pasado y tratar dar explicación al cambio de clima que la Tierra está experimentando, en lo que se viene a denominar atribución (del cambio climático, claro). Como las ecuaciones de partida provienen de leyes físicas, se emplean los más sofisticados métodos matemáticos y la simulación es realista, se tiene una gran confianza en el uso de modelos. Es evidente que quedan aspectos por conocer del funcionamiento del sistema climático, siempre quedan, y que ese desconocimiento genera incertidumbre. Sin embargo, el hecho de que se acepten los resultados de la simulación, al ser verificados mediante la observación, viene a indicar que el conocimiento que se tiene sobre el sistema es suficiente y que lo que se desconoce no sería capaz de modificar de forma sustancial las simulaciones. Si no fuera así, es decir, si nuestra ignorancia implicara consecuencias de importancia en las simulaciones, la investigación ya lo habría detectado. Algo parecido a como, por ejemplo, la investigación ha detectado que el descenso pronunciado de la temperatura en los años cuarenta del siglo pasado se debió a los métodos de observación, como se señaló en el apartado 2.3.

Dicho esto, hay que indicar también que la simulación del clima presente no es el mismo problema que la simulación del clima futuro, como tampoco lo es, y ya lo sabemos, la predicción del tiempo. En el caso de la simulación del clima presente se conocen el punto de partida y los cambios que se han producido en el transcurso del tiempo para llegar desde el pasado al presente. Se sabe cómo ha cambiado la radiación interceptada por la Tierra y se conocen los cambios en la composición atmosférica. No solo en relación con la concentración de los gases de efecto invernadero sino también, por ejemplo, en lo que respecta a los aerosoles expulsados en las erupciones volcánicas. El forzamiento de los modelos con las condiciones reales conocidas ha permitido reconstruir el clima presente. Sin embargo, a partir del presente no se sabe cuáles van a ser las condiciones en la atmósfera terrestre y, sin embargo, su conocimiento es imprescindible para poder ejecutar los modelos y simular el clima futuro.

Sabemos del pasado, por ejemplo, que las emisiones anuales de CO₂ de origen fósil han aumentado desde una media de 6,4 GtC¹⁶ por año en la década de los noventa a 7,2 GtC por año en el periodo 2000-2005. Estas emisiones, junto con las del pasado, han determinado, en parte, la concentración de CO₂ en la atmosfera, lo mismo que otros procesos lo han hecho con la de otros gases de efecto invernadero. El problema de determinar la concentración de los gases de efecto invernadero a partir de las emisiones no es sencillo; hay que recurrir nuevamente a la simulación mediante modelos, en este caso, del ciclo del carbono y de otros elementos. Hay que tener en cuenta, por ejemplo, la fijación de carbono en el suelo y en los mares (sumideros), lo que a su vez depende de muchos factores.

Y suponiendo que estuviera resuelto este problema, queda por conocer la evolución hacia el futuro de las emisiones de los gases de efecto invernadero. Lo que sí debe quedar claro es que depende de muchos condicionantes, difíciles de determinar, fundamentalmente de carácter socioeconómico. Por ello se trabaja con diferentes hipótesis plausibles que reciben el nombre de *escenarios*. Desde los primeros informes del IPCC (FAR y SAR, primero y segundo respectivamente) se ha prestado atención a la definición de escenarios de emisiones, que en un principio estaban incluidos en los propios informes (sus nombre eran SA90 e IS92). Sin embargo, tras el segundo informe se encargó un trabajo específico sobre escenarios (IPCC 2000) que dio lugar a los que actualmente se usan para proyectar el clima hacia el futuro, aunque para el quinto informe de evaluación va a ser modificada la metodología, como se verá más adelante. Los actuales escenarios reciben el nombre de SRES, acrónimo que recoge el carácter y título de la obra: Special Report on Emissions Scenarios.¹⁷

En resumen, se trabaja con cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2) condicionadas por lo que en el informe se denominan *fuerzas*, como

¹⁶ GtC: gigatoneladas de carbono, mil millones de toneladas de carbono.

¹⁷ Se preferirá por lo general el uso de SRES para los escenarios, aunque en algunas ocasiones aparecerá el acrónimo IEEE, que corresponde a Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones.

población, economía, tecnología, energía, agricultura y usos del suelo. En A1 y A2 se concede más peso al crecimiento económico mientras que en B1 y B2 predominan los aspectos ambientales. Por otra parte en A1 y B1 se tiende a un mundo globalizado, en tanto que en A2 y B2 se pone el acento en soluciones regionales y locales. Cada una de estas líneas evolutivas da lugar a diferentes escenarios, hasta completar un total de 40. Normalmente se utilizan familias de escenarios, coincidentes en nombre con las líneas, aunque en lo que hace referencia a A1 se desglosa en tres:

- A1FI, con uso intensivo de combustibles fósiles.
- A1T, con uso de tecnología y fuentes de energía no fósil.
- A1B, con uso equilibrado de diferentes fuentes.

Es evidente que no se sabía el camino que tomaría la humanidad a partir de la elaboración de los escenarios, ni se sabe ahora; en consecuencia, todos los escenarios se consideraron igualmente probables.

Cada uno de los escenarios de emisiones SRES lleva asociados valores concretos de emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del siglo XXI. Entonces, mediante el uso de modelos adecuados se deducen las concentraciones futuras de los GEI y con la evolución futura de dichas concentraciones se puede proyectar el clima hacia el futuro, gracias a los modelos de simulación del clima. El resultado es un conjunto de proyecciones climáticas, para cada uno de los SRES considerados, que, por diferencia con unas condiciones climáticas de referencia, da lugar a diferentes escenarios futuros de cambio climático. Los escenarios o proyecciones pueden ser globales o estar restringidos a regiones concretas de la geografía mundial. En este apartado se verán únicamente algunas proyecciones globales, dejando para el siguiente capítulo aspectos regionales o locales.

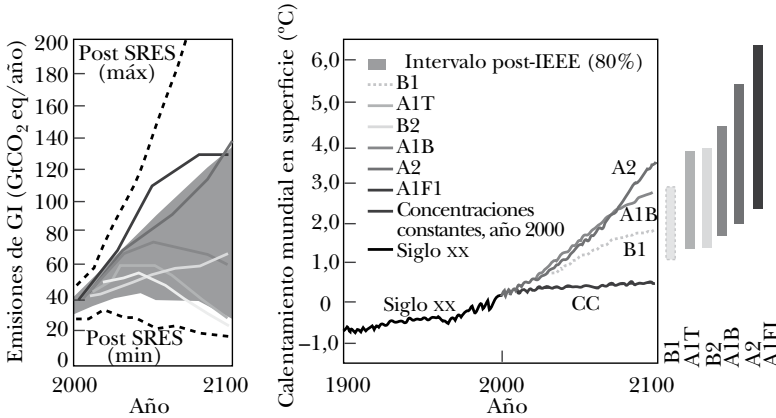
En el panel izquierdo del gráfico 2.5 se muestra la evolución prescrita de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el siglo XXI, según los diferentes escenarios. En la figura aparecen englobadas las emisiones de todos esos gases en lo que se denomina CO₂

equivalente, calculado teniendo en cuenta el mismo efecto de intensificación del efecto invernadero que el debido al conjunto de todos los gases considerados. Además de los escenarios SRES descritos anteriormente se ofrecen aquí resultados para otros escenarios posteriores a la publicación del Informe Especial (IPCC 2000), que modificaban la contribución de ciertas *fuerzas* condicionantes de las líneas evolutivas consideradas. En el panel derecho se muestran proyecciones de la temperatura media en superficie para varias familias de escenarios y la proyección correspondiente a no aumentar la concentración de gases de efecto invernadero en los valores observados en el año 2000. Hay que hacer notar que a pesar de este hecho, las proyecciones indican que la temperatura seguiría aumentando aunque, evidentemente, a un ritmo mucho menor. Esto es debido a la inercia del sistema y al tiempo de residencia de los diferentes gases ya presentes en la atmósfera.

Si se analizan las proyecciones para las dos primeras décadas de este siglo, los resultados son muy poco dependientes del escenario considerado y del modelo usado (se tendría un calentamiento de, aproximadamente, 0,2 °C por década). Sin embargo, para las décadas finales del siglo no es así; dependen fuertemente del escenario considerado y también del modelo empleado. Por ejemplo, la estimación media multimodelo para el escenario B1 a final de siglo es 1,8 °C (probablemente con rango de 1,1 °C a 2,9 °C) y para el escenario A1FI es 4,0 °C (probablemente con rango de 2,4 °C a 6,4 °C), siempre por encima de la media del periodo 1980-1999. Nótese que esos valores son muy superiores a los observados para el aumento de la temperatura media en superficie para el siglo xx.

Teniendo en cuenta estas proyecciones de temperatura se ha evaluado el efecto sobre el nivel global medio del mar (incluyen también las contribuciones de la fusión del hielo en Groenlandia y Antártida). La elevación a final del siglo xxi que depende, lógicamente, del escenario considerado iría del mínimo 0,18 m a 0,38 m para el escenario B1 al máximo 0,26 m a 0,59 m para el escenario A1FI. Estos valores son relativos al nivel medio del mar en 1980-1999.

Gráfico 2.5 Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales), y proyección de temperaturas en superficie



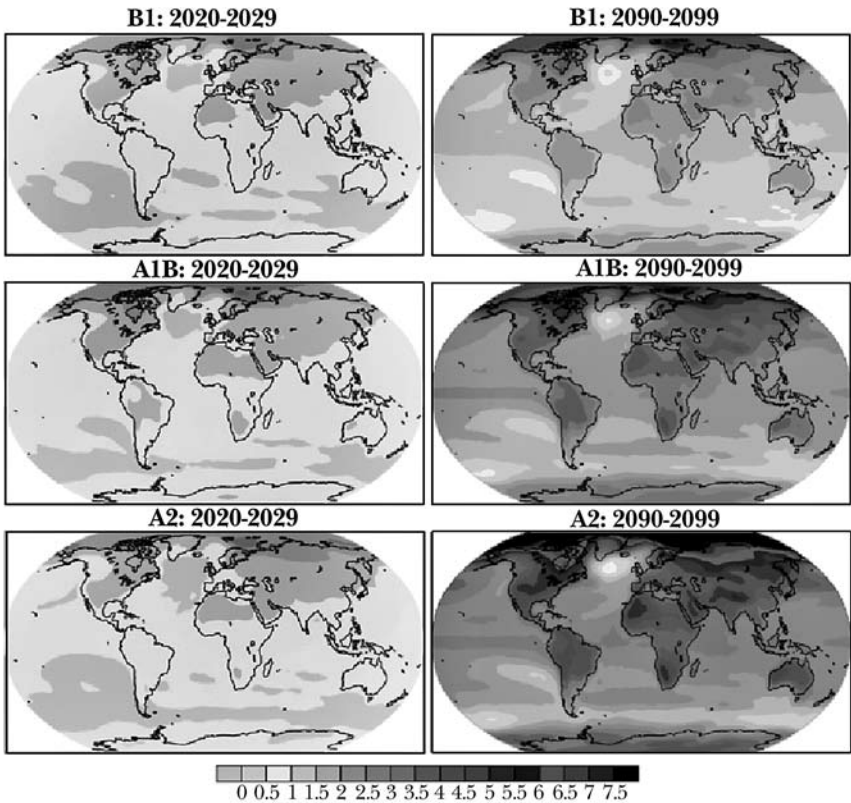
Panel izquierdo: emisiones mundiales de GEI ($\text{CO}_2\text{-eq}$) en ausencia de políticas climáticas. Seis escenarios SRES ilustrativos (líneas en diferentes tonos de gris), junto con el percentil del 80% de escenarios recientes publicados desde el SRES (post SRES) (área sombreada en gris). Las bandas de la derecha representan la totalidad de los escenarios post SRES. Las emisiones abarcan los gases CO_2 , CH_4 , N_2O y F. *Panel derecho:* las líneas continuas representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo xx. Estas proyecciones reflejan también las emisiones de GEI y aerosoles de corta permanencia. La línea CC no es un escenario, sino que corresponde a simulaciones de AOGCM en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores del año 2000. Las barras de la derecha indican el intervalo probable evaluado para los seis escenarios SRES considerados en el periodo 2090-2099. Todas las temperaturas son anomalías respecto del periodo 1980-1999.

Fuente: Adaptado de IPCC 2007c, Figura RRP-5.

Los modelos AOGCM, acoplados atmósfera-océano, permiten llevar a cabo proyecciones climáticas globales en las que se puede apreciar la variabilidad espacial y temporal. En AR4 se incluyen una gran cantidad de proyecciones (véase IPCC 2007, capítulo 10) de las que aquí se da cuenta solo de algunas. En el mapa 2.2 se presentan mapas de proyecciones medias multimodelo de la temperatura superficial para diferentes alcances temporales y algunos escenarios. Conviene destacar dos aspectos: primero, la poca diferencia existente entre los mapas de la columna izquierda, correspondientes a la década de los años veinte de este siglo, similarmente a lo que ya se había indicado para las proyecciones evaluadas del gráfico 2.5; segundo, la desigual distribución geográfica de los aumentos de temperatura, con un claro predominio de los valores en la región ártica donde la tempera-

tura podría aumentar a final de siglo más de 7 °C (véanse escenarios A2 y A1B). En general, el calentamiento proyectado para el siglo XXI se espera que sea mayor sobre tierra y en altas latitudes del hemisferio norte y menor sobre el océano Austral y parte del Atlántico norte.

Mapa 2.2 Cambios de temperatura superficial proyectados para inicios y finales del siglo XXI relativos al periodo 1980–1999



Los paneles a la izquierda y a la derecha muestran las proyecciones medias de multimodelos AOGCM para la media por decenios de los escenarios B1 (arriba), A1B (centro) y A2 (abajo) de 2020 a 2029 (izquierda) y de 2090 a 2099 (derecha).

Fuente: Adaptada de IPCC 2007b, Gráfico RT.28.

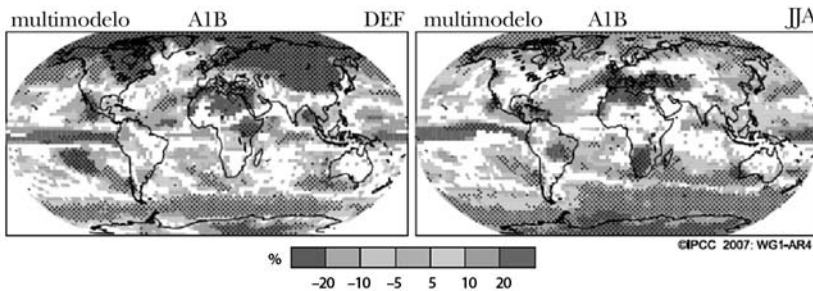
En el mapa 2.3 se pueden ver proyecciones estacionales de la precipitación; en este caso, para un escenario concreto, el A1B. Aunque se

estima que en una acumulación global su valor aumente, probablemente en la mayor parte de las regiones subtropicales terrestres decrezca mientras que en latitudes altas muy probablemente la precipitación será más elevada.

Se han obtenido también proyecciones para otros aspectos importantes del clima. En general se puede decir que todos ellos continúan con la tendencia observada en el siglo xx, pero, en la mayor parte de los casos, acentuándose.

Por lo que respecta a los fenómenos extremos, la última columna del cuadro 2.1 da cuenta de los resultados proyectados. En todos los casos allí mostrados aumenta la verosimilitud de la tendencia obtenida para el fenómeno correspondiente, empleando los escenarios SRES (IE-EE, en el encabezamiento de dicha columna) en las proyecciones consideradas. Para la interpretación de las probabilidades de ocurrencia se recuerda que se debe recurrir al cuadro 2.2.

Mapa 2.3 Cambios de la precipitación relativos (en valores porcentuales) para el periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999



Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B para los periodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha). Las áreas en blanco representan los lugares en que más de un 66% de los modelos coinciden en el signo del cambio, y las áreas punteadas representan los lugares en que más de un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio.

Fuente: Adaptada de Cambio Climático 2007a, Figura RRP.7.

Mención especial merece la proyección (no mostrada) de la fusión de los hielos en Groenlandia, aunque la escala temporal sea superior al

siglo. Hace unos 125.000 años la temperatura en la zona del Atlántico norte se mantuvo durante un periodo duradero por encima de las temperaturas actuales. La reducción de la masa de hielo hizo que el nivel del mar se elevara de 4 a 6 m. Pues bien, si la temperatura fuera entre 1,9 °C y 4,6 °C superior a la preindustrial durante, al menos, 1.000 años, la fusión del hielo de Groenlandia podría producir una elevación del nivel del mar en el planeta del orden de 7 metros.

Conviene insistir en que los valores que se han señalado anteriormente para algunas variables no son predicciones sino que se obtienen a partir de escenarios concretos. Más bien deberían entenderse como respuestas a la pregunta: «¿Qué ocurriría si...?». Teniendo en cuenta que, en realidad, no sabemos cómo va a evolucionar la concentración de gases de efecto invernadero, o CO₂ equivalente, debemos admitir todas las posibilidades. Si la concentración de CO₂ equivalente se mueve entre las líneas evolutivas del panel izquierdo del gráfico 2.5 podemos decir que no esperamos que los cambios de temperatura sean superiores a los proyectados con el peor de los escenarios, el A1FI. Por el contrario, si se superaran los valores de este escenario, y atendiendo a la variabilidad de las simulaciones, la temperatura media global en superficie podría aumentar en más de 6 °C con respecto al periodo de referencia 1980-1999.

Por otra parte, no se puede olvidar que los escenarios SRES fueron publicados hace ya diez años. Sería razonable, entonces, que nos preguntáramos cómo se comparan las variables observadas con las proyecciones deducidas. La verdad es que ha habido muchas críticas a los escenarios (críticas que no pueden ser comentadas aquí por la naturaleza de esta obra); en realidad, las tres generaciones de escenarios empleados por el IPCC han sido, por una u otra causa, criticados. Los trabajos de comparación entre las variables observadas y las proyecciones no son todavía concluyentes pues, desde un punto de vista climático, una década es todavía un intervalo de tiempo relativamente corto. Con el riesgo que implica tomar una decisión sin tener todos los datos a disposición (o más precisamente, teniendo todavía una información muy limitada) me inclino por lo siguiente:

- a) La evolución de la concentración de gases de efecto invernadero ha sido bastante bien recogida por los escenarios SRES. En todo caso, la concentración real puede estar siendo subestimada por los escenarios.
- b) La temperatura media global ha ido evolucionando entre los márgenes de las mejores estimas de las proyecciones, pero muy cerca de la correspondiente al escenario A1FI. En todo caso la evolución real podría incluso estar siendo subestimada por este escenario.
- c) El ascenso del nivel del mar ha sido subestimado a partir de los escenarios SRES.

Para el próximo informe del IPCC, AR5, que se publicará en 2013, se tiene previsto poder utilizar unos nuevos escenarios. Lo más importante es el cambio metodológico que implica su introducción. Hasta ahora el proceso era secuencial. Se predefinían los escenarios, SRES en la actualidad, y a continuación se realizaban las proyecciones climáticas (se debe entender que para el escenario que se hubiera seleccionado). Posteriormente, si era el caso, se evaluaban los impactos, la vulnerabilidad y se establecían las estrategias de adaptación.

En la propuesta que se comenzó a elaborar en 2007, una vez se cerraron los trabajos de AR4, último informe publicado (IPCC 2007), se sugiere abandonar la rigidez de la metodología actual, en la práctica impuesta por los propios escenarios SRES. Se podría hablar de una metodología en paralelo; se partiría de unos pocos escenarios de emisiones de referencia (en realidad evoluciones de concentración de gases de efecto invernadero, designadas por RCP) que deberían permitir el inicio de las simulaciones climáticas para obtener nuevas proyecciones. A partir de ellas los expertos en escenarios socioeconómicos, desarrollo tecnológico y políticas, así como los expertos en impactos, adaptación y vulnerabilidad irían elaborando los nuevos escenarios que permitirían decidir la RCP que mejor se adaptara. Se trataría de un proceso iterativo que se podría realizar independientemente de las proyecciones climáticas, que hayan sido obtenidas con anterioridad.

Las reducciones de tiempo de cálculo y coste de las simulaciones necesarias, que implicaría esta nueva metodología, se sugiere que podrían ser invertidas en la mejora de la resolución espacial y en la obtención de proyecciones regionales. Estas tareas se realizan hoy día, con la metodología secuencial, como un post proceso de la simulación climática, según se verá en el capítulo siguiente.

Otra novedad de los nuevos escenarios es que se piensa trabajar en dos alcances temporales diferentes. Uno primero, a corto plazo, hasta aproximadamente 2035, y otro, a largo plazo, en principio hasta 2100, pero que, de forma más simplificada, podría llegar hasta 2300. La distinción entre escenarios a corto y largo plazo viene determinada por las necesidades de diferentes usuarios finales de las proyecciones climáticas.

3 De lo general a lo particular

3.1 De lo global a lo local

El capítulo anterior ha estado dedicado principalmente a la observación del cambio climático y a las proyecciones del clima. He insistido —creo haberlo hecho suficientemente— en el alcance planetario del problema. Se ha presentado aquello que determina el clima global, sin olvidar por ello la variabilidad espacial; las razones por las que puede cambiar el clima global; las herramientas para simularlo y las proyecciones para el clima global del futuro. También los escenarios considerados son globales. Sin embargo, cuando se observan los efectos de un fenómeno climático concreto o, en general, el impacto del cambio climático, hay que atender a ámbitos más reducidos: a entornos regionales e, incluso, locales.

En lo relativo a la observación de las variables que permiten establecer el estado del sistema climático, esto no representa mucho problema. Desde que se dispone de sistemas de observación se ha trabajado desde las escalas más pequeñas a las mayores. De hecho, en el caso atmosférico, se observa el tiempo local para ir, de abajo arriba, hacia otras escalas. El clima se construye así, por medio de un tratamiento matemático adecuado de las series temporales y de las distribuciones espaciales de las variables meteorológicas. Lo anterior, válido para las variables atmosféricas, se puede extender a las observaciones de los otros subsistemas del sistema climático. Es interesante señalar que la calidad de la observación ha ido ligada a avances tecnológicos que las Ciencias de la Tierra han ido incorporando, como no podía ser de otra manera.

Tiene especial relevancia la observación con sensores remotos desde el espacio, o teledetección; en la mayor parte de los casos se ha conseguido mediante la observación satelitaria una cobertura espacial impensable por otros métodos, como en el caso meteorológico, o también mejorando extraordinariamente la precisión, como en el caso de la variación del nivel del mar.

Desde el punto de vista de la simulación las cosas son verdaderamente diferentes. En primer lugar, hay que recordar que los modelos de simulación tienen una resolución espacial limitada. Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los dos fluidos de la Tierra y el comportamiento del resto del sistema climático se resuelven en puntos discretos del espacio, y constituyen una malla cuyo brazo tiene una longitud determinada. Si bien es cierto que la resolución ha mejorado muchísimo¹⁸ desde que se emplean los modelos, y que se han ido incluyendo en ellos progresivamente más procesos, también lo es que el brazo de malla no se puede reducir a voluntad. Y esto es así no solo por lo que implicaría en cuanto a la potencia de cálculo sino porque todo aumento de resolución lleva aparejado una mayor complejidad en el tratamiento de los procesos considerados en el modelo. Estos procesos se resuelven por medio de las denominadas *parametrizaciones*, formuladas empíricamente y, muchas veces, dependientes de la resolución. Dicho de otra forma, hay que olvidarse, hoy por hoy, de modelos globales de resolución adecuada para poder obtener información de ámbitos pequeños, por ejemplo, de 1 km o menos, si se ha de poner alguna cifra.

Una forma de resolver esta dificultad, aunque no la única, como veremos a continuación, es utilizar una metodología aprendida de la

¹⁸ En el primer informe del IPCC, FAR, publicado en 1990, el brazo de malla horizontal de los modelos era del orden de 500 km, mientras que en el último, AR4, era de unos 100 km. Para hacerse una idea de lo que representa desde el punto de vista de cómo se ve, por ejemplo, Europa, en el primer caso, tanto el mar Mediterráneo como el Báltico eran cerrados y las Islas británicas no existían como tales. Ese factor 5 en la resolución, si fuera igual en la vertical, representaría, al menos, multiplicar por $5^3 = 125$ el número de operaciones, de no cambiar nada en la formulación del modelo. Quiere esto decir que cualquier aumento en la resolución de un modelo implica necesariamente un incremento en las necesidades de computación.

predicción del tiempo (no hay que olvidar, no obstante, que considerar el clima implica realizar un tratamiento estadístico a posteriori de las simulaciones). El procedimiento se denomina *anidamiento de modelos* y consiste esencialmente en lo siguiente: se usan dos, o más, modelos de resoluciones diferentes, centrados en un punto geográfico concreto, para cubrir áreas progresivamente menores con resoluciones progresivamente mayores. En el límite, el modelo de menor resolución puede ser un modelo global; el de mayor resolución es un modelo regional o de área limitada —como se prefiere decir en predicción del tiempo—. El modelo de menor resolución proporciona al de área limitada las variables iniciales y de contorno, necesarias para que las ecuaciones que constituyen el modelo se puedan resolver con la mayor resolución. En este caso, la información fluye en un sentido, del modelo de menor resolución al modelo de resolución mayor. Sin embargo, es también posible que el anidamiento se realice con flujo de información en los dos sentidos. En cualquier caso, se logra un aumento de resolución reduciendo la superficie de la Tierra cubierta o, lo que es lo mismo, reduciendo el número de mallas empleadas en la simulación a la menor resolución. De esta forma se pueden evitar los problemas derivados de la necesidad de mayor potencia de cálculo, aunque no necesariamente los relativos a las parametrizaciones. No se debe olvidar que estamos hablando de un método inicialmente aplicado a la predicción del tiempo donde se requiere que las predicciones estén disponibles a una hora determinada. Esto hace que sea de trascendental importancia el tiempo necesario para realizar la simulación. No obstante, en la aplicación climática, esto no es crítico. El clima de los inviernos de la década del 2050 en la cornisa cantábrica con un escenario concreto, o para varios escenarios, puede esperar. ¿Un día?, ¿una semana?, ¿un mes?... podría ser irrelevante.

La metodología que se emplea para conseguir una resolución mayor en las simulaciones recibe el nombre de *downscaling*, de difícil traducción al castellano aunque se está extendiendo el uso de *regionalización*. Comparado con lo comentado para las observaciones, se trata ahora de

un proceso de arriba abajo. A veces tan abajo, como en ecología, que podría necesitarse información a escala de planta o de algunos metros cuadrados.

Los métodos de regionalización se acostumbran a clasificar en dos tipos, aunque los hay también híbridos: al primero, basado en el anidamiento de modelos, se le concede el calificativo de *dinámico*; el segundo método es *estadístico*.

En la regionalización dinámica se parte de un modelo AOGCM de simulación global y, en él, se anida un modelo regional, RCM, de área limitada y mayor resolución, encajando sus mallas y cubriendo con este la zona bajo estudio. Habitualmente se dispone de los resultados de la simulación con el modelo global para una zona y durante un intervalo de tiempo determinados. Esta información, mediante un proceso que se denomina *de asimilación*, es empleada por el modelo regional que es ejecutado autónomamente, durante un cierto intervalo de tiempo, a partir de los datos iniciales y de los valores en el contorno del modelo con mayor resolución. Desde un punto de vista intuitivo, el modelo regional, RCM, simula lo que ocurre en el área objeto de estudio a partir de los datos que proporciona el modelo global, AOGCM, y sin desviarse, en su contorno, de lo que el modelo global dice. La información que se obtiene es más precisa porque el modelo regional tiene un brazo de malla menor y, también, porque el paso de tiempo que se emplea para cada integración es menor que el usado en el modelo global.

El hecho de que los modelos regionales incorporen el conocimiento científico disponible, al igual que los modelos globales, representa una de sus mayores fortalezas. Por otra parte, como la resolución es mayor y las parametrizaciones más finas, el modelo regional desarrolla estructuras que en el global son infravaloradas o, simplemente, pasan desapercibidas. Entre las debilidades del método hay que indicar que, computacionalmente hablando, la simulación regional es costosa, y puede llegar a ser comparable a la simulación global. Hay que señalar también que las parametrizaciones, incluidas en los modelos, están probadas en clima presente y podrían no ser válidas para las condiciones climáticas futuras.

La regionalización estadística se basa en que el clima regional está condicionado por dos factores: el estado climático a gran escala y características fisiográficas (por ejemplo, topografía, distribución de tierras y mares, usos de la tierra) regionales o locales. De acuerdo con esto, las características climáticas de una zona, e incluso de un punto concreto, se pueden obtener a partir de un modelo estadístico que relacione variables climáticas a gran escala (llamadas *predictores*) con variables locales o regionales (denominadas estas, *predictandos*). Este modelo estadístico se obtiene empíricamente a priori, usando información climática en clima presente. Para el clima futuro se utilizan como predictores las simulaciones de modelos de gran escala, los mismos AOGCM, y se obtiene, usando el modelo estadístico establecido, la información climática regional o local proporcionada por los predictandos. El método para obtener el modelo estadístico no es único; existen diferentes procedimientos para determinarlo dependiendo, por ejemplo, de las bases de datos disponibles sobre el clima presente o, incluso, del gusto personal del investigador. Algunos ejemplos serían regresión, redes neuronales o clasificación por análogos.

La primera ventaja que se debe reseñar de la regionalización estadística es su bajo coste computacional, lo que permite, por ejemplo, que se puedan realizar fácilmente diferentes experimentos, aplicando el mismo modelo estadístico, a salidas de distintos modelos de gran escala. Otra ventaja es que la regionalización puede diseñarse para obtener información climática local, en un punto concreto o una pequeña zona, necesaria para poder realizar algunos estudios de impactos del cambio climático. Veremos más adelante un ejemplo concreto para una playa en la isla de Mallorca. La mayor debilidad teórica de este método de *downscaling*, en cierto modo coincidente con el dinámico, es que su punto de partida no es verificable: el modelo estadístico obtenido para el clima presente sigue siendo válido también para el clima del futuro.

En los últimos años se ha desarrollado en Europa el proyecto de investigación ENSEMBLES (Van der Linden y Mitchell 2009) financiado por la Comisión Europea. Entre sus objetivos estaba la genera-

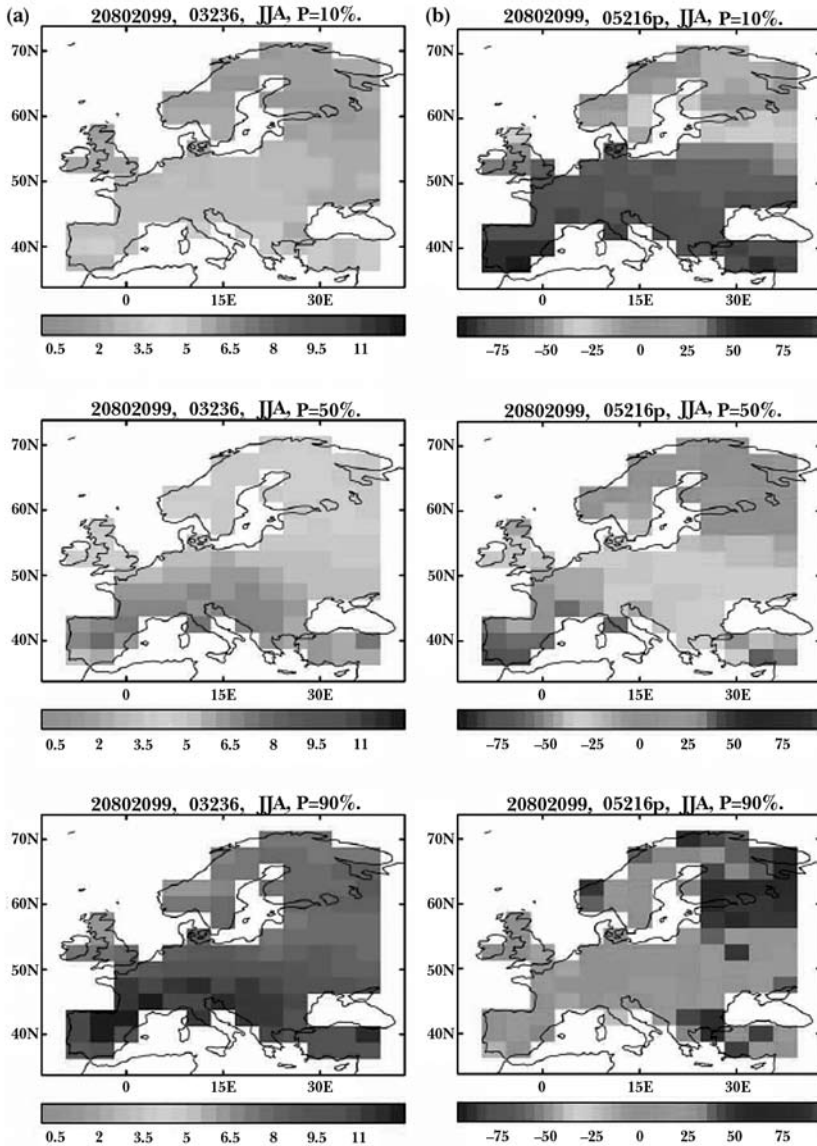
ción de proyecciones climáticas, mediante regionalización dinámica. La novedad del proyecto es que usaba una metodología multimodelo, heredada de la meteorología que la emplea para predicción probabilística del tiempo por conjuntos.¹⁹ En el mapa 3.1 se representan, como ejemplo de proyecciones obtenidas, mapas de Europa de los percentiles del 10%, 50% y 90% para la estación de verano²⁰ del intervalo 2080-2099 usando el escenario SRES de emisiones A1B. Las variables que se representan son las anomalías de temperatura y el porcentaje de cambio de la precipitación, ambos con respecto al periodo de referencia 1961-1990. En todos los paneles se observa bastante variabilidad espacial. Considerando el percentil del 50% (o sea, la mediana) se observa que los mayores aumentos de temperatura y reducciones de precipitación se proyectan para la zona euromediterránea. Las diferencias entre los percentiles del 90% y del 10% son una medida de la incertidumbre de los resultados. En este sentido, en algunos lugares se señalan diferencias para la temperatura que llegarían a alcanzar los 10 °C, en tanto que, para la lluvia, se podría producir, en determinadas zonas, tanto un aumento como una disminución de las precipitaciones futuras.

Asimismo, en el mismo proyecto, se han realizado proyecciones a alta resolución, de gran utilidad para estudios de adaptación al cambio climático. Se muestra aquí también un ejemplo en el mapa 3.2. La variación de la temperatura cerca de la superficie (mapa 3.2 a), obtenida como la media de los 16 modelos usados, es positiva para toda Europa. Nótese que, para este caso, la proyección es para valores anuales y para un periodo diferente del representado en el mapa 3.1.

¹⁹ Se puede entender como un procedimiento para soslayar el efecto mariposa. Se trata de, a partir de unas condiciones iniciales, obtener diferentes predicciones con un mismo o varios modelos. Se acostumbra a agrupar las predicciones semejantes y se dan los resultados en términos de probabilidad.

²⁰ Normalmente se considera verano el periodo constituido por los tres meses íntegros de junio, julio y agosto. En consecuencia, septiembre, octubre y noviembre, determinan el otoño; diciembre, enero y febrero, el invierno; y marzo, abril y mayo, la primavera.

Mapa 3.1 Proyecciones probabilísticas del proyecto ENSEMBLES para Europa con el escenario A1B



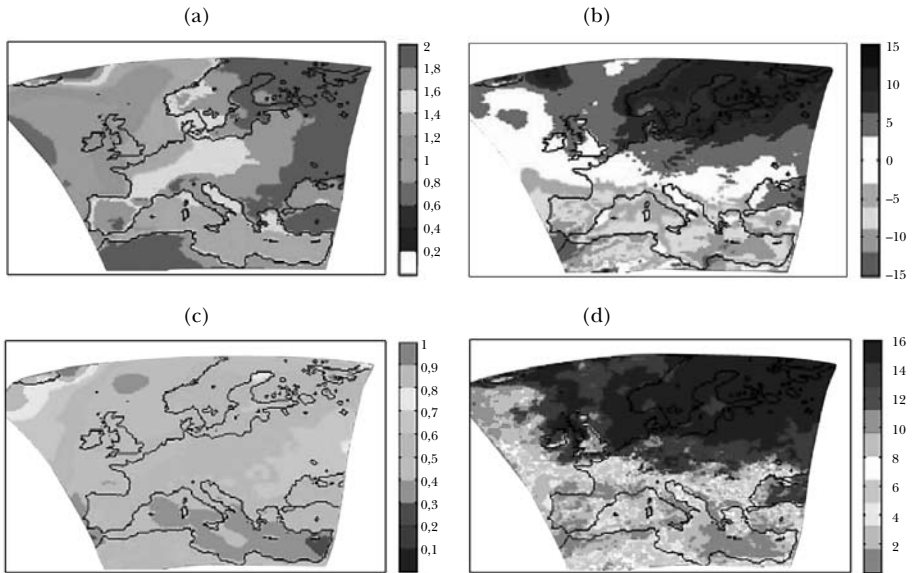
Los mapas muestran los percentiles del 10% (paneles superiores), 50% (mediana, paneles intermedios) y 90% (paneles inferiores) de (a) cambio de la temperatura superficial y (b) porcentaje de variación de la precipitación para la estación de verano del periodo 2080-2099 relativos al periodo base 1961-1990.

Fuente: Van der Linden y Mitchell 2009.

El hecho de que la señal sea mucho mayor que la desviación estándar, obtenida a partir de las proyecciones de los 16 RCM usados, indica que el incremento obtenido en la temperatura debe ser interpretado como una señal robusta.

En cuanto a la precipitación, se observa que Europa puede ser dividida en dos regiones (mapa 3.2 b), con aumento de la precipitación en el norte y disminución en el sur. Esta configuración debe ser también considerada como robusta atendiendo al número de modelos RCM que concuerdan en la tendencia proyectada; incluso llegan a ser todos concordantes en el aumento de la precipitación en el norte y, a lo sumo, discrepan cuatro en el signo de la tendencia en el sur.

Mapa 3.2 Resultados en alta resolución a partir de 16 modelos regionales, RCM, usados en el proyecto ENSEMBLES



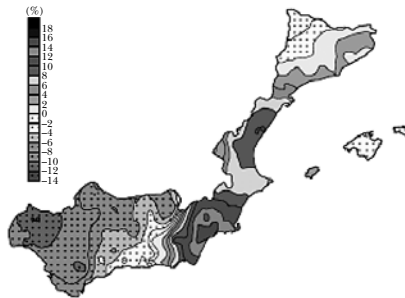
(a) Señal de cambio climático (2021-2050 menos 1961-1990) para la temperatura anual media multimodelo a 2 m de la superficie. (b) Señal de cambio climático (2021-2050 relativa a 1961-1990) para la precipitación total anual media multimodelo (%). (c) Desviación estándar entre los RCM de la señal de cambio climático (2021-2050 menos 1961-1990) para la temperatura anual media multimodelo a 2 m de la superficie. (d) Número de RCM que dan incremento en la precipitación (2021-2050 relativo a 1961-1990).

Fuente: Van der Linden y Mitchell 2009.

Como otro ejemplo de regionalización, esta vez estadística y exclusivamente para el Mediterráneo español, se puede ver el mapa 3.3. La proyección corresponde al cambio de la precipitación a final del siglo XXI (2090-2099), referida a un periodo del siglo XX (1984-1993). A diferencia de los anteriores ejemplos, en Sumner et al. (2003), se utilizó una proyección global que había sido obtenida con un escenario IS92, disponible entonces y anterior a los SRES. La metodología de regionalización usada fue diseñada ad hoc para este trabajo y se empleó un método de análogos a partir de una clasificación de tipos de tiempo, tanto en clima presente como en clima futuro.

Se aprecia en el mapa 3.3 que, desde el punto de vista de la precipitación futura, se tendrían al final del siglo XXI zonas más secas que las del final del siglo XX en Cataluña noroccidental, en la mayor parte de Andalucía y en las islas de Mallorca y Menorca. Por el contrario, en el resto, la proyección indica un aumento de la precipitación. El método empleado permite descender a proyecciones para tamaño de isla y sobre estaciones concretas, aunque no se muestran aquí los resultados.

Mapa 3.3. Porcentaje de variación de la precipitación anual en las comunidades mediterráneas españolas del periodo 2090-2099 relativo al periodo 1984-1993



Se proyecta reducción de la precipitación en las zonas punteadas y aumento en el resto.

Fuente: Sumner et al. 2003.

Las regionalizaciones que se obtienen, independientemente del método empleado, poseen gran valor, por ejemplo, para estudios de impactos, de vulnerabilidad o de estrategias de adaptación en una época

en que los resultados de investigación se empiezan a incorporar a planteamientos urbanísticos, obras públicas o actuaciones en general con horizontes de ejecución previstos de varias décadas.

3.2 Consecuencias del cambio climático

En este apartado se presentarán de forma resumida algunos impactos proyectados del cambio climático tanto referidos a las diferentes regiones del planeta como a distintos sistemas y sectores. Estos impactos están extraídos del último informe, AR4, del IPCC (2007) atendiendo a su magnitud y cronología, confianza en la evaluación, cobertura representativa del sistema, del sector y de la región. Debe resultar evidente que, por necesidades de extensión de esta obra, no se puede ser muy detallado. El lector interesado puede consultar el segundo volumen del anteriormente mencionado informe para tener un análisis totalmente preciso.

Cuando se analiza información sobre impactos del cambio climático, aparece, sin excepción, el término *vulnerabilidad*, y también otros. La razón es que un mismo impacto puede tener efectos diferentes según la vulnerabilidad de lo que se llama, en términos generales, *unidad de exposición*; aquello que está expuesto al cambio de clima, sea, por ejemplo, una actividad, un grupo, un recurso o una región. Se puede definir *vulnerabilidad* como el nivel al que un sistema, sector o región es susceptible o incapaz de afrontar los efectos negativos del cambio climático, de la variabilidad natural y de los fenómenos extremos. La vulnerabilidad depende del carácter, la dimensión y la intensidad de la alteración climática que soporta la unidad de exposición así como de su sensibilidad y su capacidad de adaptación.

A su vez, por *adaptación* se entiende el ajuste que llevan a cabo los sistemas naturales y humanos como respuesta a los “estímulos” climáticos, reales o previstos, o a sus efectos, que permite mitigar daños o aprovechar oportunidades beneficiosas. En el apartado 3.4 volveremos sobre este asunto.

Y para cerrar el círculo de las definiciones, también aparece la *sensibilidad*, o nivel en el que un sistema resulta afectado, ya sea negativa o positivamente, por estímulos relacionados con el clima. Los efectos pueden ser directos (por ejemplo, una variación del rendimiento de los cultivos en respuesta a una variación de la temperatura media, de los intervalos de temperatura o de la variabilidad de la temperatura) o indirectos (por ejemplo, los daños causados por un aumento de la frecuencia de las inundaciones costeras como consecuencia de una elevación del nivel del mar).

Para evaluar los impactos del cambio climático existe una detallada metodología que, por su extensión, no tiene cabida en este libro. La obra de referencia es Feenstra et al. 1998. Después de una primera parte introductoria general sobre la evaluación de los impactos del cambio climático, se abordan específicamente en esa obra los aspectos concretos de nueve recursos, sectores o actividades.

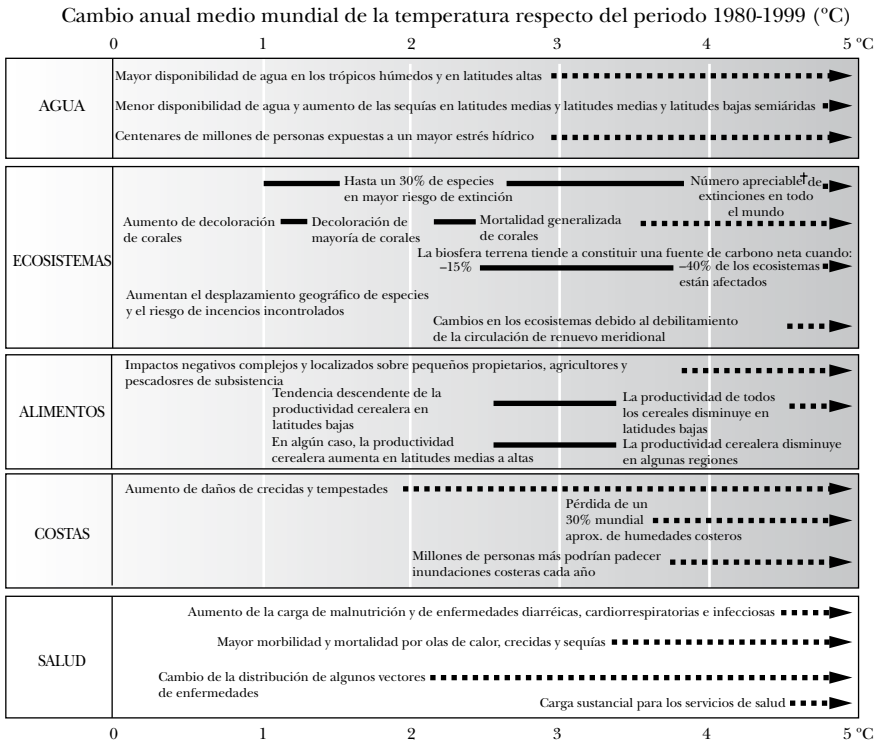
Atendiendo al cambio de la temperatura media global en superficie, en la figura 3.1 se pueden ver, en la parte superior, diferentes impactos relacionados con el agua, sobre los alimentos, ecosistemas, costas y salud.

Para relacionar el incremento de la temperatura con las proyecciones climáticas se debe utilizar la parte inferior de la figura 3.1, donde aparecen los intervalos proyectados de temperatura global para diferentes escenarios SRES. Hay que resaltar que a todos los impactos que aparecen en la figura 3.1 se les ha asignado un nivel de confianza alto.²¹

Se pueden destacar algunos rasgos importantes de los impactos proyectados (figura 3.1). En relación con los recursos hídricos hay que señalar que, para cualquier incremento de temperatura, se proyecta una menor disponibilidad de agua y aumento de las sequías en latitudes medias. En los alimentos, sin embargo, podría darse un aumento de la productividad de cereales en algunas zonas de latitudes medias y altas. En la figura 3.1 se indica asimismo que las costas quedarían también afectadas al producirse daños más importantes por temporales. En cuanto a la salud, se destacan los efectos perjudiciales de una mayor incidencia proyectada de olas de calor.

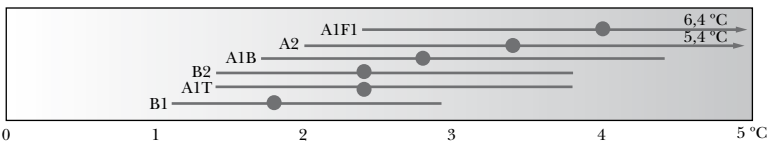
²¹ Se quiere señalar con esto que, por lo menos, en 8 de cada 10 posibilidades se cumple lo indicado, deducida esta consideración a partir trabajos publicados. De igual manera se considera confianza muy alta si son, al menos, 9 de 10 posibilidades.

Figura 3.1 Ejemplos de impactos proyectados asociados al promedio mundial del calentamiento en superficie



† Se entiende por 'apreciable' más de un 40%. ‡ Basado en la tasa promedio de aumento del nivel del mar, es decir, 4,2 mm/año entre 2000 y 2080.

Calentamiento hasta 2090-2099 respecto de 1980-1999 con escenarios sin mitigación



Parte superior: ejemplos ilustrativos de impactos mundiales proyectados de los cambios de clima (y de nivel del mar y de CO₂ atmosférico, cuando corresponda) asociados a diferentes magnitudes de aumento del promedio mundial de temperatura superficial en el siglo XXI. Las líneas en negro relacionan impactos; las flechas con líneas de trazos indican impactos que prosiguen con el aumento de la temperatura. La información se ha dispuesto de manera que el texto de la parte inferior indique el nivel aproximado de calentamiento asociado a la aparición de un impacto dado. La información cuantitativa sobre escasez de agua e inundaciones representa los impactos adicionales del cambio climático respecto de las condiciones proyectadas para la totalidad de escenarios A1F1, A2, B1 y B2 del SRES. No se ha incluido en esas estimaciones la adaptación al cambio climático. Los niveles de confianza respecto de todas las afirmaciones son altos. Parte inferior: los puntos y las barras indican la estimación óptima y los intervalos probables de calentamiento evaluados para los seis escenarios SRES para el periodo 2090-2099 tomando como referencia el periodo 1980-1999.

Fuente: Adaptada de IPCC 2007c, Figura RRP-7.

En el cuadro 3.1 se dan algunos ejemplos de impactos proyectados, en este caso, para las diferentes regiones del mundo. En cada una de ellas se consideran los efectos esperados sobre distintos recursos, ecosistemas, salud, etc.

Todas las proyecciones incluidas tienen un nivel de confianza alto o muy alto en cada uno de los sectores indicados (en la nota 4 a pie de página se ha incluido información sobre los niveles de confianza implicados en estas proyecciones).

Entre los impactos en Europa se hace referencia, en el cuadro 3.1, a que en el sur del continente las condiciones de temperatura y precipitación representarían un empeoramiento, debido a un clima en las proyecciones más caluroso y seco. Esto traería como consecuencia una reducción de los recursos hídricos y un perjuicio para el denominado turismo de sol y playa (se hará un análisis específico del este sector turístico, económicamente tan importante para España, en el siguiente apartado). En las zonas montañosas se proyecta una reducción de la cobertura nivosa, lo que también tendría consecuencias negativas en el turismo de montaña. En cuanto a la salud, coincidiendo con lo visto en la figura 3.1, el incremento de frecuencia de olas de calor llevaría asociado un aumento tanto de morbilidad como mortalidad. También se proyecta un aumento del número de incendios forestales, lo que es especialmente preocupante en la Península, ya de por sí castigada en el clima presente.

Otro de los aspectos que se considera en los estudios de impactos, es el efecto del cambio de frecuencia e intensidad que experimenten los fenómenos extremos. Como ya vimos en el capítulo 2, en el clima presente se estaba ya observando este cambio y, además, para el clima del futuro, las proyecciones indicaban una exacerbación de dichos eventos (cuadro 2.1).

En el cuadro 3.2 se resumen algunos posibles impactos, en agricultura, silvicultura y ecosistemas, en recursos hídricos, en salud humana y en industria, asentamientos y sociedad, debidos a los cambios que pueden experimentar los fenómenos extremos, deducidos dichos cambios a partir de proyecciones realizadas empleando escenarios SRES (IE-EE). Para las estimaciones de verosimilitud se debe consultar el cuadro 2.2.

Cuadro 3.1 Proyecciones de impactos en distintas áreas geográficas

	<ul style="list-style-type: none"> • Hasta 2020, entre 75 y 250 millones de personas estarían expuestas a un mayor estrés hídrico por efecto del cambio climático. • Hasta 2020, la productividad de los cultivos pluviales podría reducirse en algunos países hasta en un 50%. La producción agrícola y el acceso a los alimentos en numerosos países africanos quedarían en una situación gravemente comprometida. Ello afectaría aun más negativamente a la seguridad alimentaria y exacerbaría la malnutrición. • Hacia el final del siglo XXI, el aumento proyectado del nivel del mar afectaría a las áreas costeras bajas muy pobladas. El costo de la adaptación podría ascender a, como mínimo, entre un 5% y un 10% del producto interno bruto (PIB). • Hasta 2080, se produciría un aumento de entre un 5% y un 8% en la extensión de las tierras áridas y semiáridas en África para toda una serie de escenarios climáticos (RT).
África	<ul style="list-style-type: none"> • Hacia el decenio de 2050, la disponibilidad de agua dulce en el centro, sur, este y suroeste de Asia disminuiría, particularmente en las grandes cuencas fluviales. • Las áreas costeras, y especialmente las regiones de los grandes deltas superpoblados del sur, este y sudeste de Asia serían las más amenazadas, debido al incremento de las inundaciones marinas y, en algunos grandes deltas, de las crecidas fluviales. • El cambio climático potenciaría las presiones ejercidas sobre los recursos naturales y el medio ambiente por efecto de la rápida urbanización, de la industrialización y del desarrollo económico. • La morbilidad y mortalidad endémicas causadas por las enfermedades diarreicas asociadas principalmente a las crecidas y sequías aumentarían en el este, sur y sureste de Asia por efecto de los cambios del ciclo hidrológico proyectados.
Asia	<ul style="list-style-type: none"> • Hasta 2020 se experimentaría una importante pérdida de diversidad biológica en algunos lugares de gran riqueza ecológica, como la Gran Barrera Coralina o los trópicos pluviales de Queensland. • Hasta 2030, los problemas de seguridad hídrica se agravarían en el sur y este de Australia y, en Nueva Zelanda, en Noruecia y en ciertas regiones orientales. • Hasta 2030, la producción agrícola y forestal disminuiría en gran parte del sur y este de Australia y en partes del este de Nueva Zelanda, como consecuencia del mayor número de sequías e incendios. Sin embargo, en Nueva Zelanda los efectos serían inicialmente beneficiosos en algunas otras regiones. • Hasta 2050, el constante desarrollo costero y el crecimiento demográfico en ciertas áreas de Australia y Nueva Zelanda agravaría los riesgos de aumento del nivel del mar, y la intensidad y frecuencia de las tempestades y de las inundaciones costeras.
Australia y Nueva Zelanda	

Cuadro 3.1 (cont.) Ejemplos de algunos impactos regionales proyectados

- Se espera que el cambio climático magnifique las diferencias regionales en cuanto a los recursos naturales y generales de Europa. Entre los impactos negativos cabe citar un mayor riesgo de crecidas repentinas en el interior; una mayor frecuencia de inundaciones costeras, y un aumento de la erosión (debido al aumento de tempestades y del nivel del mar).
- Las áreas montañosas experimentarían retracción de los glaciares, disminución de la cubierta de nieve y del turismo de invierno, y abundante pérdida de especies (en algunas áreas hasta un 60%, en escenarios de alto nivel de emisiones, de aquí a 2080).

Europa

- En el sur de Europa, las proyecciones indican un empeoramiento de las condiciones (altas temperaturas y sequías) en una región que es ya vulnerable a la variabilidad del clima, así como una menor disponibilidad de agua y una disminución del potencial hidroeléctrico, del turismo estival y, en general, de la productividad de los cultivos.
- El cambio climático agudizaría también los riesgos para la salud por efecto de las olas de calor y de la frecuencia de incendios incontrolados.
- Hasta mediados del siglo, los aumentos de temperatura y las correspondientes disminuciones de la humedad del suelo originarían una sustitución gradual de los bosques tropicales por las sabanas en el este de la Amazonia. La vegetación semiárida iría siendo sustituida por vegetación de tierras áridas.

América

Latina

- Podrían experimentarse pérdidas de diversidad biológica importantes con la extinción de especies en muchas áreas de la América Latina tropical.
- La productividad de algunos cultivos importantes disminuiría, y con ella la productividad pecuaria, con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria. En las zonas templadas mejoraría el rendimiento de los cultivos de haba de soja. En conjunto, aumentaría el número de personas amenazadas por el hambre (RT; *grado de confianza medio*).
- Los cambios en las pautas de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían notablemente a la disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola e hidroeléctrico.

- En las montañas occidentales, el calentamiento reduciría los bancos de nieve, acrecentaría las crecidas de invierno y reduciría la escorrentía estival, intensificando así la competición por unos recursos hídricos excesivamente solicitados.
- En los primeros decenios del siglo, un cambio climático moderado mejoraría en conjunto el rendimiento de los cultivos pluviales entre un 5% y un 20%, aunque estaría sujeto a una acentuada variabilidad según las regiones. La situación sería difícil para los cultivos situados cerca de las fronteras cálidas de su ámbito natural, o dependientes de unos recursos hídricos muy demandados.

América del Norte

- En el transcurso del siglo, las ciudades que actualmente padecen olas de calor estarían expuestas a un aumento de estas y de su intensidad y duración, que podría tener efectos adversos sobre la salud.
- Las comunidades y hábitats costeros tendrían mayores dificultades, debido a la interacción de los efectos del cambio climático con el desarrollo y la polución.

Cuadro 3.1 (cont.) Ejemplos de algunos impactos regionales proyectados

	<ul style="list-style-type: none"> • Los principales efectos biofísicos proyectados son una reducción del espesor y extensión de los glaciares y mantos de hielo y de los hielos marinos, y alteraciones de los ecosistemas naturales con efectos perjudiciales para numerosos organismos, en particular aves migratorias, mamíferos y predadores superiores. • Para las comunidades humanas de la región ártica, los impactos, particularmente los resultantes de la alteración de los fenómenos de nieve y hielo, serían heterogéneos. • Los efectos perjudiciales recaerían, en particular, sobre las infraestructuras y modos de vida tradicionales de las comunidades indígenas. • En ambas regiones polares, determinados ecosistemas y hábitats se harían vulnerables a medida que disminuyesen los obstáculos climáticos a las invasiones de otras especies.
Regiones polares	
	<ul style="list-style-type: none"> • El aumento del nivel del mar intensificaría las inundaciones, las mareas de tempestad, la erosión y otros fenómenos costeros peligrosos, amenazando con ello la infraestructura vital, los asentamientos y las instalaciones de cuya subsistencia dependen las comunidades insulares. • El deterioro de las condiciones costeras, por ejemplo por erosión de las playas o decoloración de los corales, afectaría los recursos locales. • Hasta mediados del siglo, el cambio climático reduciría los recursos hídricos en gran número de islas pequeñas, por ejemplo en el Caribe y en el Pacífico, hasta el punto de que aquellos serían insuficientes para cubrir la demanda en los periodos de escasa precipitación. • Con el aumento de las temperaturas aumentarían las invasiones de especies nativas, particularmente en las islas de latitudes medias y altas.
Islas pequeñas	

Fuente: Adaptado de IPCC 2007c, Tabla RRP.2.

Cuadro 3.2 Ejemplos de posibles impactos del cambio climático por efecto de la alteración de los fenómenos atmosféricos y climáticos extremos

Fenómenos y dirección de las tendencias	Ejemplos de impactos importantes proyectados, por sectores				
	Probabilidad de las tendencias futuras (proyecciones siglo XXI, escenarios IEE)	Agricultura, silvicultura y ecosistemas {GTH 4.4, 5.4}	Recursos hídricos {GTH 3.4}	Salud humana {GTH 8.2, 8.4}	Industria, asentamientos y sociedad {GTH 7.4}
En la mayoría de las áreas terrestres, días y noches fríos más templados y más escasos, días y noches cálidos más cálidos y más frecuentes	Virtualmente cierto	Aumento del rendimiento en entornos más fríos; disminución en entornos más cálidos; aumento de plagas	Efectos sobre los recursos hídricos dependientes de la nieve fundida; efectos sobre ciertos suministros hídricos	Disminución de la mortalidad humana por menor exposición al frío	Disminución de la demanda de energía para calefacción; aumento de la demanda de refrigeración; deterioro de la calidad del aire en las ciudades; menores trastornos en los transportes debidos a la nieve o al hielo; efectos sobre el turismo de invierno
Periodos cálidos/ olas de calor. Aumento de la frecuencia en la mayoría de las extensiones terrestres	Muy probable	Menor rendimiento en regiones más templadas por efecto del estrés térmico; mayor peligro de incendios incontrolados	Aumento de la demanda hídrica; problemas de calidad del agua; por ejemplo, floración de algas	Mayor riesgo de mortalidad por efecto del calor; especialmente para los ancianos, los enfermos crónicos, los más pequeños y los que viven en aislamiento	Menor calidad de vida de las personas que habitan en áreas cálidas sin una vivienda adecuada; impactos sobre los ancianos, los pequeños y los pobres

Cuadro 3.2 (cont.) Ejemplos de posibles impactos del cambio climático por efecto de la alteración de los fenómenos atmosféricos y climáticos extremos

Fenómenos y dirección de las tendencias	Ejemplos de impactos importantes proyectados, por sectores				
	Probabilidad de las tendencias futuras (proyecciones siglo XXI, escenarios IEE)	Agricultura, silvicultura y ecosistemas {GTII 4.4, 5.4}	Recursos hídricos {GTII 3.4}	Salud humana {CTII 8.2, 8.4}	Industria, asentamientos y sociedad {GTII 7.4}
Episodios de precipitación intensa. Aumento de la frecuencia en la mayoría de las áreas	Muy probable	Daños a los cultivos; erosión del suelo, imposibilidad de cultivar tierras por anegamiento de los suelos	Efectos adversos sobre la calidad del agua superficial y oceánica; contaminación de los suministros hídricos; posiblemente, menor escasez de agua	Mayor riesgo de defunciones, lesiones y enfermedades infecciosas, respiratorias y dérmicas	Alteraciones de los asentamientos, del comercio, del transporte y de las sociedades por efecto de las crecidas; presiones sobre las infraestructuras urbanas y rurales; pérdida de bienes
Área afectada por el aumento de las sequías	Probable	Degradación de la tierra; disminución de los rendimientos/daños a los cultivos e inhabilitación de los cultivos; más cabezas de ganado muertas; mayores riesgos de incendios incontrolados	Mayor extensión del estrés hídrico	Mayor riesgo de escasez de alimentos y de agua; mayores riesgos de malnutrición; mayor riesgo de enfermedades transmitidas por el agua y por los alimentos	Escasez de agua para asentamientos, industrias y sociedades; menor potencial de generación hidroeléctrica; posibles migraciones de la población

Cuadro 3.2 (cont.) Ejemplos de posibles impactos del cambio climático por efecto de la alteración de los fenómenos atmosféricos y climáticos extremos

Fenómenos y dirección de las tendencias	Ejemplos de impactos importantes proyectados, por sectores				
	Probabilidad de las tendencias futuras (proyecciones siglo XXI, escenarios IEE)	Agricultura, silvicultura y ecosistemas {GTH 4.4, 5.4}	Recursos hídricos {GTH 3.4}	Salud humana {GTH 8.2, 8.4}	Industria, asentamientos y sociedad {GTH 7.4}
Aumento de la actividad de los ciclones tropicales intensos	Probable	Daños a los cultivos; árboles descajados por el viento; daños a los arrecifes de coral	Interrupciones del suministro eléctrico que alteran el abastecimiento de agua para la población	Mayor riesgo de defunciones, lesiones, enfermedades transmitidas por el agua y por los alimentos; trastornos de estrés postraumático	Trastornos causados por crecidas y vientos fuertes; denegación de seguros por aseguradoras privadas en áreas vulnerables; posibilidad de migraciones de la población; pérdida de bienes
Mayor incidencia de valores extremos de aumento de nivel del mar (excluidos los tsunamis)	Probable	Salinización del agua de riego, de los estuarios y de los sistemas de agua dulce	Menor disponibilidad de agua dulce por intrusión de agua salada	Mayor riesgo de defunciones y de lesiones por ahogamiento a causa de crecidas; efectos de las migraciones sobre la salud	Costos de protección costera, comparados con los costos de reubicación de los usos de la tierra; posibles desplazamientos de poblaciones y de infraestructura; véase también el apartado precedente sobre ciclones tropicales

Basados en proyecciones hasta mediados o finales del siglo XXI. Estas proyecciones no contemplan variaciones de la capacidad adaptativa. Las estimaciones de verosimilitud de la columna 2 corresponden a los fenómenos indicados en la columna 1.

Fuente: Adaptado de IPCC 2007c, Tabla 3.2.

En la descripción de los impactos reseñados en el cuadro 3.2 aparecen referencias a los apartados del informe AR4 donde dichos impactos son descritos con mayor amplitud que la, necesariamente breve, del cuadro. Obviamente, como en otros apartados de este libro, dicho informe, IPCC 2007, es de consulta obligada si se quiere tener un mayor detalle de los impactos proyectados del cambio climático.

3.3 Una mirada particular hacia el turismo²²

En los apartados anteriores hemos visto los métodos mediante los que se puede obtener información climática detallada a partir de los modelos globales de clima. También hemos tratado algunos ejemplos concretos de impactos en diferentes sectores, en un sentido amplio, y regiones del planeta. En este apartado vamos a analizar un caso concreto con aplicación al turismo. En particular al turismo de sol y playa²³ con destino en Platja de Palma, en la isla de Mallorca.

Platja de Palma es un enclave turístico de primera magnitud, no solo en la isla de Mallorca sino con carácter internacional. El motivo primero de su éxito hay que buscarlo en la privilegiada climatología de la zona. Sin embargo, en los últimos años se ha producido un deterioro considerable, con algunas partes del sistema realmente muy deprimidas, lo que ha llevado a las autoridades a planificar una reforma integral que permita mejorar la situación. Desde un primer momento plantearon la reforma procurando el máximo respeto al medio ambiente, poniendo el punto de mira en la sostenibilidad y, dando por sentado que esta acción se ejecutaría a lo largo de varios años y cuyo horizonte temporal sería de décadas, tomando en consideración escenarios de clima futuro.

Para poder evaluar el impacto del cambio climático en la unidad de exposición considerada (Sistema Platja de Palma, SPdP) hay que caracterizar primero el clima presente y, posteriormente, trabajar con proyecciones. Esta información fue utilizada después por todos los grupos de

²² La información incluida en este apartado forma parte de dos trabajos, a día de hoy, en vías de publicación (Amengual et al. 2011a, 2011b).

²³ También llamado turismo 3S para referirse, en inglés, a *Sun-Sea-Sand*.

expertos para evaluar los impactos concretos en ecosistemas, nivel del mar, recursos hídricos, etc. El trabajo se realizó gracias a un convenio de colaboración entre el Consorcio Platja de Palma y el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, IMEDEA (UIB-CSIC).

En lo que sigue se dan resultados de los estudios climatológicos realizados y una evaluación concreta del impacto del cambio climático en el potencial turístico de SPdP ya que, como veremos, depende directamente de variables climáticas.

En el cuadro 3.3 se tiene caracterizado el clima presente mediante los valores medios de las temperaturas diarias media, máxima y mínima, la precipitación anual, la humedad, la nubosidad y la intensidad del viento. Las observaciones corresponden al aeropuerto de Palma que, en la práctica, se encuentra ubicado dentro de SPdP.

Cuadro 3.3 SPdP: regímenes medios observados (1973-2008)

Regímenes medios	1973-2008 (36 años)	1973-1990 (18 años)	1991-2008 (18 años)	Cambio variables
T (°C)	16,5	16,0	16,9	+0,9 (°C)
Tmin (°C)	10,3	9,8	10,8	+1,0 (°C)
Tmax (°C)	22,3	22,0	22,6	+0,6 (°C)
P (mm)	454,4	490,3	418,5	-14,6 (%)
U (%)	76,5	77,3	75,7	-2,1 (%)
N (%)	44,5	42,3	46,8	+10,6 (%)
V (m/s)	2,9	2,8	3,0	+8,0 (%)

Regímenes medios de la temperatura media (T), temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), precipitación (P), humedad relativa (U), nubosidad (N) y viento (V) para SPdP, calculadas a partir de observaciones durante el intervalo 1973-2008 y cada una de sus mitades. Las unidades de cada variable están indicadas en la primera columna y las de los cambios en la última.

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Con el fin de evidenciar el cambio que está experimentando el clima se dan los valores para todo el intervalo de estudio, 1973-2008, para la primera y para la segunda mitad del intervalo. En la última columna se indican los cambios sufridos por las variables consideradas. Destacan los aumentos de las temperaturas y, en particular, el superior valor de la temperatura mínima frente a la máxima, lo que indica que se está reduciendo la oscilación diurna de la temperatura, hecho que se observa también a escala global.

Para las demás variables se ha encontrado una reducción de la humedad relativa y de la precipitación anual, mientras que la cobertura nubosa y la fuerza del viento experimentaron un aumento de su valor medio.

Otra forma de apreciar el cambio experimentado por las variables climáticas en SPdP es por medio de las tendencias. En el cuadro 3.4 se tiene un resumen de los valores calculados a partir de observaciones, de 1973 a 2008, en el Aeropuerto de Palma. Están expresadas en ritmo o tasa de cambio por década. Nótese que, para la temperatura media, el valor representa una tendencia de 5,6 °C por siglo, muy superior a 0,74 °C por siglo publicado para la media global en el informe AR4 del IPCC (2007), pero del orden de la tendencia media para el conjunto de las Islas Baleares que se indicó en el apartado 2.2. Las temperaturas máxima y mínima también han experimentado un aumento considerable en el periodo de estudio, siendo superior el de la mínima, coincidiendo con lo que se ha comentado más arriba. La precipitación anual se redujo casi 42 mm por década, valor que debe ser considerado en el contexto del valor medio, unos 450 mm, como aparece en el cuadro 3.3. La humedad relativa también se ha reducido, mientras que la nubosidad y la fuerza del viento han incrementado. En este caso se indica la confianza estadística de los valores calculados, siendo destacable que para todos ellos está en el nivel prácticamente cierto.

Cuadro 3.4 SPdP: tendencias medias observadas (1973-2008)

Variable	Tasa de cambio (por década)	Confianza estadística	95% intervalo de confianza	
			Límite inferior	Límite superior
T (°C)	+0,56	Prácticamente cierto	+0,44	+0,68
Tmin (°C)	+0,69	Prácticamente cierto	+0,57	+0,82
Tmax (°C)	+0,43	Prácticamente cierto	+0,26	+0,60
P (mm)	-41,90	Prácticamente cierto	-67,72	-16,08
U (%)	-1,20	Prácticamente cierto	-1,82	-0,58
N (%)	+2,46	Prácticamente cierto	+1,94	+2,98
V (m/s)	+0,14	Prácticamente cierto	+0,06	+0,21

Tendencias para SPdP, calculadas a partir de observaciones durante el intervalo 1973-2008. Para la interpretación de la confianza estadística debe consultarse el cuadro 2.2. El intervalo de confianza del 95% indica estadísticamente que el 5% de la muestra se reparte más allá de los límites indicados.

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Hay determinados usos de la información climática que requieren el conocimiento de los valores extremos de las distribuciones. Por ejemplo, en el caso de la precipitación es importante conocer las estadísticas de las lluvias intensas, que pueden producir inundaciones, para la planificación urbanística de entornos próximos a zonas potencialmente inundables. Los extremos de las temperaturas máxima y mínima también son importantes, por ejemplo, para la adaptación o supervivencia de algunas especies y ecosistemas, así como para el diseño de los sistemas de acondicionamiento de aire.

En el cuadro 3.5 se incluyen las estadísticas de extremos de las mismas variables que en los cuadros 3.3 y 3.4, calculadas a partir de la misma base de datos. Se hace notar que las muestras son ahora más pequeñas al considerar solo aquellos días en que la variable no alcanza el percentil del 5% o supera el percentil de 95%. Los valores correspondientes a estos percentiles, para cada variable, aparecen en la segunda columna del cuadro.

La columna de la confianza estadística pone de manifiesto el hecho indicado. Al ser más pobre la estadística, en muchos casos se han obtenido confianzas de niveles más débiles. Haciendo referencia a aquellos extremos que en clima presente han cambiado de forma prácticamente cierta, se puede decir:

- a) Se ha reducido el número de días con temperaturas medias muy bajas.
- b) Ha disminuido el número de días con temperatura mínima muy baja y ha aumentado el número de días con temperatura mínima muy alta.
- c) Ha aumentado el número de días con humedad relativa muy baja.
- d) Ha disminuido el número de días con cobertura nubosa muy pequeña.
- e) Se ha reducido el número de días con vientos muy débiles.

Cuadro 3.5 SPdP: tendencias de eventos extremos (1973-2008)

Variable	Percentil	Tasa de cambio (por década)	Confianza estadística	95% intervalo de confianza	
				Límite inferior	Límite superior
T (°C)	<P05 (7,4 °C)	-4,44	Prácticamente cierto	-7,34	-1,54
	>P95 (25,9 °C)	+5,75	Sumamente probable	+1,26	+10,23
Tmin (°C)	<P05 (0,1 °C)	-6,36	Prácticamente cierto	-8,89	-3,84
	>P95 (20,0 °C)	+5,42	Prácticamente cierto	+3,59	+7,24
Tmax (°C)	<P05 (13,2 °C)	-3,96	Sumamente probable	-6,93	-0,99
	>P95 (32,7 °C)	+2,26	Probable	-0,43	+4,95
P (mm)	= 0 mm	-2,30	Probable	-5,74	+1,15
	>P95 (24,9 mm)	-0,35	Probable	-0,81	+0,12
U (%)	<P05 (58,2%)	+7,79	Prácticamente cierto	+5,78	+9,80
	>P95 (90,8%)	-0,39	Muy improbable	-2,64	+1,87
N (%)	<P05 (6,2%)	-4,25	Prácticamente cierto	-5,80	-2,70
	>P95 (85,6%)	+2,10	Sumamente probable	+0,57	+3,64
V (m/s)	<P05 (0,9 m/s)	-11,05	Prácticamente cierto	-12,87	-9,23
	>P95 (6,0 m/s)	-0,18	Improbable	-2,82	+2,46

Semejante al cuadro 3.4, pero para el cambio en la frecuencia de días que en un año cumplen la condición de extremo indicada por los percentiles del 5% y del 95% de la segunda columna.

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Todo ello caracteriza el clima presente y los cambios experimentados por las condiciones atmosféricas en SPdP. En el futuro cabe esperar que las condiciones sean otras. Para resolver esta cuestión se planteó un proceso de *downscaling* híbrido, dinámico y estadístico, a fin de obte-

ner proyecciones climáticas sobre el Aeropuerto de Palma, como punto representativo de SPdP. La regionalización dinámica, previa a la estadística, fue la obtenida en el proyecto ENSEMBLES (van der Linden y Mitchell 2009), comentado en el apartado 3.1, con el escenario SRES A1B como forzamiento y con 18 modelos regionales. Las proyecciones de estos modelos fueron promediadas para obtener las medias multimodelo de cada una de las variables consideradas.

En el cuadro 3.6 se dan las tendencias de las temperaturas diarias media, mínima y máxima, de la precipitación, de la humedad relativa, nubosidad y viento deducidas mediante *downscaling* sobre SPdP para el intervalo 2021-2050.

Cuadro 3.6 SPdP: tendencias medias proyectadas (2021-2050, SRES A1B)

Variable (media multimodelo)	Tasa de cambio (por década)	Confianza estadística	95% intervalo de confianza	
			Límite inferior	Límite superior
T (°C)	+0,32	Prácticamente cierto	+0,28	+0,37
Tmin (°C)	+0,31	Prácticamente cierto	+0,26	+0,36
Tmax (°C)	+0,33	Prácticamente cierto	+0,29	+0,38
P (mm)	-6,98	Probable	-16,39	+2,43
U (%)	-0,11	Prácticamente cierto	-0,18	-0,04
N (%)	-0,16	Muy probable	-0,33	+0,01
V (m/s)	-0,01	Prácticamente cierto	-0,02	-0,01

Como el cuadro 3.4, pero referido a proyecciones multimodelo con el escenario SRES A1B para el intervalo 2021-2050.

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Se observa a partir de estas proyecciones que las tendencias se moderarían, en comparación con las obtenidas a partir de observaciones.

Pese a eso, las temperaturas aumentarían a un ritmo de más de 3 °C por siglo, muy superior a la media global publicada en AR4. Las demás variables decrecen en la proyección considerada.

Al igual que en clima presente, son de interés las estadísticas de valores extremos. Estas aparecen en el cuadro 3.7. Los cambios en la frecuencia de los extremos se han calculado para el intervalo 2021-2050 en relación a la treintena 1979-2008.

Cuadro 3.7 SPdP: cambios en las tendencias de eventos extremos (1979-2008/2021-2050, SRES A1B)

Variable	Percentil	Tasa de cambio (por década)	Confianza estadística	95% intervalo de confianza	
				Límite inferior	Límite superior
T (°C)	<P05 (7,4 °C)	-1,56	Prácticamente cierto	-2,48	-0,63
	>P95 (26,1 °C)	+7,22	Prácticamente cierto	+5,09	+9,35
Tmin (°C)	<P05 (0,6 °C)	-2,00	Prácticamente cierto	-3,11	-0,90
	>P95 (20,0 °C)	+7,83	Prácticamente cierto	+5,42	+10,24
Tmax (°C)	<P05 (13,4 °C)	-2,39	Prácticamente cierto	-3,51	-1,28
	>P95 (33,0 °C)	+5,56	Prácticamente cierto	+3,68	+7,43
P (mm)	= 0 mm	+2,23	Muy probable	+0,01	+4,45
	>P95 (24,4 mm)	-0,04	Improbable	-0,28	+0,20
U (%)	<P05 (57,5 %)	+0,77	Probable	-0,59	+2,13
	>P95 (91,1 %)	-0,31	Más probable que improbable	-1,15	+0,52
N (%)	<P05 (6,7 %)	-0,65	Improbable	-4,30	+3,00
	>P95 (85,8 %)	+0,69	Probable	-0,52	+1,90
V (m/s)	<P05 (1,0 m/s)	+0,21	Probable	-0,21	+0,64
	>P95 (6,1 m/s)	-0,10	Improbable	-1,04	+0,84

Como el cuadro 3.5, pero referido a proyecciones multimodelo con el escenario SRES A1B. Los cambios en la frecuencia de los extremos se refieren al intervalo 2021-2050 en relación al 1979-2008.

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Las proyecciones indican, con nivel de confianza prácticamente cierto, que disminuiría el número de días con temperaturas diarias extremadamente bajas y que, por el contrario, aumentaría el número de días con temperaturas diarias extremadamente altas. Las demás variables presentan niveles de confianza menores.

Si se comparan los umbrales de los extremos de los cuadros 3.5 y 3.7 se encontrarán algunas diferencias. Son debidas a utilizar un diferente intervalo de tiempo para la caracterización del clima presente (38 años en el cuadro 3.5 frente a 30 en el 3.7).

A modo de resumen se incluyen en el cuadro 3.8, para temperatura y precipitación, los regímenes medios observados y proyectados en diferentes ventanas temporales hasta 2050, en concreto, en cuatro décadas sucesivas. También aparecen los cambios para cada una de las décadas referidas al clima presente (1979-2008).

Cuadro 3.8 SPdP: regímenes medios anuales observados (1979-2008) y proyectados (2010-50, SRES A1B)

Ventana temporal	Presente (1979-2008)	2015 (2010-19)	2025 (2020-29)	2035 (2030-39)	2045 (2040-50)
T (°C)	16,6	17,5	17,7	18,1	18,5
ΔT (°C)	—	+0,9	+1,1	+1,5	+1,9
P (mm)	435,0	436,2	412,0	412,4	394,3
ΔP (%)	—	+0,3	-5,3	-5,2	-9,4

Valores medios y cambios proyectados para temperatura y precipitación. Las proyecciones se indican para cuatro décadas, hasta mitad del siglo XXI.

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Las proyecciones indican un aumento progresivo de la temperatura media diaria, mientras que la precipitación se incrementaría ligeramente en esta década y en la de los años 30, pero con tendencia general negativa durante la primera mitad del siglo presente.

Con los resultados anteriores y otros, no incluidos aquí, se puede evaluar el impacto del cambio climático en diferentes sectores. El único que se presenta a continuación es el que hace referencia al turismo.

Desde hace décadas se ha venido investigando la relación que existe entre las condiciones ambientales medias, el clima, y la afluencia turística a los enclaves más populares. No hay ninguna duda que cuando se planifica un desplazamiento, o cuando los mayoristas turísticos ofrecen un destino, el clima tiene un papel dominante para cierto tipo de turismo y casi exclusivo para el turismo de sol y playa. Se ha realizado investigación de campo *a priori*, por los métodos típicamente usados en sociología, para obtener índices que expresen la relación clima-turismo y *a posteriori* para correlacionar los índices con el flujo de turistas.

Admitida la bondad un índice, si resulta que depende de variables climatológicas que pueden ser obtenidas para clima futuro mediante proyecciones, es posible, también, proyectar el índice hacia el futuro y obtener información acerca de las posibilidades turísticas de una zona en clima futuro.

Es evidente que la decisión de disfrutar de las vacaciones en un lugar no depende solo del clima; hay otros factores, difíciles de cuantificar o incluso de cuantificación imposible. Esta es una de las razones por las que se acostumbra a señalar que estos índices representan, en realidad, el potencial turístico. En este caso pueden depender solo del clima pero serían válidos para un determinado tipo de turismo. Un turista inglés buscando emplazamiento para turismo 3S espera encontrar condiciones diferentes de las que buscaría un escocés amante del golf. Y lo mismo se podría decir para cicloturismo, senderismo, vela, etc.

Para evaluar el impacto del cambio climático en el potencial turístico, de sol y playa, de SPdP se ha empleado un índice de segunda generación, CIT (del inglés, *Climate Index for Tourism*), introducido y verificado por Freitas, Scott y McBoyle (2008). Este índice depende de variables observables, como son nubosidad, precipitación y viento, y de una temperatura, PET (del inglés, *Physiological Equivalent Temperature*), calculada, a partir de variables ambientales, mediante un modelo de balance de energía para una persona. Fijados los umbrales para cada una de las variables se establece el índice, CIT, que varía en un rango de 1, para las peores condiciones, a 7, para condiciones ideales. En el estudio relativo a SPdP se agruparon valores del índice en las siguientes categorías:

- Inaceptable CIT 1, 2, 3
- Aceptable CIT 4,5
- Ideal CIT 6,7

En el cuadro 3.9 se expresa el impacto del cambio climático en el turismo, para las diferentes estaciones del año. De esta forma se puede analizar el impacto estacional, que es lo que presenta interés desde el punto de vista de los empresarios y gestores turísticos. En el cuadro 3.9 se pueden ver los resultados estación por estación (invierno DEF, primavera MAM, verano JJA, otoño SON). Se indican, para cada categoría, el número medio de días en clima presente (1979-2008), en la proyección multimodelo para 2021-2050 con el escenario SRES A1B y el cambio en el número de días entre las dos ventanas temporales, que corresponden a clima proyectado y clima presente.

Cuadro 3.9 SPdP: impacto del cambio climático en el CIT

Número de días en categoría		Inaceptable	Aceptable	Ideal
Clima presente 1979-2008 (30 años)	Invierno	52,8	28,9	8,7
	Primavera	17,4	37,7	35,8
	Verano	7,7	49,9	34,4
	Otoño	41,5	31,5	18,9
Media multimodelo 2021-2050 (30 años)	Invierno	51,5	32,4	6,3
	Primavera	15,9	39,8	35,3
	Verano	15,8	52,1	24,1
	Otoño	39,5	36,4	16
Cambio número de días	Invierno	-1,3	3,5	-2,4
	Primavera	-1,5	2,1	-0,5
	Verano	8,1	2,2	-10,3
	Otoño	2,0	4,9	-2,9

Número medio de días de cada estación en cada categoría de CIT para clima presente (1979-2008), para la proyección a 2021-2050 (multimodelo, SRES A1B) y cambio en el número medio de días de 1979-2008 a 2021-2050 en cada categoría y estación. Los meses incluidos en cada estación son DEF para el invierno, MAM para la primavera, JJA para el verano y SON para el otoño.

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Teniendo en cuenta las categorías de CIT aceptable e ideal, se proyecta un aumento del número de días para la primera categoría y una reducción para la segunda en todas las estaciones del año. En invierno y primavera el aumento en el número de días categorizados como aceptables no solo sería debido a la disminución del número de días en la categoría ideal sino, también, a la disminución del número de días en la categoría no aceptable. Los resultados obtenidos apuntarían a una tendencia a la desestacionalización del turismo de sol y playa como consecuencia del cambio climático.

Los histogramas del rango completo del índice CIT (de 1 a 7 sin agrupar en categorías), permiten analizar la estructura fina de los cambios, atribuibles al cambio climático, de la frecuencia de días en cada estación (gráfico 3.1). Un hecho remarcable es que, en clima presente, el valor 3 de CIT es el más frecuente. Se trata de condiciones inaceptables pero con valor de CIT limítrofe con las condiciones aceptables. En la proyección al clima futuro, excepto en la primavera —cuyo máximo se da para valor 6 de CIT—, también el valor 3 corresponde a la moda.

Gráfico 3.1 Histogramas estacionales del índice CIT para clima presente y clima proyectado

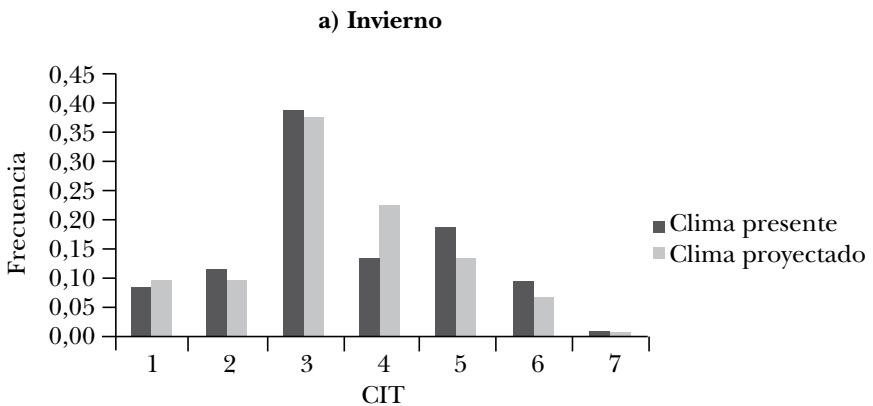
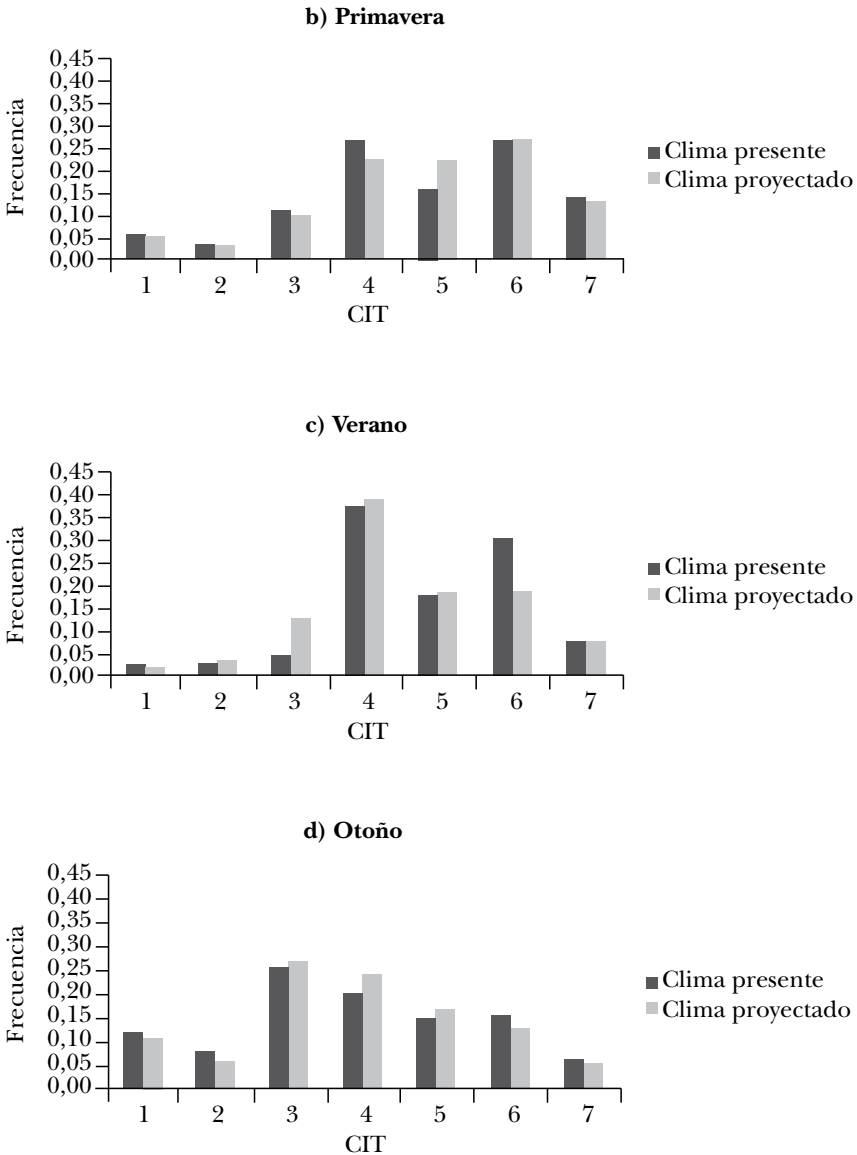


Gráfico 3.1 (cont.) Histogramas estacionales del índice CIT para clima presente y clima proyectado



Histogramas del índice CIT (rango 1-7) en clima presente (1979-2008) y en la proyección multimodelo a clima futuro (2021-2050 con escenario SRES A1B), para invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).

Fuente: Elaborado por Grup de Meteorologia, UIB.

Analizadas las condiciones en que se obtiene el valor 3 del índice, resulta evidente que no son aptas para el turismo 3S, pero lo podrían ser para otro tipo de actividad. Por ejemplo, en los días muy calurosos sin lluvia el índice 3 se asigna a días con cobertura nubosa superior al 45% o viento superior a 6 m/s; en días frescos o ligeramente fríos, sin lluvia y con viento inferior a 6 m/s, se asigna a días con nubosidad superior al 45% y en días fríos, sin lluvia y con viento inferior a 6 m/s, se asigna a días con nubosidad inferior al 45%. Un análisis posterior de diferentes ofertas de actividades de recreo al aire libre permitiría deducir si es factible diversificar la oferta para SPdP y aprovechar positivamente el impacto del cambio climático.

3.4 ¿Mitigación o adaptación?

Sentada la parte científica, referida a lo que sabemos sobre el clima y el cambio climático, llega el momento de plantear la acción; aquello que podemos hacer, que la Sociedad puede hacer, frente al cambio climático y sus consecuencias. Hay que empezar diciendo que son posibles dos tipos de respuestas: la mitigación y la adaptación. Las definiciones de estas estrategias aparecen en los glosarios de los diferentes informes del IPCC. Desde el primero de ellos, FAR, ha habido algunas modificaciones, aunque ligeras. No haremos referencias a ellas. Veamos.

Por *mitigación* se entiende cualquier intervención humana que tienda a reducir el forzamiento antropogénico del sistema climático; abarca diversas estrategias encaminadas a reducir las fuentes y emisiones de gases con efecto invernadero y a potenciar sus sumideros.

En cuanto a la adaptación, se indica que es cualquier ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados, o a sus consecuencias, que atenúa los efectos perjudiciales o explota las oportunidades beneficiosas. Cabe distinguir varios tipos de adaptación, en particular: la anticipatoria, la autónoma y la planificada.

La adaptación anticipadora es aquella que tiene lugar antes de que se observen efectos del cambio climático. Se denomina también *adaptación proactiva*.

Se habla de adaptación autónoma cuando no constituye una respuesta consciente a estímulos climáticos, sino que es desencadenada por cambios ecológicos de los sistemas naturales o por alteraciones del mercado o del bienestar de los sistemas humanos. Se denomina también adaptación espontánea.

Por último, la adaptación planificada es el resultado de una decisión expresa en un marco de políticas, basada en el reconocimiento de que las condiciones han cambiado o están próximas a cambiar y de que es necesario adoptar medidas para retornar a un estado deseado, para mantenerlo o para alcanzarlo.

Debe haber quedado claro, a partir de estas definiciones que la mitigación lucha contra las «causas» del cambio climático.

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático,²⁴ aprobada en mayo de 1992, entró en vigor en marzo de 1994 y fue el primer acuerdo internacional encaminado a la mitigación, aunque en el acuerdo no aparecen medidas concretas. Se indicaba que el objetivo era conseguir la «estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible». Sin embargo, ni define lo que es una interferencia peligrosa ni da ninguna indicación acerca de cómo proceder.

La cuantificación de un compromiso internacional llegó con la adición del Protocolo de Kioto²⁵ a la Convención. Fue aprobado en diciembre de 1997, con gran dificultad tras unas intensas y largas negociaciones. A pesar de adoptar una reducción de las emisiones de gases de efecto

²⁴ Se puede consultar la web de la Convención: www.unfccc.int.

²⁵ Existe información específica sobre el Protocolo en la web de la Convención. Concretamente en: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php.

invernadero muy limitada (una media de 5,2% respecto a los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012, pero no para todos los países, pues se dejó fuera a los que se consideran en vías de desarrollo) no entró en vigor hasta febrero de 2005, debido fundamentalmente a Estados Unidos, que ni ratificó ni ha procedido aún a la ratificación. Como consecuencia se tuvo que esperar a que se cumplieran, sin ellos, las condiciones establecidas en el propio Protocolo.²⁶

La Unión Europea ha promovido una reducción de emisiones de GEI que permita limitar el aumento de la temperatura media en superficie a 2 °C. Según los cálculos realizados, se conseguiría esto de no llegar a una concentración de CO₂ en la atmósfera de 450 ppm (o 550 ppm de CO₂ equivalente). Se recuerda que la concentración preindustrial de CO₂ en la atmósfera era de 280 ppm y que en la actualidad la concentración es superior a 380 ppm. Se estima que, para conseguir la limitación indicada de 450 ppm, habría que reducir las emisiones de CO₂ del orden un 30% hacia 2020 y del orden de un 60% a un 80% hacia el año 2050.

Dichos valores ponen de manifiesto lo ínfimo que resulta el acuerdo alcanzado en Kioto. Pero sirve también para visualizar lo improbable que resulta alcanzar el objetivo propuesto por la Unión Europea: no superar un incremento de temperatura media en superficie de 2 °C.

No se trataría entonces de una alternativa, mitigación o adaptación, como se indicaba en el título del apartado. Debe ser mitigación y adaptación. Es necesario que se establezcan políticas proactivas que permitan minimizar los efectos adversos del cambio climático.

Aquí entra en juego la Economía. Todo tiene un coste; la mitigación, la adaptación y el no hacer nada hasta que lleguen los peores efectos. El informe Stern, coordinado por el economista Nicholas Stern,²⁷ ponía luz en este sentido: es posible tener éxito actuando ya y todos. Es más caro no hacer nada.

²⁶ Se trata de un doble umbral, 55 Partes del anexo I de la Convención que sean responsables de, al menos, el 55% de las emisiones de CO₂ correspondientes al año 1990.

²⁷ Premio Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento 2010 en su categoría Cambio Climático.

Una opción que está surgiendo, aunque no tiene aceptación general entre los expertos, es la Geoingeniería. Muchos, entre los que me incluyo, consideramos que algunas de las propuestas son como *experimentos*, cuyo resultado es incierto. Se trataría de realizar acciones sobre el sistema climático sin antecedente directo, para las que no se conoce bien cuál podría ser el resultado. Si apareciera algo inesperado es más que probable que no hubiera forma de volver atrás; la evolución podría ser irreversible.

Entre las propuestas se encuentra, por ejemplo, la fertilización de los océanos. La idea es estimular el crecimiento del fitoplancton con hierro, lo que favorecería el secuestro de carbono. Se han realizado diferentes campañas y experimentos que han dado resultados no coherentes. Las campañas se han llevado a cabo en los océanos de los dos hemisferios en programas de investigación europeos y norteamericanos, principalmente. Parece que la eficiencia del proceso es baja o, al menos, menor de lo que se había estimado, con lo que el coste podría ser demasiado elevado. Por otra parte, la fertilización con hierro incrementa la producción de metano y óxido nitroso (que son gases de efecto invernadero), lo cual puede producir como un efecto de envenenamiento con impacto en la cadena alimentaria. Además, no está clara la duración de la efectividad del proceso. En cualquier caso, la muerte del plancton devolvería el CO₂ a la atmósfera.

Otro ejemplo de acción conduce a la modificación del forzamiento radiativo del Sol. La idea sería reducir la cantidad de energía procedente del Sol que aprovecha la Tierra en una cantidad suficiente para compensar el calentamiento producido por la intensificación del efecto invernadero. Se han propuesto tres tipos de técnicas. En una de ellas se trataría de instalar en el espacio barreras deflectoras de la radiación solar. En otra se propone introducir aerosoles reflectantes en la estratosfera. Una tercera implicaría modificar el albedo de algunas nubes, estratocúmulos, mediante siembra con agua marina atomizada.

Un comentario general con respecto a estas últimas técnicas es que si bien la física subyacente es clara y está bien establecida, no ocurre lo mismo, en algunos casos, con sus posibles consecuencias en la atmósfera. En todas las intervenciones anteriores se echa todavía en falta un análisis económico riguroso.

Otras propuestas, que no se van a comentar, son el uso de almacenamientos geológicos profundos o los fondos oceánicos, la fabricación de biocombustible a partir de CO₂, y el empleo de pinturas para modificar el albedo de la superficie de la Tierra.

Como comentario general final, necesario, para analizar la bondad de la acción a emprender hay que tener en cuenta todo el ciclo de vida del producto, dispositivo o instalación. Desde el punto de vista del cambio climático se deben estudiar las emisiones de gases de efecto invernadero en todo el proceso, desde la fabricación, y no únicamente en la aplicación final.

Otro punto que hay que tratar necesariamente es el de la energía nuclear. No es un tema fácil y menos en estos momentos en que se ha producido la casi destrucción de la central de Fukushima como consecuencia del tremendo tsunami que arrasó el norte de Japón y de las explosiones ocurridas después del desastre natural. Una de las dificultades del tratamiento de la energía nuclear es que existen opiniones viscerales a favor y en contra.

Supuesto que se resolvieran los problemas de seguridad y de almacenamiento de los residuos, y pensando solo en el cambio climático, repito, solo en el cambio climático, la nuclear es una posibilidad que no habría que despreciar si consideramos las emisiones directas de gases de efecto invernadero. Otro asunto es el enfoque relacionado con la población humana y la disponibilidad de energía, comentado con anterioridad. Si se admite que el motor del aumento de población es el consumo de energía, el uso de la energía nuclear llevaría a la humanidad más rápidamente al límite de capacidad del Planeta. A partir de ese momento, el problema sería otro.

3.5 Clima, política y medios de comunicación

El tiempo y el clima siempre han estado presentes, ejerciendo su influencia sobre muchas de las actividades humanas. El tiempo influye en nuestra vida del día a día (llevar paraguas o no, cambiar a vestimen-

ta de invierno, cerrar un aeropuerto o un parque de atracciones, etc.) y el clima nos afecta con un alcance temporal mayor (fijar el domicilio en otra ciudad, estudiar la ubicación de una pista de esquí, las migraciones en la antigüedad, etc.). Si el clima de la Tierra se mantuviera inalterado, o autorregulado como durante mucho tiempo se decía, una decisión sobre cualquiera las últimas acciones tendría validez permanente. Con un clima cambiante, el proceso de toma de decisión es conceptualmente más complicado, aunque normalmente no se toma en consideración su cambio. No en todas las actividades, todavía, se decide de forma parecida a como se hizo en el caso de SPdP, tratado en el apartado 3.3.

Se vio en el primer capítulo que no fue fácil que el conocimiento sobre el cambio climático, las llamadas de atención de los expertos, calara científica y socialmente. Se creía que una cosa eran las edades de hielo y otra, diferente, el efecto de las actividades humanas, que podía ser *absorbido* por el planeta sin que implicara un cambio en el clima. La propia Organización Meteorológica Mundial, dependiente de Naciones Unidas, tenía una postura tibia hasta que ya convencida se decidió a impulsar, en 1979, junto con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la creación del IPCC que, finalmente, se produjo en 1988. Su primer informe sirvió para preparar la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Es de justicia reconocer que las organizaciones ecologistas fueron pioneras en mostrar la preocupación por el cambio climático, y se mantuvieron junto a los científicos, aunque sus fines no sean coincidentes.

En junio de 1992 se celebró la llamada Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro (Brasil). Su convocatoria levantó muchas expectativas y gozó de gran cobertura mediática. Era la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo, la primera tras la aprobación de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático; hubo participación de todos los gobiernos del mundo con representación en la ONU. Entre los objetivos de la Conferencia estaban la tan conocida Agenda 21 y la apertura del periodo de firmas para la ratificación de la Convención. Resultados concretos, más bien pobres.

En 1997, tras complicadas negociaciones, se aprueba en Kioto (Japón), el archiconocido, y anteriormente comentado, Protocolo de Kioto, adenda a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático. En todo el proceso tuvo un papel impagable el embajador Raúl Estrada, de la República Argentina. Hay quien opina que sin él se habría fracasado en la negociación.

La conferencia de Kioto tuvo una impresionante repercusión mediática en todo el mundo, aunque, como ya se ha dicho en el apartado 3.4, realmente el compromiso alcanzado fue mínimo. No obstante, lo importante del Protocolo de Kioto es que, por primera vez, se logró un acuerdo político internacional para combatir el cambio climático. No hemos mejorado demasiado después de celebradas las conferencias de Copenhague, muy esperada, y Cancún.

Tras Kioto, se apreció un aumento del interés por parte de los gobiernos en abordar el problema del cambio climático, si comparamos con la respuesta que había habido después de Río. Mi opinión es que, salvo excepciones, más bien se trató de un interés, digamos, cosmético. Recuerdo que, unos años después de Kioto, un asesor político de alto nivel me comentó que si llevaban las políticas de mitigación al programa electoral perderían las siguientes elecciones. Evidentemente, las políticas relacionadas con el cambio climático no son un asunto de partido. En mi opinión se requiere un pacto de Estado; no se deberían abordar en las contiendas electorales. La verdad, sin embargo, es que algunos no entienden esto de la misma manera.

Una mención especial merece, y lo digo a título totalmente personal, el Gobierno del Reino Unido. Ante la controversia existente en relación con la alternativa de actuar de forma inmediata o esperar a que los impactos del cambio climático fueran mayores, encargó un estudio económico, coordinado por Stern, que fue presentado en 2006. En dicho estudio, que se convirtió rápidamente en una referencia, se decía que el crecimiento económico mundial disminuiría entre un 5% y un 20% si no se hacía nada, mientras que pasar a una economía de bajas emisiones podría costar del orden de un 1% del PIB mundial cada año. Convenía, por tanto, actuar inmediatamente y actuar todos.

Hace unos meses, al conseguir el premio Fronteras del Conocimiento 2010 en la categoría de cambio climático, indicó Stern:

El coste de reducir las emisiones es mayor de lo que estimamos, porque las consecuencias del cambio climático están manifestándose más rápidamente. Las emisiones están subiendo mucho, y la capacidad del océano para actuar como sumidero de carbono es menor de lo que creíamos. Otros efectos, como el deshielo de las regiones polares, también se están notando mucho más rápido. Hay que emprender acciones más drásticas, por eso los costes son mayores.

Pero no se debe considerar que el estudio haya sido un fracaso, continuó:

La economía del cambio climático es la revolución industrial del futuro. Es una auténtica oportunidad. Los países que se sumen pronto a este nuevo mercado en crecimiento sabrán aprovecharla, los que no, se quedarán atrás.

Los medios de comunicación han jugado un papel muy importante en hacer llegar a los ciudadanos la información sobre cambio climático, fundamentalmente después de la reunión de Río. Desde entonces no ha habido conferencia de Naciones Unidas vinculada a la Convención que no haya sido cubierta prácticamente por todos los medios escritos o audiovisuales. Como ya se ha dicho, la reunión que condujo al establecimiento del Protocolo de Kioto tuvo un enorme seguimiento y, posiblemente, es la que mayor difusión ha tenido. En muchos casos no ha habido únicamente información, sino que se ha querido acercar al público a miembros de las delegaciones participantes, ya sean técnicos, científicos o políticos, con lo que se ha ido formando opinión y se ha forjado también un cierto nivel de concienciación. Como se ha ido ganando presencia en los medios, se ha incrementado, en paralelo, la visibilidad y relevancia social del cambio climático.

Por otra parte, los medios han conseguido mantener encendida la llama de la preocupación por el problema cada vez que han aparecido entrevistas a científicos y a miembros de grupos ecologistas. Normalmente esto ha ocurrido al producirse avances en el conocimiento o cuando se

ha puesto de manifiesto la consecución de alguno de los records que se han ido alcanzando, por ejemplo en la temperatura media de las capas bajas de la atmósfera. También, en ocasiones, han puesto en evidencia las posturas tibias, o escépticas, de los políticos y las debilidades de los gobiernos, que no pasan decididamente a la acción a pesar de haber evidencias más que suficientes y acuerdos internacionales vinculantes.

Este papel de los medios, que definiendo abiertamente, debe continuar en el futuro y se deben buscar fórmulas colaborativas que permitan que se vaya incrementando. No quiero comentar, pero sí poner de manifiesto, que en algunas, pocas, ocasiones ciertos medios han servido como difusores de posturas contrarias al conocimiento científico debidamente establecido, del tipo que se trataron en el capítulo primero. Obviamente, con este rol acientífico de los medios de comunicación no estoy de acuerdo; como científico, claro.

Para terminar permítame el lector un comentario de cara al futuro. Nos encontramos en un periodo de fuerte crisis económica. Es evidente que las emisiones se van a reducir, se están reduciendo ya, como consecuencia de una debilitación del consumo energético. Quiero advertir que no por eso se puede bajar la guardia; seguramente nos van a decir que hemos mejorado, pero comentarios así están fuera de lugar y no se deben tomar en consideración. El proceso sigue, el mal ya se ha producido, la inercia del sistema colabora a que la concentración de los gases de efecto invernadero continúe aumentando, pasando por encima de los periodos de crisis.

3.6 Cambio climático y sociedad

Aceptado el problema ambiental del cambio climático, uno de los retos más importantes de la humanidad durante el siglo XXI, todos los integrantes de la sociedad debemos colaborar para hacerle frente aportando responsablemente nuestra cuota. Esa responsabilidad pasa por tener una sociedad informada y formada, lo que no es fácil ni barato.

De la lectura de lo anterior ha debido quedar claro que la humanidad ha creado el problema, si bien se ha hecho, y se hace, de forma muy

desigual. El cambio climático está íntimamente vinculado a la actividad humana y hemos sido los países más desarrollados los que hemos contribuido de forma más importante al aumento de concentración en la atmósfera del CO₂ y demás gases de efecto invernadero. Los países en vías de desarrollo, que ansían y tienen derecho a vivir lo mejor posible, están pasando en la actualidad a liderar el *ranking* de las emisiones. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de llegar a acuerdos sobre las emisiones que superen el marco actual, fijado por el Protocolo de Kioto.

Creado el problema, es toda la sociedad la que sufre, está sufriendo ya, y va a sufrir de forma acentuada, las consecuencias, si bien esto también ocurre de forma muy desigual, debido a las diferentes vulnerabilidades. Curiosamente es cierto que no son las sociedades más vulnerables las que han generado la mayor parte del problema. Otro aspecto a tener en cuenta, precisamente en las zonas más vulnerables, es la conflictividad que irá asociada a determinados impactos, como puede ser la disminución de los recursos hídricos en algunas regiones del planeta o la reducción de la producción agrícola de ciertos tipos de cultivo.

Para abordar la lucha y conseguir que los efectos sean los menores posibles, es muy importante la complicidad ciencia-sociedad, que se debe dar de muy diferentes maneras. Si esta reflexión se pone encima de la mesa cuando se mantiene un intercambio de opiniones, hay quien opina que es difícil de conseguir, y obviamente lo es. Sin embargo, ha habido algunas problemáticas anteriores donde se ha dado esa complicidad, como han sido los problemas de la *lluvia ácida* o del *agujero de ozono*, aunque bien es cierto que no están directamente relacionadas con el cambio climático.

Ya se indicó que una de las misiones de los científicos es explicar a la gente lo que se hace, cómo se hace, lo que se descubre... lo cual es muy fácil de decir, pero difícil de llevar a cabo. El papel de los medios de comunicación, tan importante en la difusión del cambio climático, lo debe seguir siendo y puede ser una plataforma que acerque el conocimiento a la sociedad. Para que llegue a ser así es muy importante, casi diría imprescindible, que los periodistas tengan una formación científica suficiente. No se trata de que sean científicos, sino de que

entiendan qué es lo que los científicos hacen y que sepan distinguir cuándo un tema hace referencia a conocimiento de cuándo se trata simplemente de una opinión. Si ahora se aborda la formación desde un punto de vista empresarial, del medio de comunicación concreto, deberían tener muy claro que la mejor información se consigue por medio de los profesionales mejor formados, y más ahora que tanto se habla de la sociedad del conocimiento. Esto, que es verdad en general, lo es más cuando se abordan temas científicos, como por ejemplo el que nos ocupa del cambio climático. Lo que quiero aportar como conclusión es que la complicidad ciencia-medios de comunicación debe ser el primer paso para conseguir la complicidad ciencia-sociedad.

Volviendo con la sociedad del conocimiento y con la formación, las universidades tienen también su misión. En algunas han empezado a aparecer Másteres interdisciplinares sobre clima y sociedad. Se trataría de organizar programas atractivos, de amplio espectro temático, con participación de especialistas de todos los ámbitos del saber relacionados con el clima, sin pretensiones de alta investigación (para eso hay otros programas), enfocados a un alumnado con formación de grado variada. Este tipo de propuesta podría dar respuesta a la necesidad de formación comentada para los medios de comunicación, al tiempo que conseguiría elevar el nivel de conocimiento general acerca del problema del cambio climático.

Y ¿qué decir de los políticos? Deben ser los que conduzcan la acción, ya no tienen cabida operaciones cosméticas, el discurso debe ser de tal forma que no aparezcan dudas en los ciudadanos. Los científicos debemos aportar el último conocimiento que se tenga del problema, posibles actuaciones concretas, pero las decisiones las deben tomar ellos; es su responsabilidad. Ese es el mandato que han recibido de la sociedad.

Para cerrar este apartado, este capítulo y el libro, no estaría mal contestar a la pregunta: «Pero, en concreto, ¿qué puedo hacer yo?».

Pues miren, hace tiempo que desde Europa nos recomiendan realizar cosas relativamente sencillas, bajo cuatro ideas conductoras:

1. Reducir.
2. Desconectar.
3. Reciclar.
4. Ir a pie.

Se proponen a continuación algunas de las acciones concretas:

- Reducir el nivel de calefacción.
- Programar el termostato.
- Instalar un buen sistema de aislamiento.
- Cambiar el viejo monitor del ordenador por una pantalla LCD.
- No utilizar el programa de prelavado de la lavadora.
- Desconectar la iluminación cuando no se necesite.
- Desconectar el cargador del móvil cuando no se utilice.
- Usar la secadora solo cuando sea estrictamente necesario.
- Separar todo lo posible basura y residuos en general para reciclar.
- Reutilizar las bolsas de la compra.
- Comprar un árbol de Navidad reciclable.
- Imprimir menos y reutilizar el papel.
- Tratar de evitar viajes cortos en coche.
- Evitar el lavado automático.
- Al cambiar de coche, no olvidar tener en cuenta el consumo de combustible del nuevo vehículo.
- Las bicicletas no producen gases de efecto invernadero ni contaminación.
- Utilizar en lo posible transporte público.
- Consumir alimentos producidos en el ámbito local.
- Plantar un árbol.
- Si se necesita comprar una impresora o copiadora adquirir una que disponga de la función de imprimir por las dos caras.

Este tipo de recetas sencillas, fáciles de realizar por todos y cada uno de nosotros, pueden ser entendidas como buenas prácticas, pero buenas prácticas ambientales en general. Todo el mundo estaría de acuerdo en que, aunque no existiera el problema del cambio climático, el actuar de esa forma sería positivo para la salud del planeta.

Bibliografía

Bibliografía comentada

DUARTE et al. 2009.

Se trata de la segunda edición, ampliada y revisada, de un libro de divulgación cuya primera edición, de 2006, fue premiada por el Museo de la Ciencia de Valladolid en 2008. Elaborado por un equipo interdisciplinar trata el problema del cambio global con lenguaje comprensible para cualquier lector. Interesantes los apartados de energía y de impactos social y económico.

GARCÍA MOLINER 2001.

Llamativa obra de divulgación donde el autor, Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica de 1992, explica en detalle, y amenamente, el denominado Método Científico, o sea, cómo trabaja la ciencia. Se hace algo de historia y se apuntan las razones por las que en España la ciencia no ha alcanzado el nivel de desarrollo y no tiene la relevancia social de que goza en otros países.

HARTMANN, D. L. *Global Physical Climatology*. San Diego: Academic Press, 1994.

Se trata de un manual que incluye, a un nivel intermedio, la física que permite explicar el clima de la Tierra, los cambios de clima y el cambio climático. Esta obra no figura en la Bibliografía general que sigue.

IPCC 2007.

Primer volumen del último informe de evaluación del cambio climático realizado por el Panel de Naciones Unidas. A la fecha de aprobación de los documentos que conforman el informe contenía el más reciente conocimiento científico, publicado en revistas especializadas, referente a los aspectos físicos del cambio climático. En realidad el informe consta de 3 volúmenes (dedicados a aspectos físicos; impactos, adaptación y vulnerabilidad; y mitigación), siendo el primero la fuente principal de información y de consulta obligada; en realidad, lo es toda la obra si se quiere completar gran parte del contenido de este libro. El mismo año en que se presentó este informe, el IPCC fue galardonado con el Premio Nobel de la Paz.

PEIXOTO, J. P. y A. H. OORT. *Physics of Climate*. Nueva York: American Institutud of Physics, 1992.

Posiblemente el libro más completo sobre la ciencia del clima. El nivel del tratamiento físico y matemático es elevado aunque la mayor parte de sus capítulos se inician de forma descriptiva y con física básica. Presenta el atractivo de contar con un prólogo de Edward N. Lorenz, padre del caos y del efecto mariposa, al que se hace referencia en este libro. La obra comentada aquí no está incluida en la Bibliografía general que viene a continuación.

Bibliografía general

- ALONSO, S. «No diga calentamiento global». *El País*, 03/02/2010. En www.elpais.com/articulo/futuro/diga/calentamiento/global/elpepusocfut/20100203elpepifut_3/Tes.
- . «Cambio de clima en el planeta Tierra». En *Fronteras del Conocimiento*. Madrid: BBVA, 2008: 277-293.
- ALONSO, S. y M. PUIGSERVER. «Entre el XIX i el XXI: la ciència atmosfèrica al segle XX». En F. García Moliner y J. Planelles Fuster, eds. *2001: l'odissea de la física. Paradigmes i aplicacions de la física contemporània*. Borriana (Valencia): Agrupació Borriana de Cultura, 2001: 123-140.
- AMENGUAL, A., V. HOMAR, R. ROMERO, S. ALONSO y C. RAMIS. «A statistical adjustment of regional climate model outputs to local scales: Application to Platja de Palma, Spain». *J. Climate* (2011a): en prensa.
- . «Projections of the climate potential for tourism at local scales: Application to Platja de Palma, Spain». *Int. J. Climatol.* (2011b): en prensa.
- BERGER, A. «Milankovitch theory and climate». *Reviews of Geophysics* 26 (1988): 624-657.
- BERGER, L. R., D. J. DE RUITER, S. E. CHURCHILL, P. SCHMID, K. J. CARLSON, P. H. G. M. DIRKS y J. M. KIBII. «Australopithecus sediba: A New Species of Homo-Like Australopithecus from South Africa». *Science* 328 n.º 5.975 (2010): 195-204.
- BROECKER, W. S. «Climatic Change: are we on the brink of a pronounced global warming?». *Science* 189 n.º 4.201 (1975): 460-463.
- CALVIN, W. H. *A Brain for All Seasons: Human Evolution and Abrupt Climate Change*. Chicago: Chicago University Press, 2002.
- CRUTZEN, P y E. F. STOERMER. «The "Anthropocene"». *IGBP Newsletter* 41 (2000): 17-18.
- DROSER, M. L. y J. G. GEHLING. «Synchronous Aggregate Growth in an Abundant New Ediacaran Tubular Organism». *Science* 319 n.º 5.870 (2008): 1.660-1.662.
- DUARTE, C. M. (coord.), J. C. ABANADES, S. AGUSTÍ, S. ALONSO, G. BENITO, J. C. CISCAR, J. DACHS et al. *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid: CSIC, Colección Divulgación, 2009.
- FEENSTRA, J. F., I. BURTON, J. B. SMITH y R. S. J. TOL, eds. *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*. Amsterdam: UNEP y vrije Universiteit Amsterdam, 1998.
- FREITAS, C. R., D. SCOTT, y G. McBOYLE. «A second generation climate index for tourism (CIT): specification and validation». *Int. J. Biometeorol* 52 (2008): 399-407.
- GARCÍA MOLINER, F. *La ciencia descolocada*. Madrid: Ediciones del Laberinto, Colección Hermes, 2001.
- HOMAR, V., C. RAMIS, R. ROMERO y S. ALONSO. «Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain)». *Climatic Change* 98 (2010): 199-211.
- IPCC. *Special Report on Emissions Scenarios* [NAKICENOVIC, N. y R. SWART, eds.]. Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press, 2000.
- . *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [HOUGHTON, J. T., Y. DING, D. J. GRIGGS, M. NOGUER, P. J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL y C. A. JOHNSON, eds.]. Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press, 2001a.
- . *Cambio Climático*. Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III del Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, 2001b.

- . *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 y H. L. MILLER, eds.]. Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press, 2007a.
- . *Cambio Climático. Base de Ciencia Física. Resumen para Responsables de Políticas, Resumen Técnico y Preguntas más Frecuentes. Contribución del Grupo de Trabajo I del Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* Ginebra, Suiza, 2007b.
- . *Cambio Climático. Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III del Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* IPCC, Ginebra, Suiza, 2007c.
- LORENZ, E. N. «Deterministic Nonperiodic Flow». *J. Atmos. Sci.* 20 (1963): 130-141.
- LOULERGUE, L., A. SCHILT, R. SPAHNI, V. MASSON-DELMOTTE, T. BLUNIER, B. LEMIEUX, J.-M. BARNOLA, D. RAYNAUD, T. F. STOCKER y J. CHAPPELLAZ. «Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the last 800,000 years». *Nature* 453 (15/05/2008): 383-386.
- LUNINE, J. I. *Earth: Evolution of a Habitable World.* Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- LÜTHI, D., M. LE FLOCH, B. BEREITER, T. BLUNIER, J.-M. BARNOLA, U. SIEGENTHALER, D. RAYNAUD ET AL. «High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present». *Nature* 453 (15/05/2008): 379-382.
- MASSON-DELMOTTE, V., A. LANDAIS, N. COMBOURIEU-NEBOUT, U. VON GRAFENSTEIN, J. JOUZEL, N. CAILLON, J. CHAPPELLAZ, D. DAHL-JENSEN, S. J. JOHNSEN y B. STENNI. «Rapid climate variability during warm and cold periods in polar regions and Europe». *Comptes Rendus Geoscience* 337 (2005): 935-946.
- MITHEN, S. *The Prehistory of the Mind: The Cognitive Origins of Art, Religion and Science.* Thames & Hudson, 1996.
- RAUP, D. y J. SEPKOSKI. «Mass extinctions in the marine fossil record». *Science* 215 n.º 4.539 (1982): 1.501-1.503.
- SANTOS, F. D. *Que futuro? Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento e Ambiente.* Lisboa: Gradiva-Publicações, 2009.
- SCHÖPF, J. W. *Cradle of Life: The Discovery of Earth's Earliest Fossils.* Princeton University Press, 1999.
- SPERGEL, D. N., L. VERDE, H. V. PEIRIS, E. KOMATSU, M. R. NOLTA, C. L. BENNETT, M. HALPERN et al. «First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters». *Astrophysical Journal Supplement Series* 148 (2003): 175-194.
- SUMNER, G. N., R. ROMERO, V. HOMAR, C. RAMIS, S. ALONSO y E. ZORITA. «An estimate of the effects of climatic change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late 21st century». *Climate Dyn* 20 (2003): 789-805.
- THOMPSON, D. W. J., J. J. KENNEDY, J. M. WALLACE y P. D. JONES. «A large discontinuity in the mid-twentieth century in observed global-mean surface temperature». *Nature* 453 (29/05/2008): 646-649.
- VAN DER LINDEN, P. y J. F. B. MITCHELL, eds. *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project.* UK: Met Office Hadley Centre, 2009.
- WANG, Y., H. XU, E. MERINO y H. KONISHI. «Generation of banded iron formations by internal dynamics and leaching of oceanic crust». *Nature Geoscience Letters* 2 (2009): 781-784.

Índice de cuadros

CUADRO 2.1 Fenómenos extremos (observados y simulados) con indicio valorable de la influencia antrópica	84
CUADRO 2.2 Términos utilizados en IPCC (2007) para definir la probabilidad de un resultado siempre que se pueda calcular de manera probabilística.....	85
CUADRO 3.1 Proyecciones de impactos en distintas áreas geográficas.....	120
CUADRO 3.2 Ejemplos de posibles impactos del cambio climático por efecto de la alteración de los fenómenos atmosféricos y climáticos extremos	123
CUADRO 3.3 SPdP: regímenes medios observados (1973-2008)	127
CUADRO 3.4 SPdP: tendencias medias observadas (1973-2008)	128
CUADRO 3.5 SPdP: tendencias de eventos extremos (1973-2008)	130
CUADRO 3.6 SPdP: tendencias medias proyectadas (2021-2050, SRES A1B).....	131
CUADRO 3.7 SPdP: cambios en las tendencias de eventos extremos (1979-2008/2021-2050, SRES A1B)	132
CUADRO 3.8 SPdP: regímenes medios anuales observados (1979-2008) y proyectados (2010-50, SRES A1B)	133
CUADRO 3.9 SPdP: impacto del cambio climático en el CIT.....	135

Índice de figuras, gráficos y mapas

FIGURA 2.1 Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones.....	60
FIGURA 2.2 Componentes del forzamiento radiativo.....	77
FIGURA 3.1 Ejemplos de impactos proyectados asociados al promedio mundial del calentamiento en superficie.....	118
GRÁFICO 2.1 Evolución de la concentración de gases de efecto invernadero en el hielo ártico para los últimos 650.000 años.....	69
GRÁFICO 2.2 Variaciones en las concentraciones de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O desde hace 20.000 años.....	75
GRÁFICO 2.3 Cambios en temperatura, nivel del mar y manto de nieve en el hemisferio septentrional.....	81
GRÁFICO 2.4 Resultados de la comparación de la temperatura media global con la simulada por los modelos climáticos para el siglo xx.....	92
GRÁFICO 2.5 Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales), y proyección de temperaturas en superficie.....	101
GRÁFICO 3.1 Histogramas estacionales del índice CIT para clima presente y clima proyectado.....	136
MAPA 2.1 La gran cinta transportadora de los océanos.....	72

MAPA 2.2 Cambios de temperatura superficial proyectados para inicios y finales del siglo XXI relativos al periodo 1980–1999	102
MAPA 2.3 Pautas proyectadas de cambios en precipitaciones	103
MAPA 3.1 Proyecciones probabilísticas del proyecto ENSEMBLES para Europa con el escenario A1B	113
MAPA 3.2 Resultados en alta resolución a partir de 16 modelos regionales, RCM, usados en el proyecto ENSEMBLES	114
MAPA 3.3. Porcentaje de variación de la precipitación anual en las comunidades mediterráneas españolas del periodo 2090-2099 relativo al periodo 1984-1993.....	115

Nota sobre el autor

SERGIO ALONSO OROZA, licenciado y doctor en Física por la Universidad de Barcelona, es catedrático de Meteorología en la Universidad de les Illes Balears (UIB) e investigador del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, CSIC-UIB). Ha sido vicerrector de la UIB (2003-2006) y presidente de la Comisión de Ciencias para la Acreditación Nacional de Profesores Titulares de Universidad (2007-2011); ha participado como redactor y gestor (1995-1999) del Programa Nacional de I+D sobre el Clima, que formaba parte del III Plan Nacional de I+D; y ha sido miembro de la representación española en la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1998-2003) así como del Consejo Nacional del Clima (1998-2004). Es miembro de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona y del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) y preside la sección de Meteorología y Ciencias de la Atmósfera de la Comisión Española de Geodesia y Geofísica. Ha sido profesor visitante en las universidades de Bolonia, Lisboa y Aveiro. Asimismo, ha publicado numerosos de artículos y colaboraciones.

Su investigación ha estado centrada en la meteorología del Mediterráneo occidental aunque ha prestado atención a aspectos de oceanografía dinámica y de hidrometeorología. En Climatología ha estudiado el clima presente, proyecciones del clima futuro e impactos del cambio climático en Illes Balears.

