

COLECCIÓN DIVULGACIÓN

Cambio global

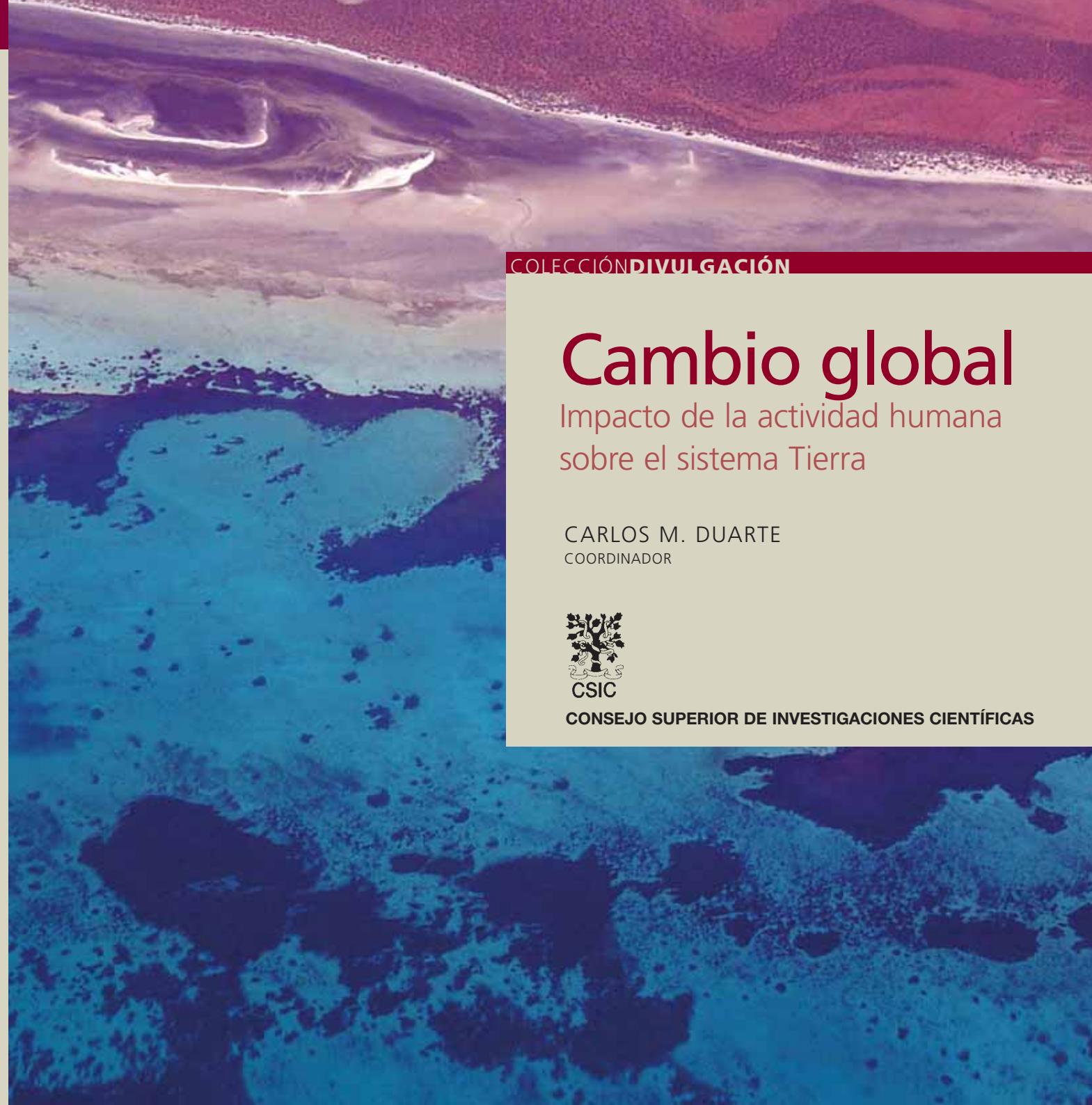
Impacto de la actividad humana
sobre el sistema Tierra

Esta obra, dirigida al público en general y elaborada por un equipo interdisciplinar, aborda con un lenguaje claro y asequible pero sin renunciar al rigor científico, el complejo problema del cambio global, un desafío de dimensiones colosales para la humanidad.

El cambio global se define en esta obra como el conjunto de cambios en los procesos fundamentales que definen el funcionamiento de la biosfera derivados de la actividad humana. Los autores describen las múltiples dimensiones del cambio global, sus causas y sus consecuencias. Se describe la transformación de la superficie del planeta Tierra por la actividad humana y sus impactos sobre los ciclos del agua, los elementos y el sistema climático, incluyendo la introducción de miles de compuestos químicos sintéticos en la biosfera.

Esta exposición pretende despejar la confusión que el aluvión de noticias e informaciones, a veces contradictorias, genera en la sociedad. Los autores prestan particular atención a la definición de las estrategias de adaptación y mitigación que los distintos actores de la sociedad, desde ciudadanos a políticos, pueden desplegar para minimizar el impacto del cambio global, animándoles al mismo tiempo a aprovechar las oportunidades que estos cambios pueden conllevar.

CARLOS M. DUARTE COORDINADOR • Cambio global



COLECCIÓN DIVULGACIÓN

Cambio global

Impacto de la actividad humana
sobre el sistema Tierra

CARLOS M. DUARTE
COORDINADOR



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

MINISTERIO
DE EDUCACIÓN
Y CIENCIA

Cambio global

Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra



COLECCIÓN**DIVULGACIÓN**

Cambio global

Impacto de la actividad humana
sobre el sistema Tierra

Carlos M. Duarte (coord.)

Sergio Alonso

Gerardo Benito

Jordi Dachs

Carlos Montes

Mercedes Pardo

Aida F. Ríos

Rafel Simó

Fernando Valladares



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
Madrid, 2006

Con la COLECCIÓN DIVULGACIÓN, el CSIC cumple uno de sus principales objetivos: proveer de materiales rigurosos y divulgativos a un amplio sector de la sociedad. Los temas que forman la colección responden a la demanda de información de los ciudadanos sobre los temas que más les afectan: salud, medio ambiente, transformaciones tecnológicas y sociales... La colección está elaborada en un lenguaje asequible, y cada volumen está coordinado por destacados especialistas de las materias abordadas.

COMITÉ EDITORIAL

Pilar Tigeras Sánchez, directora
Susana Asensio Llamas, secretaria
Miguel Ángel Puig-Samper Mulero
Alfonso Navas Sánchez
Gonzalo Nieto Feliner
Javier Martínez de Salazar
Jaime Pérez del Val
Rafael Martínez Cáceres
Carmen Guerrero Martínez

Catálogo general de publicaciones oficiales
<http://publicaciones.administracion.es>



© CSIC, 2006
© Carlos M. Duarte (coord.), Sergio Alonso, Gerardo Benito, Jordi Dachs, Carlos Montes, Mercedes Pardo, Aida F. Ríos, Rafel Simó y Fernando Valladares, 2006

Foto portada: vista aérea de la línea de costa en Shark Bay, Australia Occidental. Fotografía de Susana Agustí.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por medio ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito de la editorial.

Las noticias, asertos y opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, sólo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

ISBN: 978-84-00-08452-3

NIPO: 653-06-073-7

Depósito legal:

Edición a cargo de Cyan, Proyectos y Producciones Editoriales, S.A.

Índice

Agradecimientos	11
Sobre los autores	13
1. Presentación	17
2. Introducción	21
3. ¿Qué es el cambio global?	23
4. La maquinaria de la biosfera	31
4.1. Los motores del clima	31
4.2. El ciclo del agua	35
4.3. Los ciclos de los elementos	37
4.4. El papel de los organismos	41

5. La maquinaria de la biosfera en el Antropoceno	43
5.1. Perturbaciones en el ciclo del agua	43
5.2. Perturbaciones en los ciclos de elementos	49
5.3. Emisiones de materiales a la atmósfera	55
5.4. Aerosoles, hielo y albedo	56
5.5. Contaminantes y nuevas sustancias en la biosfera	60
5.6. Desertificación, cambios en el uso del suelo	61
5.7. Detección y observación de perturbaciones	65
5.8. Incertidumbres	70
6. Cambio climático	73
6.1. ¿Qué es el cambio climático?	73
6.2. Incertidumbres	77
6.3. Cambio climático: ¿realidad, futuro o especulación?	79
7. Escenarios de cambio global	85
7.1. Escenarios climáticos	85
7.2. Cambio global y ecosistemas	88
7.3. Escenarios del cambio global	101
8. El impacto social del cambio global	105
8.1. El ecosistema social	105
8.2. Áreas relevantes para la comprensión del impacto social del cambio global	107
8.3. El impacto en la población como base demográfica: salud, estructura demográfica y flujos migratorios	108
8.4. El impacto en la base económica de la sociedad: economía, usos del territorio, asentamientos humanos	114

8.5. El impacto en la organización social: estructura social y política, conflictos, normas y valores sociales	118
8.6. El impacto en el patrimonio histórico-natural. El papel de los espacios protegidos	121
8.7. Perspectivas	122
9. ¿Cómo afrontar el cambio global? Mitigación y adaptación al cambio global	122
9.1. Cómo construir capacidad adaptativa frente al cambio global	128
9.2. El papel de la ciencia	131
9.3. El papel de las tecnologías	136
9.4. El papel de la política	140
9.5. El papel de la educación y sensibilización ambiental	146
9.6. El papel de los medios de comunicación	149
9.7. El papel de los ciudadanos	155
9.8. El papel de las empresas y el sector privado	158
9.9. El papel de lo imprevisible	159
10. Perspectiva	161
11. Enlaces recomendados	163

Viento catabático desplazándose sobre un
glaciar en Bahía Esperanza (Península Antártica).
Fotografía: C. M. Duarte.



Agradecimientos

AGradecemos a Xavier Bellés la invitación a escribir esta obra; a Regino Martínez y X.A. Padín, su ayuda en la compilación de datos; a Javier Bustamante, los datos facilitados; a Iván López, Esther Lorenzo, Ángeles Yuste, X. A. Álvarez-Salgado, Beatriz Ramírez y Esteban Manrique sus aportaciones y recomendaciones sobre el texto; a Susana Agustí, la cesión de fotografías; a Taro Takahashi, Nicolás Gruber, Jorge Sarmiento, Christopher Sabine, Fiz F. Pérez, Iván López, Esther Lorenzo, Ángeles Yuste, X. A. Álvarez-Salgado, Beatriz Ramírez y Esteban Manrique. la utilización de algunas figuras de sus publicaciones; y a Mariano Mufiz, director del Centro de Ciencias Medioambientales (CSIC), la hospitalidad durante las sesiones de trabajo para escribir esta obra.



Torrente en Puerto Mont (Chile).
Fotografía: C. M. Duarte.

Sobre los autores



Carlos M. Duarte, coordinador de esta obra, es profesor de Investigación del CSIC en el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, CSIC-Universidad de les Illes Balears) y fue presidente del Comité Español de IGBP entre 2000 y 2005. Ha sido elegido en 2006 presidente de la Asociación Americana de Limnología y Oceanografía. Su investigación se centra en el estado y funcionamiento de los ecosistemas marinos y el impacto del cambio global sobre éstos.



Sergio Alonso es catedrático de Meteorología en la Universitat de les Illes Balears. Fue gestor del Programa Nacional de I+D sobre el Clima y miembro de la delegación española para la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Es presidente de la sección de Meteorología y Ciencias de la Atmósfera de la Comisión Española de Geodesia y Geofísica. Su investigación está centrada en meteorología y clima del Mediterráneo occidental.



Gerardo Benito es investigador del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC, en Madrid. Actualmente, es presidente de la Comisión Internacional de Paleohidrología Global de INQUA, miembro del comité español de IGBP, como representante del programa internacional PAGES (Past Global Changes), y miembro del comité español de INQUA. Su investigación se centra en los riesgos naturales, la reconstrucción de registros hidrológicos del pasado para su interpretación paleoclimática, y en temas relacionados con la hidrología y la erosión de suelos.



Jordi Dachs es científico titular del CSIC en el Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona y vocal del subcomité SOLAS (surface ocean-lower atmosphere) del IGBP. Su investigación se centra en el ciclo de los contaminantes orgánicos y la materia orgánica, con especial énfasis en los procesos de deposición atmosférica y las múltiples interacciones entre el océano y la atmósfera que regulan el transporte, destino e impacto de los compuestos orgánicos.



Carlos Montes es catedrático de Ecología en la Universidad Autónoma de Madrid. Es presidente de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para el estudio y la gestión de los espacios naturales. Su investigación se centra en el análisis de las interrelaciones entre ecosistemas y humanos bajo la trama conceptual de los sistemas socioecológicos y la resiliencia.



Mercedes Pardo Buendía, profesora de Sociología del Medio Ambiente en el departamento de Ciencia Política y Sociología de la Universidad Carlos III de Madrid, fue vicepresidenta del Grupo de Investigación de Sociología y Medio Ambiente de la Asociación Internacional de Sociología, es presidenta del Comité Español de Investigación en Cambio Global, CEICAG. Su investigación aborda la sociología del medio ambiente, de la energía, la ciudad, los residuos, las políticas medioambientales, los valores sociales y la participación pública.



Aida F. Ríos es investigadora científica del CSIC en el Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo y presidenta del Comité Español de IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) y miembro de CEICAG. Su investigación se centra en el sistema del carbono en agua de mar, especialmente en la captación de CO₂ antropogénico por parte del océano y su relación con el cambio global.



Rafel Simó es científico titular en el Institut de Ciències del Mar del CSIC, en Barcelona. Es representante español en el programa internacional SOLAS (Surface Ocean - Lower Atmosphere Study) y miembro del comité español de IGBP. Su investigación se centra en los intercambios de materia entre la biota marina y la atmósfera, particularmente gases y aerosoles, y sus respuestas al cambio global.



Fernando Valladares, investigador científico del CSIC, es ecólogo terrestre y trabaja en la interfase entre la ecofisiología, centrada en mecanismos, y la ecología de poblaciones y comunidades, centrada en procesos, para comprender la respuesta de las plantas a cambios ambientales y condiciones adversas. Su actividad científica la combina con la participación en comités y sociedades nacionales e internacionales relacionadas con el cambio global (AEET, ESA, BES, IGBP), con el establecimiento de una red española de seguimiento a largo plazo de ecosistemas (www.redote.org) y con la docencia universitaria.

1. Presentación

La dependencia que tiene la humanidad de la naturaleza, con la consiguiente responsabilidad de cuidarla para las generaciones futuras, es un axioma ubicuo y ancestral, presente en todos los pueblos de la Tierra, como lo demuestra la sorprendente convergencia entre pensamientos como los siguientes:

Trata bien a la Tierra: no te ha sido dada por tus padres; te ha sido prestada por tus hijos.

Proverbio Cachemir

No heredamos la Tierra de nuestros ancestros, la recibimos prestada de nuestros hijos.

Proverbio Kenyata

Debemos proteger el bosque para nuestros hijos, nuestros nietos y los niños no natos. Debemos proteger el bosque para aquellos que no pueden hablar por sí mismos, como los pájaros, los animales, los peces y los árboles.

Qwatsinas, Nación amerindia Nuxalk

En realidad, la capacidad de tener presentes a las generaciones futuras, es decir, a los miembros no natos de nuestra especie, es precisamente uno de nuestros hechos diferenciales como especie. También lo es la capacidad, que nos ofrece la tecnología, de haber multiplicado nuestro poder de transformación y de consumo, la capacidad de utilizar nuestro conocimiento para duplicar la esperanza de vida y la capacidad de utilizar la tecnología para reemplazar el lento proceso de la evolución y generar decenas de miles de nuevos compuestos químicos, que no están inscritos en nuestro genoma, sino que hemos externalizado y desarrollado a través de la tecnología.

Estas capacidades y las enormes perspectivas que ofrecen para la mejora de nuestra calidad de vida se han utilizado sin plena conciencia de las consecuencias que, conjuntamente, tienen sobre la naturaleza y sobre el funcionamiento del planeta Tierra; posiblemente porque la capacidad de contemplar el planeta como unidad funcional se ha adquirido recientemente, a través del desarrollo de plataformas de observación, como los satélites y las redes de sensores.

Estas observaciones han aportado evidencias inequívocas de que la actividad humana está afectando de forma profunda a la mayor parte de los procesos que, conjuntamente, determinan el funcionamiento de la biosfera. La consiguiente concienciación que ello ha producido, junto con la consideración del posible incremento de las perturbaciones en el funcionamiento del planeta Tierra, conforman un desafío de proporciones colosales, que requieren del concierto de la comunidad científica, los líderes políticos y toda la sociedad.

Desde el Consejo Superior de Investigaciones Científicas asumimos plenamente este reto, que esperamos afrontar con la ayuda de nuestros colegas de la universidad, de los organismos de investigación y del sector privado.

Sin embargo, reconocemos que nuestros esfuerzos serán baldíos si no cuentan con la complicidad de la sociedad. El primer paso para despertar esa complicidad es conocer, porque sin conocimiento no puede haber reacción. Así pues, la obra que aquí se presenta persigue el objetivo de informar a la sociedad sobre qué es el cambio global, cuáles son sus motores, cuáles sus consecuencias y cómo podemos actuar, desde nuestras distintas responsabilidades, para mitigar y modular esas consecuencias. Para ello hemos contado con la colaboración de un equipo multidisciplinar de investigadores, que han sabido aportar una visión integradora de esta importante cuestión.

Espero que la publicación de esta obra marque un punto de inflexión en el nivel de comprensión de la sociedad y de su compromiso con este problema. Desde luego el organismo que presido volcará toda su capacidad en aportar el conocimiento necesario para tomar las decisiones oportunas que nos permitan afrontar este desafío del que depende el futuro la humanidad.

Madrid, 4 de septiembre de 2006.

CARLOS MARTÍNEZ
*Presidente del Consejo Superior
de Investigaciones Científicas*



Colores de otoño en el parque Mont Royal
(Montreal, Canadá).
Fotografía: C. M. Duarte.

2. Introducción

El cambio global y el cambio climático son problemas que han trascendido el ámbito de la investigación científica para percolar el tejido de la sociedad, hasta encontrarse recogidos en superproducciones de Hollywood (*El día después de mañana*, dirigida por Roland Emmerich), documentales de éxito (*Una verdad inconveniente*, dirigido por David Guggenheim a partir de un libro de Al Gore), best-sellers (*Estado de miedo*, de M. Crichton), modificar el diseño y coste de nuestras viviendas (e.g. mediante la futura regulación de dotación de energías renovables en los edificios), y nuestras opciones vitales (e.g. adquirir vehículos menos contaminantes, etc.). El cambio global y el cambio climático son realidades instaladas definitivamente entre nosotros, no ya como problemas del futuro, como se

han percibido hasta hace poco, sino como una realidad a la cual nos hemos de adaptar y un desafío al que hemos de responder.

Líderes mundiales, como el ex vicepresidente y candidato a presidente de los EE.UU. Al Gore, perciben en el cambio global y el cambio climático el mayor desafío de la humanidad, ya que no compromete únicamente a las personas que consciente o inconscientemente incidimos o atenuamos el problema con nuestras opciones personales y estilo de vida, sino que compromete, de forma particularmente aguda, a las generaciones futuras, nuestros hijos, nietos y sus descendientes. Al Gore afirmó, en su presentación en el Foro Económico Global de Génova, que “el Mundo está entrando en un periodo de consecuencias” debido a que se está

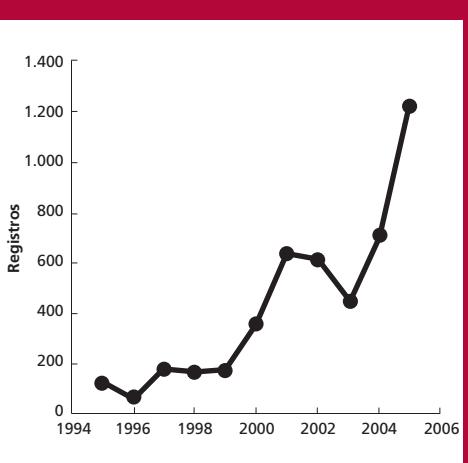


Figura 2.1. Número de registros sobre cambio global (cambio global, cambio climático y calentamiento global) en una muestra de los medios de comunicación españoles (*ABC*, *El Mundo*, *El País*, *La Vanguardia*).

produciendo “una colisión entre el diseño actual de la civilización y la Tierra”.

José Luis Rodríguez Zapatero, presidente del Gobierno español, declaró (16-2-2005) con motivo de la entrada en vigor del Acuerdo de Kioto que “el diagnóstico está hecho y es muy concluyente: tenemos que frenar el deterioro de nuestro medio ambiente, porque el mundo no nos pertenece, pero la responsabilidad sí” e identificó el cambio climático como “el mayor problema ambiental” en el presente.

Reflejo de este proceso es el hecho de que la presencia del cambio global en los medios de comunicación ha aumentado exponencialmente en la última década, reflejando un mayor grado de conocimiento social de este problema (figura 2.1.), con más de 706 informaciones en esos mismos medios hasta el 8 de agosto de 2006.

De hecho, el flujo de información es tan intenso y presenta tantas contradicciones internas que los ciudadanos, los gestores públicos y el sector privado pueden verse confundidos, debilitando esta confusión su capacidad de responder y adaptarse al desafío que el cambio global plantea ya y seguirá planteando, con más fuerza, en el futuro.

El objetivo de este volumen es comunicar en un lenguaje claro y accesible, sin abandonar el rigor científico, qué son el cambio global y el cambio climático, qué relación tienen entre sí, cuáles son sus causas y consecuencias, cómo van a afectar a la sociedad, particularmente a la española, y qué podemos hacer para paliar estos impactos.

ABC.es

Actualidad Opinión Al minuto Gente & Ocio Ediciones

Sociedad Medio Ambiente

La temperatura del agua en el mar Mediterráneo aumentó 8 grados en julio hasta alcanzar los 30

LAVANGUARDIA.es

AV 24 Horas AV Edición Impresa Sociales Clasificados Deportes Suscripción

Martes 5 de agosto 2008 - ALTAVELA a las 10:15h

EL PAÍS.es Sociedad

El calentamiento global extinguirá 60.000 especies en menos de un siglo

E. DE B. - Madrid

A fondo

El clima

Tiempo estimado de lectura 4 min.

Versión para imprimir

Enviar a un amigo

Categorías Relacionadas

Ola de calor en Europa

4 9 °

3. ¿Qué es el cambio global?

El término cambio global define al conjunto de cambios ambientales afectados por la actividad humana, con especial referencia a cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra. Se incluyen en este término aquellas actividades que, aunque ejercidas localmente, tienen efectos que trascienden el ámbito local o regional para afectar el funcionamiento global del sistema Tierra. El cambio climático se refiere al efecto de la actividad humana sobre el sistema climático global, que siendo consecuencia del cambio global afecta, a su vez, a otros procesos fundamentales del funcionamiento del sistema Tierra. La interacción entre los propios sistemas biofísicos entre sí y entre éstos y los sistemas sociales, para amplificar o atenuar sus efectos, es una característica

esencial del cambio global que dificulta la predicción de su evolución.

De hecho, el cambio es algo consustancial al planeta Tierra que, a lo largo de sus miles de millones de años de historia, ha experimentado cambios mucho más intensos que los que se avecinan. Incluso muchos de los cambios más importantes en la biosfera han estado forzados por organismos, como fue el paso de una biosfera pobre en oxígeno y con alta irradiación ultravioleta a una biosfera con un 21% de oxígeno y una capa de ozono que filtra los rayos ultravioleta, consecuencia del desarrollo de la fotosíntesis en bacterias. Por ello, la elección de los términos cambio global y cambio climático para referirse a los efectos indicados anteriormente es desafortunada, pues su antónimo, la constancia global y climática, no ha

existido en la agitada historia del planeta Tierra. Sin embargo, hay dos características del cambio global que hacen que los cambios asociados sean únicos en la historia del planeta: en primer lugar, la rapidez con la que este cambio está teniendo lugar, con cambios notables (e.g. en concentración de CO₂ atmosférico) en espacios de tiempo tan cortos para la evolución del planeta como décadas; y en segundo lugar, el hecho de que una única especie, el *Homo sapiens*, es el motor de todos estos cambios.

Las características específicas del cambio global han llevado a proponer el término Antropoceno para referirse a la etapa actual del planeta Tierra. El Antropoceno es un término propuesto en el año 2000 por el químico atmosférico y premio Nobel Paul Crutzen, junto a su colega E. Stoermer, para designar una nueva era geológica en la historia del planeta en la que la humanidad ha emergido como una nueva fuerza capaz de controlar los procesos fundamentales de la biosfera (Crutzen y Stoermer, 2000).

El conjunto de cambios que constituyen el cambio global está sustanciado por observaciones e inferencia de distinta naturaleza. Hoy en día, el esfuerzo de observación sobre el planeta es considerable e implica, de forma destacada, el uso de satélites que observan un número de propiedades importantes del planeta (e.g. fuegos, meteorología,

hidrología, oceanografía, uso del territorio, producción vegetal, etc.) desde el espacio. El uso de satélites para la observación del planeta es relativamente reciente, iniciándose en 1960 con las primeras imágenes del satélite meteorológico estadounidense TIROS-1, pero ha aumentado notablemente para conformar un sistema de observación del planeta en la actualidad (recomendamos visitar los observatorios de la Tierra de la NASA: earthobservatory.nasa.gov y de la Agencia Espacial Europea: www.esa.int/esaEO/index.html). El periodo instrumental se inició en la segunda mitad del siglo XIX, con las primeras redes de observatorios meteorológicos iniciada en los EE.UU. en 1849. Los cambios anteriores al registro instrumental se han derivado de observaciones indirectas como anillos de crecimiento en árboles longevos, cambios en la composición isotópica de los esqueletos carbonatados de microorganismos marinos, que permiten reconstruir la temperatura en el pasado, o análisis de burbujas atrapadas en hielo, que han permitido reconstruir la composición atmosférica a lo largo de millones de años. Estos registros han permitido confirmar que las tasas de cambios en sistemas claves del sistema Tierra en la actualidad sobrepasan frecuentemente las registradas en el pasado.

Las claves del cambio global en el Antropoceno se han de buscar en la

conjunción de dos fenómenos relacionados: el rápido crecimiento de la población humana y el incremento, apoyado en el desarrollo tecnológico, en el consumo de recursos per cápita por la humanidad. El crecimiento de la humanidad es un proceso imparable desde la aparición de nuestros ancestros en el planeta, hace aproximadamente un millón de años hasta alcanzar la población actual, superior a los 6.000 millones de habitantes (figura 3.1.). La reconstrucción de la evolución de la población humana (Cohen, 1995) muestra un crecimiento exponencial sostenido durante casi un millón de años, un hecho que posiblemente no tenga parangón en la historia de la vida en el planeta, de no ser por el crecimiento paralelo de las especies (animales, plantas y microorganismos) asociados a la humanidad (figura 3.1.). Este crecimiento continuará en los próximos años, alcanzándose un máximo de población humana en torno a 9.000 millones (con un margen entre 7,6 y 10,6 millones) de habitantes hacia el año 2050 (Naciones Unidas, 2003), con una leve disminución a continuación derivada principalmente del impacto del virus del sida en África y Asia.

El crecimiento de la población humana conlleva un aumento de los recursos, alimento, agua, espacio y energía consumidos por la población humana. Dado que los recursos del planeta Tierra son finitos, es evidente que ha de existir

un techo a la población humana.

La primera voz de alarma en cuanto al crecimiento incontrolado de la población humana fue la del demógrafo británico Thomas R. Malthus, quien en su obra *Un ensayo sobre el principio de la población* (1798) predijo que la población humana excedería la capacidad de producir alimento. De hecho existen registros mucho más antiguos que alertan de los peligros de la sobrepoblación humana, destacando entre ellos la *Épica Atrahasis babilónica*, transcrita alrededor de 1600 a.C. Esta preocupación ha llevado a muchos investigadores a realizar cálculos de la capacidad de carga de la población humana del planeta o el número máximo de personas que el planeta puede soportar. La mayor parte de estas estimaciones oscilan entre los 6.000 y 15.000 millones de habitantes (Cohen, 1995), con un valor mediano cercano a los 10.000 millones de habitantes, cifra a la que se aproximan mucho las proyecciones demográficas para el siglo XXI.

Estas estimaciones de capacidad de carga de la población humana están basadas en aproximaciones de la cantidad máxima de recursos disponibles, como alimentos y agua. Por ejemplo, dada una cantidad mínima de calorías para mantener un ser humano de alrededor de 2.000 kcal/día, que requiere una producción de cereales para la que serían necesarias, teniendo en cuenta pérdidas por

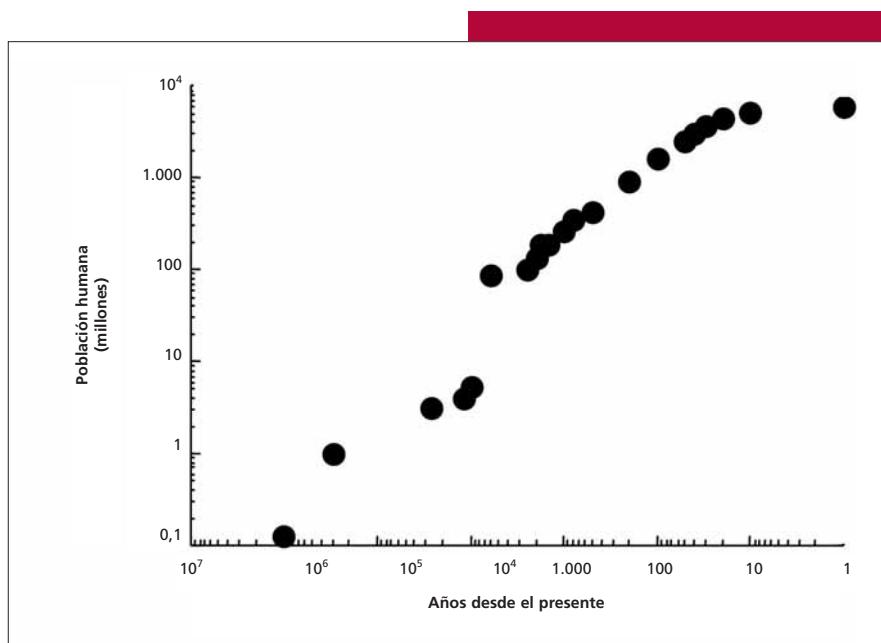


Figura 3.1. Reconstrucción del crecimiento de la población humana desde la aparición de nuestros ancestros hace algo más de un millón de años hasta el presente.

Fuente: Cohen, 1995.

evapotranspiración de las plantas, de al menos 200 m³ por año, que, teniendo en cuenta pérdidas e ineficiencias, así como la presencia de un porcentaje de carne en la dieta, que requiere mucha más agua, podría situarse en torno a 600 m³ por año (Cohen, 1995).

Teniendo en cuenta otros consumos de agua para uso doméstico, industrial, etc., el consumo directo e indirecto por habitante por año sería en torno a 1.000 m³ por año, con lo que, teniendo en cuenta los recursos de agua dulce disponibles, la población máxima que se puede mantener se sitúa en torno a 10-16.000 millones de habitantes, en el

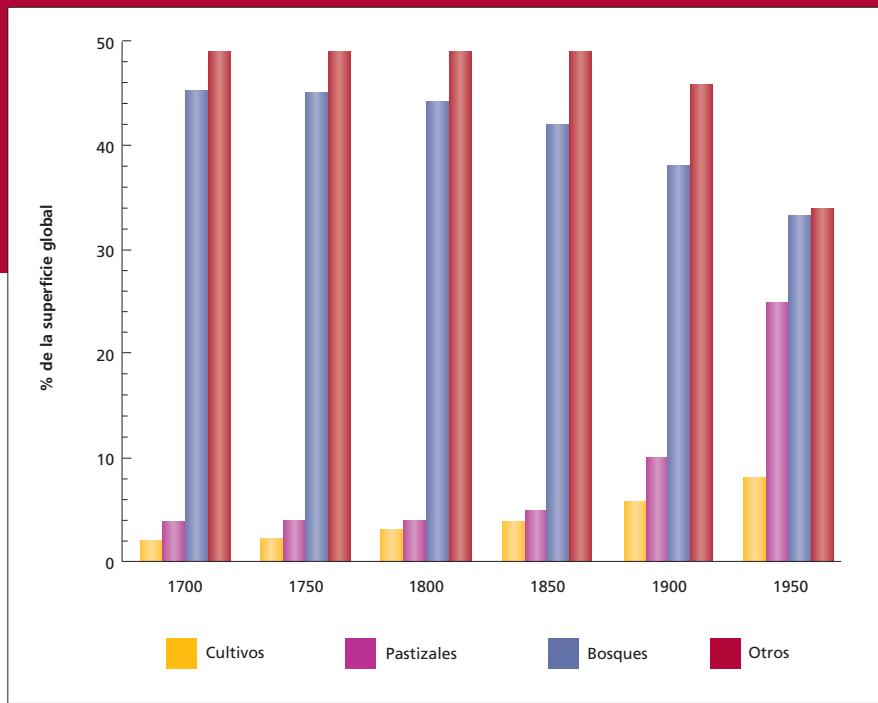


Figura 3.2. Territorio transformado. Progresión de la transformación de la superficie global de bosques y otros ecosistemas naturales a pastizales y campos de cultivo. La superficie urbana está en torno al 2% de la superficie terrestre global.

Fuente: Goldewijk & Battjes, 1997.

escenario más favorable. Sin embargo, estas estimas no consideran, en su mayoría, si esta población máxima sería sostenible a largo plazo, y no introducen en sus cálculos las asimetrías en la disponibilidad y uso de los recursos limitantes entre regiones ni las tendencias al aumento en las tasas de uso de estos recursos por la humanidad. En cualquier caso, estos cálculos, comparados con las proyecciones de

Naciones Unidas, que sitúan la población humana en alrededor de 9.000 millones de habitantes en 2150 (United Nations, 2003) sugieren que a lo largo del siglo XXI nos acercaremos al límite de la población humana en el planeta.

El crecimiento de la población humana es, sin duda, un componente fundamental de la creciente influencia de nuestra especie sobre los procesos

que regulan el funcionamiento de la biosfera. Sin embargo, el crecimiento de la población ha ido acompañado de un rápido incremento en el consumo per cápita de recursos tales como territorio, agua y energía. El consumo de territorio ha supuesto una conversión de ecosistemas sin perturbar, que la humanidad ha usado y usa como recolectores, a ecosistemas domesticados como pastizales o campos de cultivo, o ecosistemas totalmente antropizados como zonas urbanas. La transformación del territorio es un proceso que se inició con el desarrollo de la agricultura, hace unos 10.000 años, pero que se ha acelerado tras la revolución industrial, con el aumento explosivo de la población humana y el desarrollo de maquinaria pesada capaz de transformar grandes superficies en plazos cortos de tiempo. Desde 1700 hasta el presente la superficie domesticada ha aumentado de un 6% a un 40% de la superficie terrestre, con un dominio de la conversión a pastizales (Goldewijk & Battjes, 1997). El rápido crecimiento de zonas urbanas

supone aún una pequeña fracción del territorio transformada, ya que las áreas urbanas ocupan aproximadamente un 2% del territorio del planeta (Goldewijk & Blijlevens, 1997; figura 3.2.).

El consumo de agua se incrementó por un factor de 10, pasando de unos 600 a más de 5.200 km³ anuales durante el siglo XX, a lo que contribuyó el aumento del consumo per cápita de agua desde 350 a 900 m³ anuales (Shiklomanov, 1993). Este incremento tiene múltiples componentes, incluyendo los cambios en la dieta con un aumento del consumo de carne, que requiere más agua para el mismo aporte calórico que una dieta vegetariana, el desarrollo a fines del siglo XIX de infraestructuras sanitarias que utilizan agua para impulsar los residuos y la migración de la población a zonas urbanas, donde su consumo de agua se duplica. Finalmente, el uso de energía per cápita se ha multiplicado por 15 desde la Revolución Industrial (figura 3.3.), con el desarrollo del transporte y la extensión de la climatización de los espacios habitados. Estas cifras globales de incremento del uso de territorio, agua y energía per cápita ocultan enormes desequilibrios regionales, con oscilaciones que varían 10 veces desde los países cuyos ciudadanos consumen más recursos (Canadá y EE.UU.) a los países cuyos ciudadanos apenas alcanzan niveles mí nimos de

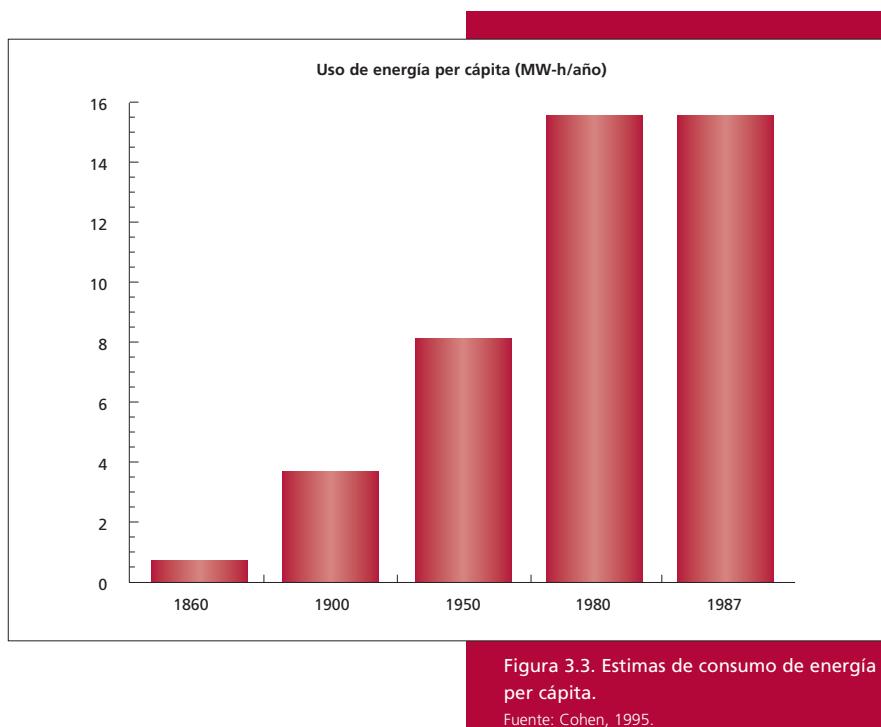


Figura 3.3. Estimaciones de consumo de energía per cápita.

Fuente: Cohen, 1995.

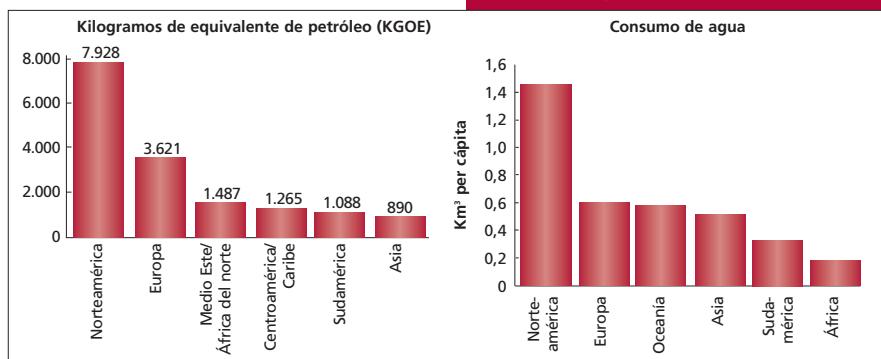


Figura 3.4. Distribución del consumo per cápita de energía y agua en distintas áreas geográficas.

Fuente: World Resources Institute.



Figura 3.5. Imagen nocturna del planeta Tierra el 27 de noviembre de 2000. La imagen fue generada por C. Mayhew y R. Simmon (NASA/GSFC) a partir de cientos de imágenes de los satélites DMSP.

subsistencia en el uso de agua, alimento y energía, típicamente ubicados en Asia y África (figura 3.4.). Estos desequilibrios reflejan no sólo diferencias geográficas en la disponibilidad de recursos, sino, principalmente, diferencias en estilos de vida. La desigual distribución de consumo de recursos en la Tierra es incluso visible desde el espacio, en las impactantes fotografías nocturnas de la Tierra de la NASA que reflejan la combinación del binomio densidad de población y consumo de energía per cápita (figura 3.5.).

La presión total de la humanidad sobre los recursos del planeta se puede computar, de manera simplificada, como el producto del tamaño de la población y el consumo per cápita de recursos, de forma que es posible calcular que esta presión se ha multiplicado por un factor de entre 10 y 15 veces en total desde la revolución industrial, con un peso similar del incremento de la población y el aumento del consumo per cápita en ese aumento. El imparable incremento del consumo total de recursos, que avanza a un ritmo mucho mayor que el

incremento de la población, supone que la capacidad de carga del planeta se alcanzará a un nivel de población global más reducido de la prevista en los cálculos anteriores, dado que los individuos de los países más consumistas tienen un peso desproporcionado —equivalente al consumo de diez ciudadanos de países pobres— sobre el consumo de recursos. Por otro lado, los cambios que este consumo de recursos generan sobre el funcionamiento de la biosfera, que se detallan a lo largo de esta obra, afectan a su vez al uso de recursos por la humanidad. Es evidente que el consumo de recursos por la humanidad

no es la causa inmediata de que cambie el clima o se extingan especies, sino que desencadena una serie compleja de mecanismos, que interactúan entre sí, y que devienen en los cambios en el planeta que estamos constatando.

El incremento de uso de recursos de la biosfera por la humanidad plantea una serie de cuestiones fundamentales tales como: ¿cómo ha afectado el aumento del uso de recursos por la humanidad al clima? ¿Cómo ha afectado al funcionamiento de la biosfera? ¿Cómo ha afectado a los ecosistemas? ¿Cómo repercuten estos cambios sobre la sociedad? ¿Se puede predecir la evolución de estos efectos en

el futuro? ¿Podemos adaptarnos y paliar los impactos de estos cambios? Estas cuestiones, fundamentales para nuestra sociedad, no pueden encontrar respuesta en una disciplina particular de la ciencia, requiriendo el concurso de la práctica totalidad de las ciencias naturales así como las ciencias sociales, lo que da idea del carácter transversal de la problemática del cambio global. El texto que sigue tiene por objeto atender a estas cuestiones presentando sin ambages datos objetivos, escenarios posibles y las incertidumbres que pueden afectarles, para concluir con una discusión de cómo el lector puede jugar un papel fundamental en paliar los problemas que aquí se exponen.

Referencias

- COHEN, J. E. (1995). *How many people can the Earth support?* Norton, Nueva York.
- CRUTZEN, P. J., AND E. F. STOERMER. (2000). The "Anthropocene". *Global Change Newsletter*. 41: 12-13.
- MALTHUS, T. R. (1978). *Un Ensayo sobre el Principio de la Población*. Oxford's Word Classics, 1993. Oxford.
- UNITED NATIONS (2003). Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2004 Revision and World Urbanization Prospects: The 2003 Revision. <http://esa.un.org/unpp>.



Convergencia de desierto y océano en Point
Peron (Shark Bay, Australia Occidental).
Fotografía: C. M. Duarte.

4. La maquinaria de la biosfera

Los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el sistema Tierra están conectados entre sí y entre la Tierra, océano y atmósfera. La maquinaria de la biosfera ha venido funcionando dentro de dominios caracterizados por límites bien definidos y patrones periódicos. Sin embargo, este funcionamiento está siendo perturbado como consecuencia de la actividad humana.

Para poder entender mejor la “maquinaria” de la biosfera hay que observarla desde el punto de vista del clima, del ciclo del agua y de los elementos y del papel que juegan los organismos que se van a ver afectados por las perturbaciones antropogénicas.

4.1. Los motores del clima

No es fácil definir de una forma precisa lo que es el clima de la Tierra, y menos en una obra como la presente. Desde un punto de vista físico podemos decir que es el estado del sistema climático (atmósfera, hidrosfera, litosfera, criosfera y biosfera), o sea, nuestro planeta, cuando resulta forzado por la energía que proviene del Sol.

El clima queda caracterizado por las condiciones ambientales (principalmente temperatura y precipitación, aunque no sólo) en intervalos de tiempo largos. Es importante remarcar que el intervalo de tiempo debe ser largo, pues

considerando alcances temporales cortos (digamos de unos pocos días) nos estaríamos refiriendo al tiempo meteorológico y no al clima. En esta caracterización es importante conocer, no sólo los valores medios de las variables consideradas, sino su variabilidad, tanto espacial como temporal. Esto quiere decir que diferentes lugares geográficos tienen climas diferentes (lo cual parecería una evidencia), pero también que, en un lugar concreto, la caracterización ambiental puede ser diferente en el transcurso de los años (por ejemplo, las primaveras actuales y las primaveras de nuestra infancia).

El ser humano recibe sensorialmente a través de la atmósfera la percepción del clima. Gracias a esto, la ciencia ha desarrollado instrumentos de medidas para sustituir a nuestros sentidos, cuyos resultados se han ido archivado, desde hace cientos de años, y ahora nos resultan muy útiles. Mediante un tratamiento estadístico adecuado de series largas de variables meteorológicas se puede deducir información de los valores medios y de la variabilidad espacio-temporal anteriormente mencionada.

Todos los procesos que se dan en nuestro planeta son posibles gracias a la energía que procede del Sol en forma de radiación electromagnética. Sin embargo, el clima queda determinado por un buen número de causas, tanto

externas a la Tierra como internas. Estas causas, además, son cambiantes en el transcurso del tiempo, lo que hace que su reajuste para establecer el clima sea complejo y sea entonces razonable pensar que el clima resultante no tenga porqué ser algo inalterable. En realidad se sabe que el clima de la Tierra ha sido en el pasado diferente al actual (piénsese, por ejemplo, en las eras geológicas, con la alternancia de glaciaciones y periodos interglaciares) y será también distinto en el futuro. Una buena parte de esas causas son naturales y las dividimos en externas e internas al cambio climático.

a) Causas externas (al sistema climático)

- Actividad solar, incluidas las manchas solares. Afecta a la propia fuente de energía, por lo tanto a la radiación que finalmente se recibe en la cima de la atmósfera, que sería como el combustible del motor que representaría el sistema climático. Se sabe que el Sol manifiesta ciclos en su actividad pero, por el momento, no se conoce cómo el sistema climático respondería a ellos produciendo finalmente cambios en el clima.
- Movimiento relativo Tierra-Sol. La Tierra describe una trayectoria elíptica alrededor del Sol cuya

excentricidad 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 va siendo igual año tras año al recorrer su órbita, que además es cambiante. También la inclinación del eje del mundo con respecto al plano de la trayectoria (oblicuidad) es variable, lo que hace que, como si la Tierra fuera una gran peonza, la prolongación de su eje de rotación señale puntos diferentes de la cúpula celeste, con ciclos de alrededor de 41.000 años. Por otra parte, 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 se den 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 constituye la llamada teoría de los ciclos de Milankovitch, la cual permite explicar, junto con algún mecanismo interno, la sucesión de las eras geológicas, anteriormente indicadas.

- Impacto de meteoritos o cometas. Corresponde ésta a una causa bien diferente de las anteriores. Se trata de algo difícilmente predecible, pero de consecuencias importantes si el tamaño del bólido 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 que lo hacía antes del impacto. En esas condiciones, la temperatura puede descender de una forma apreciable, dando lugar a un cambio en el clima. La extinción de algunas especies, entre ellas los dinosaurios, en el llamado límite KT, parece que tuvo este origen.

b) Causas internas (al sistema climático)

- Efecto invernadero. Parte de la radiación que proviene del Sol, aproximadamente un 30%, es reflejado hacia el espacio. Con el resto, si la Tierra no dispusiera de atmósfera, la superficie del planeta se encontraría a una temperatura media de -18°C, justo la necesaria para mantener el balance de radiación. La Luna, que no posee atmósfera, se encuentra a una temperatura media como la indicada; sin embargo, en la

Tierra las cosas son radicalmente diferentes. Los constituyentes atmosféricos absorben relativamente poca radiación solar (sobre todo en ausencia de nubes) pero absorben fuertemente 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, alcanzando una temperatura media de 15°C al nivel de la superficie. Este comportamiento de la atmósfera, radiativamente diferente para la radiación solar que para la terrestre, recibe el nombre popular de efecto invernadero, ya que guarda cierta semejanza con el comportamiento de esa estructura. El principal responsable del efecto invernadero 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 es decisivo en el clima que posee el planeta, ha permitido la vida, al menos en la forma que la conocemos, y cualquier modificación en dicho mecanismo alteraría el clima.

• Desigual distribución del balance de energía. Aunque el planeta en su conjunto se encuentra en equilibrio de radiación, ese equilibrio no se da en cada lugar. En latitudes bajas,

hasta unos 35° de latitud en cada hemisferio, es mayor la radiación solar absorbida por el sistema que la radiación infrarroja emitida hacia el espacio. Por el contrario, en el resto predomina la radiación emitida sobre la absorbida, existiendo entonces allí un déficit de energía. La tendencia natural a destruir los desequilibrios se lleva a cabo por medio de los dos fluidos de la Tierra (atmósfera y océanos), aunque la reducción total no se produce. Un cambio en la distribución del balance de energía (por ejemplo, debido a los parámetros orbitales) alteraría los sistemas mundiales de vientos y corrientes marinas.

- Dinámica interna del sistema (vientos, corrientes, retroalimentaciones). La atmósfera y el océano, por medio de vientos y corrientes marinas, tienden a reducir la diferencia entre el aporte neto de energía en latitudes bajas y el déficit en latitudes altas. Los vientos y corrientes marinas juegan un papel muy importante en la definición climática regional. Sin embargo, una vez establecidos los flujos fluidos, sus múltiples efectos actúan sobre las causas que los producen, en una especie de ciclos sin fin. Estos procesos reciben el nombre de realimentaciones y son una característica de lo que se llaman efectos no lineales, de los que el

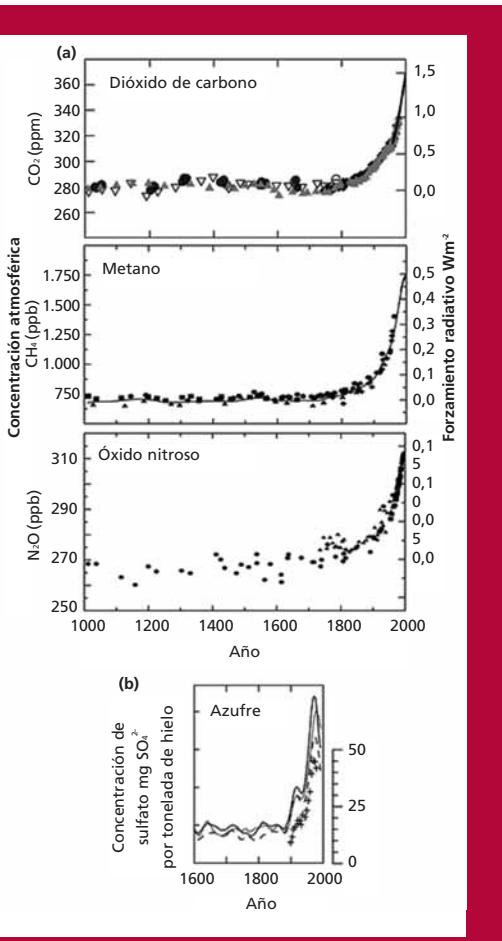


Figura 4.1. Evolución de las concentraciones de (a) gases con efecto invernadero y (b) aerosoles.

sistema climático posee en abundancia. Cuando muchos de estos procesos de retroalimentación actúan simultáneamente, como ocurre en el sistema climático, resulta muy difícil predecir el resultado, aunque es evidente que existe. Una de las pocas posibilidades de tratar este problema es mediante la simulación numérica de dichos procesos.

- Cambio de la composición atmosférica. El efecto invernadero es consecuencia de la diferente absorción de la radiación solar y terrestre por la atmósfera. Esta absorción la realizan los gases que la constituyen y también las partículas que se encuentren en suspensión en el aire. Cualquier cambio 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 que la Tierra es Tierra, ha sido cambiante. 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 CO₂

(con una concentración mucho menor, en la actualidad del orden de unas 380 ppm¹). Si la composición atmosférica cambia, se modifica el efecto invernadero y, en consecuencia, la temperatura media superficial del planeta. En la figura 4.1., panel (a), se pueden observar las importantes variaciones que se han producido en la evolución de la concentración de los gases favorecedores del efecto invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) desde la Revolución Industrial.

- Presencia de aerosoles en la atmósfera. En la atmósfera se encuentra una gran cantidad de partículas materiales en suspensión. Su origen se halla principalmente en el suelo y en la superficie de los océanos, siendo las de origen marino de gran importancia meteorológica pues sin ellas sería prácticamente imposible que se formaran las nubes, al ser necesario un núcleo sólido para que se produzca la nucleación que da lugar a las proto-gotas de nube. Las erupciones volcánicas y también las actividades humanas introducen partículas en el aire. El nombre genérico que se le da a esa masa en

1. Partes por millón, medida de concentración para constituyentes poco abundantes. Equivale a una fracción molar de $\mu\text{mol/mol}$. 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.

forma de partículas es el de aerosoles². Los aerosoles atmosféricos también participan en el efecto invernadero, aunque su comportamiento es más complejo que el de los gases, ya que tanto atenúan la radiación solar como absorben radiación terrestre. El panel (b) de la figura 4.1. muestra la evolución de la deposición de aerosoles de tipo sulfato en el hielo de Groenlandia que, evidentemente, depende de la concentración en el aire.

- Papel de las nubes. Algo parecido a lo anterior ocurre con las nubes; pueden tender a favorecer o atenuar el efecto invernadero dependiendo de su tipo y altura. Así, las nubes altas (como, por ejemplo, los cirroestratos) 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.

4.2. El ciclo del agua

El agua constituye el elemento principal de nuestro planeta, cubriendo sus dos terceras partes. El agua resulta esencial para la vida en la Tierra, y cambios menores en su

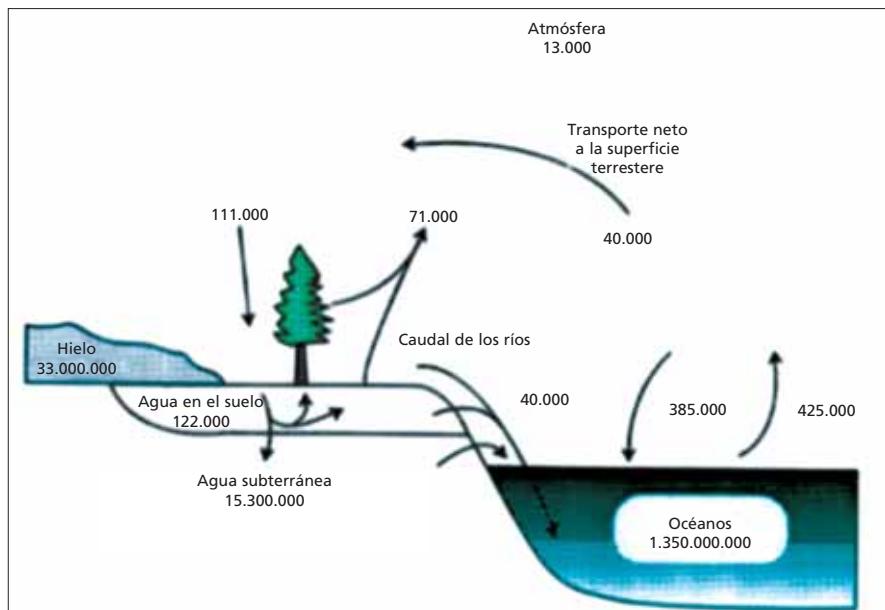


Figura 4.2. Ciclo global del agua. Los volúmenes almacenados están en km^3 , mientras que los flujos (indicados con flechas) en $\text{km}^3/\text{año}$.

Fuente: Schlesinger, 1997.

volumen o composición pueden producir impactos importantes en los sistemas biológicos, y en particular en los sistemas antrópicos. La historia de la humanidad ha estado siempre marcada por la disponibilidad de agua, favoreciendo el florecimiento de civilizaciones en períodos de abundancia (e.g. Antiguo Egipto y las inundaciones del Nilo), o su colapso en períodos de ausencia prolongada (e.g. Mesopotamia), llegando incluso a provocar su desaparición (e.g. Civilización Maya).

El agua se encuentra en la superficie terrestre en un estado de equilibrio dinámico, circulando entre los océanos, la atmósfera y los ambientes continentales en un sistema de intercambio conocido como ciclo hidrológico. Las vías de flujo en este intercambio incluyen la precipitación, evaporación, evapotranspiración por la vegetación, recarga, descarga y escorrentía. El volumen total de agua en la Tierra es de 1.400 millones de

2. Desde el punto de vista de una disolución, la atmósfera en su conjunto sería un aerosol, pero no es éste el uso que se da al término en las ciencias atmosféricas sino el que se ha indicado en el texto.

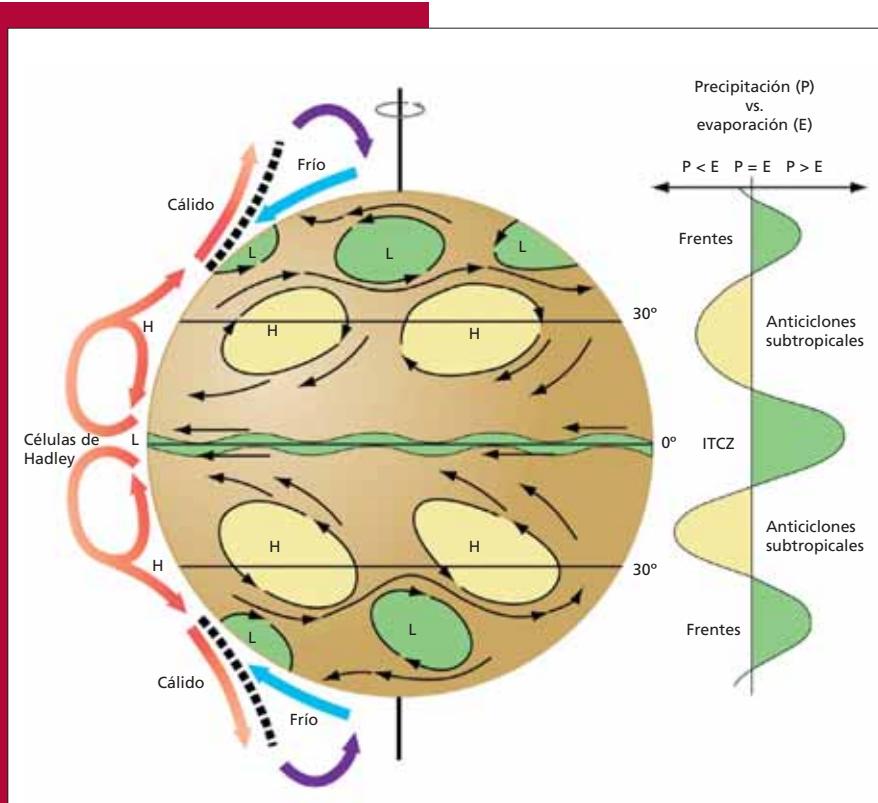


Figura 4.3. Esquema de los principales elementos de la circulación general de la atmósfera y distribución de la relación latitudinal de la precipitación versus evaporación. ITCZ: Zona de convergencia intertropical.

kilómetros cúbicos (aprox. 400 veces el volumen del Mediterráneo), la mayor parte (97%) se encuentra almacenada en los océanos, y solamente el 2,8% corresponde a agua dulce (figura 4.2.). La mayor parte del agua dulce presenta una distribución geográfica irregular y frecuentemente se encuentra en estado sólido (hielo o nieves perpetuas) o en acuíferos profundos, dificultando su utilización. La principal fuente de agua para el consumo humano se encuentra

en ríos, lagos, suelos y en acuíferos relativamente someros. Estas fuentes de agua accesible para el uso humano representan menos del 1% del conjunto del agua dulce terrestre (UNEP, 2002). La distribución del agua dulce resulta regionalmente muy desigual. La evaporación en los océanos varía entre los 4 mm/día en los trópicos, a <1mm/día en los polos. Esta diferencia favorece el movimiento de vapor de agua en la atmósfera y de calor latente hacia las regiones polares. En latitudes bajas y altas de los dos hemisferios (figura 4.3.) predomina la precipitación sobre la evaporación. Por el contrario, en latitudes intermedias lo que predomina es la evaporación, exportándose este exceso de agua hacia las latitudes bajas anteriormente indicadas. Este transporte se efectúa a través de la circulación atmosférica.

En la actualidad el 54% del agua dulce terrestre ya está siendo utilizada por la humanidad. En los últimos 70 años, el consumo de agua se ha incrementado seis veces, mientras que la población mundial se ha triplicado. De acuerdo con las Naciones Unidas, 1,2 billones de personas en el mundo todavía no tienen acceso a sistemas de agua potable, y entre 2,5 y 3,3 billones de personas (casi la mitad de la población mundial) carecen de infraestructuras básicas de saneamiento. La mayor parte de los recursos hídricos (70%) se utilizan en la agricultura, donde se

mantiene sistemas de riego inefficientes con pérdidas de evaporación de hasta el 60%. Por su parte, la industria utiliza el 22% de los recursos de agua globales y, escasamente, el 8% se destina a usos domésticos y de servicios. En España, la situación es similar con el 80% de los recursos utilizados en la agricultura (24.200 Hm³), frente al 14% de abastecimiento a núcleos urbanos (4.300 Hm³/año), y el 6% destinado a la industria (1.900 Hm³/año).

En la Tierra, además del ser humano, existe una gran comunidad de usuarios que comprende al resto de los seres vivos que, como nosotros, requieren de un mínimo de cantidad y calidad de agua para sobrevivir. Igualmente, el agua es imprescindible para el funcionamiento de la geodinámica externa y la atmósfera del sistema terrestre. El conjunto de los elementos bio-geo-físicos presentes en la Tierra son vitales en la subsistencia y desarrollo del ser humano, dado que le proveen de recursos naturales (comida, combustible, medicinas, etc.) y de servicios (seguridad medioambiental, sumideros de carbono, etc.). Los usos y abusos que el ser humano realiza de los recursos hídricos incluyendo la contaminación del agua, y el desarrollo urbanístico e industrial desmesurado, incrementan el estrés hídrico de muchas regiones y amenaza la subsistencia de muchos seres vivos. Este estrés actual sobre los recursos hídricos se agrava por

el cambio global (climático y ambiental), produciéndose una alteración del ciclo hidrológico cuyos resultados son actualmente difíciles de prever con precisión.

4.3. Los ciclos de los elementos

Los principales elementos que constituyen los tejidos vivos de los organismos y que explican el 95% de la biosfera, son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre (C, H, O, N, P y S). Para mostrar los ciclos elegimos C, N y S que van a presentar importantes perturbaciones por la actividad antropogénica. Estos elementos también se encuentran en la naturaleza no viva acumulados en depósitos.

Ciclo del carbono

El ciclo del carbono es de gran interés en biogeoquímica porque la mayor parte de los tejidos están compuestos de carbono, además el papel como gas invernadero del CO₂ ha incrementado el interés y el esfuerzo científico en comprender y cuantificar los intercambios de carbono asociados al ciclo de este elemento. El elemento carbono es básico en la formación de moléculas orgánicas de carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Los organismos fotosintéticos, usando la luz solar como energía captan CO₂ y producen materia orgánica y oxígeno. Así pues CO₂ y O₂ están

íntimamente relacionados. El proceso contrario es la mineralización de la materia orgánica, que tiene lugar como resultado de la respiración de los organismos para extraer la energía contenida en las moléculas orgánicas o procesos fotoquímicos capaces de remineralizar la materia orgánica, con el consiguiente consumo de oxígeno y aumento de CO₂ así como de los otros elementos que forman la materia orgánica (N, P, S), incorporándose nuevamente al ciclo en forma inorgánica. La materia formada durante el proceso fotosintético puede ser de consistencia blanda o dura, como en el caso de algunos organismos acuáticos que poseen caparazones calcáreos. Así, cuando los organismos mueren sus caparazones se depositan en el fondo formando sedimentos calizos en los que el carbono queda retirado del ciclo durante miles y millones de años. Este carbono se incorpora lentamente al ciclo cuando se van disolviendo los carbonatos cárnicos. El carbono se encuentra en diferentes formas, como dióxido de carbono tanto en gas como disuelto en el agua, ácido carbónico, carbonato y bicarbonato.

El ciclo global del carbono consta de tres principales reservas de carbono: la atmosférica, la oceánica y la terrestre. En la figura 4.4. se pueden observar, en negro, tanto las reservas naturales como los flujos a través de las distintas reservas. Los océanos son grandes depósitos de CO₂ (38.000 Pg)

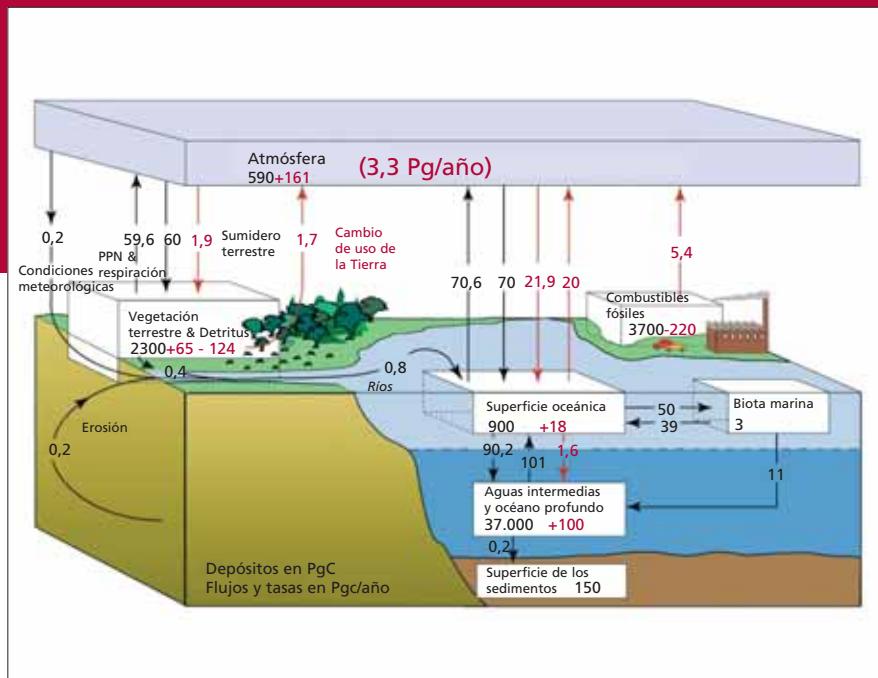


Figura 4.4. Los flujos (representados por flechas) están en Pg (10^{15} g) C año $^{-1}$ y los reservorios (representados por cajas) en Pg C. Las flechas y cifras en negro representan el ciclo natural y las flechas y cifras en rojo representan la alteración de los flujos y reservorios por la actividad humana.

Fuente: Sarmiento y Gruber, 2002.

conteniendo unas 50 veces más que la atmósfera (590 Pg) y unas 20 veces más que la tierra (2.300 Pg). La captación de CO₂ por parte de los océanos se ve favorecida por la solubilidad de CO₂ y su capacidad tampón. El intercambio de carbono entre los distintos depósitos (atmósfera, océano y tierra) nos indica si éstos se están comportando como sumideros o fuentes. En el ciclo natural los flujos son muy pequeños. El océano emite 0,4 Pg C año $^{-1}$ mientras que esa

misma cantidad es captada por producción de la vegetación terrestre. La contribución de C inorgánico y orgánico de los ríos al océano es de 0,8 Pg C año $^{-1}$.

Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para los seres vivos ya que es un componente fundamental del ADN, ARN y las proteínas. El nitrógeno es un elemento muy versátil que existe en

forma orgánica e inorgánica. Un gran número de transformaciones bioquímicas de nitrógeno son posibles ya que el nitrógeno se encuentra en la naturaleza en gran número de estados de oxidación: amonio (-3), nitrógeno molecular (+0), óxido de nitrógeno (+1), nitrito (-3) y nitrato (+5). La forma más abundante de nitrógeno en la atmósfera es el nitrógeno molecular (N₂) que es la especie menos reactiva.

Al igual que el ciclo del carbono, el del nitrógeno consiste en varios depósitos y procesos mediante los cuales se intercambia nitrógeno. Los procesos principales que componen el ciclo del nitrógeno son: la fijación e incorporación de nitrógeno, mineralización, nitrificación y desnitrificación. En la fijación de nitrógeno el N₂ se convierte en amonio. Este proceso es esencial porque es la única manera en la que los organismos pueden obtener el nitrógeno directamente de la atmósfera. Existen algunas bacterias terrestres, como *Rhizobium* o marinas como

Trichodesmium, que son capaces de fijar nitrógeno molecular. El descubrimiento de la reacción de Haber, patentada en 1908 por Fritz Haber, que permite fijar nitrógeno gas atmosférico en amonio para su uso en fertilizantes supone una nueva componente tecnológica, en vez de biológica, de la fijación de nitrógeno que fija actualmente aproximadamente 154 Tg (10^{12} g) de nitrógeno atmosférico, más que los procesos de fijación de nitrógeno que ocurren a través de la actividad nitrogenasa presente en plantas y microorganismos terrestres y marinos. Después de que el nitrógeno se incorpora a la materia orgánica, éste se vuelve a convertir en nitrógeno inorgánico mediante el proceso de mineralización desarrollado por bacterias. Una vez que el nitrógeno está en forma de amonio está de nuevo disponible para ser usado por los productores primarios o para ser transformado a nitrato a través del proceso de nitrificación que requiere la presencia de oxígeno. En la desnitrificación las formas oxidadas de nitrógeno como nitrato y nitrito se convierten en N_2 y óxido nitroso gas (N_2O).

La atmósfera contiene la mayor parte de nitrógeno ($3.9 \cdot 10^{21}$ g N). Cantidad relativamente pequeña de nitrógeno se encuentran en la biomasa terrestre ($3.5 \cdot 10^{15}$ g N) y en la materia orgánica del suelo ($95-140 \cdot 10^{15}$ g N). Los océanos reciben el aporte de $36 \cdot 10^{12}$ g

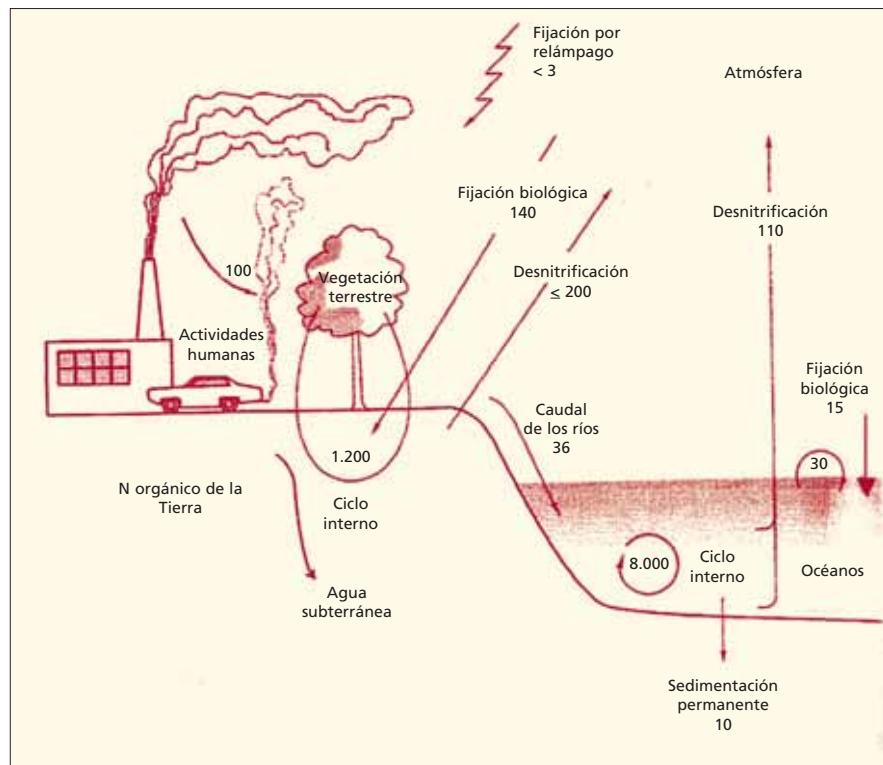


Figura 4.5. El ciclo global del nitrógeno, mostrando la conexión entre atmósfera, tierra y océano. Los flujos (representados por flechas) están en Tg (10^{12} g) N año⁻¹ y los reservorios representados por cajas) en Tg N.

Fuente: Schlesinger, 1997.

N año⁻¹ en formas disueltas por los ríos (Meybeck, 1982), alrededor de $15 \cdot 10^{12}$ g N vía fijación de nitrógeno y cerca de $30 \cdot 10^{12}$ g N por precipitación (Duce *et al.* 1991). Aunque el flujo de los ríos es un componente bastante pequeño del ciclo terrestre contribuye en un 40% del nitrógeno total vertido anualmente al mar. Estos vertidos de nitrógeno

tienen gran importancia en las zonas costeras y en estuarios. El océano contiene una gran reserva de nitrógeno de aproximadamente $570 \cdot 10^{15}$ g N obtenidos por la descomposición de la materia orgánica. El nitrógeno orgánico sedimentado es muy pequeño ($10 \cdot 10^{12}$ g N año⁻¹), así pues, la mayor parte de la contribución de nitrógeno al océano es

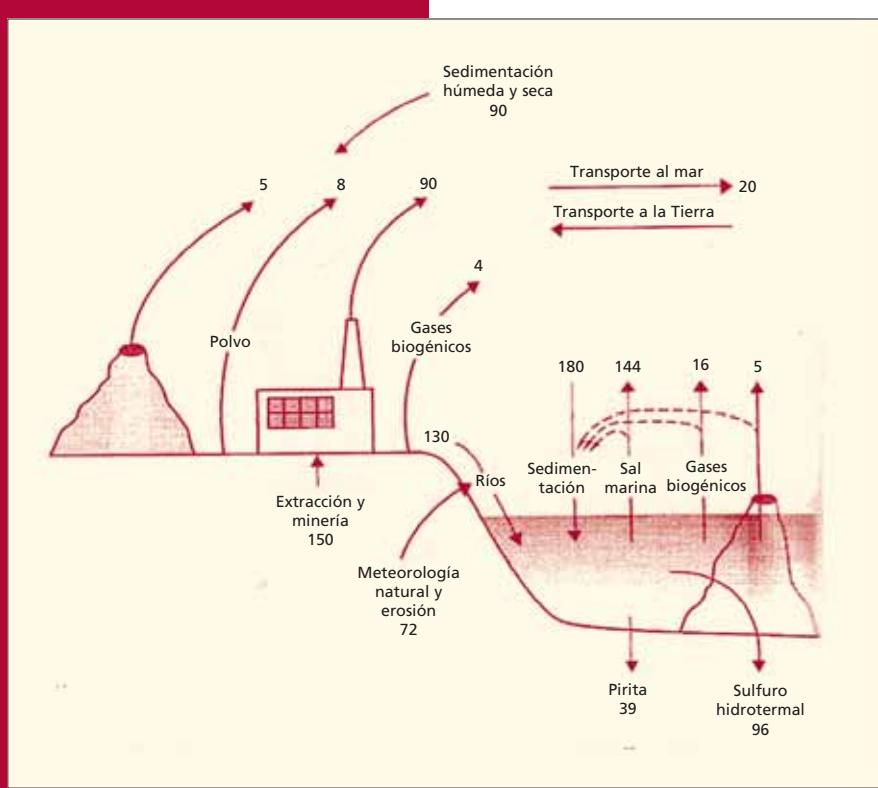


Figura 4.6. El ciclo global del azufre, mostrando la conexión entre atmósfera, tierra y océano. Los flujos (representados por flechas) están en $Tg (10^{12} \text{ g}) \text{ S año}^{-1}$ y los reservorios (representados por cajas) en $Tg \text{ S}$.

Fuente: Schlesinger, 1997.

devuelto a la atmósfera como N_2 por el proceso de desnitrificación ($110 \cdot 10^{12} \text{ g N año}^{-1}$).

Ciclo del azufre

El azufre es otro de los elementos esenciales para la vida, pues forma parte de las proteínas. En el medio abiótico (océanos y litosfera), el azufre se encuentra principalmente como sulfato, es decir en su forma oxidada. La movilización de ese sulfato por parte de

los seres vivos la realizan los microorganismos mediante reducción asimilativa (el sulfato es convertido en aminoácidos y proteínas) y disimilativa (el sulfato es convertido a sulfuro y liberado al medio). Los organismos que no tienen capacidad para transformar el sulfato toman el azufre ya reducido de su dieta. Como muestra la figura 4.6., la vegetación terrestre ($4 \cdot 10^{12} \text{ g S año}^{-1}$) y el plancton marino ($16-30 \cdot 10^{12} \text{ g S año}^{-1}$) liberan parte de su azufre reducido en forma de gases a la atmósfera, donde, juntamente con los gases emitidos por los volcanes ($5-7 \cdot 10^{12} \text{ g S año}^{-1}$), sufren procesos de oxidación que lo convierten mayoritariamente de nuevo a sulfato. Otras fuentes importantes de sulfato atmosférico son la suspensión de partículas de sal ($144 \cdot 10^{12} \text{ g S año}^{-1}$) y de polvo ($8 \cdot 10^{12} \text{ g S año}^{-1}$) por acción del viento sobre la superficie de los océanos y los suelos áridos. En conjunto, el azufre tiene un tiempo de residencia media en la atmósfera muy corto, de unos 2 a 4 días. Puesto que el sulfato es muy soluble, en su mayoría se deposita con la lluvia cerca de los puntos de emisión, y el resto es transportado a largas distancias.

En las regiones oceánicas alejadas de los continentes, las fuentes mayoritarias de azufre atmosférico son la sal marina, que en su mayoría se vuelve a depositar rápidamente en el océano, y el gas de origen biológico dimetilsulfuro (DMS).

En un tiempo de alrededor de un día, el DMS atmosférico se oxida a sulfato y sulfonato y forma pequeñas partículas donde condensa el agua. La formación de nubes depende no solamente de la humedad del aire, sino también de la existencia de partículas de condensación. Si dichas partículas son muy abundantes, la nube se forma con un número mayor de gotas pequeñas, lo que la lleva a tener una vida más larga y a reflejar mejor la luz solar (es decir, a tener un mayor albedo). Si hay pocas partículas de condensación, la nube crece con menos gotas y de un tamaño mayor, es más transparente a la radiación solar y se deshace antes en forma de lluvia. En el océano remoto, las partículas de condensación son escasas y dependen en gran medida de las emisiones de DMS. Es decir, el plancton marino, mediante la producción de DMS, interviene en la formación y brillo de las nubes y, por lo tanto, en el clima.

4.4. El papel de los organismos

De lo anteriormente expuesto se deduce que la vida es parte central del funcionamiento de la biosfera, alterando la composición gaseosa de la atmósfera, con lo que afecta al clima, y participando en el reciclado de materiales necesario para mantener los

ciclos del agua y de los elementos. El grado de control de la vida sobre el funcionamiento de la biosfera es tal que en los años 60 el investigador británico James Lovelock acuñó la hipótesis de Gaia, prácticamente panteísta, que concebía la interacción compleja entre los componentes del planeta Tierra (biosfera, atmósfera, océanos y suelos) como un sistema que se autorregula para mantener condiciones óptimas para la vida (Lovelock, 1995). Aunque esta hipótesis fue severamente criticada en sus primeras formulaciones, es indudable su influencia en el origen de la disciplina emergente conocida como Ciencia del Sistema Tierra, que investiga la regulación de los procesos esenciales del planeta a partir de las interacciones entre sus distintos componentes.

A pesar de la diversidad de formas de vida que pueblan la Tierra, los organismos que participan de forma más intensa en la regulación del funcionamiento de la biosfera son los microorganismos. Éstos, cuyos componentes son relativamente homogéneos morfológicamente pero reúnen la mayor parte de la diversidad genómica del planeta, son responsables de la mayor parte del reciclado de materiales, remineralizando la materia orgánica a formas inorgánicas que pueden ser utilizadas de nuevo en procesos productivos, y son responsables de la mayor parte de la producción primaria en el océano.

Los organismos controlan la composición gaseosa de la atmósfera a través del equilibrio entre sus procesos metabólicos, particularmente la fotosíntesis (que consume CO₂ y libera O₂) y la respiración (que consume O₂ y libera CO₂). Las variaciones en este equilibrio son causantes de las grandes variaciones en la composición de la atmósfera durante la historia del planeta, así como de las oscilaciones estacionales en la composición gaseosa de la atmósfera. De hecho, las emisiones de CO₂ por la actividad humana se podrían equiparar a un proceso respiratorio exógeno. Al igual que los procesos respiratorios, se basa en materia orgánica formada por procesos fotosintéticos, en este caso depósitos de combustibles fósiles generados por excedentes de producción primaria en eras pasadas, y tiene como función esencial generar energía, en este caso no para mantener los procesos metabólicos esenciales, sino para el transporte y la manipulación del ambiente. La actividad biológica afecta también al ciclo hidrológico: las cubiertas vegetales afectan la escorrentía y los flujos de agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración, y algunos organismos, como las plantas acuáticas y las presas construidas por los castores, pueden afectar al flujo de agua en ríos y arroyos. La presencia de cubierta vegetal reduce también la erosión del suelo y ayuda a prevenir

la desertificación. Los organismos aceleran la meteorización y transformación de rocas y minerales a través de las variaciones de pH que provocan y las sustancias que liberan. Generan también minerales, como carbonatos y silicatos, interviniendo de forma decisiva en los ciclos geológicos del planeta. Afectan también al clima, a través de su efecto sobre la composición

de gases de efecto invernadero, como el CO₂, el metano o el óxido nitroso, o de efecto refrigerante, como el DMS y otros precursores de aerosoles y nubes. Los organismos también afectan al balance térmico de la Tierra, pues las superficies cubiertas por vegetación tienen un menor albedo, es decir, una menor reflexión de la radiación solar incidente. Además, la absorción de luz

por los organismos fotosintéticos del océano genera calor, lo que puede llegar a afectar al grado de mezcla de las aguas superficiales. Está claro, pues, que los impactos de la actividad humana sobre los ecosistemas (por ejemplo, modificando la cubierta vegetal o eutrofizando el océano) pueden tener importantes repercusiones sobre los ciclos de los elementos y el clima.

Referencias

- DUCE, R. A.; LISS, P. S.; MERRILL, J. T.; ATLAS, E. L.; BUAT-MENARD, P.; HICKS, B. B.; MILLER, J. M.; PROSPERO, J. M.; ARIMOTO, R.; CHURCH, T. M.; ELLIS, W.; GALLOWAY, J. N.; HANSEN, L.; JICKELLS, T. D.; KNAP, A. H.; REINHARDT, K. H.; SCHNEIDER, B.; SOUDINE, A.; TOKOS, J. J.; TSUNOGAI, S.; WOLLAST, R.; ZHOU y M. (1991). "The atmospheric input of trace species to the world ocean". *Global Biogeochemical Cycles*, 5: 193-259.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3 vols.
- LOVELOCK, J. (1995). *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth*.
- MCGUFFIE, K. y HENDERSON-SELLERS, A. (2005). *A climate modelling primer*. Wiley. 280 pp.
- MEYBECK, M. (1982). "Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers". *American Journal of Science*, 287: 301-428.
- MMA, 2005: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. J.M. Moreno, ed., Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. 822 pp.
- NERC (2005). "Climate Change. Scientific certainties and uncertainties". *Natural Environment Research Council*, UK. 6 pp.
- RIVERA, A. (2000). *El cambio climático: el calentamiento de la Tierra*. Temas de Debate, Madrid. 270 pp.
- SARMIENTO, J. L.; GRUBER N. (2002). *Sinks for anthropogenic carbon*. *Physics Today*. American Institute of Physics S-0031-9228-0208-010-9.
- SCHLESINGER, W. H. (1997). *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press., San Diego, 588 pp.
- UNEP (2002). *Global Environment Outlook - 3*. Earthscan.

5. La maquinaria de la biosfera en el Antropoceno

Como se ha comentado anteriormente, el cambio global es más que un cambio climático: a lo largo de los últimos siglos, las actividades humanas han conllevado efectos importantes y diversos para los sistemas naturales. Por sistemas naturales cabe entender no solamente los ecosistemas confinados geográficamente, que en muchos casos han visto modificados su extensión y dinámica de funcionamiento, sino también los grandes compartimentos ambientales (atmósfera, océanos, aguas continentales, suelos, masas forestales), cuyos flujos de energía y materia determinan el funcionamiento del planeta. Los cambios recientes en los ciclos de los elementos, por ejemplo, son tan profundos que podríamos hablar de una nueva era geológica en la historia de nuestro planeta, el Antropoceno (ver sección 3) que habría

empezado a finales del siglo XVIII con el invento de la máquina de vapor, el inicio de la industrialización con combustibles fósiles, la explosión demográfica y el inicio del aumento de las concentraciones de CO₂ y metano en la atmósfera. En este capítulo se presenta el impacto de la actividad humana sobre los motores de la biosfera en el Antropoceno.

5.1. Perturbaciones en el ciclo del agua

En la historia de la Tierra se observa que las perturbaciones en el clima han generado cambios importantes en el ciclo hidrológico. A modo de ejemplo, durante el último periodo glacial (hace 18.000 años), un 3% del volumen oceánico (42 millones de km³)

quedaron atrapados en los casquetes glaciares, produciendo un descenso del nivel del mar de 120 m con respecto al nivel actual. Igualmente, este periodo se caracterizó por un descenso en la tasa de evaporación y precipitación, la reducción de la circulación de la humedad a través de la atmósfera, la disminución de la biomasa terrestre, la expansión de los desiertos y el aumento del transporte eólico, entre otros.

Las interacciones entre clima e hidrología son tan estrechas que cualquier cambio afecta en una doble dirección. Por un lado, los cambios en las variables climáticas (e.g. temperatura y precipitación) producen impactos significativos en los recursos hídricos, y a partir de éstos en las sociedades y los ecosistemas. Por otro, los cambios inducidos por el ser humano en los recursos hídricos (e.g. embalses, sistemas de irrigación, sobreexplotación de acuíferos) influyen en las condiciones climáticas. Tanto el clima como el ciclo del agua son complejos, sujetos a relaciones causa-efecto y acción-reacción no proporcionales y, por tanto, resulta extremadamente complejo determinar los impactos directos que se derivan de perturbaciones en la hidrosfera.

El *Tercer Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental del Cambio Climático* (IPCC, 2001) señala las evidencias de los cambios en las variables críticas que han controlado el

ciclo hidrológico y el clima durante el siglo XX. Entre los hechos más relevantes para el ciclo hidrológico tenemos: (1) aumento de $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ en la temperatura media global, (2) aumento de 7-12% en la precipitación continental sobre la mayor parte del Hemisferio Norte, (3) fuerte retroceso de la mayor parte de los glaciares de montaña y de los polos, (4) retraso en las primeras heladas de otoño, (5) adelanto del deshielo en muchos de los lagos del Hemisferio Norte, y (6) ascenso del nivel de mar. Aunque más inciertos, algunos cambios potencialmente importantes incluyen un aumento del 2% en la cobertura de nubes sobre muchas zonas de latitudes medias y altas (albedo y aumento del efecto invernadero), aumento del 20% en la cantidad de vapor de agua en la estratosfera baja (aumento del efecto invernadero), cambios en el almacenamiento y transporte de calor en el océano, interacciones entre el ciclo del agua y del carbono, e incremento global en eventos extremos (sequías y riadas).

Los cambios del ciclo hidrológico incidirán en una doble vertiente: (1) en los recursos hídricos disponibles, alterando la distribución del agua tanto en su actual distribución regional, como el volumen presente en los distintos componentes del ciclo hidrológico, y (2) en la magnitud y frecuencia de los extremos hidrológicos, cuyos impactos

pueden ser magnificados por la vulnerabilidad de los sistemas.

La mayor parte de modelos climáticos predicen un planeta más húmedo en relación con el calentamiento global, asociado a un incremento en la tasa del movimiento del agua en el ciclo hidrológico, con un aumento en la evaporación, precipitación y escorrentía. Sin embargo, no todas las áreas estarán afectadas con estas tendencias, sino que en las latitudes medias y subtropicales se producirán cambios en sentido contrario con tendencia a una disminución de los recursos hídricos, y al aumento en la variabilidad hidrológica (aumento de las sequías y crecidas).

El efecto del cambio climático en los caudales de los ríos y de la recarga de los acuíferos depende de las regiones y los escenarios planteados, ajustándose en gran parte a los cambios que se esperan en la precipitación (figura 5.1.). Sin embargo, esta respuesta hidrológica de las cuencas no sólo depende de los cambios de variables climáticas (precipitación y temperatura), sino también de factores ambientales (usos de suelo, vegetación), y antrópicos (embalses, trasvases), lo que dificulta una estimación más precisa de la evolución de la escorrentía y su distribución. Los factores ambientales como los cambios de uso del suelo y en la vegetación dependen principalmente de factores económicos y sociológicos

(demografía, economía, cultura, entre otros) y de limitaciones climáticas. La utilización de combustibles fósiles y reducción de la actividad agrícola ha favorecido la recuperación de la vegetación en numerosas regiones del planeta, reduciendo la escorrentía neta. Igualmente, la alteración de la hidrología superficial y subsuperficial se ha incrementado con la masiva construcción de presas y de trasvases para proyectos de irrigación, conduciendo a la fragmentación de los sistemas fluviales y la alteración de los regímenes de flujo. Estas alteraciones han afectado considerablemente a la biodiversidad y a los ecosistemas acuáticos.

Como consecuencia del aumento del uso de agua para la agricultura, grandes lagos, como el Mar de Aral, en Asia Central, han perdido gran parte de su extensión y volumen de agua, reduciéndose éste en 0,6 m cada año y la superficie ocupada por el Lago Chad, en África, se redujo en 20 veces en tan sólo 15 años. El uso del agua por la humanidad y la transformación del

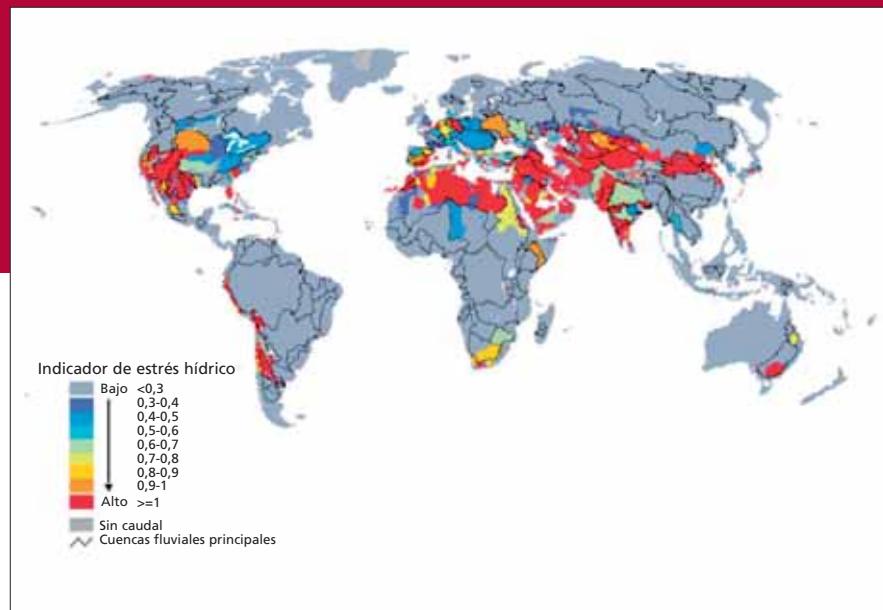


Figura 5.1. Mapa mundial de indicadores de estrés hídrico.

Fuente: © 2003 World Resources Institute.

territorio han resultado en importantes cambios en el ciclo del agua.

Aproximadamente el 60% de las zonas húmedas europeas existentes en 1800 se han perdido. El número de embalses construidos ha crecido rápidamente durante el siglo XX, a un ritmo de un 1% anual, reteniendo un volumen de agua de aproximadamente 10.000 km³, equivalente a 5 veces el volumen de agua contenidos en los ríos. El mayor de los embalses es actualmente el lago Volta (8.482 km²; Ghana), y siguen construyéndose grandes embalses como el embalse de las Tres Gargantas, sobre el río Yangtze en China, que estará

operativo en el año 2009. El número de estanques para uso agrícola también ha aumentado, hasta alcanzar aproximadamente medio millón. Las extracciones de acuíferos también han aumentado notablemente, de forma que las extracciones aumentan mucho más rápido que las recargas. Solamente en China, existen más de 2 millones de pozos, y en la India éstos alcanzan profundidades cada vez mayores, superando los mil metros de profundidad, al descender progresivamente el nivel de los acuíferos.

El cambio climático podría reducir aún más la disponibilidad de agua y la

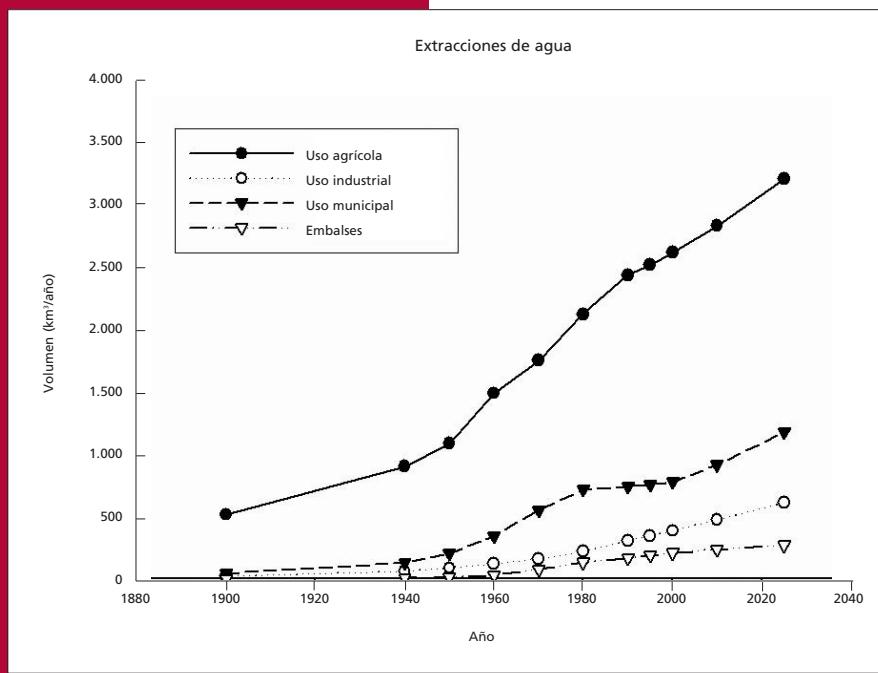


Figura 5.2. Valores de extracción de agua en el mundo para distintos usos humanos, y su proyección para el futuro.

Fuente: Shiklomanov, 1999, IHP UNESCO.

recarga de las aguas subterráneas en muchos de los países que presentan actualmente estrés hídrico, así como aumentarla en otras (IPCC, 2001). A esto hay que añadir que en los próximos 50 años la población mundial crecerá hasta alcanzar los 9.000 millones, produciendo una mayor presión sobre los recursos hídricos (Cosgrove y Rijsberman, 2000). Teniendo en cuenta tasas de consumo similares a las actuales, se espera que para el 2025 el uso de agua global aumente entre el 25 y el 50%, lo que supone que el 70% del suministro de

agua anual se emplee en cubrir las necesidades de 8.000 millones de personas (figura 5.2.). Sin embargo, si los consumos se incrementan hasta los niveles de los países más desarrollados, sería necesario utilizar hasta el 90% de los recursos disponibles. Igualmente, se prevé que dos tercios de la población mundial estarán sujetos a problemas de escasez de recursos hídricos, con menos de 50 litros diarios por persona.

En España, la sensibilidad de los recursos hídricos al aumento de temperatura y disminución de la precipitación es muy alta, precisamente en aquellas zonas con temperatura media alta y precipitaciones bajas. En las zonas semiáridas de nuestro país la reducción de la aportaciones pueden alcanzar el 50% (Iglesias *et al.*, 2005). En el informe de la ECCE (Iglesias *et al.*, 2005) se señala que para el horizonte 2030, considerando dos escenarios, uno con un aumento de 1°C en la temperatura media anual (escenario 1) y otro con disminución de un 5% en la precipitación media anual y aumento de 1°C en la temperatura (escenario 2), son esperables disminuciones medias de aportaciones hídricas en España, en régimen natural, entre el 5 y 14% (figura 5.3.). Para el horizonte 2060, con un escenario de 2,5°C de aumento de temperatura y un 8% de disminución de las precipitaciones se prevé una reducción global de los recursos hídricos del 17%, y un

aumento de la variación interanual de los recursos. Según este informe ECCE, las cuencas más afectadas corresponden al Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares (figura 5.4.). En un trabajo previo, Ayala e Iglesias (1996) predicen una reducción media del caudal en España de 17% (equivalente a 20.115 hm³), oscilando entre el 34% para la cuenca del Guadalquivir y el 6% para las cuencas internas catalanas. Igualmente, la extracción de agua subterránea seguirá aumentando en aquellas zonas con mayor estrés hidrológico, que incluyen la zona costera mediterránea y meseta sur.

El aumento de la extracción de agua superficial y subterránea para consumo humano determinará en el futuro la reducción de los recursos disponibles en ríos, lagos y humedales. Se estima que el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos requieren entre el 20 y el 50% del caudal medio anual de los principales ríos del mundo (Smakhtin *et al.*, 2004). Igualmente, se requieren enormes cantidades de agua para

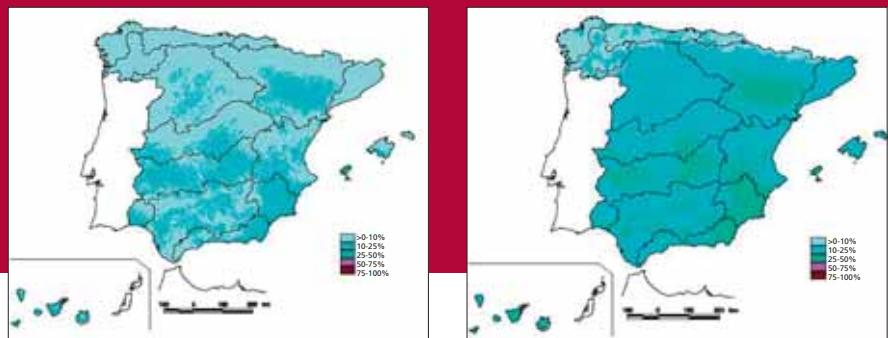


Figura 5.3. Mapa de disminución porcentual de la escorrentía para el escenario 1 y el escenario 2.
Fuente: Iglesias *et al.*, 2005 en informe ECCE.

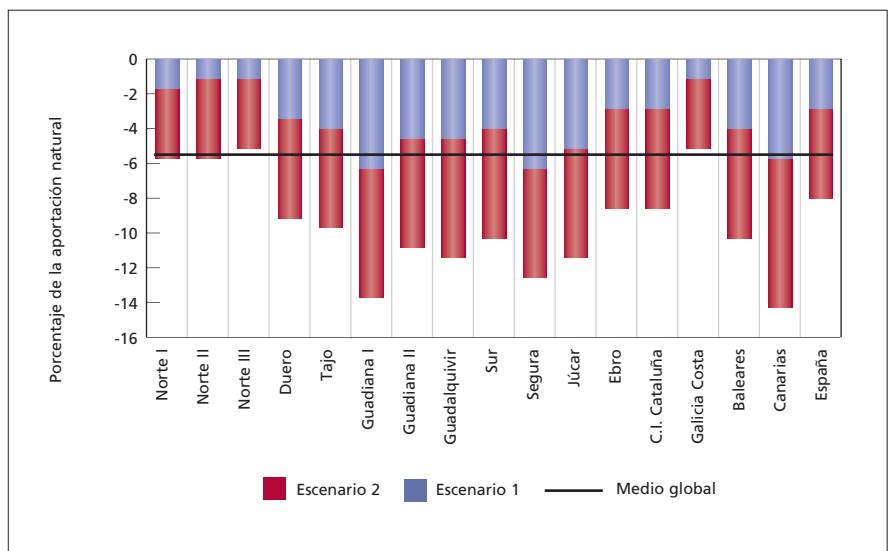


Figura 5.4. Porcentajes de disminución de la aportación total, para los escenarios climáticos considerados, en el largo plazo de la planificación hidrológica 2.
Fuente: Iglesias *et al.*, 2005 en informe ECCE.

mantener bosques, matorrales y pastizales.

Entre las perturbaciones del cambio global tenemos los cambios en los

patrones de magnitud y frecuencia de los eventos extremos como sequías e inundaciones. Se espera que el cambio climático cause una mayor frecuencia

y severidad de crecidas y sequías, que afecten la cadena de producción de alimentos, infraestructuras y especialmente un incremento de la vulnerabilidad social y de los ecosistemas (IPCC, 2001). De hecho, entre 1960 y la actualidad, más del 75% de los desastres naturales en el mundo y en España tienen origen climático, tales como crecidas, sequías y precipitaciones intensas. En España, el informe ECCE (Benito *et al.*, 2005) indica que desde el 1910 hasta la actualidad, los ríos atlánticos han experimentado una disminución en la frecuencia de las crecidas extraordinarias, aunque la magnitud de las crecidas más catastróficas se ha mantenido e incluso aumentado a pesar del efecto laminador de los embalses (tabla 5.1.). Igualmente, se pronostica una tendencia al aumento de la variabilidad hidrológica (sequías y crecidas). En los ríos Duero y Ebro, los caudales punta pueden aumentar debido a fenómenos de deshielo súbito como consecuencia de la variación brusca de la temperatura de invierno y primavera. Igualmente, se apunta a un aumento en la generación de crecidas relámpago en las cuencas mediterráneas y el interior de la Península Ibérica.

Entre las principales opciones adaptativas a las crecidas se encuentran los estudios de prevención que mejoren la ordenación territorial, así como los sistemas de predicción en tiempo real.

Possible impacto del cambio climático	Guadalquivir Guadiana Tajo	Duero	Norte	Ebro	Cuenca Interna de Cataluña	Levante/Sur
Cambio en la circulación zonal (NAO positiva)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)				
Aumento de fenómenos de gota fría			+Irregularidad de extremos		+Irregularidad de extremos	+Irregularidad de extremos crecida/sequías
Generación de núcleos convectivos	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago
Cambios bruscos en la temperatura		+Crecidas por deshielo		+Crecidas por deshielo	+Crecidas por deshielo	

Tabla 5.1. Análisis cualitativo de la respuesta de diferentes cuencas españolas a posibles impactos del cambio climático. Menos (-), más (+).

Fuente: Benito *et al.*, 2005, en informe ECCE.

En previsión de estos escenarios futuros será necesario hacer un importante esfuerzo encaminado a mejorar la eficiencia en el uso del agua y del suministro hídrico, así como alcanzar un desarrollo sostenible que permita el acceso al agua y a sistemas de saneamiento. Resulta especialmente crítico mejorar la eficiencia de los sistemas de riego (e.g. uso de riego por goteo), lo que supondría duplicar la eficiencia del uso del agua en la agricultura y gestionar cuidadosamente aquéllos usos, como actividades lúdicas o deportivas que generan una presión importante sobre un recurso, el agua, que cada vez será más escaso. Es importante también considerar estos escenarios de cambio de régimen hidrológico al plantear una estrategia hidrológica

española. En particular, una estrategia basada en trasvases requiere, como premisa de partida, el que las cuencas donantes se mantengan en el tiempo como excedentarias en recursos hídricos. Lamentablemente, los escenarios expuestos generan grandes incertidumbres sobre la posibilidad de que cuencas que actualmente son excedentarias, aunque lo sean por márgenes estrechos, se mantengan como tales en el futuro. A medida que aumenta la demanda de agua en el mundo, existe una mayor preocupación con los conflictos que la propiedad del agua pueda generar entre regiones, e incluso entre naciones. No hay que olvidar que más de 200 ríos en el mundo presentan un carácter transnacional, algunos de ellos localizados en regiones conflictivas como el Cercano

Oriente, donde el control del agua juega ya un papel importante, aunque no explícito, en las inestabilidades políticas que afectan a la seguridad de esta región. Los conflictos asociados al control del agua se extenderán en el futuro.

5.2. Perturbaciones en los ciclos de elementos

Ciclo del carbono

El gas más importante del efecto invernadero después del vapor de agua es el CO₂, cuyas emisiones en la atmósfera se han ido incrementando desde la época pre-industrial como consecuencia de la combustión de fósiles (5.4 Pg C año⁻¹) y el diferente uso de la tierra (1.7 Pg C año⁻¹), dando lugar a un importante incremento en la atmósfera (figura 5.5.).

Aproximadamente el 50% de las emisiones permanecen en la atmósfera, el otro 50% se incorpora al océano y a la vegetación terrestre, desacoplando el equilibrio natural de intercambio entre éstos y la atmósfera. El océano, en particular, se comporta como un sumidero neto de CO₂ que “secuestra” alrededor de 2 Pg de carbono antropogénico al año. Es decir, el océano juega un papel importante como depósito de CO₂, sin el cual el aumento de la concentración atmosférica de este gas sería significativamente mayor de la actual.

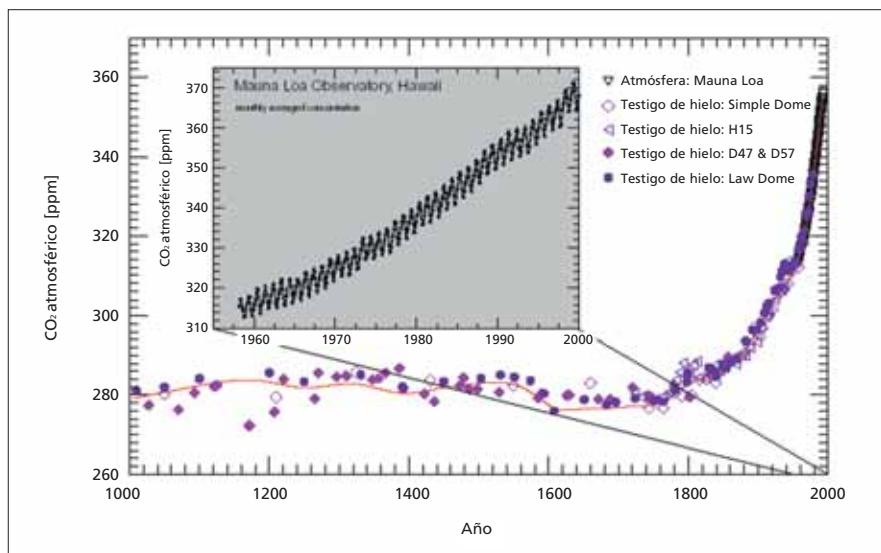


Figura 5.5. Progresión de la presión parcial de CO₂ en la atmósfera durante el último milenio.
Fuente: Sarmiento y Gruber, 2002.

Las bombas física y biológica en el océano
El secuestro de CO₂ por parte del océano tiene lugar por medio de procesos físico-químicos y biológicos. Estos procesos son conocidos como *bomba física* (o de solubilidad) y *bomba biológica*; ambos contribuyen a transportar CO₂ desde la superficie a aguas profundas, y alejarlo así de un retorno a corto plazo a la atmósfera.

La bomba física está conducida por el intercambio de CO₂ en la interfase atmósfera-océano, ya que la presión parcial de CO₂ tiende a estar en equilibrio entre la atmósfera y el océano, por lo que su aumento en la atmósfera fuerza un flujo hacia el océano. La bomba física depende, además, de los procesos físicos

que transporta CO₂ al océano profundo. El CO₂ atmosférico entra en el océano por intercambio gaseoso dependiendo de la velocidad del viento y de la diferencia de las presiones parciales entre la atmósfera y el océano. La cantidad de CO₂ captado por el agua de mar es función de la temperatura a través del efecto de la solubilidad. La solubilidad aumenta a bajas temperaturas. Así pues las aguas frías absorben más CO₂ que las cálidas.

La circulación termohalina oceánica conecta todos los océanos como una gran cinta transportadora. Así, aguas saladas y cálidas alcanzan altas latitudes en el Atlántico norte, en invierno se enfrián

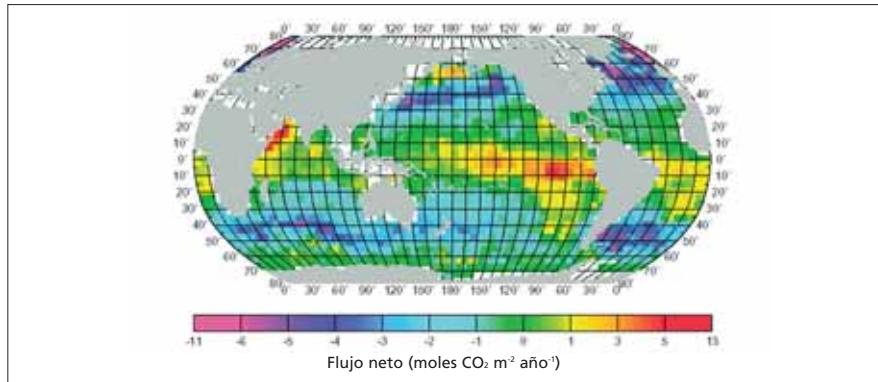


Figura 5.6. Intercambio medio anual de CO_2 ($\text{mol m}^{-2} \text{año}^{-1}$) entre la atmósfera y el océano para el año 1995. Los valores negativos denotan una captación de CO_2 atmosférico por el océano y los valores positivos su emisión del océano a la atmósfera.

Fuente: Takahashi *et al.*, 2002.

y se hunden a grandes profundidades. Este proceso es conocido como formación de aguas profundas. Desde ahí comienza su recorrido hacia el sur donde se unirá a las aguas frías profundas recién formadas alrededor de la Antártida. Entonces este flujo de agua profunda llega a los océanos Índico y Pacífico. En ambos océanos el agua profunda se dirige al norte, regresando por superficie y retornando al Atlántico donde comenzará un nuevo ciclo que dura unos 1.000 años. En el momento en el que se forman las aguas profundas por hundimiento de aguas frías, éstas arrastran CO_2 disuelto hacia el fondo donde, a medida que circulan de un océano a otro, se van enriqueciendo en CO_2 como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica procedente de la sedimentación de la producción biológica en la superficie.

Como indica su nombre, en la *bomba biológica* interviene la biota marina. El proceso de fijación fotosintética de CO_2 en la capa iluminada del océano por el fitoplantocion está compensado por la exportación de carbono orgánico (tejidos blandos) y carbonato (caparazones calcáreos) a capas profundas por gravedad (sedimentación). Así, la actividad biológica retira CO_2 de las aguas superficiales y lo transporta hacia el interior del océano en forma de carbono orgánico y carbonatos. Durante esta exportación la materia orgánica y el carbonato se van descomponiendo por acción de las bacterias y de los equilibrios químicos, respectivamente. Una pequeña parte de ambos alcanza el lecho marino y se incorpora a los sedimentos, donde quedará retenido durante largos períodos de tiempo.

Balances globales de captación de CO_2 antropogénico

El estudio de la captación de CO_2 antropogénico por el océano se puede abordar desde varios puntos de vista. Uno sitúa al observador en la capa más superficial del océano, justo donde tiene lugar el intercambio de CO_2 con la atmósfera. La figura 5.6. muestra que las zonas polares y frías actúan como sumideros de CO_2 , mientras que las zonas cálidas ecuatoriales actúan como fuentes de exhalación de CO_2 como consecuencia de su elevada temperatura y del hecho de ser zonas donde las aguas profundas, ricas en CO_2 , afloran a la superficie. El flujo de intercambio neto anual calculado por Takahashi *et al.* (2002) para 1995 fue de $2.2 \pm 0.45 \text{ Pg C año}^{-1}$.

Otra manera de abordar la captación de CO_2 es a partir de la medida de la acumulación de éste en la columna de agua a lo largo del tiempo. Así, usando datos obtenidos durante la década de los 90 (figura 5.7.), Sabine *et al.* (2004) estimaron que el CO_2 antropogénico secuestrado por el océano en el periodo 1800-1994 fue de $118 \pm 19 \text{ Pg C}$.

La distribución de CO_2 antropogénico en los océanos es función de la formación y hundimiento de masas de agua superficial y profunda en los océanos y su transporte y acumulación en las zonas subtropicales. Las regiones de afloramiento ecatorial tienen relativamente menor cantidad de CO_2 antropogénico ya que suelen funcionar como fuentes de carbono.

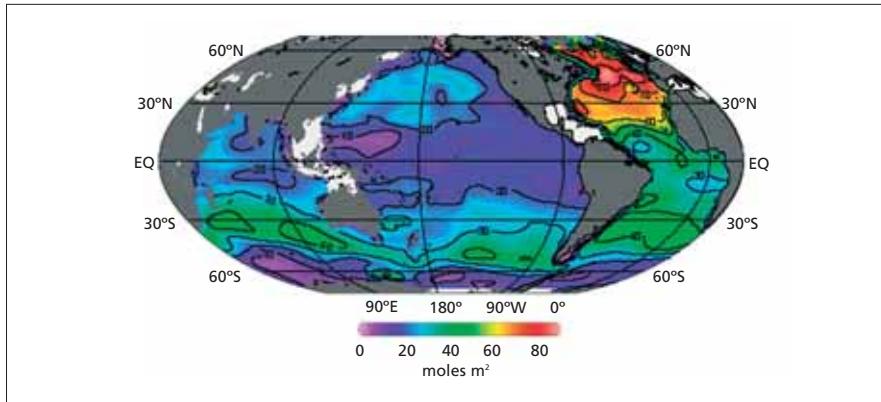


Fig. 5.7. Inventario de CO₂ antropogénico en la columna de agua oceánica (mol m⁻²). Altos inventarios están asociados con formación de agua profunda en el Atlántico Norte y formación de aguas intermedias y modales entre 30° y 50° S. El inventario total oceánico entre 1980 y 1994 es de 118 ± 19 Pg C.

Fuente: Sabine *et al.*, 2004.

La figura 5.7. muestra la distribución de CO₂ antropogénico con una mayor penetración de CO₂ en el océano Atlántico, disminuyendo en el océano Índico, y siendo menor en el océano Pacífico donde las aguas son más viejas. Esta distribución de CO₂ antropogénico sigue la circulación termohalina (ver cuadro 5.1.). Tanto a partir de las medidas directas de flujos de intercambio de CO₂ en superficie como a partir del inventario de CO₂ antropogénico acumulado en la columna de agua, se puede apreciar que el Atlántico norte juega un papel muy importante en el secuestro de CO₂ por el océano.

Sabine *et al.* (2004) resumen el papel del océano en el ciclo del carbono global durante el Antropoceno (tabla 5.2.). Aproximadamente la mitad del CO₂

antropogénico emitido por las combustiones de fósiles y la producción de cemento en los últimos 200 años se encuentra en el 10% más superficial del océano. El balance neto terrestre de CO₂

viene expresado por la diferencia entre las emisiones del cambio de uso de la tierra y de la captación de CO₂ por la biosfera terrestre. Las estimaciones de la emisión de CO₂ debida a los cambios del uso de la tierra para el periodo 1850 a 1994 tienen una elevada incertidumbre. Teniendo en cuenta los valores de 100 a 180 Pg C adoptados por Sabine *et al.* (2004) se puede deducir que la biosfera terrestre puede haber captado entre 61 y 141 Pg C desde el Antropoceno. Comparando los dos periodos de 1800-1994 y el más reciente de las décadas de los 80 y 90, hay una indicación, aunque no estadísticamente significativa, de que la tasa de captación de carbono por parte del océano ha descendido de 28-34% a 26%. Mientras que el sumidero terrestre parece mantenerse constante dentro de la elevada incertidumbre (18-33% *versus* 28%).

Fuentes de CO ₂	1800-1994 [Pg C]	1980-1999 [Pg C]
<i>Fuentes y sumideros</i>		
1. Emisiones por combustión de fósiles y producción de cemento	244±20	117±5
2. Almacenamiento en la atmósfera	-165±4	-65±1
3. Captación y almacenamiento en el océano	-118±19	-37±8
<i>Balance terrestre neto deducido</i>		
4. Balance terrestre neto = -(1)-(2)-(3)	39±28	-15±9
<i>Balance terrestre</i>		
5. Emisiones por el cambio en el uso del suelo	100 a 180	24±12
6. Sumidero de la biosfera terrestre = -(1)-(2)-(3)-(5)	-61 a -141	-39±18

Tabla 5.2. Balance de CO₂ antropogénico para el Antropoceno (1800-1994) y para las décadas de los 1980s y 1990s.

Fuente: Sabine *et al.*, 2004.

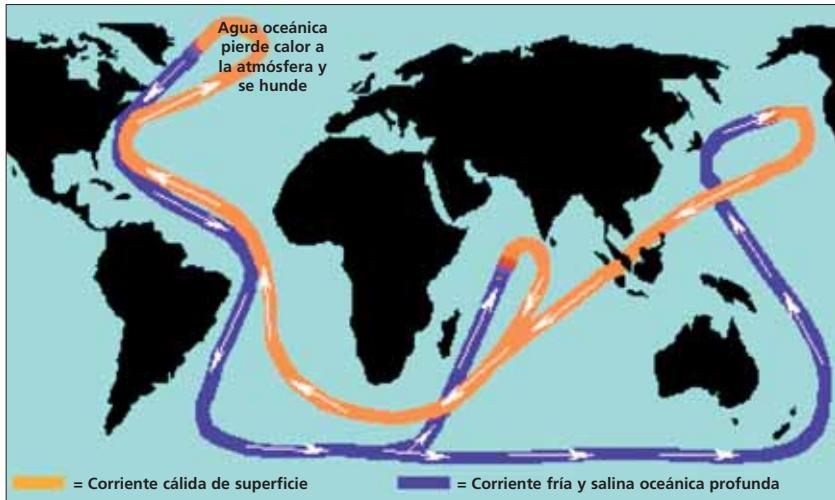
Cuadro 5.1.

Circulación termohalina

La circulación termohalina consiste en corrientes oceánicas impulsadas por flujos superficiales de aguas saladas y cálidas procedentes de los trópicos que alcanzan altas latitudes en el Atlántico norte donde se enfrián y hunden a grandes profundidades. Este proceso es conocido como formación de aguas profundas. Desde ahí comienza su recorrido hacia el sur donde se unirá a las aguas frías profundas recién formadas en la Antártica. Este flujo de agua profunda llega a los océanos Índico y Pacífico. En ambos océanos el agua profunda se dirige al norte, regresando por superficie y retornando al Atlántico donde comenzará un nuevo ciclo que dura alrededor de 1.000 años.

La circulación termohalina oceánica conecta todos los océanos como una gran cinta transportadora.

Los cambios climáticos alteran el balance de agua dulce en el Atlántico Norte. Cuando la temperatura del aire aumenta, las aguas de superficie también tienden a calentarse. Este efecto es mayor en altas latitudes por deshielo debido al calentamiento. El ciclo hidrológico puede verse acelerado en una atmósfera cálida por el incremento del caudal de los ríos. Así en un futuro, el agua de mar en sus



Representación esquemática de la circulación termohalina del océano de acuerdo con Broecker (1991).

zonas de formación será cada vez más cálida y menos salada, siendo su densidad menor. Este hecho provocará una ralentización de la circulación termohalina, llegando incluso al colapso. La ralentización o colapso de la circulación termohalina puede tener importantes consecuencias sobre el clima global, con un enfriamiento de hasta 7°C en latitudes altas del Hemisferio Norte y un calentamiento de 1 a 2°C en el Hemisferio Sur. Existe la evidencia, derivada del examen de paleoindicadores, de una relación entre cambios bruscos en climas pasados y alteraciones de la circulación termohalina.



Atardecer en el mar de Weddell (Antártida).

Fotografía: C. M. Duarte.

Ciclo del nitrógeno

La actividad humana ha perturbado la condición de estado estacionario del ciclo de nitrógeno, acelerando de forma notable la fijación de nitrógeno. La tasa de producción de fertilizantes de nitrógeno ha ido incrementándose de forma exponencial desde que a principios del siglo XX, el alemán Fritz Haber descubrió cómo acortar el ciclo del nitrógeno fijándolo químicamente como amonio a altas temperaturas y presiones, creando así fertilizantes que podían ser añadidos directamente al suelo. Los niveles de producción de fertilizantes de nitrógeno fueron de aproximadamente $80 \cdot 10^{12}$ g N año⁻¹ en 1995 y se prevé que supere los $140 \cdot 10^{12}$ g N año⁻¹ en 2020.

La evolución de la fijación natural y antropogénica de nitrógeno se pueden observar en la figura 5.8., en la que se aprecia el incremento exponencial de la fijación antropogénica como consecuencia del incremento en la producción de fertilizantes de nitrógeno. A principios del siglo pasado la fijación antropogénica únicamente representaba un 15% de la natural, mientras que en 1980 la fijación antropogénica se igualó a la natural, superándola en la actualidad en más del 35%.

Este enriquecimiento de nitrógeno estimula las tasas de nitrificación y desnitrificación, produciendo un incremento de N₂O en la atmósfera.

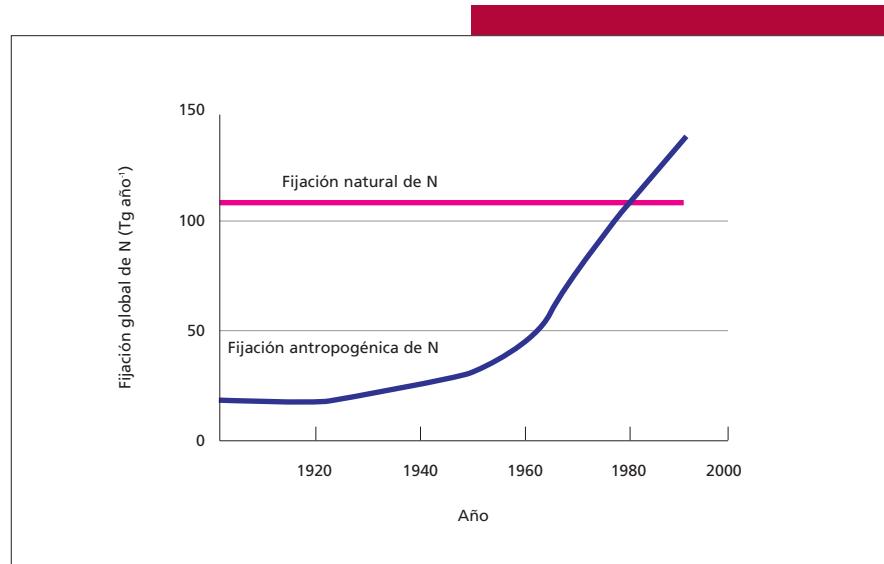


Figura 5.8. Evolución de la fijación anual de nitrógeno a través de procesos naturales y la fijación antropogénica a través de la reacción de Haber para producir fertilizantes.

También la combustión de combustibles fósiles libera actualmente alrededor de $20 \cdot 10^{12}$ g N/año⁻¹ en forma de N₂O. La concentración de N₂O en la atmósfera se incrementó desde la época preindustrial con valores de 273 ppbv a 310 ppbv en año 2000. Estos óxidos de nitrógeno forman parte de la lluvia ácida que es causante de la deforestación en partes de Europa y en el noreste de Estados Unidos. El incremento de nitrógeno atmosférico también produce cambios en las especies dominantes y por tanto en el equilibrio del ecosistema en algunos bosques y prados. Además el incremento de óxido nítrico causa enfermedades respiratorias como el asma en niños y adultos.

Algunos fertilizantes de nitrógeno aplicados en agricultura son arrastrados por el agua de lluvia o acumulados en el agua del suelo y acuíferos subterráneos. El agua del suelo que se usa como fuente de agua potable puede provocar cáncer en humanos si contiene concentraciones excesivas de nitrógeno. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ha establecido un estándar de nitrógeno para agua potable de 10 mg L^{-1} . En aguas que no han sido alteradas por la actividad humana, la concentración no supera 1 mg L^{-1} . El exceso de nitrógeno arrastrado por las aguas llegará a la costa a través de los ríos contaminados, generando un enriquecimiento costero en nitrógeno conocido como eutrofización, produciendo una pérdida de calidad del agua, con proliferaciones algales que pueden dar lugar a, entre otros efectos negativos, eventos de muerte de peces cerca de la costa y cambios de la distribución de especies en el ecosistema costero afectado. De hecho, el transporte atmosférico del nitrógeno emitido a la atmósfera por la actividad humana ha llevado a que la deposición de nitrógeno al océano se duplique, posiblemente provocando un aumento de la producción primaria en el océano. El impacto de la actividad humana sobre el ciclo del nitrógeno queda también reflejado en el hecho de que tanto la exportación de nitrógeno de cuencas hidrológicas como la concentración de

nitrógeno reactivo en aguas de los ríos más importantes del planeta aumentan con la densidad de población en sus cuencas.

Las perturbaciones observadas en el ciclo global de nitrógeno tienen importantes implicaciones en el potencial incremento del efecto invernadero y sus consecuencias medioambientales, y han sido producidas básicamente por dos procesos antropogénicos: el incremento de la producción de fertilizantes y el uso de combustibles fósiles.

Ciclo del azufre

Dejando a un lado la resuspensión de sal marina, unos dos tercios del azufre que llega a la atmósfera, alrededor de $90 \cdot 10^{12} \text{ g S/año}^{-1}$ son emitidos por actividades humanas, sobre todo por la combustión de carbón y petróleo y por

la metalurgia. En áreas industrializadas, las emisiones antropogénicas pueden llegar a representar el 90% de las emisiones totales. La mayor parte de estas emisiones son en forma del gas dióxido de azufre (SO_2). Una parte de este SO_2 se deposita localmente de nuevo en la superficie, pero en su mayoría es oxidado en la atmósfera a ácido sulfúrico y sulfato, ambos higroscópicos, que son los principales causantes de la acidez de los aerosoles contaminados y del fenómeno de la lluvia ácida cerca y a sotavento de los grandes focos de emisión. A pesar de tener una vida media bastante corta en la atmósfera (del orden de pocos días), parte del azufre es transportado en forma de aerosol lejos de las regiones de emisión, como demuestra su detección en los hielos de Groenlandia (figura 5.9.).

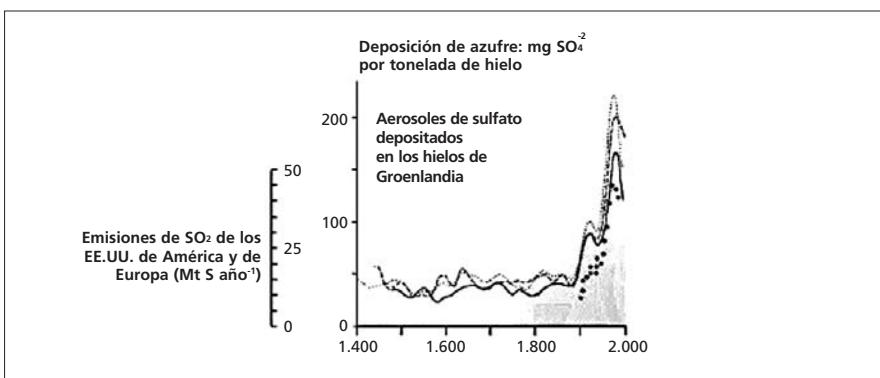


Figura 5.9. Aerosoles de sulfato depositados en los hielos de Groenlandia en los últimos seis siglos, en comparación con las emisiones de SO_2 en Europa y Estados Unidos durante el siglo XX.

Fuente: IPCC 2001.

Como fuentes de aerosol y de núcleos de condensación de agua en las nubes, las emisiones humanas de azufre a la atmósfera tienen importantes implicaciones en la química de la atmósfera, en el balance radiación y, consecuentemente, en el clima. En los países desarrollados existe una reciente pero clara tendencia a la reducción de la emisión relativa de azufre por unidad de energía generada, gracias a la utilización de combustibles menos ricos en azufre y de filtros de captura de gases azufrados. Ello persigue mejorar la calidad del aire respirado y reducir la lluvia ácida. Al mismo tiempo, sin embargo, se altera la cantidad de azufre reactivo en la atmósfera, con posibles efectos climáticos difíciles de prever y cuantificar. Esto se comentará de forma más detallada en el apartado “aerosoles” de la sección 5.4.

Las actividades humanas también afectan al transporte de azufre por los ríos. Se calcula que al menos un 28% del contenido en sulfato de los ríos se deriva de la contaminación industrial y minera, la erosión y otras actividades humanas. Alrededor de $130 \cdot 10^{12}$ g S año $^{-1}$ son transportados actualmente por los ríos, lo que supone aproximadamente el doble que en la época preindustrial.

En España, las emisiones de azufre a la atmósfera se concentran mayoritariamente en Galicia y Aragón, al estar situadas en estas comunidades importantes instalaciones productoras de electricidad que usan combustibles de

baja calidad. En los últimos años se están consiguiendo importantes reducciones en la emisión de azufre (de 1980 a 1990 ha disminuido en un 33%) como consecuencia de la sustitución de carbones españoles (ricos en azufre) por combustibles de importación, más limpios. De todas formas, el SO₂ de combustión sigue siendo el contaminante primario emitido en mayor cantidad después del monóxido de carbono (CO).

5.3. Emisiones de materiales a la atmósfera

La atmósfera, y especialmente la troposfera, es la parte de la biosfera más dinámica, con una renovación constante de los materiales presentes a niveles traza. Por lo tanto la atmósfera es altamente sensible a los procesos biogeoquímicos de la biosfera y especialmente a las perturbaciones antropogénicas. No en vano, las primeras evidencias experimentales de los cambios de composición de la biosfera durante el Antropoceno vinieron de medidas del contenido de CO₂ y ozono en series temporales en la baja atmósfera. El carácter dinámico de la atmósfera en la biosfera también es evidente si se consideran los procesos atmosféricos relevantes para los ciclos biogeoquímicos. La atmósfera es el gran reactor químico del sistema Tierra, especialmente por la potente capacidad oxidativa que tienen el

ozono y los radicales hidroxilo (OH) (Seinfeld y Pandis 1998). Esta capacidad oxidativa está además muy influenciada por las emisiones a la atmósfera de compuestos orgánicos biogénicos y antropogénicos que han modificado, por ejemplo, la concentración troposférica de radical OH y de ozono. El transporte atmosférico de materiales es muy eficiente y los tiempos de mezcla a escala hemisférica son de solamente dos semanas. Esto implica que las emisiones regionales de una sustancia o grupo de sustancias, si éstas tienen vidas medias atmosféricas de unos días, pueden ser transportadas a larga distancia, llegando a otras regiones planetarias. Estos fenómenos de redistribución de sustancias antropogénicas han sido extensamente validados al identificar, por ejemplo, contaminantes orgánicos provenientes de la actividad urbana e/o industrial en zonas de montaña remotas, o incluso en zonas antárticas o árticas.

Por lo tanto, la atmósfera juega un papel muy importante en los procesos de cambio global, ya que actividades y actuaciones locales o regionales tienen implicaciones a escala global, y al contrario, una determinada región recibe un impacto como consecuencia de actividades y políticas realizadas en otras partes del planeta. Finalmente, la atmósfera es el vector común de todo el sistema Tierra. Por lo tanto las emisiones de materiales a la atmósfera, sean estas primarias (directamente de actividades

antropogénicas) o secundarias (emisiones ambientales o difusas pero inducidas por perturbaciones antropogénicas o por la propia dinámica de los ciclos biogeoquímicos), son importantes para entender los procesos de cambio global en el Antropoceno.

De entre las emisiones de materia a la atmósfera destacan aquellas que provienen del uso de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas). A parte de las emisiones de CO₂, y debido a la baja eficiencia de los procesos de combustión, se emiten grandes cantidades de monóxido de carbono y compuestos orgánicos (carbono reducido) volátiles y semi-volátiles (Seinfeld and Pandis, 1998). Estos compuestos serán en parte oxidados a la atmósfera pero una fracción significativa terminará depositándose a los ecosistemas marinos y continentales (Jurado *et al.*, 2005) con un impacto ambiental sustancial. Además de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos, el uso de combustibles fósiles implica la emisión de cantidades ingentes de azufre y nitrógeno, que también representan una perturbación de los ciclos biogeoquímicos. Incluso si la reglamentación de emisiones de nitrógeno se cumple de aquí al 2030, la deposición de este nutriente fundamental para los ecosistemas puede generar problemas de eutrofización en muchas regiones. Las emisiones de azufre antropogénico, por ejemplo, ya superan las biogénicas, con unas implicaciones

desconocidas en la formación de los núcleos de condensación atmosféricos y la regulación del albedo terrestre. Las emisiones de hollín han aumentado en un factor de diez durante el Antropoceno y tienen también un efecto significativo en el balance radiativo del sistema Tierra (IPCC, 2001). El uso de combustibles fósiles también ha conllevado un incremento, por un factor de 10, en las emisiones de plomo y otros metales y compuestos orgánicos.

De todas maneras, las emisiones a la atmósfera y los cambios que ha sufrido la composición de la atmósfera no se deben, ni mucho menos, solamente al uso de combustibles fósiles. Hay muchas otras actividades, que incluyen el distinto uso de la tierra, la aplicación de fertilizantes en agricultura, la cría de ganado y otras actividades que ha incrementado las emisiones de N, afectado el ciclo del carbono, emitido gases con efecto invernadero, como el metano, e introducido compuestos sintéticos utilizados como herbicidas y plaguicidas (Schwarzenbach *et al.*, 2003). Evidentemente, infinidad de actividades industriales y urbanas diversas han conllevado la introducción de grandes cantidades de compuestos antropogénicos a la atmósfera. De hecho, la civilización humana usa en la actualidad más de 100.000 productos sintéticos (Schwarzenbach *et al.*, 2003), que no estaban presentes en la biosfera

antes del Antropoceno, y han usado muchos más, algunos de ellos muy persistentes, durante el siglo XX. Durante lustros, ha habido un control y legislación más bien laxos con respecto al impacto potencial de estas sustancias. Se desconoce el número, e incluso la composición de muchas de las sustancias que se han introducido en los diversos ecosistemas, pero hasta la actualidad se han identificado en la atmósfera más de un millar de compuestos sintéticos que no estarían en la atmósfera si no fuera por la actividad humana, y por lo tanto atestiguan cambios ambientales propios del Antropoceno. Algunas de estas sustancias, una vez en la atmósfera pueden contribuir al efecto invernadero. Se desconoce el número de sustancias antropogénicas que han llegado a la atmósfera, y a la biosfera en general, y el esfuerzo de investigación de estas sustancias está limitada, no solamente por los recursos que se les destina, sino también por las tecnologías analíticas disponibles. (Muir y Howard, 2006).

5.4. Nubes, hielo, aerosoles y albedo

El albedo

El albedo de un planeta es uno de los motores de su clima, puesto que determina cuánta de la radiación solar

recibida es reflejada de nuevo hacia al espacio y cuánta es absorbida y disipada en forma de calor. En el caso de la Tierra, el albedo planetario depende del color y características de las superficies terrestre y marina, de la cobertura de nubes y de la concentración de aerosoles. La superficie oscura del océano abierto, lo mismo que una superficie terrestre cubierta de vegetación espesa, tienen albedos del orden del 10% (es decir, reflejan tan sólo un 10% de la radiación solar que reciben), mientras que las superficies heladas o nevadas, y la nubes, tienen albedos de entre el 20 y el 80%.

Las nubes

Una Tierra sin nubes tendría un albedo medio global del 15%, la mitad del 30% que tiene por efecto de las nubes (figura 5.10.).

Ello supone que las nubes actúan como un parasol muy efectivo. Es cierto que las nubes también retienen calor que emana de la Tierra; es bien sabido que las noches despejadas suelen ser las más frías. Pero, en conjunto, domina el efecto parasol y las nubes ejercen un efecto enfriante estimado en unos -20 W m^{-2} en presencia de nubes en relación a cielos despejados. Los modelos climáticos prevén una mayor evaporación del agua de océano en condiciones de calentamiento global. Ello conllevaría un aumento de la cobertura de nubes y un probable

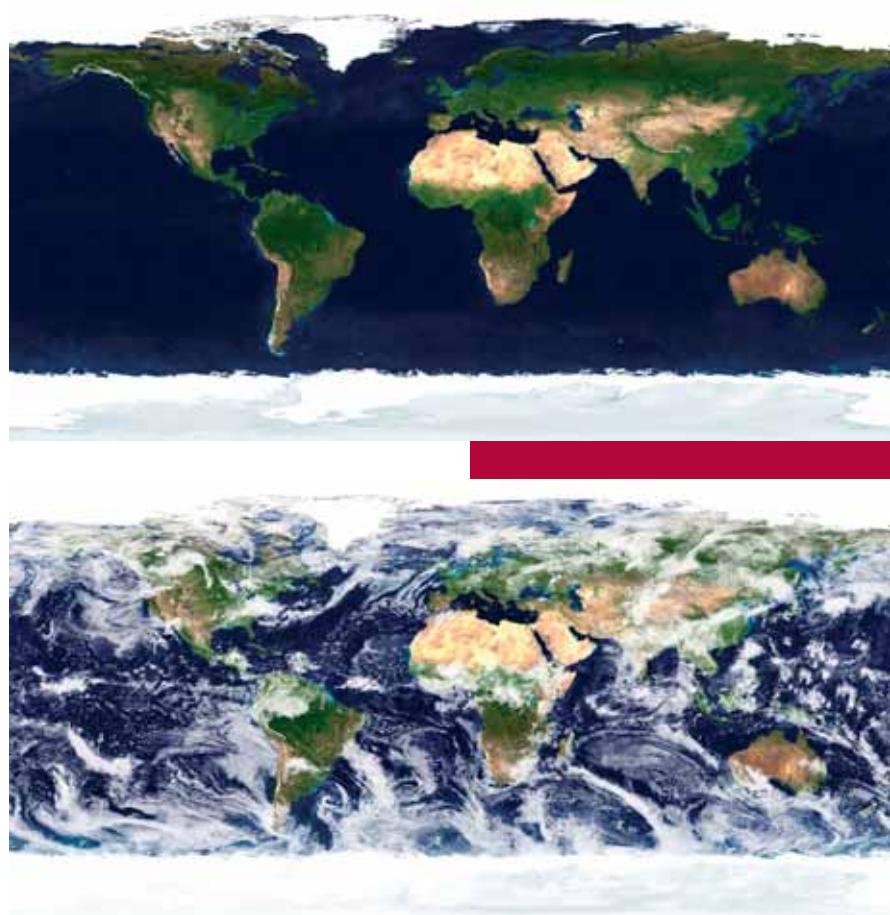


Figura 5.10. Imagen compuesta de fotografías de radiación visible tomadas con el sensor MODIS del satélite TERRA (NASA). Arriba, las nubes han sido eliminadas mediante manipulación de la imagen. Nótese el efecto de las nubes y del hielo sobre el albedo del planeta, particularmente sobre la superficie oscura de los océanos.

hielo) y su altitud en la atmósfera, lo cual es difícil de modelizar con rigor y fiabilidad.

Los hielos

En el caso de los hielos, su efecto enfriante es doble. Por una parte, como ya se ha comentado, la presencia de hielo o nieve aumenta muchísimo el albedo del océano y continentes. Por otro lado, la cubierta de hielo reduce el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera, y la evaporación. Una mayor extensión de los hielos polares supone una menor retención energética, y condiciones más favorables para la expansión del hielo y viceversa. Se cree que esta retroacción positiva explica en parte las velocidades de transición entre períodos glaciales e interglaciales que ha venido experimentando la Tierra. Reducciones y redistribuciones de insolación por causas orbitales habrían supuesto la expansión del océano helado y el aumento de la radiación reflejada, con el consiguiente enfriamiento adicional. El efecto opuesto aceleraría las terminaciones de las épocas glaciales. En lo que respecta al cambio global actual tanto las observaciones como los modelos de predicción alertan sobre una reducción de la extensión del océano helado en los polos como consecuencia del calentamiento. Este fenómeno es especialmente acusado en el Ártico, donde el grosor de la banquisa ha disminuido en un 40% en los últimos años, y su área de extensión se ha

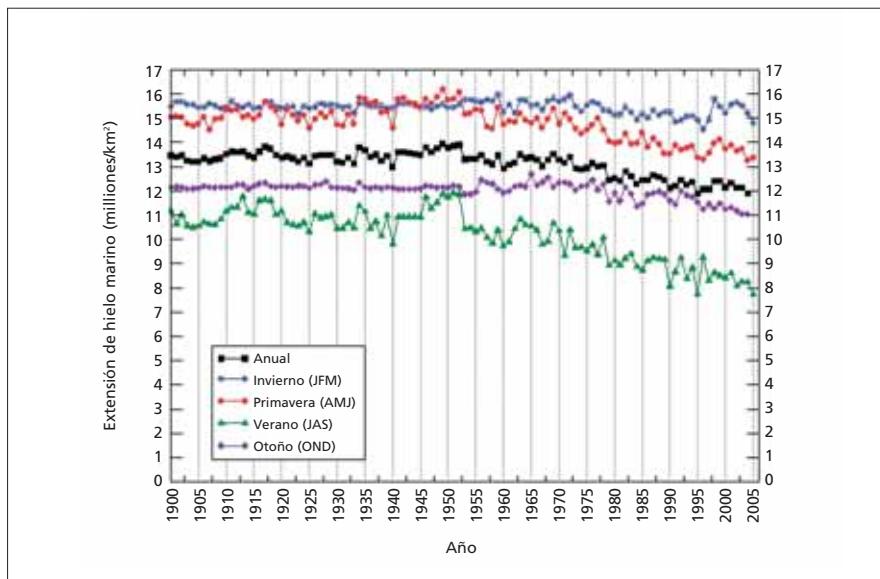


Figura 5.11. Extensión del hielo marino en distintas estaciones en el Hemisferio Norte.
Datos de la NOAA y W. Chapman, Universidad de Illinois.

reducido en más un 14%, con una disminución en la extensión estival del hielo en el Hemisferio Norte desde 11 a 8 millones de km² (figura 5.11.). De hecho, la reducción de la extensión de hielo en el Ártico parece acelerarse en los últimos años, lo que puede deberse a efectos sinérgicos entre la reducción de la cubierta de hielo y el más rápido calentamiento del océano Ártico. Además de ejercer una retroacción positiva sobre el clima, la paulatina desaparición de la banquisa de hielo en el Ártico central tendría un enorme impacto socioeconómico, tanto para las

comunidades autóctonas, cuya forma de vivir está basada en el hielo, como para el conjunto de las sociedades de los países colindantes, puesto que supondría la apertura de rutas marítimas mucho más directas.

Los aerosoles

Definimos "aerosoles" como pequeñas partículas suspendidas en el aire. Representan un componente más de la atmósfera, componente que, según su composición y tamaño, interviene en procesos tan importantes como la formación de nubes, la absorción

y dispersión de radiación solar, o el transporte y deposición de elementos nutrientes y contaminantes. A pesar de que existen múltiples fuentes naturales de aerosoles, como la suspensión de sal marina y polvo por el viento, las erupciones volcánicas o la oxidación de compuestos volátiles liberados por las masas vegetales, la actividad humana ha aumentado enormemente las emisiones y concentración de partículas en la atmósfera. El uso masivo de combustibles fósiles en regiones industrializadas y urbanas conlleva la emisión de grandes cantidades de partículas de combustión (hollín) y de óxidos de azufre que serán oxidados a partículas de sulfato. La quema de biomasa con finalidades agrícolas o de deforestación en regiones tropicales también supone la emisión de grandes cantidades de hollín. También la explotación de canteras y minas, y la exposición y movilización de suelo árido con fines urbanísticos o de grandes infraestructuras, suponen un aumento de las fuentes de polvo.

El impacto de los aerosoles en el clima es de naturaleza doble (Penner *et al.*, 2001). Por un lado, ejercen un efecto directo sobre la radiación solar. En función principalmente de su contenido en hollín (carbono negro), un aerosol puede absorber o dispersar la radiación. Contenidos elevados de hollín (bajo albedo) hacen que la partícula absorba radiación y contribuya a calentar la

atmósfera. Bajos niveles de hollín (alto albedo) hacen que la partícula disperse la radiación y una parte sea devuelta al espacio, con su consiguiente efecto refrigerante. En conjunto, el efecto directo actual de los aerosoles presentes en la atmósfera se estima como refrigerante y de una magnitud aproximada de -0.6 W m^{-2} . Existe otro efecto, el indirecto, por el cual los aerosoles intervienen en la formación de las nubes e influyen en su albedo (a más aerosoles, mayor es el número de gotas pequeñas de una nube y mayor su albedo) y en su tiempo de vida (a más aerosoles, más tardan las gotas en crecer lo suficiente como para precipitar en forma de lluvia). Este efecto indirecto, también refrigerante, es muy difícil de cuantificar, pero se estima en un mínimo de -1.5 W m^{-2} .

En conjunto, los aerosoles ejercen un forzamiento sobre el balance de radiación, y por lo tanto sobre el clima, cercano en magnitud pero de signo opuesto al que ejerce el aumento de gases de efecto invernadero desde la Revolución Industrial. De hecho, en el planteamiento de políticas de mitigación del cambio global, los aerosoles constituyen una paradoja. Si se apuesta por energías renovables y tecnologías de combustión limpias, con el objeto de reducir las emisiones de CO₂ y de contaminantes, la consiguiente reducción de aerosoles en la atmósfera puede conllevar un efecto de calentamiento de magnitud parecida al que se pretende paliar.



Investigadores del CSIC desarrollando el primer experimento de mesocosmos en aguas antárticas.

Fotografía: Susana Agustí.

5.5. Nuevas sustancias en la biosfera

A parte de la modificación de la abundancia de metales, nutrientes y compuestos orgánicos que ya estaban presentes en la biosfera antes del Antropoceno, las actividades humanas han introducido millares de nuevos compuestos, la mayoría orgánicos en el medio ambiente (Schwarzenbach *et al.*, 2003). Hay múltiples ejemplos, algunos paradigmáticos. Entre los compuestos orgánicos que se han usado para el control de insectos destaca el DDT, muy usado, incluso hoy en día para el control de malaria (control de los mosquitos). Los bifenilos policlorados (PCBs) se usaron durante más de cincuenta años en centenares de aplicaciones entre las que destacan su uso como fluido dieléctrico en transformadores eléctricos. Actualmente los PCBs se encuentran distribuidos en absolutamente toda la biosfera, desde los ecosistemas polares a la sangre de cualquier humano. Posteriormente, estos compuestos se han sustituido por otros con propiedades y problemáticas parecidas (naftalenos clorados). Durante el último tercio del siglo veinte, el uso doméstico y sobretodo industrial de detergentes aniónicos (nonilfenoles polietoxilados), hizo incrementar la concentración de nonilfenoles, que tiene propiedades estrogénicas, en los ecosistemas acuáticos de los países occidentales, también España. Posteriormente éstos se volatilizan

y pueden afectar ecosistemas remotos como los ecosistemas marinos. Actualmente, el uso de retardantes de llama en una diversa gama de productos de consumo (ordenadores, sillas, etc., introduce en la atmósfera y toda la biosfera éteres de bifenilo polibromados, compuestos altamente bioacumulables y persistentes. Todas estas sustancias, una vez entran en la biosfera se redistribuyen en todos los medios (atmosférico, acuoso, vegetal...) mediante los procesos esquematizados en la figura 5.12., y por lo tanto con un potencial nocivo para ecosistemas muy diversos. Se podrían poner centenares de ejemplos más en donde una cierta actividad que se considera normal en las sociedades contemporáneas conlleva la emisión de sustancias nocivas para el medio ambiente y para los humanos (Schwarzenbach *et al.*, 2003). Incluso, el uso de productos farmacéuticos, que naturalmente es del todo necesario y pertinente y tiene la finalidad de sanar, conlleva también un impacto ambiental ya que éstos, por ejemplo, se pueden encontrar en concentraciones no despreciables en ríos y otros ecosistemas, tal como ya pasa en nuestro país.

Parte del problema ha sido que durante muchas décadas no había una legislación adecuada que regulara el uso de compuestos sintéticos teniendo en cuenta su impacto ambiental. También es cierto que esto está actualmente mejor regulado con las nuevas directivas comunitarias,

aunque, debido al carácter de la economía global, y a que sustancias emitidas en otras regiones planetarias pueden transportarse atmosféricamente, estas directivas no impiden el impacto de sustancias que se depositan por vía atmosférica. En todo caso, aquí también hay unas limitaciones operativas debido a las técnicas analíticas disponibles, ya que es imposible hacer un inventario de todas las sustancias sintéticas que se encuentran en el medio ambiente que deben ser millares, sino más.

De hecho, existe un tratado internacional, similar al tratado de Kioto para las emisiones de CO₂, que es el tratado de Estocolmo para los POPs (siglas de “persistent organic pollutants”) que regula la producción y las emisiones de doce familias de contaminantes orgánicos que son persistentes en el medio ambiente, bioacumulan en los organismos y que por sus propiedades físico-químicas pueden transportarse a larga distancia en el medio ambiente. Además, la Unión Europea regula el uso de muchas más. A pesar de esto, hay aún docenas de familias de contaminantes orgánicos que no se regulan eficientemente, e incluso la legislación vigente no se cumple en todos los casos. Los riesgos para la salud humana son múltiples incluyendo, entre otros, alergias, enfermedades respiratorias, desórdenes reproductivos, cáncer. Estos contaminantes implican riesgos sanitarios importantes igualmente para los organismos salvajes, impactando de forma importante sobre los ecosistemas,

particularmente en los organismos apicales de las cadenas tróficas, en los que se bioacumulan los contaminantes. Así, los cetáceos y atunes muestran altos niveles de contaminantes, y los esquimales, un pueblo eminentemente cazador, se encuentran entre los pueblos con niveles más altos de contaminantes en el planeta (Kuhnlein y Chan, 2000).

Efectivamente, los humanos estamos continuamente expuestos a miles de sustancias químicas orgánicas, muchas de las cuales aún no han recibido la debida atención por la comunidad científica, y la legislación siempre va 10-15 años por detrás con respecto a los resultados científicos. No quiere decir que todas las sustancias que llegan al medio ambiente sean nocivas, algunas no lo son, pero en muchos casos se introducen nuevas sustancias al medio ambiente sin que se conozcan sus efectos. En todo caso, la emisión de nuevas sustancias al medio ambiente no es una cuestión que pueda resolverse completamente, sino que solamente se puede llegar a controlar de manera que ésta no sea demasiado grande y se mantenga en unos límites aceptables. El problema actual es que es muy difícil saber el número de sustancias nuevas que se han introducido en el medio ambiente y la estructura de muchas de ellas. El vacío normativo que ha permitido liberar miles de sustancias sintéticas al ambiente sin conocer sus efectos sobre la salud humana y ambiental está siendo afrontado por la nueva directiva, pionera en el mundo,



sobre registro, evaluación y autorización de sustancias químicas de la UE (normativa REACH, ver ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach_intro.htm) que entrará en vigor el próximo 1 de junio.

Figura 5.12. Ciclo y compartimentación de los contaminantes orgánicos en el medio ambiente.
Fuente: Jordi Dachs.

5.6. Desertificación, cambios en el uso del suelo

La desertificación se define como el proceso de degradación del suelo que afecta a zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas causadas, entre otros, por cambios climáticos y antrópicos. Este proceso acarrea la reducción del potencial productivo de los recursos superficiales y subsuperficiales y, por tanto, la disminución de la capacidad de mantener la población de forma sostenible. Conviene resaltar que el origen de los

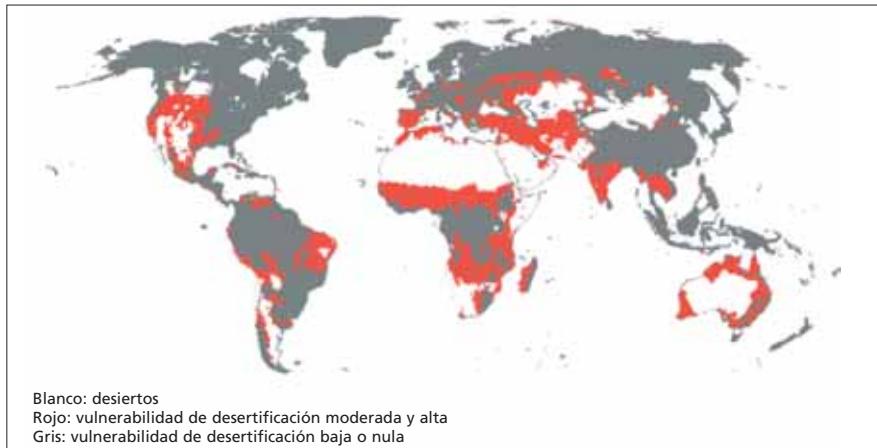


Figura 5.13. Situación de las regiones más vulnerables a la desertificación (en rojo)

Fuente: USDA-NRCS Soil Survey Division, www.earthaction.org/engl/resourcesDV.html, 08/06/2006.

procesos de desertificación está siempre ligado a la acción intencionada del ser humano. La vulnerabilidad a la desertificación depende del clima, el relieve, las condiciones de los suelos y la vegetación, así como de la gestión de los recursos naturales. Entre las malas prácticas de la gestión ambiental se encuentran la deforestación, el deficiente manejo agrícola y el sobrepastoreo. Estas actividades humanas pueden producir el deterioro del suelo (erosión física, degradación física, salinización, etc.) y/o la destrucción de la cubierta vegetal. Evidentemente, la desertificación sólo resulta posible en regiones sensibles donde existe un determinado grado de aridez climática, como es el caso de las regiones con clima mediterráneo.

La desertificación: un problema presente y futuro

La desertificación ha sido una preocupación medioambiental constante de los organismos internacionales desde hace décadas. Sin duda, el punto de inflexión se produce en 1977 con la celebración en Nairobi (Kenia) de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la desertificación. Estas iniciativas internacionales continuaron con la firma del Acta del Convenio de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD), aprobada en París en 1994, donde se asume la gravedad del problema y sus efectos ambientales y socioeconómicos, a la vez que se insta a los países firmantes a realizar un diagnóstico del problema y a desarrollar y aplicar las medidas necesarias para

combatir dicho fenómeno. Durante la Cumbre del Milenio, celebrada en Nueva York en el año 2000, los 189 estados miembros de Naciones Unidas adoptaron la Declaración del Milenio cuyos objetivos incluyen la sostenibilidad medioambiental y la lucha contra la desertificación. En este documento se establecen una serie de metas cuyo cumplimiento se puede medir través de indicadores concretos que deberán ser alcanzados en el año 2015. Como primer paso, la Asamblea General de Naciones Unidas declaró el 2006 “Año Internacional de los Desiertos y de la Desertificación” (AIDD), como instrumento para erradicar la pobreza en las áreas rurales de las zonas áridas y de abordar los problemas medioambientales y socioeconómicos existentes en las zonas desérticas o en proceso de desertificación.

En España, las actuaciones y programas oficiales en relación con la desertificación se remontan a 1981 con el desarrollo del proyecto de “Lucha contra la desertificación en el Mediterráneo” (LUCDEME), realizado por el ICONA (Instituto Nacional de Conservación de la Naturaleza) y que en la actualidad sigue vigente a través de la Dirección General para la Biodiversidad (DGB) del Ministerio de Medio Ambiente. Desde su inicio, el proyecto LUCDEME ha generado más de 240 trabajos en forma de estudios, evaluaciones, mapas temáticos, investigaciones, formulaciones y aplicaciones técnicas acerca del proceso

Riesgo de desertificación	Nº de subcuencas	Superficie (km ²)	Proporción
Muy alto	42	56.053	11,08%
Alto	74	103.284	20,41%
Medio	72	109.712	21,68%
Bajo	46	70.728	13,98%
Total Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas	234	339.776	67,14%
Zonas húmedas y subhúmedas húmedas	106	166.284	32,86%
Total Nacional	340	506.061	100,00%

Tabla 5.3. Superficie afectada por riesgo de desertificación en España.

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

de desertificación en zonas áridas y semiáridas de nuestro país.

La extensión de las regiones con problemas de desertificación ha sido objeto de diversos trabajos recientes, señalando en algunos de ellos las preocupantes previsiones a corto y medio plazo (horizontes del 2050 y 2075) bajo distintos escenarios climáticos y socioeconómicos. La mayor parte de la zonas que se señalan como de riesgo de desertificación grave se localizan en torno a las actuales zonas desérticas (figura 5.13.), afectando a la tercera parte de la superficie terrestre y a las dos terceras partes de los países del mundo, habitados por más de 1.000 millones de personas (una sexta parte de la población).

El 70% de los 5.200 millones de hectáreas de tierras secas que se utilizan con fines agrícolas en todo el mundo ya está degradado (Lean, 1995). Se estima que en 2025 las tierras cultivables disminuirán en dos tercios en África, un tercio en Asia y en una quinta parte en

América del Sur. Asia posee la mayor superficie de tierras afectadas por desertificación, y el 71% de ellas están entre moderada y gravemente degradadas. En América Latina la proporción es del 75%. África, donde dos tercios de la superficie son tierras desérticas o secas,

es el continente que se enfrenta a la mayor amenaza de desertificación dado que el 73% de las tierras secas agrícolas están entre moderada y gravemente degradadas (Lean, 1995). Esta desertificación conlleva la disminución de la capacidad de mantener la población de forma sostenible, lo que podría ocasionar importantes movimientos migratorios de trasfondo ambiental.

Por su parte, España es el país más árido de Europa, con un 67% del territorio potencialmente amenazado por la desertificación, especialmente la vertiente mediterránea, Valle del Ebro y la cuenca del Guadalquivir (tabla 5.3., figura 5.14., Programa de Acción Nacional contra la Desertificación, PAND, del Ministerio de Medio Ambiente). En estas regiones

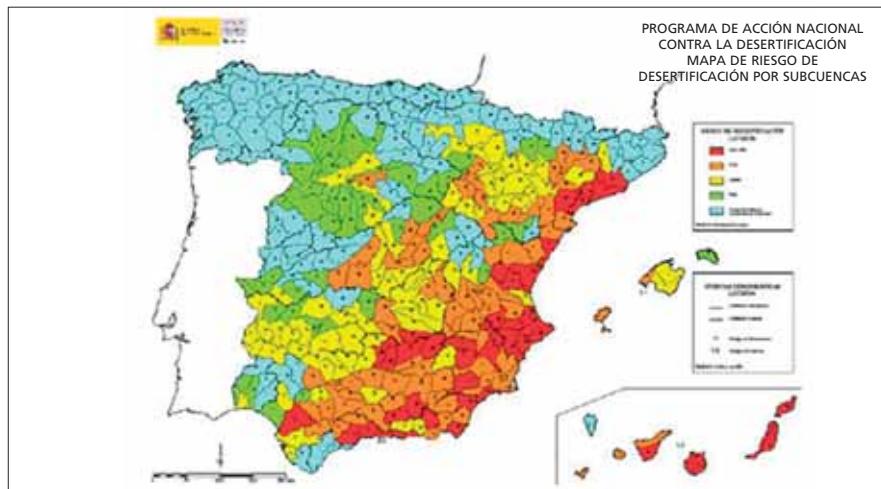


Figura 5.14. Mapa de riesgo de desertificación por cuencas hidrológicas (riesgo creciente del azul al rojo).

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

existen igualmente otros problemas que favorecen la aridificación como la salinización del suelo y del agua, incendios forestales, y la sobre-expLOTación de los recursos naturales. En 1991, los costes económicos directos relacionados con la erosión del suelo ascendían a 280 millones de euros y los costes de las medidas de regeneración exigían un desembolso de unos 3.000 millones de euros en un periodo de 15-20 años. Las últimas inversiones anunciadas por el Ministerio de Medio Ambiente durante 2005 en materia de lucha contra la desertificación superaban los 8.000 millones de euros, afectando a Murcia, Andalucía, Extremadura, Cataluña, Aragón y Comunidad Valenciana.

Desertificación y aridificación en el clima

Se ha puesto de manifiesto que la desertificación aparece exclusivamente relacionada con la acción del ser humano. Por tanto, la desertificación puede afectar a cualquier ecosistema sensible, independientemente de su localización. Esta sensibilidad del territorio aparece estrechamente ligada a las condiciones climáticas, especialmente aquellas con tendencia a la aridificación, en las que se producen situaciones episódicas, periódicas o permanentes de carencia de agua. Los climas áridos, semiáridos y subhúmedos secos, donde existe una alta variabilidad interanual y estacional de la precipitación, presentan condiciones climáticas sensibles

que contribuyen a agravar y a acelerar los procesos ligados a la desertificación. En estas zonas, los periodos prolongados de sequía, o la irregularidad de las precipitaciones en forma de tormentas de elevada intensidad, aceleran los procesos locales o regionales que conducen a la desertificación. Por tanto, podemos afirmar que la explotación excesiva del territorio por parte de ser humano, en ecosistemas áridos y semiáridos, puede acarrear la desertificación del mismo.

En la definición de desertificación, tomada de la *Agenda 21*, se menciona la variabilidad climática como factor que incide como causa directa en el proceso de degradación del paisaje. De esta manera, se establece una relación implícita entre cambio climático y la posible extensión de las áreas con problemas de desertificación. En primer lugar, el cambio climático puede producir la expansión o contracción de las áreas con climas semiáridos y subhúmedos, alterando la extensión de las regiones sensibles a la desertificación. Por otro lado, el cambio climático afecta a la frecuencia y severidad de las sequías capaces de causar la aridificación del territorio que, aunque no necesariamente, pueden contribuir o acelerar los procesos de desertificación. En cualquier caso, el cambio climático, aun no siendo causante de la desertificación, puede agravar una situación derivada de la gestión no sostenible del territorio.

Desertificación en el contexto de cambio climático

Las previsiones de calentamiento global del planeta apuntan al aumento de la frecuencia de años secos y precipitaciones de alta intensidad en numerosas partes del mundo. En las zonas mediterráneas, los cambios en el clima pueden modificar los patrones de magnitud y frecuencia de estos eventos extremos (sequías, inundaciones, tormentas) aumentando la vulnerabilidad a la desertificación del territorio. De hecho, en el informe Acacia (escenario HADCM2) se señala que el principal riesgo en los países del sur de Europa se deriva de las crecidas relámpago debidas a lluvias torrenciales, así como de los riesgos asociados a las sequías. En este informe, se indica que para el 2020, los veranos anómalamente calurosos, como el producido en el 2003, ocurrirán con una frecuencia entre cuatro y cinco veces mayor que en la actualidad.

Las sequías suelen tener una amplia duración temporal (varios años), con efectos lentos sobre extensas regiones que ejercen un fuerte impacto en la agricultura. Las restricciones de agua y las escasas cosechas ocurridas al inicio de los años 90 ponen de manifiesto la vulnerabilidad de la región mediterránea, produciéndose pérdidas en la agricultura del sur de España por unos 4.500 millones de euros y 20.000 empleos. Sin embargo, estas sequías constituyen parte del régimen hidroclimático mediterráneo, habiéndose producido períodos con

frecuentes sequías tanto durante el siglo XX, como en siglos precedentes. Los eventos de sequías más severas de los últimos 500 años comprenden a las décadas centrales del siglo XVI (1540-1570) y del siglo XVII (1625-1640), con menos severidad en 1750-1760 y finalmente entre 1810-1830 y 1880-1910 (Barriendos, 2002). El mayor avance de la desertificación se produce cuando el periodo de sequía se produce después de la puesta en actividad de nuevas zonas agrícolas y ganaderas. En estas condiciones de aridez se aceleran los procesos de erosión y degradación de los suelos desprotegidos, y por tanto, la desertificación del territorio.

Por su parte, las lluvias torrenciales, capaces de generar importantes inundaciones en el área mediterránea, presentan la energía suficiente para erosionar los niveles más fértiles del suelo, produciendo una disminución en el potencial del suelo como soporte de la vegetación. Estos eventos de precipitación intensa ocasionan que la erosión hídrica en climas semiáridos se produzca de forma episódica y en relación con estos eventos de lluvia extrema. Evidentemente, el mayor impacto de estas lluvias torrenciales se centra en aquellos suelos sin protección de la cubierta vegetal, o donde concurre algún grado de alteración previa en las propiedades físicas o químicas. En general, se puede establecer un valor mínimo de precipitación de entre 30

y 60 mm por día a partir del cual se desencadena la escorrentía superficial capaz de acarrear un elevado flujo de sedimentos (S. Bautista, citado en Vallejo *et al.*, 2005). Por ejemplo, en campos de barbecho la erosión de una lluvia de 60 mm por día puede producir tasas de erosión de hasta 300 toneladas por hectárea, principalmente en forma de regueros y cárcavas, cuando la erosión media anual en condiciones normales es del orden de 8 toneladas por hectárea (De Alba *et al.*, 1998). En el futuro, los datos existentes apuntan a que el calentamiento global puede generar un aumento en la irregularidad del régimen de lluvias y promover la generación de crecidas relámpago en las cuencas mediterráneas y del interior de la Península Ibérica (Benito *et al.*, 2005).

La perspectiva futura de la desertificación en las zonas vulnerables del mundo, y en España en particular, en relación con los impactos del cambio climático, resulta pesimista y motivo de preocupación, poniendo como causa la sostenibilidad del territorio en condiciones de aridificación del clima. A nivel global, las perspectivas y las problemáticas varían en función del desarrollo económico y tecnológico de los países. Así, en el sur de Europa, se espera que las zonas con matorral improductivo se expandan en el futuro, mientras que en el norte de África, la mayor parte de las áreas de pastoreo en matorral estepario darán paso al desierto antes de 2050. Paralelamente,

la presión demográfica sobre el territorio contribuye a desestabilizar estos sistemas vulnerables, al aumentar las actividades humanas que suponen riesgo de degradación en ambientes áridos y semiáridos, en particular, el sobrepastoreo, y los manejos agrícolas inapropiados (e.g. barbecho blanco en zonas marginales), los fuegos forestales, la salinización del suelo y del agua relacionada con la agricultura intensiva, y la reducción de la calidad del suelo en general.

Igualmente, la desertificación puede afectar a nivel global en el intercambio del carbono, modificando el albedo, reduciendo la biodiversidad, y aumentando la degradación y la erosión del suelo. La vegetación en las zonas áridas y semiáridas almacena una cantidad importante de carbono, superando las 30 toneladas por hectárea, que se reduce a medida que la vegetación desaparece. Por otro lado, los suelos de las zonas secas almacenan en términos de volumen total de carbono mundial una importante cantidad de carbono, cuya destrucción puede afectar al ciclo del carbono, incrementando el efecto invernadero.

5.7. Detección y observación de perturbaciones

La detección del cambio global y su impacto en los ecosistemas así como de las anomalías y las respuestas a las perturbaciones requiere, por un lado,

de observaciones locales finas y prolongadas en el tiempo, y conectadas entre sí mediante redes de sistemas de observación, y, por otro lado, de observaciones sinópticas de menor resolución pero de escala global.

Series temporales y redes de sistemas de observación

Las series temporales de observación suponen el núcleo central de la investigación sobre cambio global y cambio climático, pues permiten comprobar cambios en tendencias y variaciones con respecto a patrones estadísticamente representativos. Sin embargo, las observaciones sostenidas del sistema Tierra son relativamente cortas, ya que los primeros sistemas de observación basados en técnicas instrumentales, que eran sistemas metereológicos, se iniciaron a mediados del siglo XIX, y las primeras series de observación oceanográficas más sencillas se iniciaron algunas décadas más tarde. Las series de observación que tienen por objetivo la observación de organismos o ecosistemas son aún más recientes, arrancando, las más antiguas, a mediados del siglo pasado. Las grandes variaciones interanuales, sobre todo de tipo climático, no permiten detectar tendencias con validez estadística en series de observaciones de menos de diez años, y con frecuencia se requieren varias décadas para establecer con suficiente seguridad la dimensión del cambio

ambiental. Con esta premisa se estableció primero en 1980 en Estados Unidos de América y luego en diversos países del mundo una red de observaciones ecológicas a largo plazo (redes LTER, del inglés Long Term Ecological Research), las cuales buscan sintetizar y armonizar observaciones e investigaciones ecológicas de un amplio y diverso número de ecosistemas con el fin de predecir su evolución y mejorar nuestra capacidad de gestionarlos y conservarlos (ver enlaces www.lternet.edu para la red americana, y www.ilternet.edu para la red internacional). Esta estructura en red coordinada se está implantando en Europa (www.alter-net.info) y en España (www.redote.org). Los sistemas de observación cumplen dos funciones principales: mejorar nuestra comprensión de fenómenos y procesos ambientales complejos, y servir de sistemas de alerta temprana ante el cambio global, revelando con relativa rapidez y seguridad estadística la existencia de cambios abruptos o inusuales en la evolución temporal de los procesos naturales.

Con una visión similar a las redes LTER pero sin limitarse a sitios o localidades concretas, el Grupo de Observaciones de la Tierra (Group on Earth Observations, GEO, www.earthobservations.org), que reúne 66 países de la Naciones Unidas incluyendo España, promueve un ambicioso plan a diez años vista: la puesta en práctica de la observación

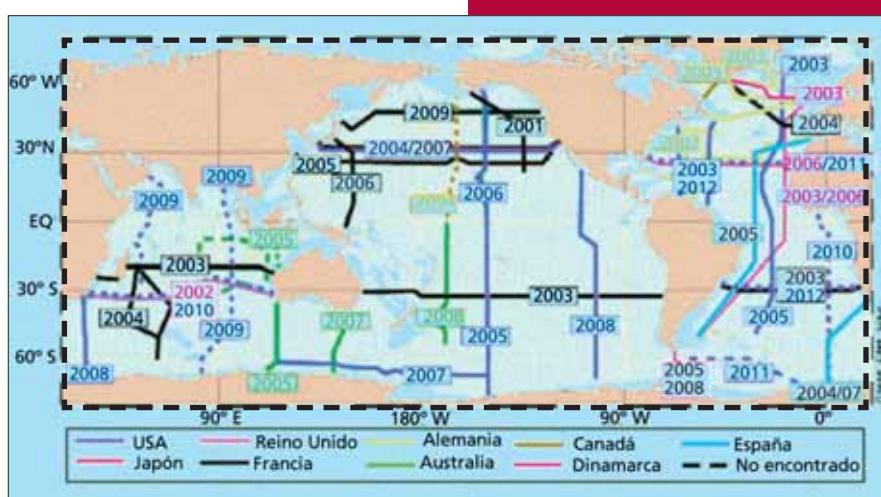
global de la Tierra mediante el establecimiento de un sistema de sistemas de observación que incluyen desde sensores remotos y teledetección hasta estudios ecosistémicos y socioeconómicos del planeta. Esta puesta a punto de un Sistema de Sistemas de Observaciones Globales Terrestres (Global Earth Observation System of Systems, GEOSS) implica el desarrollo de nueve áreas de trabajo entre las que se encuentran desglosadas no sólo la exploración del clima, el funcionamiento de los ecosistemas y la biodiversidad, sino aspectos directamente relacionados con la especie humana como son la salud, la energía, los recursos naturales y la agricultura. GEOSS está previsto que alcance plena operatividad a finales de esta década y supondrá una eficaz herramienta para integrar el conocimiento sobre cambio global y establecer recomendaciones precisas para atenuar sus efectos.

En lo que se refiere a datos climáticos, es de principal importancia el sistema de observación del clima global (GCOS, Global Climate Observing System) establecido en 1992 por acuerdo de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (IOC), el programa de Naciones Unidas para el Medioambiente (UNEP) y el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), para asegurar que toda la información relativa al clima de la Tierra se pudiera

poner a disposición de todos los interesados. Otros programas relacionados son el de observación del océano global (GOOS) y el del sistema terrestre global (GTOS). Una gran cantidad de información de éstos y otros programas relacionados con el cambio global se puede consultar en la página web del Centro de Información de Sistemas de Observación Global (<http://goscic.org>).

En el océano existen programas de ubicación de boyas que emiten, a través de satélites, datos sobre temperatura, salinidad, corrientes y otras propiedades relevantes para estimar el contenido de calor y circulación del océano. Además, con el fin de obtener en un futuro buenas estimaciones de la captación del CO₂ antropogénico, la comunidad científica internacional ha diseñado una serie de sistemas de muestreo que utilizan buques de oportunidad (buques de líneas comerciales en los que se instala un equipo de medida de CO₂), estaciones fijas, y secciones repetidas distribuidas por todos los océanos (figura 5.15.). Ésta es una iniciativa impulsada por el SCOR-IOC (Scientific Committee on Oceanic Research/Intergovernmental Oceanographic Commission) incluida en el International Ocean Carbon Coordination Programme (IOCCP; <http://ioc.unesco.org/ioccp/>).

Con la misma filosofía de trabajo coordinado bajo un objetivo común se está desarrollando el proyecto

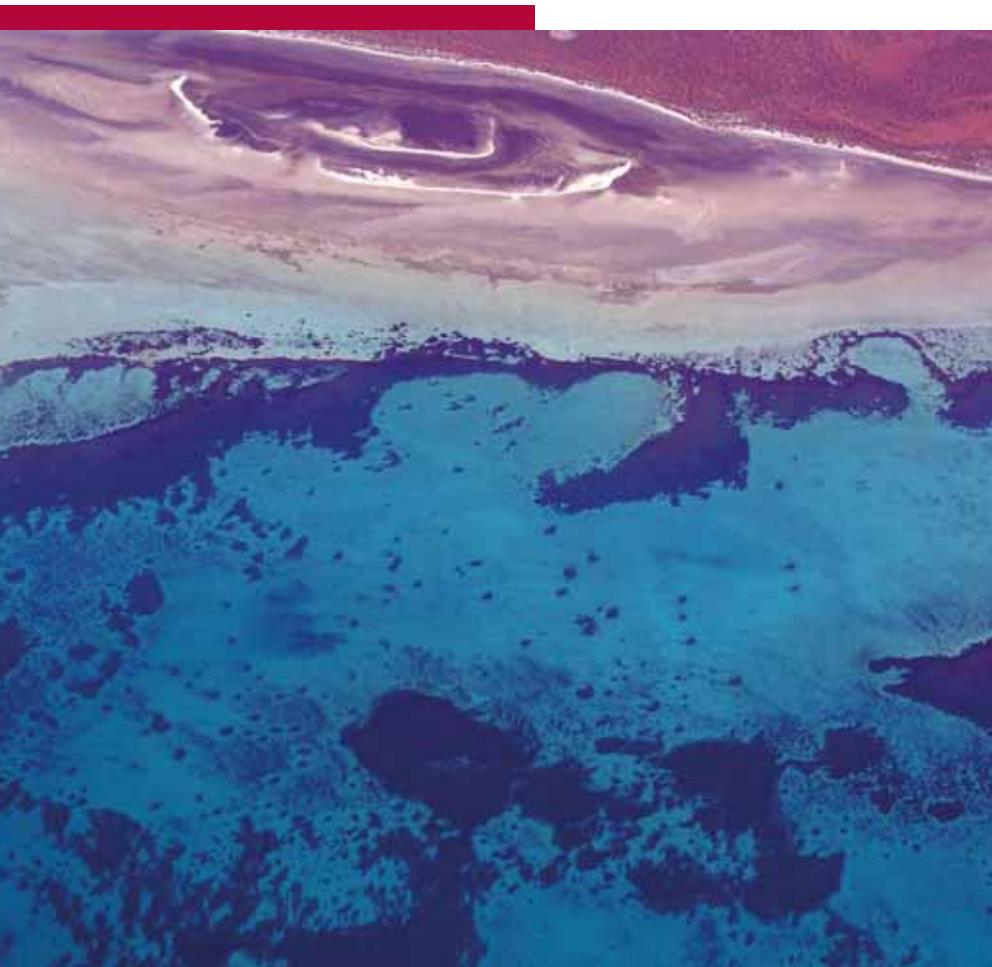


CARBOOCEAN del VI Programa Marco de la Unión Europea, en el que están involucrados 44 grupos de investigación, entre ellos varios españoles. El objetivo es evaluar con precisión las fuentes y sumideros del carbono marino en los océanos Atlántico y Circumpolar Antártico.

Observación desde el espacio

Sin lugar a dudas, la herramienta que ha dado un empuje definitivo a la ciencia y observación del cambio global es la teledetección desde satélites orbitales. Gracias a estos vehículos espaciales que portan espectroradiómetros, escáneres o sensores de microondas, ahora es posible obtener, en períodos de tiempo impensadamente cortos, registros globales cuasi-sinópticos de variables tan dispares como la temperatura y el nivel

Figura 5.15. Secciones hidrográficas repetidas compiladas en enero 2003 en la reunión del IOCCP celebrada en la sede de UNESCO, París.



Vista aérea de la línea de costa en Shark Bay (Australia Occidental).

Fotografía: Susana Agustí.

del mar, la velocidad del viento, la cobertura de hielo y nieve, de nubes y de partículas atmosféricas, la cantidad de radiación reflejada, la extensión y concentración de pigmentos fotosintéticos, e incluso la emisión de algunos gases a la atmósfera. Sólo de

esta forma podemos percibir las dinámicas interrelacionadas de la biosfera, las grandes corrientes marinas, los hielos polares y la atmósfera a escala planetaria, es decir, lo que se viene a llamar el estado del sistema Tierra. El primer satélite metereológico, el satélite estadounidense TIROS-1 se lanzó, como se ha indicado anteriormente, en 1960.

En la actualidad, varias agencias espaciales, en especial la de Estados Unidos, la europea y la japonesa, ponen a disposición de la comunidad científica buena parte de los datos de observación obtenidos por los satélites. A su vez, la comunidad científica ofrece a las agencias conocimiento para la mejora de los sensores de observación y para la conversión de las mediciones en datos de interés ambiental. Para hacerse una buena idea de la capacidad de observación que ofrecen los satélites, recomendamos las páginas web de la NASA <http://earthobservatory.nasa.gov> y de la Agencia Europea del Espacio, www.esa.int/esaEO/index.html. Todos estos sistemas de observación han generado una base para evaluar los cambios que se están dando en el funcionamiento del sistema Tierra en el Antropoceno y que representan un conjunto de huellas del cambio global (cuadro 5.1.), que conforman un conjunto de evidencias claras sobre el impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra.

Cuadro 5.2.

Algunas huellas de cambio global

En la composición atmosférica

- CO₂: 280 ppm (año 1750) - 368 ppm (2000)
- CH₄: 0.7 ppm (año 1750) - 1.75 ppm (2000)
- N₂O: 0.27 ppm (año 1750) - 0.32 ppm (2000)

En el clima

- Temperatura media global en superficie: aumento de $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ durante el siglo XX; el año 2005 ha sido el año con la temperatura global más cálida registrada hasta la fecha.
- Temperatura en el Hemisferio Norte: la década 1990-2000 fue la más cálida de todo el milenio. La media de los primeros cinco años del siglo XXI han superado la temperatura media de la década anterior.
- Amplitud térmica diaria: disminución entre 1950 y 2000.
- Episodios de calor extremo: aumento.
- Episodios de frío extremo: disminución.
- Precipitación en las zonas continentales: aumento de un 5-10% en el Hemisferio Norte. En algunas regiones, disminución (Mediterráneo).
- Episodios de precipitación muy abundante: aumento en latitudes medias y altas.
- Sequías: períodos más largos sin lluvia.
- Aumento del número de huracanes de alta energía en el Atlántico.

En el océano

- Nivel del mar: aumento medio global de 10-25 cm en los últimos 100 años.
- Temperatura del océano: aumento medio de $0,31^{\circ}\text{C}$ hasta 300 m de profundidad en los últimos 50 años, con aumentos superiores ($> 1,1^{\circ}\text{C}$) en el Mediterráneo, donde se ha alcanzado un máximo (30°C) en el verano de 2006.

- Hielo ártico: disminución de la extensión en verano en un 8% por década desde finales de los 70, con tendencia a la aceleración. La extensión del hielo en el mes de marzo fue mínima en el año 2006.

- Aumento de CO₂ y acidificación del océano: más de dos décimas de pH de disminución en el agua superficial del océano global.

- Centenares de nuevos compuestos de origen sintético hallados en los océanos más aislados y los fondos más profundos.

En los ecosistemas

- Deterioro generalizado de la calidad del agua por lluvia ácida, eutrofización (aportes excesivos de nitrógeno y fósforo), y aportes de contaminantes.
- Ritmos estacionales de las especies (fenología): alteración.
- Migración: modificación de las fechas de salida y llegada.
- Extinción de especies: más de 800 especies extintas en los últimos siglos. Las tasas de extinción actuales son más de 1.000 veces superiores a las tasas anteriores al impacto humano.
- Depauperación de los stocks pesqueros en el océano.
- Pérdida de hábitats: disminución anual de un 0,5% de los bosques tropicales, 4-9% de los arrecifes de coral; 1-2% de los bosques de manglar y marismas; 2-5% de las praderas submarinas.
- Productividad de los ecosistemas: generalmente disminución (excepto en zonas eutrofizadas).
- Hypoxia: aumento de los episodios de mortalidad por hypoxia (niveles bajos de oxígeno) en ecosistemas costeros.
- Capacidad de tolerancia de las perturbaciones (resiliencia) de los ecosistemas: disminución.

- Cambios no lineales tales como: expansión epidémica de enfermedades contagiosas, proliferación de algas y muerte de peces, colapso de poblaciones de peces con repercusión directa en pesquerías, extinciones locales y expansión de especies exóticas invasoras, cambios rápidos en las especies dominantes en los ecosistemas, cambio climático regional en relación con cambios en la vegetación (ciclos de interacción complejos).
- Bienes y servicios que aportan los ecosistemas: alteración.

En la sociedad

- Salud: aumento de mortalidad asociada a olas de calor y a otros eventos climáticos extremos (huracanes, inundaciones, riadas, etc.). Aumento de mortalidad y problemas de salud causado por el uso de agua insalubre. Desplazamiento de los rangos geográficos de patógenos. Aumento de alergias, enfermedades respiratorias y distintos tipos de cáncer fomentados por contaminantes.
- Bienes: aumento de daños causados por eventos extremos (inundaciones, tsunamis, huracanes, etc.).
- Agua: aumento de la población que no tiene acceso a agua de calidad y en cantidad suficiente para satisfacer sus necesidades.
- Migración: aumento de flujos migratorios causados por deterioro ambiental y catástrofes en las regiones emisoras.
- Economía: aumento de pérdidas por bienes asegurados y daños a las infraestructuras debido a eventos climáticos extremos. Pérdida de productividad agrícola por desertificación y eventos extremos (sequías, tormentas, etc.). Oscilaciones en flujos turísticos asociados a cambios climáticos.

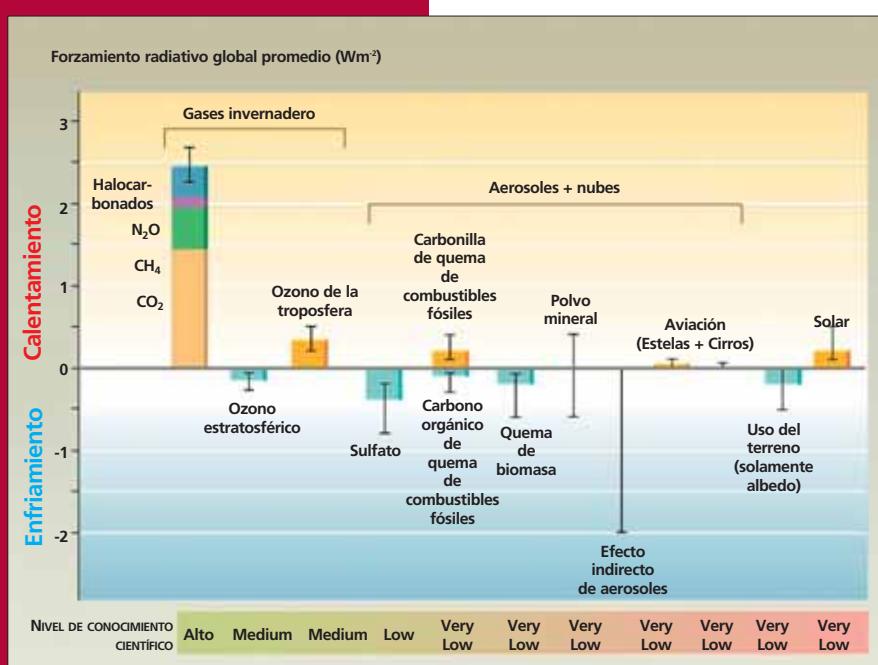


Figura 5.16. Forzamientos radiativos naturales y antropogénicos en el año 2000 en relación con el año 1750. La altura de las barras indica la mejor estima posible del forzamiento, y las líneas asociadas corresponden al rango de valores más probables de acuerdo con el conocimiento actual de los procesos. La ausencia de barra indica un forzamiento para el que no se dispone todavía de estimas fiables.

Fuente: IPCC 2001.

5.8. Incertidumbres

El conocimiento sobre los ciclos elementales es aún insuficiente, en parte por problemas de integración, para derivar inferencias precisas sobre cuál es el destino de los materiales introducidos por el ser humano y, por tanto, su efecto sobre el funcionamiento del sistema Tierra. Por ejemplo, en el ciclo de carbono existen incertidumbres sobre el destino del carbono emitido por la actividad humana, ya que sólo tres cuartas partes, aproximadamente, de las emisiones se encuentran en el

oceano o acumuladas en la atmósfera. Se piensa que el carbono emitido restante debe estar atrapado en tierra, pero no se ha conseguido demostrar dónde se está acumulando este carbono, aunque hay varias hipótesis al respecto. Esta incertidumbre, ejemplo del tipo de incertidumbre que afecta a nuestro conocimiento del ciclo de carbono, no afecta, sin embargo las predicciones climáticas, pues éstas dependen del ritmo de incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, que se conoce con un alto grado de precisión.

Sin embargo, existen también incertidumbres importantes en cuanto al balance térmico de la atmósfera. Las incertidumbres en el efecto de distintas sustancias y procesos sobre los forzamientos radiativos, que determinan el balance térmico de la atmósfera, son considerables. El IPCC (2001) reconoce que los errores asociados a las predicciones de las perturbaciones en el balance radiativo son importantes, a veces con errores del 100, 300 o 1.000% (ver figura 5.16.). En particular hay grandes incertidumbres en cuanto al papel de cambios en el albedo, carga de aerosoles y efectos de los aviones sobre el balance radiativo de la atmósfera (ver figura 5.16.). En cambio, el conocimiento que se tiene del efecto del CO_2 y otros gases en el balance radiativo es mucho más preciso. Esta disparidad en el nivel de conocimiento, se debe entre otros factores a las políticas

científicas. Éstas tienen una gran influencia en determinar los temas que van a recibir más recursos para la investigación. Además, hay procesos y componentes de la biosfera que se desconocen completamente, y por lo tanto ya no aparecen en el cuadro de incertidumbres del informe IPCC (figura 5.16.).



Extracción Artesanal de sal marina en la isla de La Palma.

Fotografía: F. Valladares.

Referencias

- AYALA-CARCEDO FRANCISCO J. E IGLESIAS LÓPEZ, A. (1996). *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular*. Instituto Tecnológico y Geominero de España.
- BARRIENDOS, M. (2002). "Los riesgos climáticos a través de la historia: avances en el estudio de episodios atmosféricos extraordinarios". En: F. J. Ayala-Carcedo y J. Olcina (eds.). *Riesgos naturales*, Ariel, Barcelona, 549-562.
- BENITO, G.; BARRIENDOS, M.; LLASAT, C.; MACHADO, M. y THORNDYCRAFT, V. R. (2005). "Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático". En: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático* (J. M. Moreno, coordinador), Ministerio de Medio Ambiente, 527-548.
- BROECKER, W. S. 1991. "The Great Ocean Conveyor". *Oceanography*, 4: 79-89.
- COSGROVE, W. J. y RIJSBERMAN, F. R. (2000). *World Water Vision: Que el agua sea asunto de todos*. London: Earthscan Publications.
- DE ALBA, S.; BENITO, G. Y PÉREZ GONZÁLEZ, A. (1998). "Erosión de suelo en episodios de lluvia de elevada intensidad versus episodios de moderada y baja intensidad y elevada frecuencia, en ambientes semiáridos". En: A. Gómez Ortiz y F. Salvador Franch (eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*, pp. 483-492.
- FEELY, R. A.; SABINE, C. L.; LEE, K.; BERELSON, W.; KLEYPAS, J.; FABRY, V. J. y MILLERO, F. (2004)."J. Impact of Anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ System in the Oceans". *Science*, 305: 362-366.
- IGLESIAS, A.; ESTRELA, T. y GALLART, F. (2005). "Impactos sobre los recursos hídricos". En: *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático* (J. M. Moreno, coordinador), Ministerio de Medio Ambiente, 303-353.

- IPCC (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of IPCC*. McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken D. J., White, K. S. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1005 pp.
- JURADO, E.; JAWARD, F.; LOHMANN, R.; JONES, K. C.; SIMÓ, R. y DACHS, J. (2005). "Wet deposition of persistent organic pollutants to the global oceans". *Environmental Science & Technology* 39, 2426-2435.
- KUHNLEIN, H. V. y H. M. CHAN (2000). "Environment and contaminants in traditional food systems of northern indigenous peoples". *Annual Review of Nutrition*, 20: 595-626.
- LEAN, G. (1995). *Down to Earth. Secretariat of the Convention to Combat Desertification*. United Nations. Bonn, Alemania.
- MUIR, D. C. G. y HOWARD, P. H. (2006). *Are there other persistent organic pollutants? A challenge for environmental chemists*. Environmental Science Technology 40, 7157-7166.
- PENNER, J. E.; HEGG, D.; LEITCH, R. (2001). Unraveling the role of aerosols in climate change. *Environ. Sci. Technol.*, Aug. 1: 332A-340A.
- RIEBESELL, U.; ZONDERVAN, I.; ROST, B.; TORTELL, P. D.; ZEEBE, R. E.; MOREL, F. M. M. (2000). "Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂". *Nature*, 407: 364-367.
- SABINE, C. L.; FEELY, R. A.; GRUBER, N.; KEY, R. M.; LEE, K.; BULLISTER, J. L.; WANNINKHOF, R.; WONG, C.S.; WALLACE, D.W.R.; TILBROOK, B.; MILERO, F.J.; PENG, T.-H.; KOZYR, A.; ONO, T. y Ríos, A. F. (2004). "The oceanic sink for anthropogenic CO₂". *Science*, 305: 367-371.
- SARMIENTO, J. L. y GRUBER N. (2002). *Sinks for anthropogenic carbon*. *Physics Today*. American Institute of Physics S-0031-9228-0208-010-9.
- SCHWARZENBACH, R. P.; GSCHWEND, P. M.; IMBODEN, D. M. (2003). *Environmental Organic Chemistry*. Wiley-Interscience, New York.
- SEINFELD, J. H. y PANDIS, S. N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, New York.
- SHIKLOMANOV, I. A. (1999). *World water resources and their use*. CD-ROM "Freshwater Resources", IHP-UNESCO, París.
- SMAKTHIN, V.; REVENGA, C. y DÖLL, P. (2004). "Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments". *Comprehensive Assessment Research Report*, nº 2. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- AKAHASHI, T.; SUTHERLAND, S. C.; SWEENEY, POISSON, C. A.; METZL, N.; TILBROOK, B.; BATES, N.; WANNINKHOF, R.; FEELY, R. A.; SABINE, C.; OLAFSSON, J. y NOJIRI, Y. (2002). "Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects". *Deep-Sea Res.II*, 49, 1601-1622.
- VALLEJO, V. R.; DÍAZ FIERROS, F. y DE LA ROSA, D. (2005). "Impactos sobre los recursos edáficos". En: Moreno, J. M. (coordinador), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, 355-397.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE (1998). World Resources 1998-99. Report available at <http://www.wri.org>.

6. Cambio climático

6.1. ¿Qué es el cambio climático?

La mayor parte de nosotros comparte la sensación de que el clima, que representa las condiciones medias del tiempo atmosférico, está cambiando. Esta percepción del cambio en el clima se basa generalmente en la comparación de los inviernos o veranos actuales con los existentes durante nuestra niñez. Lo cierto es que el clima ha variado constantemente desde el origen de nuestro planeta hace más de 4.500 millones de años. Estos cambios (figura 6.1.) no sólo se han producido a escala geológica (millones de años), sino también en nuestra historia reciente (últimos miles y cientos de años).

Los períodos glaciares e interglaciares experimentados durante el Cuaternario (últimos 2,6 millones de años),

constituyen momentos extremos de avance y retroceso de los casquetes glaciares desde las zonas polares hacia latitudes ecuatoriales. Dentro de estos grandes ciclos glaciares e interglaciares, existen variaciones importantes en las condiciones climáticas medias (figura 6.1.). En los últimos mil años, se han producido dos variaciones reseñables de signo climático opuesto: (1) el periodo “cálido” conocido como Periodo Cálido Medieval (entre 900-1200) y (2) el periodo frío denominado como Pequeña Edad del Hielo (entre 1550 y 1850).

Durante el Periodo Cálido Medieval existen referencias históricas que señalan la expansión de los viñedos en el sur de Inglaterra, y la retirada de los glaciares a cotas más elevadas. Posteriormente, en la Pequeña Edad del Hielo desaparecieron los viñedos de

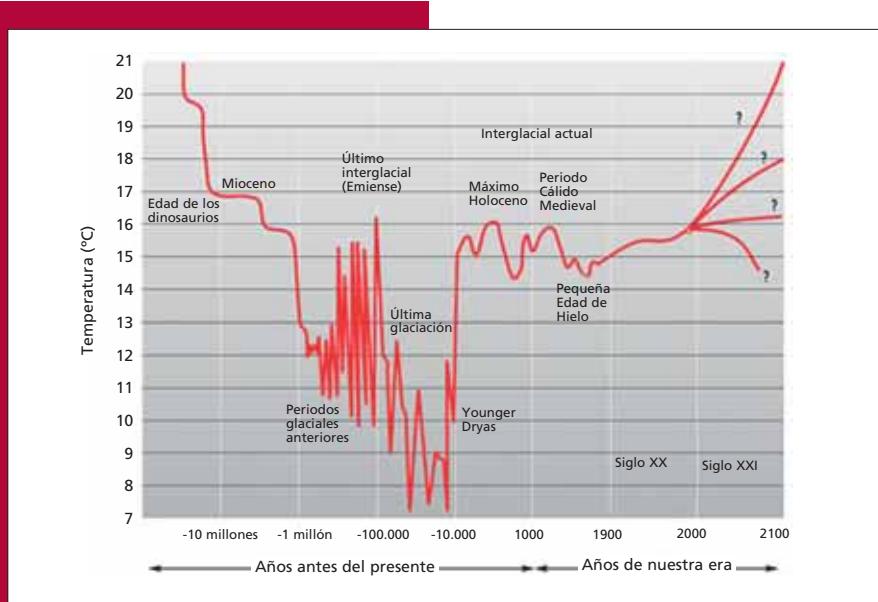


Figura 6.1. Variación de la temperatura media de la Tierra a escala geológica. El eje X de tiempo está representado en escala logarítmica.

Fuente: Bureau of Meteorology, Commonwealth of Australia 2006
[\(http://www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/\)](http://www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/).

Inglaterra, y se hizo difícil el cultivo de cereal en Islandia. Los registros históricos, desde el siglo XVI al XVIII, sugieren la existencia de una fase más fría con un máximo de dichas condiciones para el siglo XVII. Durante estos siglos, varios ríos llegaron a helarse, siendo destacables las 11 heladas ocurridas entre 1503 y 1697 en el río Ebro en Tortosa (a 15 km de la costa), destacando el invierno de 1693-1694 donde el hielo alcanzó un espesor de 3 m. Igualmente, el río Tajo se heló 5 veces a su paso por Toledo durante el mismo periodo.

Las variaciones recientes en el clima (figura 6.2.) se han relacionado con

ciclos de la actividad solar, grandes erupciones volcánicas y la composición atmosférica, fundamentalmente de los gases traza de origen natural (H_2O , O_3 , CO_2 , N_2O , CH_4).

¿Qué hace diferente el cambio climático actual a los cambios registrados en el pasado?

En la actualidad el ser humano tiene capacidad de afectar directamente en el sistema climático, tal y como se ha puesto de manifiesto con la masiva emisión de gases con efecto invernadero resultado de la utilización de combustibles fósiles. En este sentido, existen evidencias claras que relacionan esta emisión creciente de gases a la atmósfera durante el siglo XX con un incremento medio de la temperatura global de $0,6^{\circ}C$ (media de la temperatura de la superficie terrestre y superficie del mar, IPCC, 2001; figura 6.3.).

Este incremento de temperatura se ha acelerado desde los años 70 y parece haber sufrido una nueva aceleración en lo que llevamos de siglo XXI, paralelamente al incremento de las emisiones de gases con efecto invernadero, algunos que ya existían de forma natural (CO_2 , CH_4 , N_2O y vapor de agua) y otros con origen exclusivamente humanos como los clorofluorometanos (CFC's). Sin embargo, la emisión de estos gases debido a las actividades humanas está

produciendo un incremento medio de la temperatura global que puede afectar a diferentes sistemas de la hidrosfera-geosfera y biológicos de nuestro planeta. En definitiva, la tendencia climática actual es el resultado de una variabilidad climática natural alterada por la emisión de gases con efecto invernadero, cuyo resultado evidente es el aumento de la temperatura del aire y de los océanos.

Las emisiones importantes de gases con efecto invernadero se iniciaron a comienzos del siglo XX, asociadas a la quema de masas forestales y de matorral para ampliar las zonas cultivables. Sin embargo, las emisiones masivas de estos gases asociadas al uso generalizado de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) se han registrado en la segunda mitad del siglo XX, y particularmente en las últimas dos décadas, con un incremento de alrededor del 25% en los niveles de algunos gases con efecto invernadero.

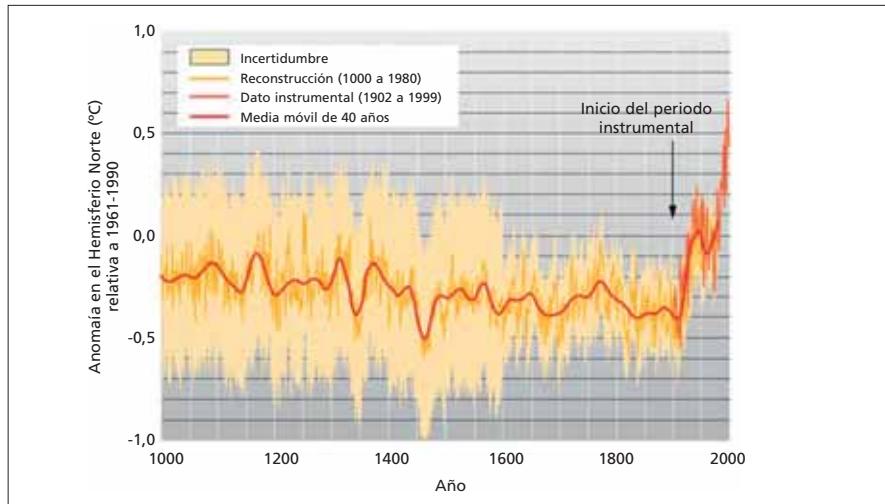


Figura 6.2. Reconstrucción de la variación media de la temperatura del Hemisferio Norte en los últimos 1.000 años, de los que los últimos 100 corresponden a medidas directas y el resto han sido reconstruidos a partir de indicadores.

Fuente: Bureau of Meteorology, Commonwealth of Australia 2006 (<http://www.bom.gov.au/info/climate/change/gallery/>).

La concentración media de dióxido de carbono antes de la revolución industrial (hacia 1750) era de unas 280 partes por millón en volumen,

elevándose hasta 315 ppm en 1958, y en la actualidad se aproxima a los 380 ppm. Esto significa que la concentración de CO₂ en el aire se ha incrementado a un ritmo medio anual de 1.5 ppm, lo que equivale al 0,5% anual. Por su parte, el metano (CH₄) representa el 9% del total de las emisiones y se genera durante la producción y transporte del carbón, gas natural y petróleo, así como de la descomposición de desechos orgánicos en vertederos y en la ganadería. Los niveles de metano se han duplicado en el último siglo desde sólo 0.7 ppmv, hasta los actuales 1.7 ppmv, aunque el ritmo de incremento ha disminuido en

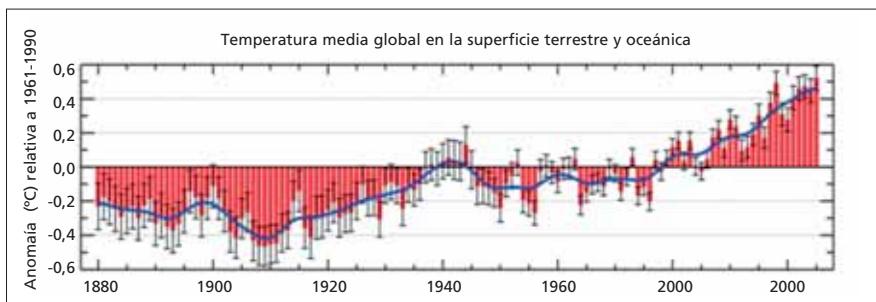


Figura 6.3. Anomalía de la temperatura media global de la superficie terrestre y oceánica durante el periodo instrumental en relación al promedio del periodo 1961-1990 (que se fija como 0).

Fuente: NOAA, USA.

los últimos años. El óxido nitroso (N_2O) se emite durante las actividades industriales y agrícolas, así como en la combustión de desechos sólidos y combustibles fósiles, representando el 5% del total de las emisiones. La cantidad de óxido nitroso ha pasado de 0.275 ppmv en la era preindustrial a alcanzar en la actualidad los 0.310 ppmv, lo que supone un incremento del 0,25% anual, con una emisión media actual de unos 7 millones de toneladas. Los halocarbonos representan el 2% del total de las emisiones y se emiten como subproductos de procesos industriales y a través de fugas.

La contribución de estos gases con efecto invernadero al calentamiento global depende de su concentración en la atmósfera, y de su capacidad de absorción de energía (tabla 6.1.). Existen algunos gases cuyo origen se debe exclusivamente a procesos industriales, ya que no existen en condiciones naturales,

como los clorofluorocarbonos (CFC-11 y CFC-12), los hidrofluorocarbonos (HFCs), los perfluorocarbonos (PFCs) y los sulfuros hexafluorados (SF₆), y que presentan un elevado efecto invernadero. En este sentido, un gramo de clorofluorocarbonos (CFC-11 y CFC-12) produce un efecto invernadero hasta 10.000 veces mayor que un gramo de CO₂, aunque este último contribuye en un 53% al calentamiento global debido a su elevada presencia en la atmósfera.

El concepto de potencial de calentamiento global (en inglés, *global warming potential* GWP) se define como el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce una liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂ (tabla 6.1.). Este concepto ha sido desarrollado para permitir la comparación de los efectos

acumulados de calentamiento de diferentes gases con efecto invernadero, y contempla tanto la capacidad de cada gas de intensificar el efecto invernadero, como su tiempo de permanencia en la atmósfera. El CO₂ se toma como patrón o elemento de referencia, asignándole un valor 1, mientras que el efecto del resto de los gases se calculan como múltiplos de este valor. Un potencial de calentamiento global de 21 para el metano (CH₄) significa que cada gramo de metano emitido tiene un efecto de calentamiento acumulado en los próximos cien años equivalente a la emisión de 21 gramos de CO₂. El valor resultante de la transformación de una cantidad de emisión de gas con efecto invernadero en su equivalente de dióxido de carbono se denota como CO₂E. Esta transformación en unidades de CO₂E permite realizar comparaciones y evaluar las tendencias futuras del efecto de las emisiones futuras. En la actualidad, Estados Unidos es el principal contribuyente a la emisión de gases con efecto invernadero, con Canadá siendo el país con mayores emisiones per cápita. Por sectores (figura 6.4.), los procesos industriales generan la mayor parte de estos gases (32%) seguidos por los procesos relacionados con la generación de energía eléctrica (20%) y la agricultura (20%).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC
Residencia en años	Variable	12.2 ±3	120	12-102
Niveles preindustriales	278 ppmv	0.7 ppmv	275 ppbv	0
Niveles en 1994	358 ppmv	1.7 ppmv	311 ppbv	0.105-0.503 ppbv
% de contribución al efecto invernadero	53	13	6-7	20
Potencial de calentamiento global con relación al CO ₂ (GWP*)	1	21	310	Varios entre 6200 - 10000

Tabla 6.1. Principales gases de efecto invernadero.

Fuente: UN Environmental Programme. Introducción al cambio climático (www.grida.no/climate/vital/intro.htm).

Ppmv: partes por millón de volumen.

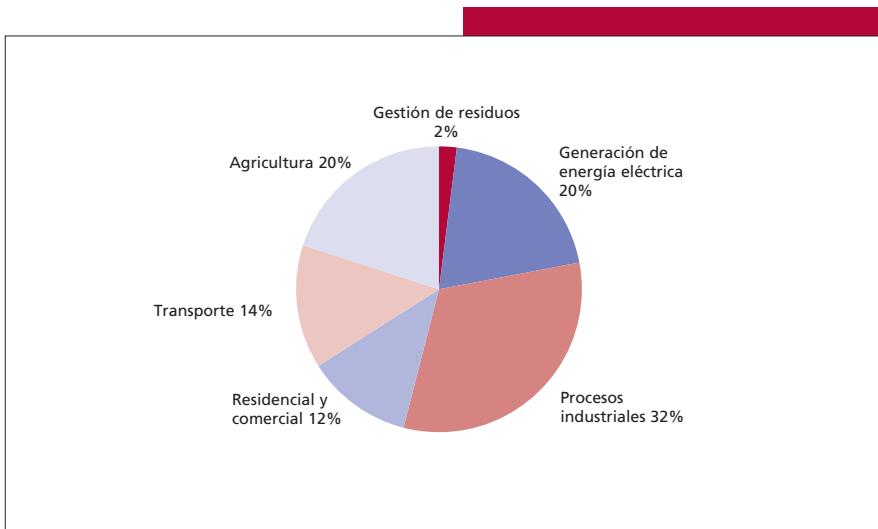
Ppbv: partes por billón de volumen.

Gwp*: para un horizonte temporal de 100 años según el Second Assessment Report (SAR) de IPCC.

Climático (CMNUCC) sienta las bases para estabilización de la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera en niveles que eviten el peligro de la interferencia antrópica en el sistema climático, a través de su Artículo 2, y que entró en vigor en 1994. En el denominado Protocolo de Kioto se acuerda reducir las emisiones totales de seis de los gases con efecto invernadero (indicados en la tabla 6.2.), en una media de 5,2% por debajo de las emisiones de 1990.

6.2. Incertidumbres

El glosario del IPCC indica para incertidumbre: “Expresión del nivel de desconocimiento de un valor (como el estado futuro del sistema climático). La incertidumbre puede ser resultado de



una falta de información o de desacuerdos sobre lo que se conoce o puede conocer. Puede tener muchos orígenes, desde errores cuantificables en los datos a conceptos o

Figura 6.4. Distribución por sectores económicos de emisión de gases con efecto invernadero (CO₂, CH₄, y N₂O en CO₂E) incluidos en el Protocolo de Kioto en 1990

Fuente: Edgar, 2000.

Gas	Emisiones	Dióxido de carbono equivalente (CO ₂ E)
CO ₂	22000	22000
CH ₄	310	6510
N ₂ O	10.5	3264
HFCs	Sin datos	70
PFCs	Sin datos	117
SF ₆	0.006	139

Tabla 6.2. Emisiones antrópicas mundiales en 1990 (en millones de toneladas métricas), tomadas como referencia en el Protocolo de Kioto. Las emisiones de CO₂ se refieren a combustibles fósiles y otros procesos industriales, pero no incluyen las emisiones producidas de la conversión de bosques y pastos en zonas agrícolas y urbanas. Los valores de CO₂E corresponden a un horizonte temporal de 100 años.

Fuente: IPCC, 2001. HFCs: Hidrofluorocarbonos. PFCs: Perfluorocarbonos. SF₆: Hexafluoruro de azufre.

terminologías definidos ambiguamente, o proyecciones inciertas de conductas humanas. La incertidumbre se puede representar con valores cuantitativos (como una gama de valores calculados por varias simulaciones) o de forma cualitativa (como el juicio expresado por un equipo de expertos”).

Repasando lo dicho con anterioridad, se pueden tener incertidumbres, y de hecho se tienen, derivadas de la ignorancia parcial de las causas del clima, del uso de los modelos e inherentes a los propios escenarios de emisiones. Algunas de ellas ya han sido indicadas al describir los motores del clima. A continuación se describirán otras que pueden resultar menos evidentes.

Papel de aerosoles y nubes

Su comportamiento en el sistema climático se acostumbra a referir al efecto invernadero y más concretamente si lo intensifican o lo atenúan. Tanto los aerosoles como las nubes pueden actuar en los dos sentidos. En un principio los aerosoles impedirían la llegada de radiación solar, atenuando el efecto invernadero, pero si su tiempo de residencia en la atmósfera es grande, y dependiendo de su naturaleza, pueden reemitir radiación térmica hacia el suelo e intensificarlo. A lo dicho hay que añadir que es difícil conocer la evolución hacia el futuro de su concentración, y no sólo en lo que

atañe a la actividad humana, sino también a causas naturales, como por ejemplo, las erupciones volcánicas.

En cuanto a las nubes, su comportamiento depende, como ya se indicó, del tipo. Todos los escenarios de clima futuro prevén un clima global más caluroso y húmedo, con mayor nubosidad, pero el comportamiento radiativo de dicha nubosidad no está claro todavía.

Composición de la atmósfera, sumideros, escenarios de emisiones

La composición atmosférica es cambiante, sobre todo como consecuencia de la actividad humana y, principalmente, debido a la quema de combustibles fósiles. El efecto invernadero, como se sabe, está producido por gases (también aerosoles) radiativamente activos, que reciben el nombre genérico de gases de efecto invernadero (GEI), que también son responsables de su intensificación si su concentración en la atmósfera aumenta. El principal contribuyente al efecto invernadero es el vapor de agua (aproximadamente un 80%) seguido del dióxido de carbono (algo menos del 20%) que, a su vez, es el máximo responsable de su intensificación (53%), seguido del metano (20%), óxido nitroso y otros gases. Cuando se habla de una cierta concentración de GEI en la atmósfera, hay que tener en cuenta que, en principio, ésta resulta

de una diferencia entre las emisiones de GEI y la cantidad de CO₂ equivalente que el sistema climático es capaz de fijar en los denominados sumideros (los más importantes, suelos, vegetación y océano, ver cuadro 6.1.). Todos esos factores son portadores de incertidumbre y, sobre todo, de cara al futuro del sistema climático. Mención especial merecen los escenarios de emisiones, deducidos a partir de consideraciones socioeconómicas, difícilmente cuantificables y verificables particularmente ante posibles innovaciones tecnológicas, y las concentraciones de GEI que de ellos se deducen.

Carácter no lineal del sistema climático

Cuando se consideran en conjunto los procesos que se dan en el sistema climático, se observa que unos influyen en otros y que los resultados de la acción de dichos procesos considerados individualmente influyen en sus propias causas; estas complejas interacciones reciben el nombre de retroalimentaciones y constituyen un rasgo característico de los denominados sistemas no lineales y del sistema climático en particular. El tratamiento analítico es muy difícil, si no imposible, siendo lo más adecuado su simulación mediante modelos, aunque éstos también muestran

limitaciones a la hora de anticipar posibles respuestas no lineares.

Este comportamiento puede dar lugar a cambios inesperados en el estado del sistema y a otros imaginables, como podrían ser los cambios de clima rápidos. Algunos de ellos serían la reorganización de la circulación termohalina, la recesión de los glaciares, con sus efectos de retroalimentación sobre el albedo global, o la fusión generalizada del permafrost. A su vez, estos cambios influyen en el ciclo del carbono.

Uso de modelos

Los modelos son aproximaciones de la realidad, establecidos tras simplificaciones diversas que, obviamente, siempre introducen incertidumbre. Para comentar sólo dos de ellas, hay que decir que la necesaria discretización espacial para que el proceso de cálculo se realice en tiempos razonables hace que los resultados de la simulación no puedan ser directamente aplicables a escalas locales. El otro aspecto a comentar está relacionado con el tratamiento, no del todo satisfactorio, del vapor de agua en los modelos. Esto tiene importancia pues su presencia en la atmósfera aumenta con la temperatura, y al producirse un

crecimiento de ésta se daría una realimentación, no adecuadamente resuelta. La reducción de éstas y otras incertidumbres proporcionan una gran cantidad de líneas de investigación de punta activas en el mundo.

Más importante aún es aceptar que los modelos climáticos sólo pueden articular lo conocido y nunca incorporar lo desconocido. Por tanto están limitados por las fronteras del conocimiento científico. Presentan, además, un problema inherente de validación, pues las proyecciones futuras sólo se pueden validar cuando éstas se constaten, de forma que existe la posibilidad de que los modelos dejen de funcionar adecuadamente, subestimando o sobreestimando los cambios, por encima de umbrales determinados de cambio.

6.3. Cambio climático: ¿realidad, futuro o especulación?

Es evidente que, a la vista de las incertidumbres comentadas en el apartado anterior, cabe la pregunta: ¿se puede dar por cierto el cambio climático?

Para tratar de dar respuesta a la pregunta anterior, se usará una línea

argumental que tendrá tres fases, la primera hará referencia a los cambios ya observados, la segunda a la seguridad en la mejor herramienta que se dispone para la simulación del clima y la tercera a las proyecciones del clima hacia el futuro.

Evolución del clima presente y aumento de concentración de los GEI

Desde el inicio de la Revolución Industrial, a mitad del siglo XVIII, la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera ha aumentado considerablemente en los últimos cien años (tabla 6.1.). En paralelo, la temperatura media en superficie del planeta ha aumentado cerca de 1°C¹ en los últimos 100 años, siendo los diez últimos años (1996-2005), con excepción de 1996, los diez más calurosos de todos los de registro instrumental y 2005 el máximo absoluto, a falta de confirmación de 2006 que, por el momento, se considera uno de los años más calurosos de la serie. Estas observaciones son coherentes con la intensificación del efecto invernadero que predice la teoría y los modelos, pero hay más. Los modelos de simulación del clima indican también que, al producirse el calentamiento, los fenómenos

1. El calentamiento medio observado ha sido de 0,8°C; probablemente el más intenso de los últimos mil años en el Hemisferio Norte.

climáticos extremos (sequías, lluvias fuertes, ciclones tropicales, olas de calor y frío...) cambian su frecuencia e intensidad, aumentando, excepto las olas de frío. Asimismo, como consecuencia de la dilatación del agua y de la fusión de los hielos continentales, el nivel medio del mar debe aumentar. Todo ello se está produciendo, en la mayoría de las montañas del mundo se está produciendo un retroceso en los glaciares y una rápida disminución de la extensión del hielo ártico, el nivel del mar ha aumentado entre 10 y 20 cm en los últimos cien años, las olas de calor son cada vez más frecuentes y producen un mayor número de defunciones y, como dato a destacar, el número de ciclones tropicales que alcanzaron la categoría de huracán en el Atlántico durante 2005 ha sido el mayor conocido, aumentando también su potencial destructivo.

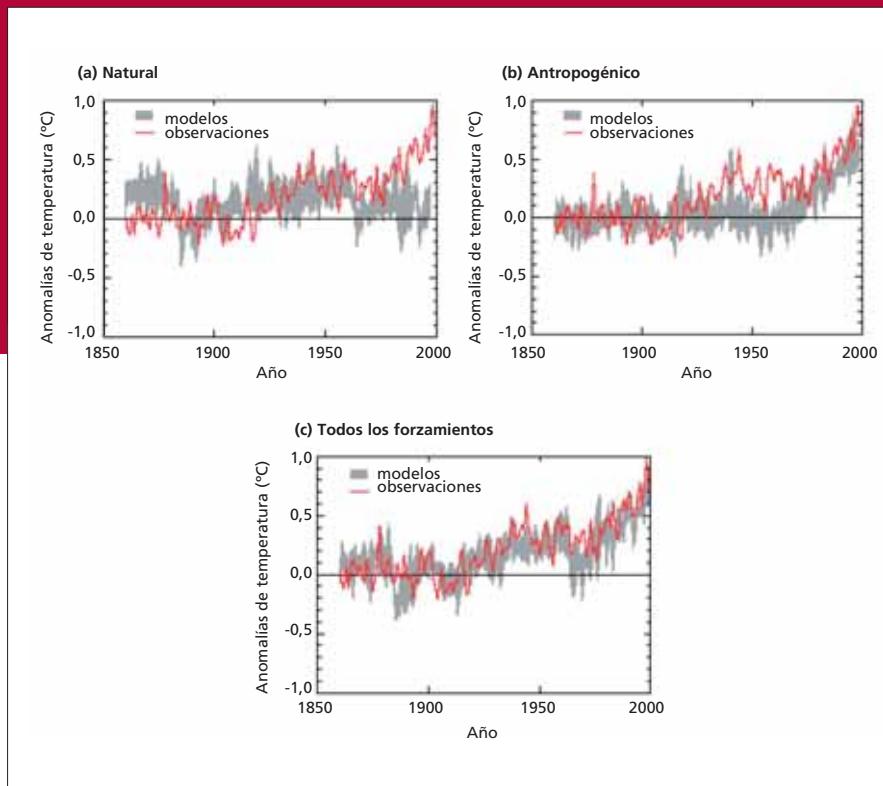


Figura 6.5. Simulación mediante modelos de la evolución de la temperatura del aire con diferentes hipótesis.

Atribución del calentamiento a la actividad humana

Del segundo informe de evaluación del cambio climático del IPCC, publicado en 1995, se deducía 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 tercer informe, publicado en 2001, se produjo un cambio sustancial, que a continuación se describe.

Para tener confianza en la capacidad de los modelos para simular el clima, lo primero que se hace es simular 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 en la actualidad para la simulación del clima dan los mismos resultados, pero se puede decir que, en conjunto, la simulación es más que satisfactoria. La media de todos ellos reproduce muy bien la evolución conocida de las variables y las diferencias entre ellos son adecuadas para simular la variabilidad observada del clima.

Como ejemplo, en la figura 6.5. se pueden ver diferentes simulaciones, realizadas con modelos sencillos, para intentar explicar la evolución de la temperatura media del planeta. La curva en rojo representa la temperatura media del aire en superficie observada desde la mitad del siglo XIX hasta nuestros días; las curvas en gris representan la evolución de la misma temperatura simulada mediante modelos. En el panel (a) se ha mantenido, durante la simulación, la composición del aire conocida en la época preindustrial. En el panel (b) se ha aislado, en la simulación, el papel de la actividad humana, modificando la composición del aire. En el panel (c) se han considerado simultáneamente los dos efectos anteriores, teniendo en cuenta la composición atmosférica tal como realmente ha evolucionado. Se observa que, si bien la evolución de la temperatura se puede explicar suficientemente bien sólo mediante causas naturales durante la primera

mitad del siglo XX, esto no es así durante la segunda mitad. Sólo considerando el papel del ser humano es posible explicar el aumento de temperatura observada en el planeta en la segunda mitad del siglo pasado, de cerca de 1°C.

Los resultados de investigación que se resumen en la figura 6.5. llevaron al IPCC (2001) a establecer en una de las conclusiones del tercer informe de evaluación que “existen pruebas nuevas y más convincentes de que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos cincuenta años se puede atribuir a actividades humanas”. Hay que añadir, además, que son los resultados como los anteriores los que permiten tener confianza en la simulación del clima mediante modelos, a pesar de las incertidumbres conocidas de todo el proceso de simulación.

Interpretación de los escenarios de emisiones

Visto lo anterior no es extraño que se pretenda proyectar el clima presente hacia el futuro. Como ya se ha indicado, esto se lleva a cabo empleando escenarios de emisiones. Nadie oculta que la probabilidad de que se dé exactamente alguno de los escenarios es francamente pequeña. Sin embargo, desde el punto de vista de la investigación del clima futuro, el camino a seguir está claro: el abanico de posibilidades que establecen los

escenarios de emisiones permite obtener un abanico de posibles escenarios climáticos futuros, y esto es así para cada uno de los modelos de simulación del clima empleados. A partir de estos resultados se pueden obtener estados climáticos futuros, de los que a veces se utilizan los extremos para estimar la variabilidad y alguno de los centrales para estimar un clima futuro plausible. En resumen, es menos importante lo que dice individualmente cada uno de los escenarios de emisiones que el conjunto de los posibles climas futuros que nos permiten simular.

Escenarios frente a realidad

Dado que la predicción sobre escenarios se inició en 1990, es posible comparar las predicciones de estos escenarios con los valores de CO₂ y temperatura del planeta observados en estos quince años. Aunque es un plazo de tiempo corto para pretender validar la fiabilidad de los escenarios, sí que permite el contraste de previsiones frente a valores observados para re-evaluar los escenarios proyectados hacia el futuro.

Así pues, la concentración de CO₂ en la actualidad es de aproximadamente 380 ppm, concentración que no se esperaba alcanzar, en el escenario más desfavorable, hasta pasado el año 2010. Igualmente, la temperatura media del planeta ha superado en tres de los cinco años transcurridos del siglo XXI (2001, 2003 y 2005) las temperaturas medias

previstas en el escenario más desfavorable de entre los planteados por el IPCC, y la temperatura media en el año 2006 lleva visos de seguir el mismo camino. Así pues, no sólo las tendencias son las previstas por los modelos: aumento de concentración de CO₂ en la atmósfera y calentamiento progresivo del planeta, sino que los cambios observados superan los previstos en el escenario más desfavorable de entre los planteados por el IPCC. Sin embargo, esto no significa necesariamente que los modelos sean deficientes, sino que muy posiblemente son los escenarios los que

fueron demasiado conservadores. Así, la evaluación de las emisiones de CO₂ desde el año 1990 ha revelado un incremento superior al previsto en el escenario más desfavorable, incluido nuestro país donde el incremento de las emisiones ha sido muy superior al permitido por el Protocolo de Kioto. Esta subestima del incremento de las emisiones quizás se deba a que las retroalimentaciones entre mayor calentamiento y mayor consumo de energía para climatización, que están poniendo al límite los sistemas de distribución de energía eléctrica de

muchos países, como EE.UU. y el nuestro, no se habían considerado suficientemente.

En resumen, de lo anteriormente expuesto se deduce que la respuesta a la pregunta retórica con la que se abría esta sección es que el calentamiento climático es una realidad en la que estamos ya plenamente inmersos y que su consideración como especulación o como proceso futuro aún por llegar sólo puede retrasar la adopción de medidas de adaptación y mitigación y, con ello, agravar los impactos de este importante problema.

Cuadro 6.1.

¿Qué son los sumideros?

Se denomina sumidero a cualquier proceso, actividad o mecanismo que retira de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol, o un precursor de gases de efecto invernadero por un periodo de tiempo relevante climáticamente.

Existen sumideros naturales como son los procesos de captación de CO₂ atmosférico por parte de la vegetación terrestre, su acumulación en los sedimentos de lagos y su acumulación en las aguas intermedias y profundas y sedimentos de los océanos, que actualmente almacenan gran parte del CO₂ emitido por la actividad humana. Sin embargo, con el fin de poder mitigar las consecuencias del efecto invernadero se han hecho propuestas y experimentos para disminuir el CO₂ atmosférico consistente en separación de CO₂ emitido por la industria, su transporte y almacenamiento a largo

plazo. Esto sería un sumidero forzado que el IPCC considera como una de las opciones en la cartera de medidas de mitigación para la estabilización de concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero.

Dos ejemplos de este tipo de tecnologías de sumidero de CO₂ se realizan mediante su inyección en formaciones geológicas y en el océano, lo que es económicamente viable, aunque se sigue investigando. Existen varias opciones de almacenamiento geológico, inyectando CO₂ en formaciones salinas, acuíferos profundos o yacimientos agotados de petróleo y gas a profundidades mayores de 800 m. A una profundidad de más de 800 m, el CO₂ adquiere una densidad de líquido (entre 500 y 800 kg por m³). El almacenamiento en capas de carbón puede realizarse a menos profundidad y depende de la

adsorción de CO₂ por la hulla. La viabilidad técnica depende en gran medida de la permeabilidad de la capa de carbón. La combinación del almacenamiento de CO₂ con la recuperación mejorada de petróleo o de metano en capas de carbón podría propiciar ingresos adicionales de la recuperación de petróleo o gas. Existen tres proyectos de almacenamiento a escala industrial en funcionamiento: el proyecto Sleipner en una formación salina marítima en Noruega, el proyecto Weyburn de recuperación mejorada de petróleo en el Canadá, y el proyecto In Salah en un yacimiento de gas de Argelia. Se continúan desarrollando tecnologías y métodos para la ejecución de proyectos de almacenamiento geológico. El almacenamiento oceánico podría llevarse a cabo de dos formas: mediante la inyección y disolución de CO₂ en la

columna de agua (por lo general, a más de 1.000 metros de profundidad) por medio de un gasoducto fijo o un buque en desplazamiento, o mediante el depósito de CO₂ por medio de un gasoducto fijo o una plataforma marítima en el fondo oceánico a más de 3.000 m de profundidad, donde el CO₂ tiene mayor densidad que el agua y se espera que forme un "lago" que retrasaría la disolución de CO₂ en el entorno (figura 6.6.). El almacenamiento oceánico y su impacto ecológico aún están en fase de investigación, ya que preocupa que la disolución del CO₂ reduzca el pH del agua de mar, acidificándola y afectando así a los organismos carbonatados. El CO₂ disuelto pasaría a formar parte del ciclo global del carbono y, llegado el momento, se estabilizaría con el CO₂ de la atmósfera. En los experimentos de laboratorio, los experimentos oceánicos a pequeña escala y las simulaciones con modelos, las tecnologías y los fenómenos físicos y químicos conexos, que incluyen, en particular, el aumento de la acidez (ver Sección 7) y sus efectos en los ecosistemas marinos han sido estudiados para diversas opciones de almacenamiento oceánico.

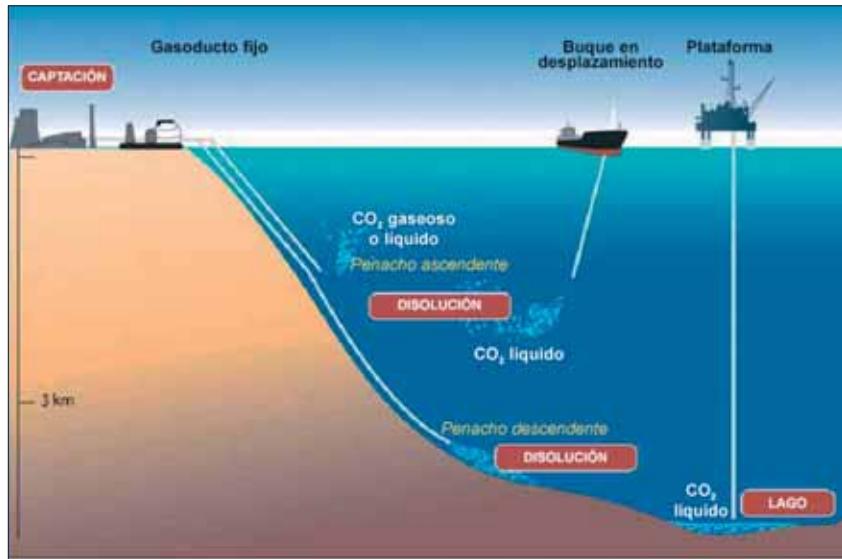


Figura 6.6. Visión general de almacenamiento o sumidero oceánico. En el almacenamiento oceánico por "disolución", el CO₂ se disuelve rápidamente en las aguas oceánicas, mientras que en el almacenamiento oceánico de "lago", inicialmente, el CO₂ es un líquido en el fondo oceánico (por gentileza del CO2CRC).

Referencias

- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3 vols.
- MCGUFFIE, K. y A. HENDERSON-SELLERS (2005). "A climate modelling primer". Wiley. 280 pp.
- METZ, B.; DAVIDSON, O.; CONINCK, H. DE; Loos, M. y MEYER, L. (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas*. Informe del Grupo de trabajo III del IPCC. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático. ISBN 92-9169-319-7.
- MMA (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, J. M. Moreno (ed.), Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. 822 pp.
- NERC (2005). "Climate Change. Scientific certainties and uncertainties". *Natural Environment Research Council*, UK. 6 pp.
- RIVERA, A. (2000). *El cambio climático: el calentamiento de la Tierra*. Temas de Debate, Madrid. 270 pp.
- WONG, C. S. y HIRAI, S. (1997). *Ocean Storage of Carbon Dioxide. A Review of Oceanic Carbonate and CO₂ Hydrate Chemistry*. IEA Greenhouse Gas R&D Programme. ISBN 1-898373-09-4.



Embarcación en aguas de Formentera.

Fotografía: C. M. Duarte

7. Escenarios de cambio global

7.1. Escenarios climáticos

Para realizar simulaciones del clima presente las condiciones de trabajo son perfectamente conocidas. En concreto, se sabe cómo ha ido evolucionando la composición atmosférica en el transcurso del tiempo. Sin embargo, la situación es muy diferente si se quiere proyectar el clima hacia el futuro partiendo de las condiciones presentes. No se conoce, a priori, qué va a ocurrir con el contenido en la atmósfera de gases con efecto invernadero y aerosoles.

El problema no es fácil pues las emisiones dependen de muchos factores. Por ejemplo, la evolución de la población mundial, de los sistemas socioeconómicos, el uso de tecnologías respetuosas con el medio ambiente, la aparición de nuevas tecnologías, la aplicación de los acuerdos internacionales

sobre limitación de emisiones, la evolución de la situación geopolítica global, etc. Para resolver el problema se hacen hipótesis sobre la evolución de las emisiones, que reciben el nombre de escenarios de emisiones. El IPCC ha introducido dos generaciones de escenarios. Los primeros en 1990 y 1992, llamados IS92, que se han venido utilizando hasta muy recientemente. En 2000 publicó la segunda generación, denominados escenarios SRES. Los 40 escenarios están agrupados en cuatro familias que se denominan A1 (incluye, a su vez, varios grupos), A2, B1 y B2, con diferentes características evolutivas, todas ellas posibles, y sin que el IPCC realice sobre ellas ningún tipo de priorización ni juicio de plausibilidad. Es evidente que no se sabe cómo va a ser la realidad, pero se tiene la confianza de que el mundo evolucionará dentro del abanico que

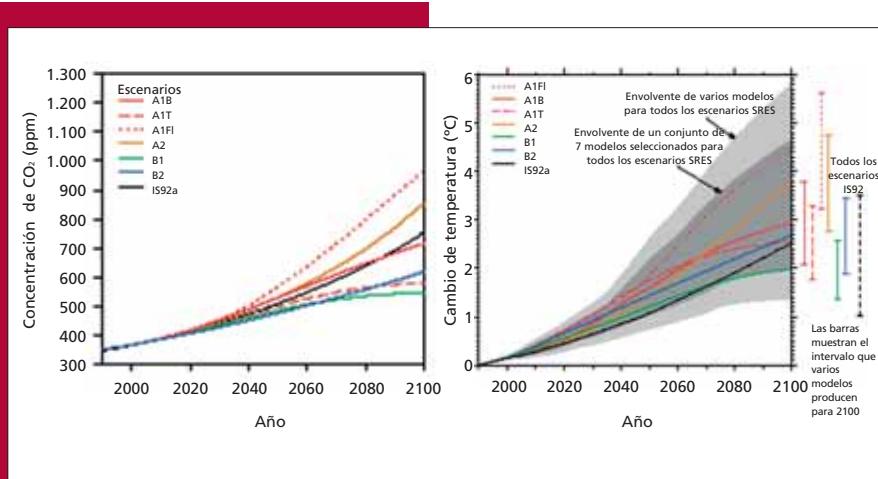


Fig. 7.1. Evolución de la concentración atmosférica de CO₂ (panel izda.) y de la temperatura media del aire (panel dcha.) a lo largo del siglo XXI para diferentes escenarios de emisiones de gases con efecto invernadero.

Fuente: IPCC, 2001.

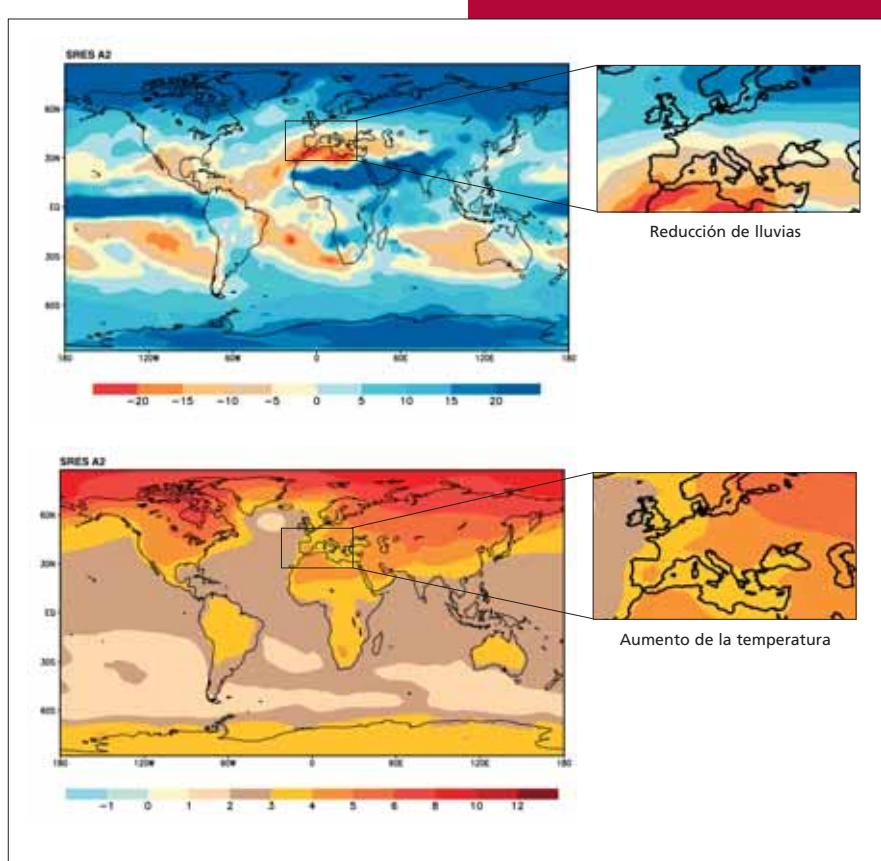
representan estos escenarios de emisiones, aunque los últimos cinco años se sitúan, como se ha indicado en la sección 7.8., fuera de los límites de los escenarios considerados hasta ahora, aunque se espera que los esfuerzos derivados de la ratificación del Protocolo de Kioto vuelvan a encauzar la evolución de concentración de CO₂ atmosférica y temperatura del planeta dentro de los límites de los distintos escenarios. A partir de ellos y de la fijación de carbono por sumideros (vegetación, océanos y suelo), utilizando modelos del ciclo del carbono, se pueden deducir concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. A modo de ejemplo, en la figura 7.1. se dan los valores que corresponden a las familias de escenarios SRES y uno de los antiguos escenarios IS92 para la evolución de la concentración de dióxido de carbono a lo

largo del siglo XXI. Se observa que algunos escenarios llevarían, al final del presente siglo, a doblar la concentración actual o triplicar la previa a la Revolución Industrial.

Para cada uno de los escenarios de emisiones se pueden realizar simulaciones a fin de deducir lo que pudiera ocurrir con el clima. Se acostumbra a hablar entonces de escenarios climáticos o, por diferencia con las condiciones en un momento dado, de escenarios de cambio climático (aunque sería más correcto decir de cambio del clima). En la figura 7.1. se representa la evolución simulada de la temperatura media de la Tierra a lo largo del siglo XXI, utilizando los escenarios anteriores y a partir de modelos sencillos. Los resultados de estas simulaciones indican un calentamiento que podría ir desde 1°C a cerca de 6°C hacia 2100, mucho mayor que el ya observado en el siglo XX y que de producirse sería, probablemente, el más intenso de los últimos 10.000 años. En el margen derecho de la figura 7.1. se pueden ver los intervalos de variación de la temperatura, en las capas bajas de la atmósfera terrestre, para las familias de escenarios SRES y para los antiguos IS92.

A parte de estas simulaciones globales con modelos sencillos, usando modelos de simulación más complejos es posible obtener también la distribución espacial de variables como la temperatura y la precipitación. Se trata de modelos que consideran detalladamente diferentes

partes del sistema climático interaccionando mutuamente. Se deducen así mapas diferentes para los diferentes escenarios de emisiones. En la figura 7.2. se tiene un ejemplo de las distribuciones de temperatura y precipitación para el escenario de emisiones A2 (medio alto) del IPCC. El panel inferior muestra los cambios que se esperan en la distribución de la temperatura para el intervalo 2071-2100 con respecto a la temperatura media del periodo 1961-1990. Hay que hacer notar que los cambios globales anteriormente indicados pueden ser ampliamente superados en algunas partes del planeta. En el panel superior se pueden observar los cambios estimados en la precipitación. Queda claro, igual que ocurría con la temperatura, la muy desigual distribución regional de los cambios en la precipitación. En general, los modelos de simulación indican un aumento de la precipitación para todo el planeta, pero, como se ve en el zoom de la derecha, para la región mediterránea se proyecta una disminución en la cantidad de lluvia caída, lo mismo que ocurre en otras regiones del planeta (notar las zonas en ocre). Para la temperatura en la zona mediterránea (zoom en la parte inferior derecha) la proyección indica aumentos de temperatura superiores a 3°C. Los estudios particularizados para esta región coinciden en indicar que de los



cambios de temperatura y precipitación esperados se puede derivar un clima notablemente más cálido con una mayor incidencia de las sequías al aumentar su duración e intensidad.

Debido al incremento de la temperatura que se puede producir en los niveles bajos de la atmósfera van a aparecer algunos efectos físicos sobre el sistema, que es interesante indicar.

Figura 7.2. Escenarios de cambio climático (cambio de temperatura en °C, panel inferior, cambio en las precipitaciones en mm por día, panel superior) para 2070-2100 referido al periodo 1961-1990. El escenario de emisiones considerado es el A2.

Fuente: elaborado a partir del Informe 2001 del IPCC.

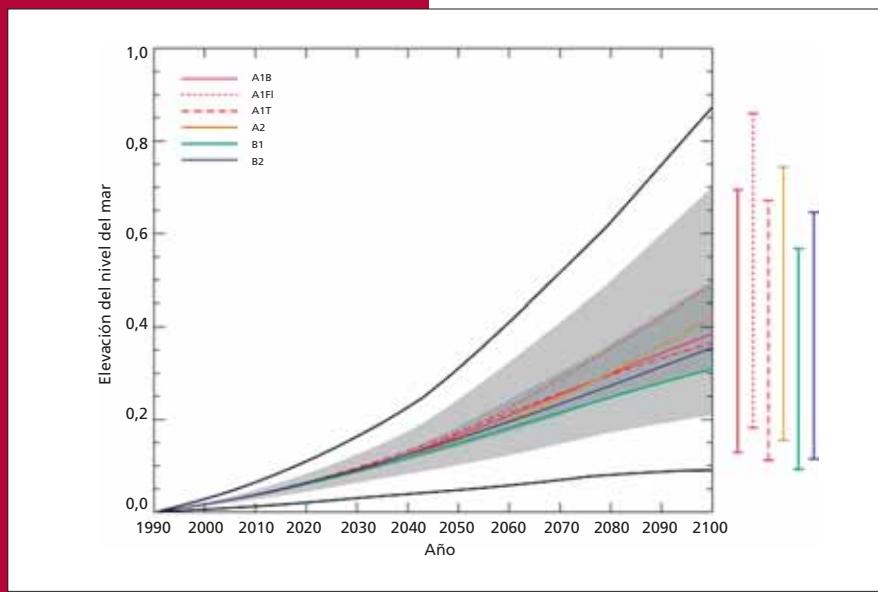


Figura 7.3. Simulaciones del aumento del nivel medio del mar (m) para diferentes escenarios de emisiones de gases con efecto invernadero.

Fuente: elaborado a partir del Informe 2001 del IPCC.

El agua de los océanos se está dilatando y continuará haciéndolo, y parte de los hielos continentales se van a fundir a un ritmo mayor del actual. Estos dos efectos modifican el nivel medio del mar, dando lugar a una elevación que, como es evidente, depende del escenario de emisiones considerado. En la figura 7.3. se presenta la evolución del aumento del nivel medio del mar para diferentes escenarios SRES, en el supuesto que los demás factores que influyen en el nivel del mar no cambien (se debe hacer notar que la fusión de hielo flotando sobre los océanos no produce variación del nivel medio del mar). Se estima que se puede producir una elevación del nivel entre 0,09 m y 0,88 m desde 1990 a 2100.

Igual que ocurría con la temperatura y la precipitación, a escala regional existirían grandes diferencias con respecto a lo indicado para la media mundial, debido a los múltiples factores que intervienen en el cambio del nivel del mar. Por esta razón es prácticamente imposible, hoy por hoy, llegar a simular lo que pueda ocurrir con el nivel del mar en un punto de costa concreto de un mar concreto, aunque sí avanzar una tendencia generalizada al aumento del nivel del mar, que continúa su incremento durante el siglo XX.

7.2. Cambio global y ecosistemas

El cambio climático es sólo uno de los motores del cambio global y la influencia que las actividades humanas tienen y tendrán sobre los sistemas naturales da lugar a todo un abanico de posibles escenarios de cambio global. Para comprender estos posibles escenarios es preciso analizar primero el impacto que ya han tenido y que previsiblemente tendrán los distintos motores de cambio sobre los diversos ecosistemas del planeta y las especies que los componen.

Durante los últimos cincuenta años, los seres humanos han alterado la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas del mundo de manera más rápida y generalizada que en ningún otro periodo de la historia de la humanidad.

Los ecosistemas se ven particularmente afectados por la pesca a gran escala, el empleo de agua dulce y la agricultura. Por ejemplo, entre 1950 y 1970 se convirtieron más tierras en tierras de cultivo que entre 1700 y 1850. Estos cambios se han llevado a cabo sobre todo para satisfacer la demanda creciente de alimentos, agua dulce, madera, fibra y combustible. Entre 1960 y 2000, la demanda de servicios de los ecosistemas creció significativamente como resultado de que la actividad económica mundial se multiplicó por seis. En este mismo periodo la extracción de agua de ríos y lagos se ha duplicado y el tiempo de retorno del agua dulce al mar se ha triplicado. Aunque a nivel global los seres humanos emplean el 10% del agua dulce disponible, en extensas zonas del planeta como el Próximo Oriente y el norte de África el consumo de agua dulce es del 120%, agotándose a ritmo creciente las reservas subterráneas. La sobrepesca ha diezmado la biomasa de poblaciones de peces en el océano, que se encuentran, en su inmensa mayoría sobreexplotadas o ya agotadas, y algunas especies de vertebrados marinos se extinguieron por la caza tras la colonización humana de islas en el Caribe y en áreas de Australia y el SE asiático. El vertido de nitrógeno, fósforo y materia orgánica a los ecosistemas acuáticos y la costa ha aumentado notablemente, causando un problema de eutrofización, con la pérdida de calidad de aguas y sedimentos.

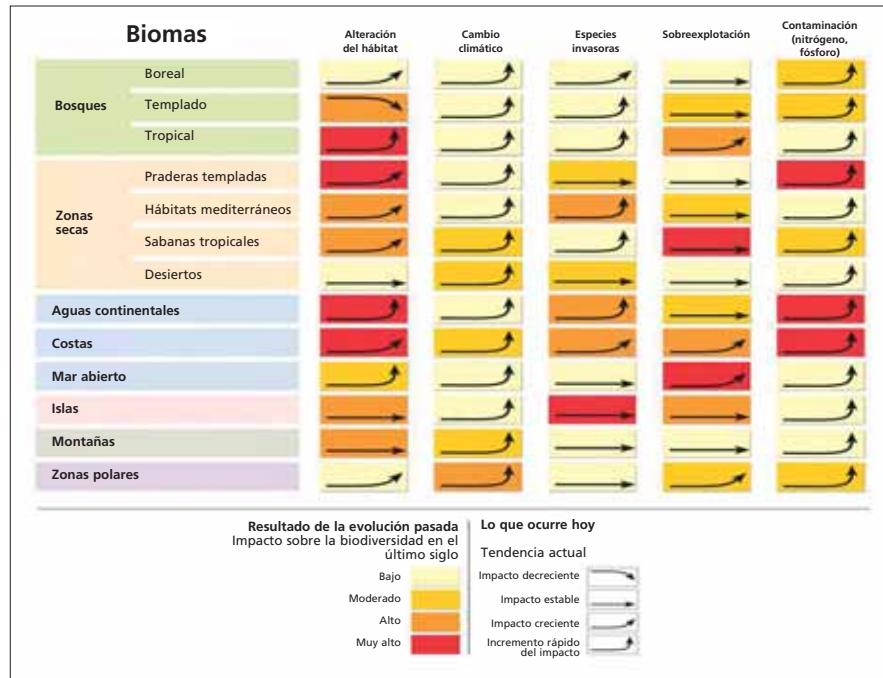


Fig. 7.4. Impacto de los cinco motores principales de cambio global sobre la biodiversidad y tendencia actual de cada motor en los principales biomas terrestres.

Fuente: Millenium Assessment, 2005.

El resultado de todo esto ha sido una pérdida sustancial y en gran medida irreversible de la diversidad de la vida en la Tierra, tanto por una erosión del número de especies, particularmente las especies raras o menos abundantes, en las comunidades de la mayor parte de ecosistemas como por la extinción de un número importante de especies, más de 800, durante los últimos 500 años, incluida una docena de especies marinas. Las tasas de pérdida de biodiversidad y erosión de especies parecen seguir

acelerándose a pesar de los compromisos adquiridos por la Convención para la Diversidad Biológica de Naciones Unidas. A la intervención directa del ser humano en los sistemas naturales hay que sumar los efectos indirectos de las actividades humanas que repercuten en el clima y en los diversos motores del cambio global. De hecho, los cinco motores directos del cambio global están actuando cada vez de forma más intensa en la mayoría de los biomas del planeta (figura 7.4.).

Globalmente, la tasa de conversión de los ecosistemas es muy alta aunque la tendencia de esta tasa es a disminuir debido a que los ecosistemas de extensas regiones ya han sido convertidos o alterados (por ejemplo, dos tercios de la superficie de los bosques mediterráneos ya fueron convertidos principalmente en tierras de cultivo hacia 1990) y a que el incremento de la productividad de los cultivos ha disminuido la necesidad de expansión de terrenos dedicados a la agricultura. La extensión de las zonas dedicadas a cultivo se ha estabilizado en América del Norte y disminuye en Europa y China. Los ecosistemas más afectados por el cambio global son los ecosistemas acuáticos (tanto marinos como continentales), los bosques templados caducífolios, las praderas templadas y los bosques mediterráneos y tropicales. Las zonas de estuarios y deltas están en retroceso por el declive en el aporte de sedimentos el cual ha disminuido en un 30% a escala global. Distintas actividades humanas causan la desaparición de hábitats costeros con un papel clave en el mantenimiento de la biodiversidad marina, como bosques de manglar, arrecifes de coral, marismas y praderas submarinas, que desaparecen a un ritmo entre 2 y 10 veces superior a la tasa de pérdida del bosque tropical, que desparece a un ritmo de un 0,5% anual. Sólo las zonas de tundra y los bosques boreales apenas han

experimentado cambios y conversiones apreciables durante el último siglo. Sin embargo, los ecosistemas de estas regiones polares y subpolares han comenzado a verse muy afectadas por el cambio climático y se cuentan entre los más vulnerables al calentamiento global (Starfield y Chapin, 1996).

Los impactos del cambio global sobre los ecosistemas afectan eventualmente los servicios que éstos prestan a la sociedad, que habitualmente los considera como servicios permanentes que no se incorporan en análisis de coste-beneficio, pero que tienen conjuntamente un valor económico colosal, similar al PIB del conjunto de las naciones. Estos servicios incluyen, entre otros, la provisión de alimento y materias primas, como la madera, y fármacos o recursos biotecnológicos, la regulación de la composición atmosférica (e.g. oxígeno, CO₂), la regulación climática (a través de la evapotranspiración, modificación del albedo y regulación de gases), la atenuación de perturbaciones (como crecidas, tormentas, temporales, huracanes, etc.), soporte para el ocio (e.g. ecoturismo, buceo), y actividades culturales, y servicios a la agricultura como la polinización de cultivos y el control de plagas.

Cambio global y biodiversidad

La biodiversidad refleja el número, la variedad y la variabilidad de seres vivos

en un ecosistema. Los cambios en la biodiversidad en un lugar determinado afectan a la capacidad del ecosistema para prestar servicios y para recuperarse de perturbaciones. Hay dos aspectos simples pero cruciales que deben considerarse al abordar el cambio global y los ecosistemas: i) cada especie se ve afectada de forma diferente por una misma intensidad de cambio ambiental, ii) las especies que componen un ecosistema interactúan entre sí de forma que existe un complejo entramado de relaciones que van desde la dependencia a la competencia pasando por la simbiosis o facilitación mutua de la existencia, como en el caso de los polinizadores. Teniendo en cuenta estos dos aspectos es fácil comprender que las consecuencias del cambio global sobre todo el ecosistema son muy complejas. El cambio global opera sobre las especies pero afecta a la intensidad y naturaleza de las interacciones entre ellas. Algo tan simple como la alteración en la fenología o ritmos estacionales de plantas y animales como consecuencia de cambios en el clima hace que se pierdan muchas sincronizaciones entre especies, de forma que una planta puede no encontrar a tiempo al polinizador o dispersor de sus frutos si adelanta su ciclo con el calentamiento, o muchos animales pueden no encontrar su alimento o su especie hospedadora si responden de forma

muy marcada al clima (Peñuelas y Filella, 2001). La pérdida de biodiversidad es uno de los efectos más importantes del cambio global sobre los ecosistemas. Las Naciones Unidas indican que la tasa actual de extinciones es entre cien y mil veces superior a la tasa de fondo esperable por causas naturales (figura 7.5.). Hay aproximadamente cien extinciones bien documentadas de especies de aves, mamíferos y anfibios en los cien últimos años, lo cual es entre cincuenta y quinientas veces más de lo que cabría esperar a partir de estimas realizadas sobre el registro fósil. Si bien la extinción de las especies es algo natural (las especies actuales representan sólo un 2-4% de las que ha albergado este planeta a lo largo de su historia), existen numerosas evidencias que apuntan a las actividades humanas como causa directa o indirecta del elevado ritmo de extinciones que tiene lugar en la actualidad.

Las introducciones de especies exóticas por la actividad humana ha sido uno de los procesos más importantes en la pérdida de especies. Muchas especies exóticas se acomodan en los ecosistemas de acogida sin desplazar a las especies locales, pero otras se comportan de forma invasiva, desplazando a las especies autóctonas. Así, la introducción del zorro y el gato en el continente australiano diezmó los pequeños marsupiales, muchos de ellos

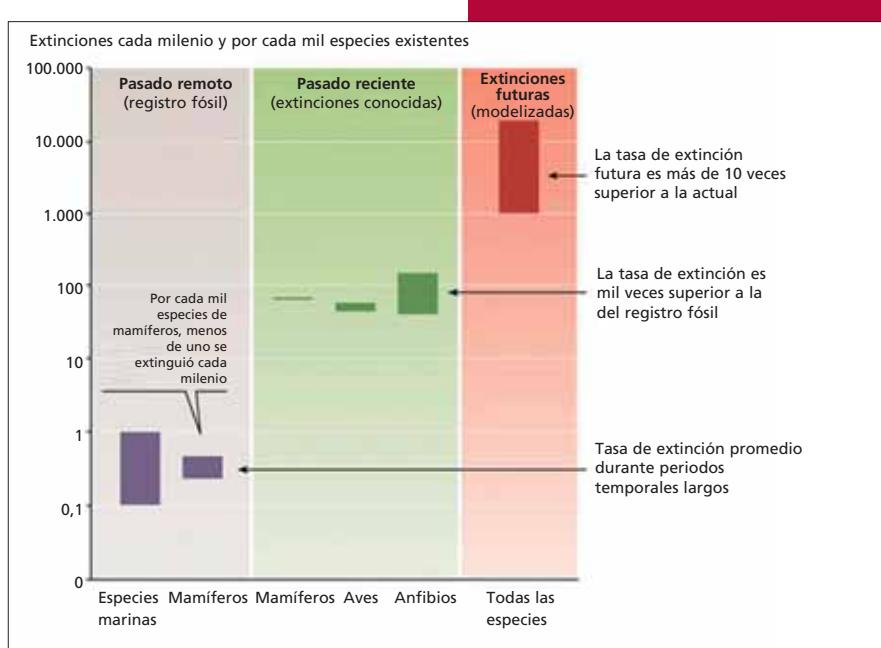


Fig. 7.5. Tasa de extinción de especies en tiempos remotos, en épocas recientes y en el futuro.

Fuente: Millennium Assessment, 2005.

ya extintos y otros en grave peligro de extinción. Los ambientes insulares, que muestran gran cantidad de endemismos, son particularmente vulnerables a la introducción de especies invasoras. Así, las islas del archipiélago Hawái han perdido un gran número de sus especies tras la introducción de especies exóticas tras su colonización. Los impactos de introducción de elementos exóticos al ecosistema pueden operar incluso dentro de especies, cuando desaparecen las barreras que aislan poblaciones que han podido desarrollar parásitos específicos. Un ejemplo muy claro de esto es la mortalidad masiva de pueblos



Caimán en Silver Springs (Florida, EE.UU.).

Fotografía: C. M. Duarte.

en América y Oceanía, víctimas de enfermedades para las que no tenían defensas tras el contacto con los colonos occidentales. Las especies invasoras afectan la biodiversidad local, desplazando muchas especies autóctonas. Su comportamiento agresivo se explica frecuentemente por la ausencia de predadores y parásitos en las nuevas áreas donde se han introducido. En algunos casos se han intentado combatir introduciendo predadores, pero estas soluciones se han de evaluar cuidadosamente, pues es posible que los predadores también actúen sobre otras especies en su nuevo hábitat. La actividad humana ha introducido, por ejemplo, más de 2.000 especies de plantas a los EE.UU. y Australia, y unas 800 en Europa (Vitousek *et al.*, 2003),

y se ha registrado la llegada de más de 500 especies exóticas en el mar Mediterráneo, algunas de ellas (e.g. el alga verde *Caulerpa taxifolia*) con un crecimiento agresivo. En algunos casos las especies invasoras pueden tener efectos positivos sobre el ecosistema, así, por ejemplo, la presencia del mejillón cebra, que invade ríos y estuarios en Europa y Norteamérica, puede atenuar los efectos de la eutrofización sobre estos ecosistemas, aunque también afecta negativamente la biodiversidad local.

Efectos de los motores de cambio global en los ecosistemas terrestres

La fragmentación de hábitat debida a carreteras y vías de comunicación lleva a la extinción de especies que requieren mucho espacio continuo para sus ciclos vitales y el empobrecimiento genético de poblaciones aisladas y fragmentadas ha sido documentado para muchas especies animales y vegetales. El calentamiento global lleva a muchas especies a migrar en altitud y latitud, pero esta migración está muy restringida por las construcciones humanas y el uso del territorio, lo cual acrecienta el problema de las extinciones locales. En los ecosistemas de montaña, ricos en especies endémicas, no es posible la migración en altura, por lo que el impacto del calentamiento sobre ellos es desproporcionadamente alto. En

general resulta difícil separar los efectos sobre la biodiversidad y los procesos ecosistémicos debidos a cada uno de los varios motores de cambio global. En el caso de los ecosistemas terrestres de nuestras latitudes, el cambio climático y los cambios de uso del territorio operan simultáneamente de forma que el efecto observado es rara vez atribuible en exclusividad a uno de ellos y la estima de la contribución relativa a los cambios observados es sólo aproximada.

Todo indica a que de aquí a 2100 el cambio climático se irá convirtiendo en el principal motor directo de cambio global, determinando cada vez en mayor medida la pérdida de biodiversidad y la alteración del funcionamiento y de los servicios de los ecosistemas terrestres a escala mundial. Aunque es posible que algunos servicios de los ecosistemas en algunas regiones se beneficien al principio de los aumentos de temperatura o precipitación previstos, se espera a escala mundial un importante impacto negativo neto en estos servicios una vez que la temperatura supere en 2°C los niveles preindustriales o que el calentamiento crezca más de 0,2°C por década. El cambio climático ha afectado a los ecosistemas terrestres europeos principalmente en relación a la fenología (ritmos estacionales de los ciclos vitales de las especies) y a la distribución de las especies animales y vegetales. Numerosas especies vegetales

han adelantado la producción de hojas, flores y frutos, y un buen número de insectos han sido observados en fechas más tempranas (EEA 2004). El calentamiento global ha incrementado en 10 días la duración promedio de la estación de crecimiento entre 1962 y 1995. En apoyo de esta tendencia, la medida del veredor de los ecosistemas mediante imágenes de satélite (una estimación comprobada de la productividad vegetal) ha incrementado en un 12% durante este periodo. No obstante, hay que precisar que este incremento en la duración de la estación de crecimiento no implicaría un incremento real del crecimiento y productividad en los ecosistemas mediterráneos, ya que el calentamiento iría aparejado de una menor disponibilidad de agua (Valladares *et al.*, 2004) y un aumento de las pérdidas por respiración. La migración de diversas especies vegetales termófilas hacia el norte de Europa ha incrementado la biodiversidad en estas zonas, pero la biodiversidad ha disminuido o no ha variado en el resto del continente. La combinación de calentamiento global y cambios de uso ha dado lugar al ascenso bien documentado en altitud de hayedos en el Montseny y arbustos y mariposas en la sierra de Guadarrama (Valladares, 2006). Muchas especies endémicas de alta montaña se encuentran amenazadas por la migración altitudinal de arbustos

y especies más competitivos propios de zonas bajas y por el hecho de que las temperaturas previstas para las próximas décadas están fuera de sus márgenes de tolerancia.

En el periodo 1990-1998 la biosfera terrestre de Europa ha sido un sumidero neto de carbono, compensando en parte las emisiones antropogénicas de CO₂ y contribuyendo a la atenuación del cambio climático (EEA 2004). Este balance positivo en la captura de carbono, que se ha mantenido durante los últimos 20 años, es improbable que se mantenga en un futuro cercano (o al menos no en los niveles actuales) ya que el incremento de temperatura reducirá la capacidad de secuestro de CO₂ de los ecosistemas europeos, al incrementar la actividad respiratoria. Esta captura de carbono se puede incrementar mediante planes de reforestación y una política agraria adecuada, pero este incremento será pequeño en relación a los objetivos establecidos en el Protocolo de Kioto.

La supervivencia de las aves que permanecen durante el invierno en Europa ha aumentado debido a la atenuación de las temperaturas invernales. Esta supervivencia seguirá incrementando en paralelo al incremento de las temperaturas previsto, pero el efecto neto de esta mayor supervivencia sobre las poblaciones de aves es incierto. Se han observado cambios significativos en las

fechas de llegada y salida de numerosas especies de aves migratorias. En varios estudios realizados en la Península Ibérica, sin embargo, se ha visto que el cambio climático ha generado una disminución del éxito reproductor de aves como el papamoscas cerrojillo, debido al desacoplamiento del calendario de llegadas con los ritmos de la vegetación y de los invertebrados que le sirven de sustento en los ecosistemas receptores españoles (Sanz *et al.*, 2003).

Un aspecto importante del cambio global en nuestras latitudes es la creciente importancia de los incendios. Las futuras condiciones más cálidas y áridas, junto con el incremento de biomasa y su inflamabilidad debidas al abandono del campo aumentan la frecuencia e intensidad de los incendios forestales. Los catastróficos incendios sufridos en España y Portugal durante los veranos de 2003, 2005 y 2006 apoyan esta tendencia.

El aumento de temperatura tiene numerosos efectos directos sobre la actividad de los organismos vivos. Uno ambientalmente importante es el aumento exponencial de la emisión biogénica de compuestos orgánicos volátiles (VOC) por parte de las plantas. Estas emisiones afectan a la química atmosférica, no solamente con respecto al ciclo del carbono y a la formación de aerosoles, sino por su papel en el equilibrio oxidativo de la atmósfera. Nuestra comprensión de las

causas de las emisiones de VOC y de sus consecuencias en un mundo cambiante es aún fragmentaria (Peñuelas, 2004).

Los ciclos de vida de organismos que no controlan su temperatura corporal, como los invertebrados, los anfibios y los reptiles se ven directamente afectados por el calentamiento global. Numerosos estudios indican fracasos en la reproducción de anfibios y reptiles asociados con el calentamiento y los cambios en el régimen de precipitaciones. Estos fracasos en la reproducción de anfibios y reptiles se ven afectados por un cúmulo de circunstancias asociadas con sus rasgos biológicos (e.g. producción de huevos de cáscara blanda, permeables, sin cuidado paterno; determinación del sexo por la temperatura durante el desarrollo embrionario) y por la combinación de diversos motores de cambio relacionados con la alteración de los hábitats.

El cambio global en el medio marino
El cambio global también afecta de pleno a los ecosistemas marinos. A diferencia de la Tierra donde los animales son producidos en instalaciones ganaderas, la mayor parte de la provisión de alimento a partir del océano se hace mediante la explotación de poblaciones salvajes. La intensificación de la actividad pesquera a lo largo del siglo XX ha diezmado los

stocks pesqueros, causando una disminución de la biomasa pesquera que se estima en un 90%. Esto ha supuesto un cambio fundamental en la organización de las cadenas tróficas marinas, cuyos niveles superiores han sido cercenados, cuyas consecuencias no se conocen en detalle, pero parecen incluir la proliferación global de medusas, al verse reducidos sus predadores (tortugas, pez luna, etc.) y sus competidores (otros peces). Además, muchas medusas se alimentan de larvas de peces, con lo que su proliferación puede dificultar la recuperación de las poblaciones de peces. Otra consecuencia parece ser las proliferaciones algales en ecosistemas costeros, incluidos los arrecifes de coral, ya que muchas de las especies de peces que han sido diezmadas son herbívoras. Los hábitats costeros, como arrecifes de coral, manglares, marismas, campos de microalgas y praderas submarinas han experimentado, como se ha comentado más arriba, importantes pérdidas de extensión, que continúan amenazándolos, con la pérdida asociada de la biodiversidad que albergan.

El aumento de la temperatura del océano ha propiciado cambios en los rangos de distribución de especies, mucho más rápidos que los que se observan en ecosistemas terrestres, debido al carácter abierto del sistema oceánico y la gran movilidad de las especies marinas. Estos cambios han

sido particularmente importantes en el Mediterráneo, que —por su carácter semi-cerrado amplifica la señal térmica— con la entrada de más de 500 especies exóticas, la mayor parte de ellas de origen tropical. Mientras que muchas de ellas se asientan en el ecosistema sin causar problemas aparentes, algunas especies se comportan de forma agresiva desplazando a las especies autóctonas. Destaca, por ejemplo, el alga verde *Caulerpa taxifolia*, originaria de Australia e introducida accidentalmente en el Mediterráneo hace dos décadas, que ha causado problemas importantes en este mar y que se han reproducido tras su llegada, quince años más tarde, en las costas de California.

El aumento de temperatura en el océano está causando cambios importantes en el ecosistema más allá de los cambios en rangos de especies. Las altas temperaturas aumentan la tasa metabólica de los organismos, con un aumento de la respiración que, unido a la menor solubilidad del oxígeno en aguas más cálidas, genera problemas de hipoxia en el océano, agravados porque el proceso de eutrofización (exceso de aporte de nitrógeno, fósforo y materia orgánica) genera un exceso de producción de materia orgánica que, al descomponerse, consume oxígeno. El número de áreas hipóxicas en el océano está creciendo rápidamente y se calcula que podría duplicarse su extensión con incrementos de temperatura del mar de



entre 2 y 4°C. La hipoxia causa la mortalidad de las especies animales, particularmente de peces y crustáceos, que son las más vulnerables. El aumento de temperatura incrementa también la mortalidad de células de fitoplancton, que liberan sus contenidos celulares al medio, estimulando la actividad bacteriana y restando efectividad a la bomba biológica de secuestro de CO₂. De hecho, el aumento de entre 2 y 4°C en temperatura del océano incrementa la respiración más allá de lo que aumenta la producción primaria haciendo bascular al plancton oceánico de actuar como un sumidero a una fuente de CO₂, agravando el calentamiento global. El aumento de temperatura también causa la mortalidad de

La playa Shell Beach (Shark Bay, Australia occidental) está formada por más de 180 km de acúmulos de pequeñas conchas.
Fotografía: C. M. Duarte.



Acúmulo de hojarasca de praderas submarinas en Two Peoples Bay (Esperance, Australia Occidental).

Fotografía: C. M. Duarte.

a la reducción de la extensión del hielo marino, más notable en el Ártico que en la Antártica. La reducción del hielo marino afecta la reproducción de muchas especies que dependen del hielo, como focas y el krill antártico —el animal más abundante del planeta— que se reproduce asociado al hielo. La disminución de la extensión de hielo antártico ha llevado a la reducción, por un factor de más de 10, de la abundancia de krill, que es el nodo central de la cadena trófica antártica, con fuertes, pero pobemente conocidas, repercusiones en toda la cadena trófica. En el Ártico se teme por especies como el oso polar, que dependen del hielo marino para cazar. La fusión de los hielos causa, además, una rápida liberación de los materiales, como contaminantes, acumulados en ellos, lo que puede generar un estrés adicional sobre las especies polares.

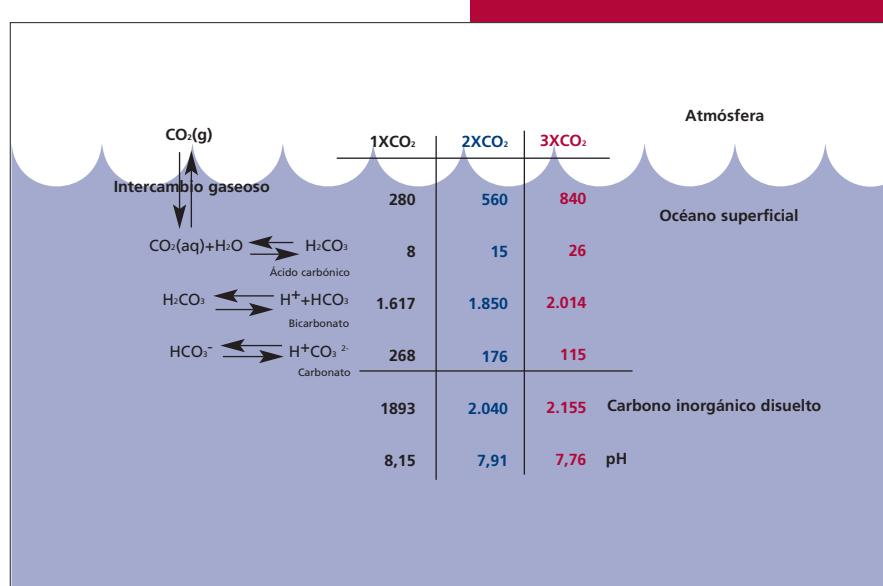
Las amenazas del cambio global se extienden más allá de los impactos de la temperatura. La figura 7.6. muestra cómo los diferentes escenarios de concentraciones de CO₂ atmosféricos

organismos que generan hábitat, como los arrecifes de coral y las praderas de angiospermas submarinas. Ambos tipos de organismos parecen tener un umbral térmico de 29°C por encima del cual experimentan mortalidad masiva, como la constatada en los episodios de blanqueamiento del coral y el aumento de la mortalidad de las praderas de *Posidonia oceánica* del Mediterráneo tras episodios de calentamiento que llevaron la temperatura del mar por encima del umbral de 29°C. Dado que los modelos

climáticos predicen que los episodios de calentamiento del océano por encima de 29°C se van a incrementar, en frecuencia y duración, todo apunta a una presión progresiva sobre los ecosistemas más sensibles a la temperatura, como los arrecifes de coral y las praderas submarinas, que se encontrarán entre los más afectados por el cambio global.

Los ecosistemas polares están experimentando cambios particularmente vertiginosos asociados

dan lugar a distintas concentraciones de carbono inorgánico disuelto en el mar y afectan al pH del agua marina., de forma que el incremento de CO₂ causa la acidificación del océano. Las concentraciones de CO₂ de origen antropogénico crecen en la capa superficial del mar y en los primeros 700 metros a una tasa acorde al incremento que anualmente acontecen en la atmósfera, teniendo en cuenta la solubilidad del CO₂ en agua de mar. En capas más profundas los valores son inferiores. Para aguas de superficie en equilibrio con la atmósfera, es posible calcular las diferencias en todas las especies del sistema de CO₂, con aumento de CO₂ disuelto, ácido carbónico y bicarbonato, y descenso en la concentración de ión carbonato y pH. El impacto directo de este efecto es que el agua se vuelve más ácida. La acidez del océano podría ser ahora la más alta registrada en los últimos cinco millones de años. Y un efecto inmediato de esto es que ha cambiado el estado de saturación de los océanos respecto a las partículas de carbonato cálcico. Esto dificulta la vida de organismos que utilizan el carbonato cálcico para fabricar sus conchas. A profundidades en las que las concentraciones de carbonato cálcico caen por debajo de un cierto límite las conchas de algunos organismos empiezan a disolverse. El fenómeno va a ir en aumento, primero en las aguas



frías de las latitudes altas y después, poco a poco, en las ecuatoriales (Feely *et al.*, 2004). Algunos ejemplos de este descenso de pH es la reducción en la calcificación de cocolitoforales (Riebesell *et al.*, 2000), el efecto del blanqueado de arrecifes de coral, y la deformación de las larvas de erizo. Esta especie es usada para determinar el grado de contaminación en aguas costeras. Según las estimaciones, si se mantiene la tendencia actual de crecimiento de las emisiones de CO₂, en el caso del plancton, las tasas de calcificación pueden caer hasta de un 25% a un 45% a niveles CO₂ equivalentes a 700-800 ppm, que se alcanzarán en un siglo.

Figura 7.6. Cambios en las concentraciones de las distintas formas del carbono inorgánico disuelto (DIC) y del pH del agua de mar como consecuencia de cambios en las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera. Se presentan datos para tres niveles de dióxido de carbono atmosférico: nivel actual , doble y triple concentración.

Fuente: IPCC, 2001.



Estromatolitos, las formas más antiguas de vida conocida, en Hamelin Pool (Shark Bay, Australia Occidental).

Fotografía: C. M. Duarte.

Ríos y colaboradores (2001) calcularon para el Atlántico una tasa de incorporación de carbono antropogénico integrada hasta 2.000 metros de profundidad de $0,95 \text{ mol m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Teniendo en cuenta la zona atlántica entre Galicia y País Vasco correspondiente a las 200 millas se obtiene aproximadamente una captación anual de $3.8 \cdot 10^{12} \text{ gC}$. Considerando las aguas atlánticas que rodean la Península Ibérica, la captación sería aproximadamente de

$7.6 \cdot 10^{12} \text{ gC/año}$. El incremento de CO₂ en nuestras aguas superficiales implica un descenso del pH de 0,15 y esto tiene unas consecuencias en la biodiversidad de nuestros mares que empiezan a ser detectadas en algunos sistemas bien controlados. Estos cambios de pH tienen lugar simultáneamente con el calentamiento del agua marina, lo cual afecta a su productividad. Trabajos realizados por un grupo de investigadores del Instituto de Investigaciones Marinas del CSIC muestran una tendencia al calentamiento y pérdidas de productividad en algunos de nuestros mares regionales. Los datos de temperatura y clorofila media para la región de Golfo de Vizcaya y Finisterre (40-50°N y 4 a 20°W) obtenidos a partir de sensores a bordo de satélites procesados por el Grupo de Oceanografía Espacial del CSIC en Cádiz muestran un significativo descenso de los niveles de clorofila durante los últimos siete años y un incremento de 0,4°C en la última década.

La dimensión temporal del cambio global

Muchos de los impactos, tanto positivos como negativos, que los seres humanos tienen sobre los ecosistemas tardan en manifestarse (figura 7.7.). Por ejemplo, el empleo de fuentes de agua subterránea puede superar la capacidad

de recarga durante algún tiempo hasta que comiencen a aumentar sustancialmente los costes de extracción. En general, se gestionan los ecosistemas de forma que se priman los beneficios a corto plazo sin tener en cuenta los costes a largo plazo. Los distintos servicios de los ecosistemas tienden a cambiar en escalas de tiempo diferentes. Por ejemplo, los servicios de apoyo (como la formación de suelo o el crecimiento vegetal) y los servicios de regulación (como la regulación del agua y de enfermedades) tienden a cambiar en escalas de tiempo mucho mayores que los servicios de provisión. En consecuencia, suelen pasarse por alto los impactos en aquellos servicios que cambian más lentamente.

El grado de inercia de los distintos motores de cambio en los ecosistemas difiere considerablemente. Algunos motores de cambio, como la sobreexplotación de ciertas especies, presentan desfases temporales más bien cortos y el impacto del motor de cambio puede ser reducido o detenido rápidamente. La carga de nutrientes y especialmente el cambio climático presentan desfases mucho mayores de forma que los efectos de tales motores de cambio no pueden reducirse en años o décadas. La extinción de especies debido a la pérdida de hábitat también presenta un gran desfase temporal. Incluso si se detuviese ahora la pérdida de hábitat, se tardarían cientos de años

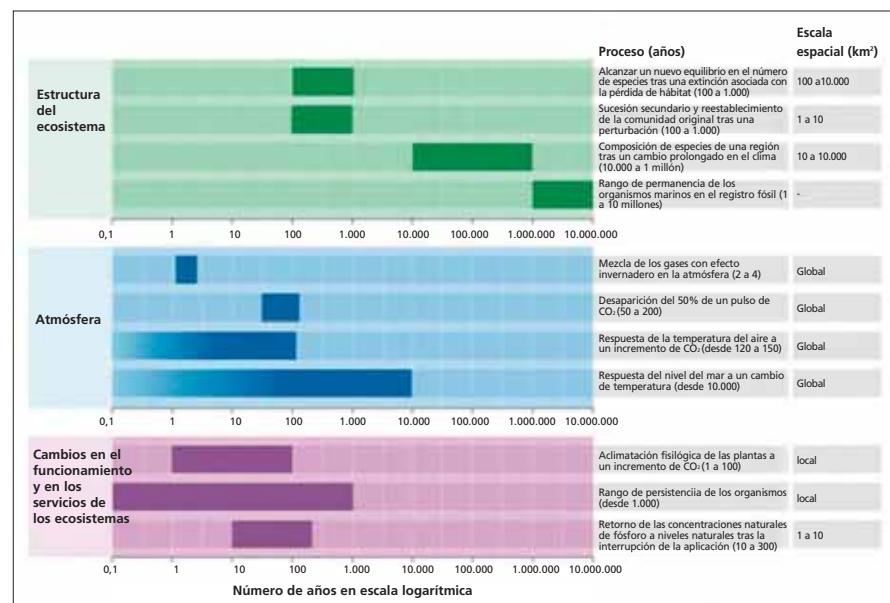


Figura 7.7. Escala temporal y espacial de procesos ecosistémicos y atmosféricos afectados por el cambio global.

Fuente: Millennium Assessment, 2005.

en conseguir que el nuevo número de especies alcance un nuevo equilibrio más bajo, en respuesta a los cambios de hábitat que ocurrieron en los últimos años.

Para algunas especies este proceso puede ser rápido, pero para otras, como es el caso de los árboles, puede llevar siglos o milenios. Tal es el caso también de las praderas submarinas de *Posidonia oceanica* en el Mediterráneo. En consecuencia, reducir el ritmo de pérdida de hábitats sólo tendría un pequeño impacto en las tasas de extinción del próximo medio siglo, pero

conduciría a beneficios sustanciales a largo plazo. Los desfases temporales entre la reducción de los hábitats y la extinción ofrecen una oportunidad para restaurar hábitats y rescatar especies de la extinción.

La mayoría de los cambios en los ecosistemas y en sus servicios son graduales, de forma que, al menos en principio, son detectables y predecibles. Sin embargo, existen muchos ejemplos de cambios no lineales y en ocasiones abruptos. Un cambio puede ser gradual hasta que una presión determinada en el ecosistema alcanza un umbral a partir



Diversidad de orquídeas en el Orchid Garden, Singapur.

Fotografía: C. M. Duarte.

del cual ocurren cambios rápidos, que alteran de forma cualitativa el funcionamiento del ecosistema, desembocando en un nuevo estado. Las capacidades para predecir cambios no lineales están mejorando; sin embargo, la ciencia aún no es capaz de predecir los umbrales exactos en la mayoría de los casos. Algunos ejemplos de cambios ambientales abruptos importantes son los siguientes:

- *Cambio climático regional.* La vegetación de una región influye en el clima ya que afecta a la cantidad de luz solar que se refleja, a la cantidad de agua que liberan las plantas en la atmósfera y a la velocidad del viento y de la erosión. En la región del Sahel, la cobertura vegetal está fuertemente relacionada con la cantidad de precipitaciones. Cuando hay vegetación, el agua de lluvia se recicla rápidamente, aumentando en general el nivel de precipitaciones y conduciendo, a su vez, a una mayor densidad de vegetación. La degradación de la tierra reduce el reciclaje de agua y puede haber contribuido a la reducción de las precipitaciones en la región del Sahel durante los últimos 30 años.
- *La introducción y la pérdida de especies.* La introducción de especies exóticas (e.g., conejo en Australia, mejillón cebra en zonas de agua dulce, el ctenóforo gelacionoso *Mnemiopsis leidyi* en el Mar Negro) puede desencadenar alteraciones profundas y rápidas en el funcionamiento de los ecosistemas receptores. Como ejemplo concreto de los efectos no lineales de una extinción local, la pérdida de las nutrias marinas en numerosos ecosistemas costeros de la costa pacífica de Norteamérica debido a la caza condujo a un desarrollo explosivo de las poblaciones de erizos de mar (especie que sirve de alimento para las nutrias) que a su vez originó la pérdida de los bosques de las algas kelp (que sirven de alimento para los erizos de mar).
- *Cambios en las especies dominantes en los ecosistemas.* Por ejemplo, algunos ecosistemas coralinos han pasado súbitamente de ser dominados por coral a ser dominados por algas. En los sistemas coralinos de Jamaica, siglos de pesca intensiva de especies devoradoras de algas contribuyeron a un cambio repentino a corales con poca diversidad, dominados por las algas y con muy poca capacidad para sustentar la vida de caladeros para la pesca. Cambios similares, de dominio de angispermas marinas a microalgas oportunistas se han constatado también en numerosas áreas costeras.
- *Explosiones de algas y muerte de peces por la carga excesiva de nutrientes (eutrofización) de ecosistemas costeros y de agua dulce.* Una vez que se alcanza cierto umbral en la carga de nutrientes, los cambios son abruptos y generalizados, causando explosiones en

el crecimiento de algas que puede matar la fauna acuática al aparecer zonas con poco oxígeno.

- *Colapso de pesquerías.* Al aumentar las capturas se puede sobrepasar un umbral a partir del cual no quedan suficientes peces adultos para producir la suficiente descendencia que aguante el nivel de capturas. Por ejemplo, las reservas atlánticas de bacalao procedentes de la costa este de Terranova colapsaron en 1992, causando el cierre forzado del caladero, que no se ha recuperado tras casi 15 años de moratoria. Por el contrario, la pesquería de arenque del Mar del Norte se recuperó tras el obligado cierre de cuatro años a finales de los años 70 por el colapso debido a la sobreexplotación.

- *Enfermedades contagiosas.* Una epidemia se propaga si se sobrepasa un cierto umbral de transmisión: una media de contagio de al menos una persona por cada persona infectada. Cuando las personas viven muy cerca unas de otras y en contacto con animales infectados, las epidemias pueden propagarse deprisa gracias a la interconexión y gran movilidad de la población mundial. La aparición casi instantánea del SARS (síndrome respiratorio agudo severo) en diferentes partes del mundo y el caso de la gripe aviar son ejemplos de este potencial en el que diversos motores de cambio global confluyen incrementando el riesgo de pandemias.

7.3. Escenarios de cambio global

Con el conocimiento de los cambios ambientales acontecidos y con la integración de los principales aspectos socioculturales, la “Evaluación de los Ecosistemas del Milenio” (Millenium Ecosystem Assesment, www.maweb.org) establece cuatro grandes escenarios generales, que no se plantean como predicciones sino que pretenden explorar aspectos poco predecibles de los cambios en los motores de cambio global y en los servicios de los ecosistemas. Ningún escenario representa la continuidad de la situación actual, aunque todos parten de la situación y tendencias actuales. Los diferentes escenarios suponen un aumento de la globalización o un aumento de la regionalización, así como una actitud de reacción, donde sólo se afrontan los problemas cuando se convierten en algo evidente, y por otro lado la actitud de acción, donde la gestión activa de los ecosistemas busca deliberadamente la preservación a largo plazo de los servicios de los ecosistemas antes de que los problemas sean muy graves o remediables.

Escenarios 1 y 2: un mundo globalizado

- *Escenario 1.* Manejo Reactivo de los ecosistemas: “Orquestación Global”. Este escenario representa una sociedad

conectada globalmente por el comercio global y la liberalización económica, que toma una actitud reactiva para la solución de los problemas de los ecosistemas. No obstante, también toma medidas efectivas para la reducción de la pobreza y las desigualdades y realiza inversiones públicas en infraestructuras y en educación. El crecimiento económico de este escenario es el más alto de los cuatro y se estima que la población humana en el 2050 será la más baja.

- *Escenario 2.* Manejo proactivo de los ecosistemas: “Tecno-jardín”. Este escenario representa una sociedad conectada globalmente; pero que depende en gran medida de tecnologías “verdes”, respetuosas con el medio ambiente, y una actitud proactiva en la resolución de los problemas ambientales. Depende de ecosistemas altamente gestionados para proporcionar los servicios de los que depende. El crecimiento económico es relativamente alto y tendente a acelerarse, mientras que la población en el 2050 estará en el término medio de los cuatro escenarios.

Escenarios 3 y 4: un mundo regionalizado

- *Escenario 3.* Manejo Reactivo de los ecosistemas “Orden desde la fuerza”. Este escenario representa un mundo regionalizado y fragmentado,

preocupado por la seguridad y la protección, que enfatiza los mercados regionales, presta poca atención a los bienes públicos y toma una actitud reactiva frente a los problemas ambientales. El crecimiento económico es el más bajo de los cuatro escenarios (especialmente bajo en los países en desarrollo) y tiende a disminuir mientras que el crecimiento de población será el más alto.

- *Escenario 4. Manejo Proactivo de los ecosistemas “Mosaico adaptativo”.* En este escenario las regiones, a la escala de cuencas hidrográficas, son el núcleo de la actividad política y económica. Las instituciones locales se fortalecen y las estrategias locales de manejo de los ecosistemas son comunes. Las sociedades desarrollan un manejo altamente proactivo de los ecosistemas. El crecimiento económico es inicialmente lento pero crece con el tiempo, y la población en el año 2050 es casi tan alta como en el escenario “Orden desde la fuerza”.

Tal como sugieren estos escenarios, los motores directos e indirectos que van a afectar a los ecosistemas durante los próximos 50 años van a ser fundamentalmente los mismos que hoy. Sin embargo, va a cambiar la importancia relativa de los distintos motores de cambio. El cambio climático y la concentración de altos niveles de nutrientes en el agua van a ser problemas

cada vez más importantes, mientras que el crecimiento de la población va a serlo relativamente menos. Los escenarios predicen que la rápida conversión de los ecosistemas para su empleo en agricultura, suelo urbano e infraestructuras va a seguir avanzando. Tres de los cuatro escenarios predicen mejoras al menos en algunos de los servicios de los ecosistemas. No obstante, en muchos casos, los usos de los ecosistemas por parte de las personas aumentarán sustancialmente. Los cuatro escenarios prevén que va a continuar la rápida transformación de los ecosistemas. Se espera que entre un 10 y un 20% de los pastos y bosques actuales sean transformados debido a la expansión de la agricultura, las ciudades y las infraestructuras. Asimismo, los cuatro escenarios prevén que la pérdida de hábitats terrestres conducirá, de aquí al año 2050, a una fuerte caída de la diversidad local de especies nativas y de los servicios asociados. Las pérdidas de hábitats previstas en los cuatro escenarios conducirán a extinciones a nivel mundial a medida que las poblaciones se ajusten a los hábitats restantes. Por ejemplo, el número de especies de plantas podría reducirse un 10-15% como consecuencia de la pérdida de hábitats sufrida entre 1970 y 2050.

Los distintos escenarios sugieren que la gestión activa de los ecosistemas es, en general, ventajosa, y especialmente bajo condiciones cambiantes o novedosas. Las

sorpresa en los ecosistemas son inevitables debido a que las interacciones implicadas son complejas y a que en la actualidad aún no se comprenden bien las propiedades dinámicas de los ecosistemas. Un planteamiento de acción activa es más beneficioso que un planteamiento de reacción frente a problemas porque la restauración de servicios de un ecosistema degradados o destruidos es más costosa en tiempo y dinero que la prevención de la degradación y no siempre es posible.

Cambios previsibles en los servicios de los ecosistemas y en el bienestar humano

Todos los escenarios indican que aumentará sensiblemente el empleo de los servicios de los ecosistemas por parte de los humanos. En muchos casos, esto conduce a un deterioro de la calidad de los servicios e incluso a una reducción de su cantidad. Es probable que la seguridad alimentaria siga fuera del alcance de gran parte de la población, y se espera que los recursos mundiales de agua dulce sufran cambios grandes y complejos que afecten a una proporción creciente de la población. La demanda creciente de pescado conduce a un mayor riesgo de colapso de las reservas marinas a escala regional, que podría ser contrarrestada si el crecimiento actual de la acuicultura consigue superar cuellos de botella actuales y reducir sus impactos ambientales.

La contribución futura de los ecosistemas terrestres a la regulación del clima es incierta. La emisión o captación de carbono por los ecosistemas afecta a la cantidad de ciertos gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera y de ese modo regula el clima de la Tierra. En la actualidad, los ecosistemas terrestres son un sumidero neto de carbono, que absorbe cerca del 20% de las emisiones de combustibles fósiles. Es muy probable que este servicio de regulación climática se vea afectado por los cambios en el uso de las tierras, aunque es difícil de predecir ya que nuestra comprensión de los procesos de respiración del suelo es limitada. Los servicios de los ecosistemas áridos y desérticos son especialmente vulnerables a los cambios y en especial a aquellos debidos al cambio climático, al estrés hídrico y a usos intensivos. El océano seguirá captando CO₂ de la atmósfera, principalmente por la bomba de solubilidad, pues la bomba biológica ve reducida su actividad, o incluso podría bombear CO₂ en sentido opuesto, hacia la atmósfera, por efecto del incremento de temperatura.

Las acciones para incrementar un servicio de un ecosistema suelen causar la degradación de otros servicios, lo que a su vez causa daños importantes al bienestar humano. Ejemplos de esto son el aumento del riesgo de cambios no lineales en los ecosistemas, la pérdida de capital natural, la



Puesta de sol espectacular, por los colores generados por la alta carga de polvo en la atmósfera, en Cap Ses Salines (Mallorca).

Fotografía: C. M. Duarte.

agudización de la pobreza o el aumento de desigualdades entre grupos de población. Es difícil evaluar las implicaciones del cambio global sobre los ecosistemas y dar recomendaciones precisas para su gestión porque muchos de los efectos tardan en manifestarse, porque pueden ocurrir a cierta distancia y porque los actores que cargan con estos costes no suelen ser los mismos que los que recogen los beneficios de las alteraciones.

En general, se espera que la salud humana mejore en el futuro en la mayoría de escenarios. Sólo el escenario que combina regionalización con una gestión de reacción podría llevar a una espiral negativa de pobreza, empeoramiento de la salud y degradación de los ecosistemas en los

países en vías de desarrollo. La degradación de los servicios de los ecosistemas está afectando particularmente a la población más pobre y más vulnerable del planeta, y representa en ocasiones el principal factor generador de pobreza y eventualmente flujos migratorios. La pobreza, a su vez, tiende a aumentar la dependencia de los servicios que prestan los ecosistemas. Esto puede provocar más presión sobre los ecosistemas y acarrear una espiral descendente de pobreza y degradación de los ecosistemas en el futuro que se ha de prevenir con políticas claras que incorporen la evaluación de los servicios de los ecosistemas y los efectos de su pérdida en los escenarios macroeconómicos de las naciones.

Referencias

- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (2004). "Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment". EEA *Copenhagen Report*, 2:1-107.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: The Scientific basis*. Cambridge Univ. Press., New York.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Ecosystems & Human Well-Being: Wetlands and water synthesis*. World Resources Institute, Washington, D.C.
- PEÑUELAS, J. (2004). "Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles como paradigma de la interacción del bosque con la atmósfera". En Valladares, F. (ed.). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 281-308.
- PEÑUELAS, J. y FILELLA, I. (2001). "Phenology: responses to a warming world". *Science*, 294: 793-795.
- RÍOS, A. F.; PÉREZ, F. F. y FRAGA, F. (2001). "Long-term (1977-1997) measurements of CO₂ in the eastern North Atlantic: evaluation of anthropogenic input". *Deep-Sea Research II*, 48:2227-2239.
- SANZ, J. J.; POTTI, J.; MORENO, J.; MERINO, S. y FRÍAS, O. (2003). "Climate change and fitness components of a migratory bird breeding in the Mediterranean region". *Global Change Biology*, 9:1-12.
- STARFIELD, A. M. y CHAPIN, F. S. (1996). "Model of transient changes in arctic and boreal vegetation in response to climate and land use change". *Ecological Applications*, 6:842-864.
- VALLADARES, F. (2006). "Consecuencias del cambio climático en España". *Quercus*, 243:22-30.
- VALLADARES, F.; PEÑUELAS, J. y CALABUIG, E. L. (2004). "Ecosistemas terrestres". En Moreno, J. M. (ed.). *Evaluación de los impactos del cambio climático en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 65-112.

8. El impacto social del cambio global

La importancia del cambio climático sobre la sociedad es tan central que el desarrollo de la civilización se remonta al cambio climático que dio lugar al fin de la última glaciaciación en el Holoceno, con el rápido desarrollo de la civilización humana en los últimos 10.000 años (Cook, 2003; Fagan, 2004). Los impactos del cambio climático sobre las sociedades están bien demostrados por la historia, particularmente las desapariciones de ciudades e incluso civilizaciones por cambios climáticos y degradación medioambiental. Ejemplos clásicos de esto, revisados en el libro *Colapso: cómo las sociedades decidieron triunfar o fracasar* de J. Diamond (2004), son la degradación, por sobreexplotación no sostenible de la isla de Pascua, con la degradación de la calidad de vida de sus habitantes; la desaparición de la civilización Maya, que parece haber

coincidido con un cambio climático brusco, el colapso de las culturas hitita y miocénica asociado a una sequía hacia el 1.200 a.C. o el abandono de antiguas ciudades en el norte de África debido a la extensión del desierto del Sáhara. Los cambios climáticos siguen propiciando grandes cambios sociales que, a pesar de la mayor estructura de las sociedades modernas, causan grandes impactos a todos los niveles de la actividad social.

8.1. El ecosistema social

No es baladí recordar que el cambio global es un hecho social, puesto que tiene sus causas en gran medida en las actividades humanas, y porque además son las sociedades globales y específicas, así como las personas que componen esas sociedades, quienes finalmente van a



Tallos de macroalgas a la venta en el mercado de Puerto Montt (Chile).
Fotografía: C. M. Duarte.

sufrir sus consecuencias bien sea directamente, bien indirectamente a través del cambio del medio biogeofísico.

Como hecho social que es conviene aclarar el campo de análisis. Es casi una obviedad recordar que las sociedades están en constante cambio, aunque éste sea en unas ocasiones más evolucionista (lento) y en otras más revolucionario (rápido). La velocidad del cambio en la sociedad es un factor extremadamente relevante para el análisis del impacto social, sobre todo en lo referido a su interrelación con el medio biogeofísico, ya que gran parte del problema del denominado cambio global se está produciendo sobre todo por la impresionante velocidad del cambio social en las sociedades contemporáneas (el aumento de la demanda de energía y otros recursos naturales, por ejemplo), lo cual produce presiones sobre el medio

biogeofísico, cuyas posibilidades de renovación de los recursos y, sobre todo, de “integración” de los residuos tóxicos y peligrosos requieren un tiempo mucho mayor y una velocidad de la presión menor. La figura 8.1. es sólo una muestra de esa presión.

Distinguimos entre efectos y consecuencias sociales del cambio global, puesto que es relevante ir más allá de lo directamente producido por una acción (es decir, los efectos) y tener en cuenta los impactos indirectos y las sinergias, es decir, el resultado en términos de consecuencias. Dentro de las dificultades que conlleva prever cualquier asunto futuro, es más abordable la identificación de los efectos, aunque, aún con sus dificultades y cautelas, se precisa identificar las interrelaciones que permitan diagnosticar las posibles consecuencias sociales del cambio global.

Indicador	Unidades	1950	1971	1997
Población	En millardos de personas	2,5	3,8	5,8
Megaciudades	De más de 8 millones de personas	2	9	25
Alimentos	Producción media por día, en calorías/personas	1.980	2.450	2.770
Pesca	Captura anual en millones de toneladas	19	58	91
Consumo de agua	Consumo anual de agua en millones de toneladas	1.300	2.600	4.200
Vehículos	Millones de vehículos de circulación	70,3	279,5	629
Uso de fertilizante	Millones de toneladas	36,5	83,7	140,3
Cubierta de bosque húmedo	Índice de la cobertura forestal (1950=100)	100	85	70
Elefantes	Millones de animales	6,0	2,0	0,6

Figura 8.1. Indicadores de la presión creciente de la actividad humana sobre los recursos mundiales.
Fuente: World Resources Institute.

El impacto o consecuencias sociales del cambio global en definitiva es lo que va a resultar de las interacciones entre los cambios en el medio biofísico y los cambios en el medio social concreto. Sin embargo, esas interacciones casi nunca son directas, pues están también —y principalmente— mediadas por las diversas esferas de la acción social, entre las que se encuentran la organización social (economía, las relaciones sociales, las normas y valores...) y la tecnología. El gráfico 8.2. ilustra el ecosistema social.

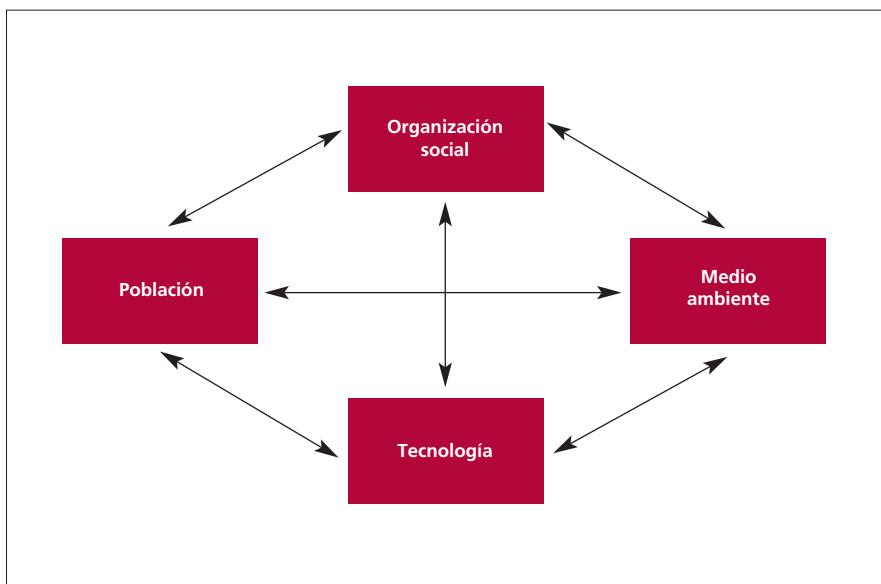


Figura 8.2. El ecosistema social.

De estas esferas básicas que componen cada sociedad —con más peso unas u otras dependiendo del tipo de sociedad— conviene tener en cuenta que un cambio en una de las esferas incide en todas las demás no de forma sumatoria, sino multiplicativa.

Es por ello que las consecuencias sociales serán —están siendo— diferentes según sean las características concretas de las distintas sociedades. En algunos casos, el mismo tipo de cambio biogeofísico puede producir consecuencias sociales negativas en unos

lugares y positivas en otros¹ (más horas solares, por ejemplo, permiten producir energía solar). Los impactos reales sobre la salud de la población van a estar muy determinados por las condiciones ambientales locales y también por las circunstancias socioeconómicas de esa población (particularmente el sistema sanitario), así como por las opciones que se tomen de adaptación social, institucional, tecnológica y de comportamiento (estilos de vida) para disminuir los riesgos y amenazas a la salud humana.

A pesar de lo anterior, sí que estamos en condiciones de afirmar que a mayor cambio biogeofísico y mayor velocidad en ese cambio, predominarán los efectos negativos en la sociedad. El marco analítico deberá ser entonces las interrelaciones para la vida y desarrollo² de las sociedades humanas, es decir, la “fábrica” social.

8.2. Áreas relevantes para la comprensión del impacto social del cambio global

El medio social o ecosistema social, como sistema de interrelaciones para la vida humana, incluye todas las esferas relevantes de la vida de la sociedad, como son:

1. La magnitud, duración y reversibilidad de los efectos sociales del cambio global son también aspectos relevantes.

2. Por desarrollo no queremos decir crecimiento económico, pues son conceptos diferenciados.



Gran diversidad de variedades de calabaza a la venta en Montreal (Canadá).

Fotografía: C. M. Duarte.

- La población como base demográfica y su sistema de poblamiento.
- La base económica de esa sociedad.
- La cultura en sentido profundo del término (antropológico), es decir, las formas de organización de la sociedad; los logros culturales materiales (la tecnología, por ejemplo) y no-materiales (símbólicos).
- Todo ello en una interrelación con su base biofísica suministradora de recursos para su subsistencia, bien sea material (alimentos...) o de valores (belleza de un paisaje...).

Por ello, el impacto social del cambio global incluye, al menos, los siguientes aspectos:

1. El impacto en la población como base sociodemográfica:

- En la esperanza de vida de esa población, centrando ésta en la salud.
- En su capacidad de reproducción biológica y en el equilibrio de su estructura social, centrándonos en su crecimiento, edad y sexo.
- En los procesos migratorios que el cambio global genera.

2. El impacto en la base económica de la sociedad:

- Riesgos a la subsistencia económica de esa sociedad y a los usos del

territorio, en particular sobre el sistema de poblamiento humano.

- Renta económica y estatus social.
- Empleo.
- Tecnología.

3. El impacto en la organización social y la cultura:

- Estructura social.
- Educación.
- Redes de apoyo social.
- Organización política y social. Sistemas de gobernanza y democracia.
- Normas y valores sociales.
- Niveles de conflictividad social. Seguridad.
- Patrimonio cultural.

8.3. El impacto en la población como base demográfica: salud, estructura demográfica, flujos migratorios

El impacto en la salud

La salud humana depende fuertemente de factores físicos (el entorno biogeofísico, la alimentación, la base genética...) aunque históricamente han sido sobre todo los factores sociales (abastecimiento de agua potable; sistemas sanitarios...) los que han permitido más que duplicar la esperanza de vida de las poblaciones humanas en los países económicamente desarrollados

(de 30 a casi 80 años en España, por ejemplo). El desarrollo de la biotecnología en las próximas décadas está generando la expectativa de una extensión aún mayor de la esperanza de vida. No ha sido éste el caso de los países empobrecidos, anclados en tan sólo una media³ de 46 años de esperanza de vida.

Actualmente, el cambio global tiene una incidencia negativa sobre la salud humana, que se resume en lo siguiente:

a) Cambios en la morbi-mortalidad⁴ por razón de la temperatura en sí misma y por la influencia del cambio climático en la producción de alimentos.

b) Efectos en la salud y mortalidad relacionados con acontecimientos meteorológicos extremos (tormentas, tornados, huracanes y precipitaciones extremas).

c) Aumentos de los efectos negativos asociados a la contaminación y los residuos.

d) Enfermedades transmitidas por los alimentos, el agua, por vectores infecciosos y roedores.

Los factores sociales y económicos determinantes de la salud y afectados por el cambio climático se resumen en la figura 8.3.

Muchas de las investigaciones sobre la salud en este campo se han centrado en estudiar los efectos de las olas de calor (por ejemplo, las miles de muertes que se produjeron en Europa en el verano de 2003⁵, figura 8.4.), o de la disminución en la capa de ozono (del 15 al 20% en la incidencia de cáncer de la piel en poblaciones de piel fina; cataratas y otras lesiones oculares pueden aumentar del 0,6 al 0,8% por cada 1% de disminución del ozono; y un aumento de la vulnerabilidad en algunas enfermedades infecciosas como resultado de la supresión de la inmunidad causada por la radiación UVB). Conviene destacar que existen muchos más aspectos que hay que tener en cuenta en clave de

Determinantes sociales de salud	Cómo influyen los factores sociales en la salud	Relación con el cambio climático: capacidad adaptación, vulnerabilidad
Renta y posición social	La salud mejora cuanto mayor sea el nivel de renta y más alta la posición social. Nivel social bajo y peores rentas están asociados con peor salud.	La capacidad de adaptación de los individuos, comunidades, regiones y naciones ricas serán mayores que las de los más pobres.
Grupos sociales de referencia	Familia, amigos y comunidad están relacionados con una mejor salud. La salud más deficiente es más común en las comunidades fragmentadas.	Los mejores grupos de referencia (formales e informales) permitirán tanto a individuos como a comunidades sobrellevar más eficazmente el cambio climático: tienen más capacidad de respuesta.
Educación	Mejor educación está relacionada con mejor salud. Peor educación con peor salud. Conocimiento cultural.	Una mejor educación proporciona aptitudes individuales para informarse y comprender, así como adaptarse. Mayor cuanto más ingresos.
Trabajo / Condiciones laborales	Mala salud está asociada con desempleo y trabajos y condiciones laborales estresantes.	Algunos tipos de desempleo incrementan el riesgo de exposición a condiciones climáticas extremas. Mayor seguridad en el empleo está relacionada con las rentas y los grupos de referencia.
Entorno social	Los valores y normas sociales influyen en la salud y el bienestar de los individuos y las poblaciones.	Algunos son más adaptables que otros; también los hay sin capacidades de adaptación.
Género	La selección de determinados roles sociales, rasgos personales, actitudes, comportamientos, valores, influencias, son atribuidos socialmente a los dos sexos.	No está bien definido en el contexto del cambio climático, excepto en países desarrollados.

Figura 8.3. Factores socioeconómicos determinantes de la salud en relación al cambio climático.

3. Indicador Desarrollo Humano Naciones Unidas 2005.

4. La morbi-mortalidad se define como la cantidad de personas que mueren en un lugar y un periodo de tiempo determinados en relación al total de la población de dicho lugar.

5. Para el caso de España, el Centro Nacional de Epidemiología cifra en 6.500 el número de muertes atribuibles a la ola calor del verano de 2003. Para Europa se calcula entre 27.000 y 40.000.

salud pública para poder prevenirlas, como son los efectos de las inundaciones, y de forma más cotidiana, los efectos de los riesgos en los sistemas alimentarios, principalmente sobre los más pobres (alrededor de 852 millones de habitantes, la mayoría niños, padecen hambrunas)⁶. Además, junto al impacto negativo, también se producían algunas mejoras: inviernos menos fríos en algunas regiones, y el calentamiento y las sequías que en algunas zonas pueden disminuir el ciclo vital de los mosquitos y su periodo de transmisión.

Respecto al aumento de la temperatura, cada región del planeta tiene un rango de temperatura óptimo en el que los índices de mortalidad se mantienen bajos.

Cuando estos niveles aumentan y se alejan de la zona considerada confortable —sobre todo si es un cambio rápido— la mortalidad se eleva. En cuanto a las inundaciones, sus efectos incluyen la pérdida de vidas, de viviendas, el deterioro de las condiciones higiénicas, la destrucción de los cultivos y la formación

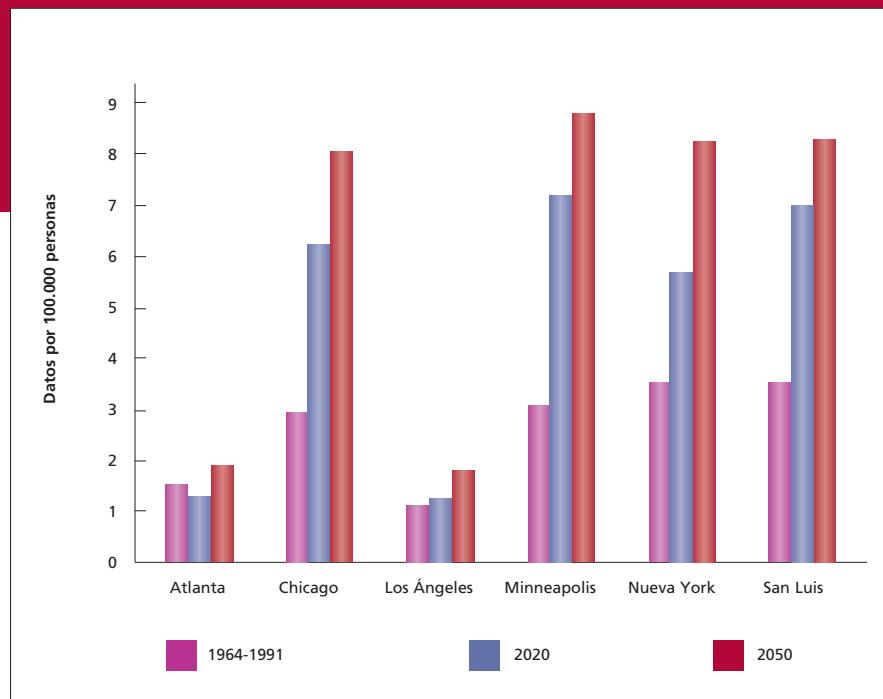


Figura 8.4. Mortalidad por olas de calor.

de un ambiente propicio a la propagación de infecciones, entre otros. La malnutrición y los trastornos mentales son las consecuencias más habituales relacionadas con estas catástrofes.

El cambio global —y en particular el cambio climático— repercute además en la productividad agrícola, ganadera y pesquera, previéndose un incremento del

5-10% en las personas desnutridas, sobre todo en los trópicos.

Los conflictos, las migraciones y los flujos de refugiados, a los que también afecta en mayor o menor grado el cambio global, aumentan el riesgo de contraer enfermedades infecciosas, de sufrir problemas mentales y lesiones, así como de muertes por conflictos violentos.

6. Los aspectos distributivos sociales del impacto del cambio global son asuntos muy relevantes a tener en cuenta, ya que, aunque el impacto también es global, son los países pobres y los grupos sociales más pobres y vulnerables los más afectados.

Se sabe que muchas enfermedades infecciosas transmitidas por vectores, alimentos y agua son sensibles a cambios de las condiciones climáticas (figuras 8.5., 8.6. y 8.7.). En la mayoría de las predicciones se llega a la conclusión de que, en ciertos escenarios de cambio climático, aumentaría la gama geográfica de transmisión posible de paludismo y de dengue, que en la actualidad amenaza al 40 a 50% de la población mundial. En todos los casos, la aparición real de la enfermedad dependerá en gran medida de las condiciones ambientales locales, circunstancias socioeconómicas e infraestructuras de salud pública, por lo que son clave las políticas preventivas y adaptativas.

Por lo que respecta a España⁷, cabe esperar un aumento en la morbi-mortalidad causada por las olas de calor, más frecuentes en intensidad y duración en los próximos años. Además, por su localización geográfica, es probable el aumento de la incidencia de enfermedades vectoriales transmitidas por mosquitos (dengue, enfermedad del Nilo occidental, malaria) o garrapatas (encefalitis). Destaca el aumento de las enfermedades conectadas a la contaminación ambiental por residuos

Enfermedad	Vector	Población en riesgo (millones) ¹	Nº personas actualmente infectadas o nuevos casos al año	Distribución actual	Probabilidad de cambio de la distribución
Malaria	Mosquito	2.400 ²	300-500 millones	Trópico y subtrópico	Altamente probable
Schistosomiasis	Caracol de agua	600	200 millones	Trópico y subtrópico	Bastante probable
Filariasis linfático	Mosquito	1.094 ³	117 millones	Trópico y subtrópico	Probable
Trypanosomiasis africano / Enfermedad del sueño	Mosca tse-tse	55 ⁴	250.000 a 300.000 casos por año	África tropical	Probable
Dracunculiasis / Infección por el gusano de Guinea	Crustáceos (copépodos)	100 ⁵	100.000 por año	Sudáfrica, Península Arábiga, África Centro-Oeste	Desconocida
Leishmaniasis	Género <i>Phlebotomus</i> Mosca de la arena	350	12 millones infectados, 500.000 nuevos casos al año ⁶	Asia, Sur de Europa, África, América	Probable
Onchocerciasis / Ceguera del río	Mosca negra	123	17.5 millones	África, América Latina	Bastante probable
Enfermedad de Chagas	<i>Triatomine</i> (chinche)	100 ⁷	18 millones	Sudamérica y América Central	Probable
Dengue	Mosquito	1.800	10-30 millones al año	Todos los países tropicales	Bastante probable
Fiebre amarilla	Mosquito	450	Más de 5000 casos al año	Zonas tropicales de Sudamérica África	Probable

Figura 8.5. Enfermedades relacionadas con el cambio global.

Fuentes: Climate change 1995, Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses, contribution of working group 2 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change. UNEP and WMO, 1996.

1. Las 3 primeras entradas son pronósticos de distribución de poblaciones, basadas en las estimaciones de 1989

2. WHO, 1994

3. Michael and Bundy, 1995

4. WHO, 1994

5. Ranque, comunicación personal

6. Frecuencia anual de daños por Leishmaniasis es 1-1.5 millones al año (PAHO; 1994)

7. WHO. 1995

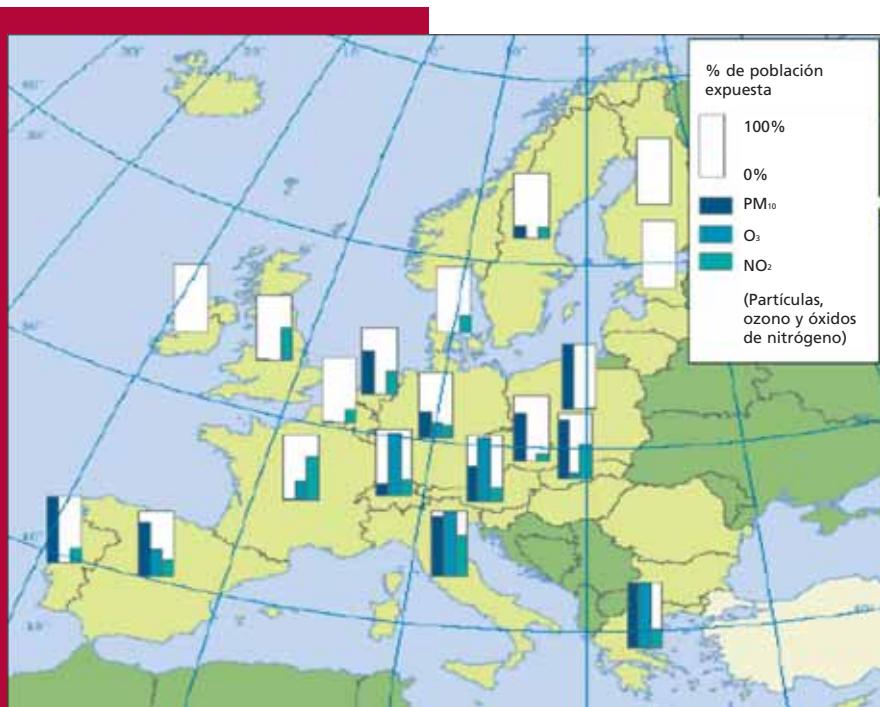


Figura 8.6. Exposición de la población urbana a concentración de contaminantes por encima de los valores límite, en los países de la Unión Europea (UE15), 1999.

y productos tóxicos (entre ellas, cánceres) así como alergias y asma.

Respecto a cada uno de los impactos negativos previstos en la salud, hay una gama de opciones posibles de políticas de adaptación social, institucional, tecnológica y de comportamiento colectivo e individual para reducir tal efecto. El reforzamiento de la infraestructura de salud pública y una gestión orientada hacia la salud medioambiental son clave. Esto incluye la regulación de la calidad del aire y las aguas, la seguridad alimentaria, la ordenación de las aguas superficiales, así como el diseño urbano y de las viviendas para crear condiciones más sanas. La información y preparación de las sociedades para el cambio global, y en particular para las contingencias que se presenten, es una de las medidas más importantes a desarrollar.

Número de personas al año	1980	2000
Enfermedades de la piel (se excluyen los tumores)	183	944
Tumor maligno del aparato respiratorio	8.771	17.363
Melanoma maligno de piel	181	701
Otro tumor maligno de piel	350	549
Leucemia	1.776	2.881
Cáncer de tejido conjuntivo	187	404
Melanoma cutáneo	166	645
Tumor de ovario	625	1.605
Linfoma NO Hodking	368	1.891
Mieloma múltiple	481	1.511

Figura 8.7. Muertes en las que habrían podido influir causas medioambientales, 1980 y 2000.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE), *La sociedad española tras 25 años de Constitución*, 2003.

El impacto en la demografía

Las migraciones de población desempeñan un papel clave en la mayoría de las transformaciones sociales contemporáneas⁸. Las migraciones son simultáneamente el resultado del cambio global (económico, ecológico, social) y una fuerza poderosa de cambios posteriores, tanto en las sociedades de origen como en las receptoras. Sus impactos inmediatos se manifiestan en el nivel económico, aunque también afectan a las relaciones sociales, la cultura, la política nacional y las relaciones internacionales. Las migraciones conducen a una mayor diversidad étnica y cultural en el interior de los países, transformando las identidades y desdibujando las fronteras tradicionales.

Las migraciones internacionales van en aumento debido a las tasas demográficas⁹ y a la desigualdad en los niveles de renta, por lo que es previsible un fuerte aumento de los flujos migratorios desde los países del norte de África hacia los del sur de Europa, desde Latinoamérica hacia los Estados Unidos y España, desde el este y el suroeste asiático hacia Norteamérica y tal vez hacia Japón, y desde algunas de

las antiguas repúblicas soviéticas hacia Rusia.

Pero los movimientos migratorios también tienen lugar dentro de los propios países¹⁰. En Estados Unidos, los desplazamientos hacia las zonas costeras del Pacífico y del Golfo de México han sido continuos en las últimas décadas, de manera que más del 50% de la población reside en una franja costera de 70 km. En China se están produciendo fuertes movimientos migratorios, desde las zonas más áridas y pobres del interior hacia las provincias del litoral, por razones económicas y sociales, pero en las que subyace la precaria situación ambiental del interior. Pero, con mucho, el fenómeno que se repite mundialmente es la emigración de las zonas rurales a las áreas metropolitanas así como la expansión de éstas.

La relación población-entorno es particularmente significativa en los casos de migraciones incontroladas (debido a políticas gubernamentales como es el desarrollo de infraestructuras) hacia zonas delicadas desde el punto de vista ambiental. Las subvenciones otorgadas por el gobierno de Estados Unidos, por poner un ejemplo, desempeñaron un papel importante en el rápido desarrollo

urbano de las “islas barrera”¹¹ en zonas costeras, aún cuando son zonas poco aptas para el asentamiento de la población por los riesgos asociados a huracanes y temporales y porque cumplen una importante función preventiva de daños por acontecimientos meteorológicos. En Filipinas, las subvenciones estatales para desarrollar las regiones boscosas desembocaron en migraciones hacia esas áreas, llevando a un incremento de la deforestación y los riesgos y pérdidas de vidas por las consiguientes riadas.

Los daños en el estado de Luisiana, particularmente Nueva Orleans, por el huracán Katrina de 2005 parecen haberse incrementado debido a la desaparición de marismas en el delta del Mississippi (Tibbetts, 2006). El tsunami del sureste asiático del 26 de diciembre de 2004 puso de manifiesto cómo el hecho de haber conservado los bosques de manglares entre la costa y las zonas pobladas tuvo como consecuencia menos muertes en esas poblaciones comparativamente a aquellas donde la protección de los manglares había desaparecido (Kathiresan y Rajendran, 2005), de forma que la mortalidad asociada a perturbaciones se ve moderada

8. Como siempre ha sido en la historia de la humanidad, aunque ahora a ritmos y dimensiones mayores.

9. En los próximos 50 años, la población mundial sumará tres billones más de personas, principalmente en las zonas del mundo que tienen ya fuertes cargas de enfermedades y daños relacionados con el clima.

10. Fundación Biodiversidad y Ministerio de Medio Ambiente.

11. La isla de Ocracoke, por ejemplo.

por la presencia de ecosistemas en buen estado de conservación. Un aspecto adicional relevante es el referido a las diferencias en el impacto según género. El tsunami asiático de 2004 puso de manifiesto que los desastres afectan de forma diferente a los hombres que a las mujeres. En Aceh Besar los supervivientes hombres sobrepasaron a las supervivientes mujeres en una ratio de 3:1; en los distritos norte de Aceh, el 77% de las muertes fueron de mujeres (Oxfam). Igualmente ocurre con los niños, los cuales son particularmente vulnerables a estos desastres.

8.4. El impacto en la base económica de la sociedad: economía, usos del territorio, asentamientos humanos

Los asentamientos humanos (núcleos rurales y urbanos, viviendas, infraestructuras...) están afectados por el cambio global por razón de:

- Cambios en la productividad o en la demanda del mercado, en cuanto a los bienes y servicios del lugar.
- Aspectos directos de consecuencias del cambio global sobre la infraestructura material (incluidos los sistemas de transmisión y distribución de energía), edificios, servicios urbanos (incluidos los sistemas de transporte) y determinadas industrias (tales como agroindustria, turismo, y construcción).

- Cambios indirectos sociodemográficos, como hemos señalado anteriormente.

El riesgo directo que afecta en más partes del mundo a los asentamientos humanos es el de inundaciones y movimientos de tierra, agravados por el aumento previsto de la intensidad de las lluvias y, en las zonas costeras, por la subida del nivel del mar e incremento de temporales y huracanes. Este riesgo es mayor para los asentamientos localizados en las vertientes de los ríos y mares, pero la inundación urbana puede ser un problema en cualquier zona en la que haya una escasa capacidad de los sistemas de alcantarillado, suministro de agua y gestión de residuos, es decir, los núcleos y sociedades con menos recursos infraestructurales. En tales áreas, son altamente vulnerables los barrios con ocupación ilegal del territorio y otros asentamientos urbanos oficiosos con elevada densidad de población, sin acceso a refugios para evacuación, poco o ningún acceso a recursos tales como agua potable y servicios sanitarios públicos, y, en general, escasa capacidad de adaptación.

Algunos ejemplos al respecto son los siguientes. En Nicaragua el 80% de las personas que perdieron su hogar debido

al huracán Mitch (octubre 1998) vivían en la línea de la pobreza o por debajo de ella antes de la tormenta. En la capital de Honduras (Tegucigalpa) una barriada entera que fue arrastrada al río Choluteca albergaba a vendedores ambulantes del mercado local que habían construido chabolas por falta de viviendas asequibles. La deforestación ha provocado que Haití, uno de los países más pobres del mundo, sea enormemente vulnerable a huracanes devastadores, que a finales de 2004 provocaron tremendas riadas y avalanchas de barro (4.000 muertos), caso paralelo al de las Islas Filipinas. De los daños que pueden causar los desastres naturales, puede dar una idea el terremoto de 1995 en Kobe (Japón) con resultado de 6.350 personas muertas y más de 100.000 millones de dólares en daños. En Europa, las inundaciones constituyen el 43% de todos los desastres acontecidos en el periodo 1998-2002. En este periodo, Europa sufrió alrededor de 100 inundaciones graves con más de 700 víctimas mortales, el desplazamiento de aproximadamente medio millón de personas y numerosas pérdidas económicas.

Los asentamientos humanos sufren en la actualidad otros importantes problemas ambientales, que pudieran agravarse en regímenes de temperatura más elevada y de mayor precipitación, principalmente los relacionados con el

agua y la energía, así como la infraestructura, el tratamiento de residuos y el transporte.

La rápida urbanización de zonas bajas costeras, tanto en el mundo económicamente desarrollado como en el mundo empobrecido, está produciendo un aumento considerable de la densidad de la población y de los bienes humanos expuestos a extremos climáticos en las costas, como son los ciclones tropicales. Las previsiones basadas en modelos del promedio de personas al año que pudieran ser objeto de inundación por tormentas en la costa, se multiplica varias veces (75 veces 200 millones de personas, en escenarios de aumento del nivel del mar de 40 cm al año 2080, respecto a escenarios sin dicho aumento). Los daños potenciales a las infraestructuras de las zonas costeras, como resultado del aumento del nivel del mar, han sido calculados en valores correspondientes a decenas de miles de millones de dólares para países como Egipto, Polonia y Vietnam, por ejemplo.

Los asentamientos humanos con poca diversificación económica, y en los que un elevado porcentaje de los ingresos proviene del sector primario sensible al clima (agricultura, silvicultura y pesca) son más vulnerables que aquellos con economías más diversificadas. Los más

pobres de los pobres ocupan las áreas con más restricciones, limitaciones y de mayor fragilidad ambiental; esto es así en todo el mundo, incluso en los países económicamente desarrollados, como se pudo constatar en el caso de los daños del huracán Catarina del 2005 en la ciudad de Nueva Orleans (EE.UU.). Se trata por lo tanto de ecosistemas con muy poca flexibilidad, lo que significa que sus opciones de uso productivo así como su capacidad natural de producción es baja, de tal manera que cualquier alteración de las variables que lo mantienen en un equilibrio delicado, resultan en una aceleración de su dinámica degradante. En este contexto, cada vez que se produce un desequilibrio en estos ecosistemas —con independencia de las razones que lo provocaron— la población que los ocupa y utiliza, por definición, ejerce una mayor presión sobre los recursos, potenciando así los procesos de degradación. Ello a su vez empobrece aún más a la población, produciéndose de este modo un auténtico círculo vicioso.

Según la *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, en España, el turismo es un sector económico particularmente relevante a tener en cuenta en cuanto a su vulnerabilidad al cambio global¹². Al ser un sector muy dependiente de las condiciones climatológicas y biofísicas



Plantación de plátanos en el centro de un pueblo en la isla de La Palma.
Fotografía: F. Valladares.

12. *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio Medio Ambiente / Universidad Castilla-La Mancha.



Cordón de dunas en el Parque Nacional de Doñana.

Fotografía: F. Valladares.

en general, el turismo en España (con un PIB de más del 11%) se verá afectado por razón de la posible disminución de la demanda, del deterioro de la oferta y de los criterios de los operadores del mercado. No obstante, el sistema turístico español se caracteriza por ser un sistema dinámico que ha sido capaz de generar respuestas adaptativas a los cambios. Sin embargo, el grado de deterioro que existe en algunos destinos turísticos tradicionales

muestra un escaso margen de maniobra, y cualquier cambio puede empeorar aún más las actuales condiciones ya de por sí desequilibradas. Nuevos factores asociados al cambio global —como la proliferación de medusas en distintas áreas del océano y cuya incidencia en las costas mediterráneas españolas parece ir en aumento— se han vinculado a la conjunción de la sobre pesca, que ha eliminado predadores y competidores de las medusas, y al aumento de la temperatura del mar, que acelera su crecimiento.

Entre los espacios potencialmente afectados por el cambio global destacan los siguientes:

- Los espacios naturales que acogen turismo; los destinos turísticos al frente mediterráneo, el golfo de Cádiz y los archipiélagos balear y canario; los espacios que actualmente acogen al turismo de invierno, por falta o escasez de nieve; los espacios de interior y litoral, en todos ellos se pueden generar cambios en los calendarios de actividad al producirse una disminución de las aptitudes climático-turísticas en los meses centrales del verano por calor excesivo y un aumento de la potencialidad en las interestaciones (primavera y otoño). Algo similar puede suceder en determinadas zonas de montaña, aunque en sentido inverso: la disminución de la temporada turística

de invierno por falta de nieve puede verse compensada por el alargamiento de la estación estival.

- Dos asuntos destacaríamos como vulnerables: las reservas de agua dulce disponibles en los humedales y acuíferos costeros, que están sufriendo intrusión de agua salada, agravando una situación ya crítica en la actualidad, derivada de problemas de abastecimiento en determinados lugares turísticos. Al aumentar los procesos de erosión, se pueden ver alteradas todas las infraestructuras de primera línea de mar (playas, paseos marítimos, diques, espigones, puertos deportivos, entre otros). Los siguientes datos básicos ilustran la importancia del asunto: las costas españolas acogen a más de 24 millones de habitantes (cerca del 60% de la población), a lo que hay que añadir casi 50 millones de turistas que nos visitan cada año.
- Otros sectores económicos que se han estudiado con relación al cambio global son la industria y el sector de seguros. Se sabe que modificaciones en la disponibilidad de los recursos hídricos afectarían a la industria en general, aunque los sectores más perjudicados serían la siderurgia, pasta y papel, químico, alimentación, textil y petróleo. Por su parte, el sector de las aseguradoras puede ser, económicamente hablando, uno de los que más rápida e intensamente se

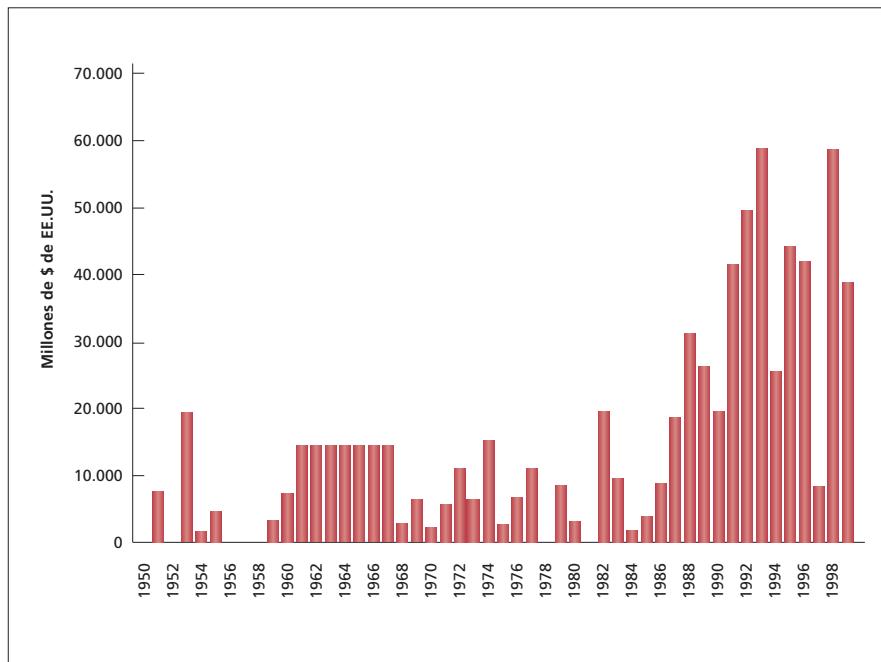


Figura 8.8. Pérdidas económicas por catástrofes naturales, 1950-1999.

Fuente: IPCC 2001.

vea afectado por los cambios climáticos, al requerir aumentar las primas de seguro y/o verse incapacitadas financieramente para asumir grandes riesgos, en sociedades que requieren cada vez mayores niveles de seguridad, como es el caso de las económicamente desarrolladas.

En las zonas desarrolladas del Ártico, y donde el permafrost (capa del suelo permanente helada) es abundante en hielo, será necesario prestar particular atención a mitigar los impactos

perjudiciales del deshielo, tales como daños graves a los edificios y a la infraestructura de transporte. La infraestructura industrial de transporte y comercial es en general vulnerable a los mismos peligros que la infraestructura de los asentamientos urbanos.

En la edificación, la repercisión del cambio global conlleva nuevas necesidades para atender los aspectos de habitabilidad de los edificios, que requieren instalaciones de climatización y ventilación que, a su vez, repercuten

sobre el microclima de la localidad¹³. Algunos sistemas de producción y distribución de energía pueden sufrir impactos adversos que reducirían los suministros o la fiabilidad de los mismos, mientras que otros sistemas energéticos podrían beneficiarse (por ejemplo, la energía solar y eólica en algunos casos).

Entre las posibles opciones de adaptación destacan la planificación¹⁴ de los asentamientos poblacionales y de su infraestructura¹⁵ y del emplazamiento de instalaciones industriales y la adopción de decisiones similares a largo plazo, de forma que se reduzcan los efectos adversos de sucesos que son de escasa probabilidad (aunque creciente), pero que conllevan grandes consecuencias (y quizás están en aumento).

Hace pocos meses, el Reino Unido ha publicado un informe, el *Informe Stern* (Stern team, 2006), que evalúa el coste económico del cambio climático en hasta un 20% de la economía mundial, y urge a desarrollar actuaciones de mitigación y adaptación que permitirían rebajar fuertemente este impacto con una inversión de tan sólo un 1% del PIB mundial. Este informe, que contiene inevitablemente importantes incertidumbres, pone de manifiesto el

importante coste económico del cambio climático y la necesidad de actuar sin más dilación para minimizar los impactos negativos asociados.

8.5. El impacto en la organización social: estructura social y política, conflictos, normas y valores sociales

El cambio global conllevará también un impacto destacable en diversos aspectos de la organización social, así como en las normas y valores sociales, extendiéndose a la gobernabilidad de las sociedades y el desarrollo de la democracia.

Concretamente, la desigualdad social aumenta también por razón del cambio global, tanto en lo que se refiere a los países entre sí (países de desarrollo alto / países de desarrollo bajo), como a lo referido a las desigualdades sociales en un mismo país (rentas, acceso a los recursos, impactos de desastres). Los riesgos biogeofísicos que conlleva el cambio global afectan en mayor medida a los sectores más vulnerables de todas las sociedades (los pobres, los ancianos, los niños, las mujeres, los débiles...) ya que cuentan con menos recursos no

sólo económicos, sino también de información, de educación e incluso del necesario ánimo y autoestima, para prevenir y mitigar los efectos del cambio global. Esta desigualdad social se manifiesta en virtualmente todos los capítulos de impacto que se están abordando en este análisis.

En cuanto a las normas y valores sociales, conviene recordar que éstos son instrumentos (“caja de herramientas”) adaptativos que crean, cambian y desarrollan las sociedades para preparar la acción social a los cambios necesarios, pero que no siempre estos instrumentos han respondido al cambio rápido. Aunque la propia historia de la humanidad es un ejemplo extraordinario de adaptación, existen también testimonios que corroboran el colapso de civilizaciones por razones medioambientales a los que no quisieron o no supieron adaptarse (la Isla de Pascua, al sur del Pacífico, por ejemplo, fue una civilización que dependía de los árboles para todas las facetas de su supervivencia, y aún así, taló hasta el último, en una espiral hacia el colapso, junto con la guerra y el canibalismo). No es posible trasladar automáticamente ese tipo de comportamiento a las sociedades

13. Calefacciones y aires acondicionados están produciendo también problemas de salud como, por ejemplo, legionelosis.

14. La planificación territorial (por ejemplo, el urbanismo, que es algo más que la construcción de viviendas) está en gran desuso en España.

15. Un ejemplo de adaptación al respecto de las viviendas es la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación que establece las exigencias básicas para que el sector de la construcción se adapte a la estrategia de sostenibilidad energética y medioambiental.

actuales, pero se pueden ilustrar los casos de Ruanda, de la isla de Hispaniola, de China y Australia, que demuestran que las “semillas” de colapsos del pasado están presentes en el mundo actual (Diamond, 2004). Es por ello relevante el estudio del impacto del cambio global sobre estas esferas de la sociedad, aunque aún estamos lejos de contar con un *corpus* de conocimiento científico y empírico satisfactorio al respecto.

Un caso actual, con consecuencias legales, es el de los Inuit (Conferencia Circumpolar Inuit, ICC) del Ártico, que han presentado una querella legal¹⁶ contra el Gobierno de Estados Unidos sobre la base de que las emisiones de gases invernadero de este país, que están incidiendo en el cambio climático, están dañando profundamente su forma de vida y su cultura. Esta petición es sólo uno de los casos legales o casi-legales que se han presentado contra el gobierno de Estados Unidos y otros países, basándose en el cambio climático.

Los conflictos sociales —incluyendo las guerras como expresión extrema de los conflictos— están también aumentando por razón del cambio global. No es casual que el concepto clásico de seguridad se haya ampliado a las cuestiones medioambientales, hasta el punto de llegar a plantearse su

importancia, para algunos analistas, por encima incluso del terrorismo internacional.

Y es que el cambio global es un factor de aumento de la conflictividad social entre países y dentro de cada país, por razones varias, entre las que se encuentra el acceso a recursos naturales básicos como el agua, las tierras agrícolas, los bosques, las pesquerías. Esto sucede en el caso de grupos que dependen muy directamente del buen estado y productividad de la fuente de recursos (campesinos, pastores nómadas, ganaderos, industrias extractivas), pero también en los países económicamente desarrollados. A la inversa, esa conexión pone de manifiesto que la gestión adecuada de los recursos naturales y el medio ambiente puede construir confianza entre los países y contribuir a la paz, facilitando la necesaria cooperación para atravesar las líneas de tensión política. La violencia en países como Brasil, México, Haití, Costa de Marfil, Nigeria, Ruanda, Paquistán y Filipinas está impulsada en parte por estos factores. Según Diamond (2004), el importante deterioro ambiental que sufre el país jugó un papel destacable en el genocidio de Ruanda (entre 800.000 y 1.000.000 de víctimas). Pero esa violencia no es exclusiva de los países empobrecidos, produciéndose



Barrio pobre y densamente poblado en Ammán, capital de Jordania situada en un clima muy árido.

Fotografía: F. Valladares.

16. La petición la han hecho a la Comisión Interamericana de Derechos Humanos.



Marismas del Parque Nacional de Doñana vistas desde el palacio.

Fotografía: F. Valladares.

igualmente en los económicamente desarrollados.

El agua es ya un elemento clave en muchas de las guerras. Las aguas del río Jordán fueron una de las principales causas de la guerra árabe-israelí de 1967. Líbano ha acusado hace tiempo a Israel de desear apropiarse de aguas del río Litani, y Siria imputa a los israelíes el estar reacios a retirarse de las costas del Mar de Galilea, la fuente de hasta un 30% del agua israelí. Turquía ha sido acusada por Siria e Irak de arrebatárselas al agua, al continuar construyendo presas a lo largo del Tigris y el Eufrates; el país también está embarcado en un ambicioso proyecto de venta del agua de su río

Manavgat a Oriente Medio. Egipto advirtió en 1991 que utilizaría la fuerza para proteger su acceso a las aguas del Nilo, que también es compartido por Etiopía y Sudán. Los enfrentamientos en el Punjab (India), que han provocado más de 15.000 muertos durante la década de los ochenta, son el resultado de disputas por el reparto del agua. En España, los actuales conflictos políticos en torno al Plan Hidrológico Nacional son otro ejemplo de las pugnas por el agua que afecta incluso a las relaciones entre regiones dentro de un mismo país.

Pero al mismo tiempo, el agua es una fuente de cooperación pues las cuencas fluviales requieren ser administradas conjuntamente, lo cual comporta enormes dificultades pero también genera oportunidades de colaboración. El caso del río Jordán es paradigmático: existe un acuerdo entre Siria y Jordania, otro entre Jordania e Israel, y uno más entre Israel y Palestina —o sea, una serie de acuerdos bilaterales para una cuenca multilateral bastante bien administrada, aunque los palestinos terminen por reivindicar y probablemente por obtener derechos de agua más amplios. Los afectados por desastres ambientales, como huracanes, tifones, etc., son también receptores de ayudas internacionales que, aunque siempre insuficientes, consiguen aliviar la situación de las víctimas.

La gobernabilidad de los países y del mundo está siendo afectada por el cambio global, aunque en direcciones a veces contradictorias: el aumento de conflictos —tal como ha sido ilustrado anteriormente— y al mismo tiempo el aumento de la cooperación y la gobernabilidad mundial. El Protocolo de Kioto para luchar contra el cambio climático, por ejemplo, es de los pocos acuerdos mundiales existentes (firmado por más de 150 países) aun conllevando importantes compromisos económicos¹⁷. Por otra parte, una consecuencia del cambio global está siendo la participación de nuevos actores sociales en el proceso de discurso y legitimación, destacando la creciente importancia del movimiento ecologista como agente de cambio social¹⁸. La gobernabilidad alude no sólo a la dimensión política (gobernabilidad democrática) sino también a la económica, social (incluida la lucha contra la pobreza y la igualdad de oportunidades de género) y medioambiental. Específicamente la gobernabilidad medioambiental se refiere a todo lo tendente a la creación de los marcos y capacidades institucionales necesarios para asegurar los bienes públicos medioambientales y la equidad en el acceso intra e intergeneracional a los mismos, así como a la prevención y

17. El Ministerio de Medio Ambiente de España calcula en unos 3.000 millones de euros la factura por incumplir nuestros compromisos en el Protocolo de Kioto.

18. El Consejo Asesor de Medio Ambiente de España está formado, entre otros, por las organizaciones ecologistas aunque no participa ninguna organización científica.

manejo de las crisis y situaciones de conflicto.

La gobernabilidad es una de las esferas claves de prevención y adaptación de las sociedades al cambio global, que aún requiere un desarrollo teórico y práctico en el ámbito del análisis de impacto.

8.6. El impacto en el patrimonio histórico-natural. El papel de los espacios protegidos

Los cambios en el uso del suelo producen, además de la degradación de la integridad ecológica de muchos ecosistemas, cambios en la composición atmosférica por su efecto en el ciclo global del carbono y del agua (Foley *et al*, 2005). Esta degradación afecta también a nuestro patrimonio histórico. Los cambios en composición atmosférica, como la lluvia ácida, causan también importantes daños en edificaciones y, en particular, en el patrimonio histórico, siendo responsable de la aceleración de la erosión de la piedra y conjuntos escultóricos al aire libre. Los gases atmosféricos implicados en el llamado “mal de la piedra” son, principalmente, los óxidos de carbono, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre, liberados en la quema de combustibles fósiles. El aumento del nivel del mar también amenaza el patrimonio histórico, como es el caso de algunas ciudades como Venecia.

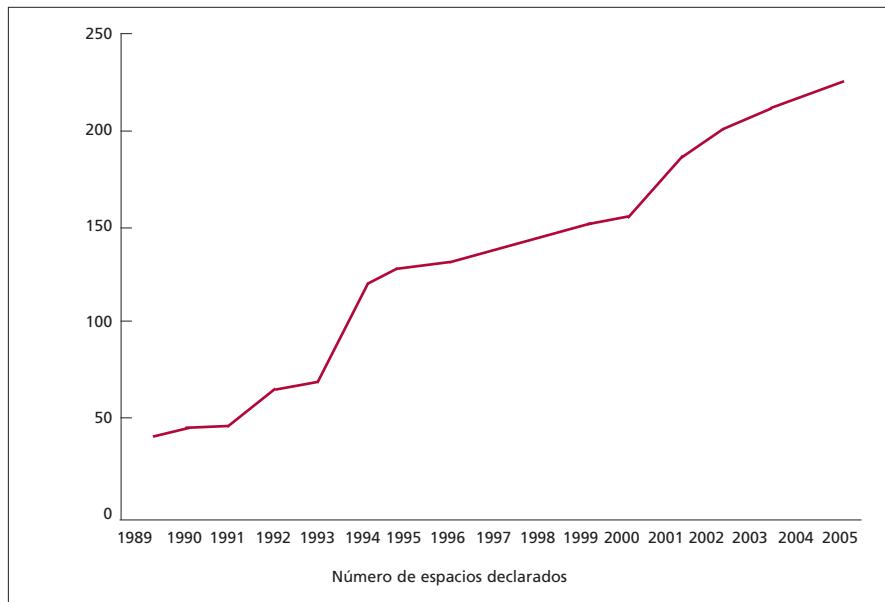


Figura 8.9. Evolución de la declaración de los espacios protegidos en España en los últimos 17 años. Puede observarse cómo el número de espacios protegidos no ha dejado de crecer ya que sigue considerándose la mejor herramienta para la conservación de la biodiversidad pero al ser gestionadas, la mayoría de ellas, como entidades estáticas no consiguen alcanzar sus objetivos.

Fuente: Europarc-España, 2005.

El cambio global ha alterado los paisajes culturales generados tras procesos milenarios donde han ido evolucionando fuerzas naturales y humanas. Estos paisajes han variado su característica heterogeneidad para configurarse como extensos paisajes homogéneos (cultivos intensivos, asentamientos urbanos, por ejemplo), siendo ésta una de las causas más importantes de la pérdida de la biodiversidad, ya que conlleva la desaparición de los hábitats de muchas especies (Pimm & Raven, 2000).

La base de la política de la conservación de la naturaleza en nuestra sociedad actual se asienta en la configuración como espacios naturales protegidos de los fragmentos más singulares de los ecosistemas naturales en desaparición. Esta tendencia se refleja en los más de 100.000 espacios mundiales protegidos (12% de la superficie terrestre, pero sólo el 0,6% de la marina del planeta, WDPA-Word Database on Protected Areas) y, concretamente en España, en 1.115 espacios protegidos que ocupan el 10,24% del territorio terrestre (Europarc-España, 2005).

En general, estos espacios protegidos conservan sus valores naturales gracias a figuras legales que prohíben o restringen determinados usos, contrastando con la dinámica de intensa transformación que se produce en los alrededores de sus límites. El resultado es un modelo territorial de antinomias (*protegido versus no-protegido*), en el que los espacios protegidos aparecen como “islas” en un territorio más o menos transformado; situación que no beneficia los objetivos de conservación. Por un lado, los procesos biogeofísicos trascienden los límites administrativos, una realidad que queda patente al considerar que la expresión “ponerle puertas al campo”, que podría definir la situación descrita, se equipara en el habla popular con un sinsentido. Por otro lado, esta situación genera espacios estáticos tan diferenciados que conlleva en ocasiones conflictos por parte de la población local en relación a la explotación de sus recursos. Por ello, se avanzó hacia la tendencia actual, donde el modelo de redes ecológicas pretende —a través de corredores biológicos— conectar los fragmentos de ecosistemas protegidos. En este modelo continúan los conflictos entre uso y conservación, y se siguen considerando los espacios protegidos como un fin en sí mismo.

Frecuentemente, el objetivo de gestión de estas áreas protegidas es la inmutabilidad o incluso revertir el estado de los ecosistemas sujetos de protección a un estado anterior más virginal. Estos

objetivos no consideran suficientemente el carácter dinámico de los ecosistemas ni que inevitablemente el cambio global impone también cambios sobre los ecosistemas protegidos (Miller, 2004), que experimentan cambios climáticos, que llevan a cambios en las comunidades, cambios en la composición de gases, que altera la fisiología de las especies, etc.

Consideramos entonces que las áreas protegidas del siglo XXI, en el escenario del cambio global, deben cambiar el paradigma que les dio su razón de ser en el pasado siglo. El modelo alternativo debe incluir la presencia humana como parte esencial del área protegida, con el fin de mantener su funcionalidad (flujos ecológicos, agua, nutrientes, organismos) y enfatizar la capacidad adaptativa al cambio. Esto implica tender puentes entre la política de conservación y la de ordenación del territorio. Ello conlleva —desde el nuevo paradigma de los territorios dinámicos y adaptativos— que los espacios protegidos pasan de ser un fin en sí mismo a ser una herramienta esencial en la ordenación del territorio. Todos los espacios del territorio son importantes —estén protegidos o no— ya que todos juegan un determinado papel dentro de un modelo de mosaico cambiante (García Mora & Montes, 2003).

El objetivo final supone establecer un territorio dinámico de alta biodiversidad y elevada conectividad, lo que le dotarán de la suficiente capacidad para acoplarse a los cambios

territoriales actuales, además de amortiguar y reorganizarse ante los impactos naturales y antrópicos que caracterizan el propio cambio global.

8.7. Perspectivas

Los cambios globales están afectando de forma muy relevante a las sociedades en virtualmente todas las esferas de la acción social: la demografía, la economía, las estructuras sociales y culturales... Al prever sus calamitosos efectos, con el fin de minimizarlos y de maximizar los aspectos positivos, se debe poner el énfasis tanto en sus consecuencias sociales y políticas como en las puramente biogeofísicas.

A escala global existe un importante retraso en comprender, modelizar y cuantificar la vulnerabilidad de los sistemas humanos al cambio global, así como en evaluar su capacidad de adaptación. Por ejemplo, se conoce poco sobre el nivel de efectividad de la aplicación de experiencias de adaptación a la variabilidad climática y acontecimientos extremos pasados y actuales al campo de la adaptación al cambio climático; nada se sabe sobre cómo esta información podría ser utilizada para mejorar las estimaciones sobre la viabilidad, efectividad, costos y beneficios de la adaptación a largo plazo. También se conoce poco sobre las diferencias en la capacidad

adaptativa de las diferentes regiones del mundo y los diferentes grupos socioeconómicos. Igual ocurre con los roles que el cambio institucional y de modelos de consumo en el futuro jugarán en la capacidad de la sociedad para prepararse y responder al cambio global¹⁹.

Es por ello que la toma de decisiones es una esfera clave de la acción social cuando se trata de incertidumbres —incluyendo los riesgos de cambios irreversibles y/o no lineales— las cuales puede que se aborden de forma insuficiente en unos casos o por el contrario excesiva en otros, cuyas consecuencias pueden afectar a varias generaciones. Las incertidumbres se producen por diversos factores, incluyendo problemas de datos, modelos, falta de conocimiento de interacciones importantes, representación imprecisa de la incertidumbre, variaciones estadísticas y errores de medida, y juicio subjetivo, entre otros.

Se requiere avanzar en la investigación del impacto del cambio global en áreas relevantes de las sociedades que apenas o nada se han estudiado. Entre éstas, destacamos los temas de igualdad/desigualdad social, ética,

relaciones de poder y justicia social, que han sido minusvalorados en la agenda investigadora del impacto del cambio global, y que son fundamentales para el funcionamiento, adaptación y supervivencia de las sociedades.

Pero sobre todo, se requiere avanzar en enfoques integrales e integrados del impacto del cambio global, que permitan avanzar en la comprensión de los factores sociales, no como un listado temático, sino en cómo va a afectar a la capacidad de funcionamiento de la ‘fábrica’ social, y, la relación entre ésta y la vulnerabilidad del sistema biofísico y su capacidad de adaptación. La atención a los efectos acumulativos debería ser central, pues implica una perspectiva más compleja y completa de las problemáticas del cambio global, al incorporar la noción de interconexión de los elementos que conforman el medio ambiente (tanto biofísico como social), así como las relaciones interdependientes que configuran los ecosistemas. Este enfoque ayuda a la creación de verdaderas soluciones a problemas concretos del cambio global, evitando el desplazamiento de la contaminación y otros problemas de un medio a otro, como a menudo ocurre.



Observatorio astronómico El Roque de los Muchachos, junto a la Caldera de Taburiente en la isla de La Palma.

Fotografía: F. Valladares.

19. Relativo a estos aspectos, existe un amplio margen para mejorar, desde el punto de vista sociológico, los estudios que realiza el Ministerio de Medio Ambiente de España en relación a su Plan de Adaptación al Cambio Climático.

Cuadro 8.1.

Delta del Ebro

Los cambios ambientales inducidos por actividades humanas no solamente han sucedido durante el último siglo. Un ejemplo paradigmático que esto no ha sido así lo aporta el estudio de la dinámica de sedimentos del delta del Ebro que indica que éste se formó a partir del siglo XVI debido a un incremento de los aportes de material particulado por el río (Maldonado 1972). Este incremento de sedimentos fue debido a cambios importantes en la utilización del territorio en toda la cuenca del Ebro, que conllevaron una disminución de la masa forestal de ésta, y, por lo tanto, aumentaron la erosión. Por ejemplo, anteriormente la región de los Monegros en Aragón estaba ocupada por grandes extensiones de bosques. La tala de árboles para su uso en la construcción de buques, etc., y el incremento de las zonas agrícolas conllevo una mayor erosión, y por lo tanto, un incremento del material particulado que llegaba al mar, que en un periodo de tres siglos permitió la formación del delta del Ebro, tal como lo conocemos actualmente (ver figura 8.10.). El carácter dinámico de estas

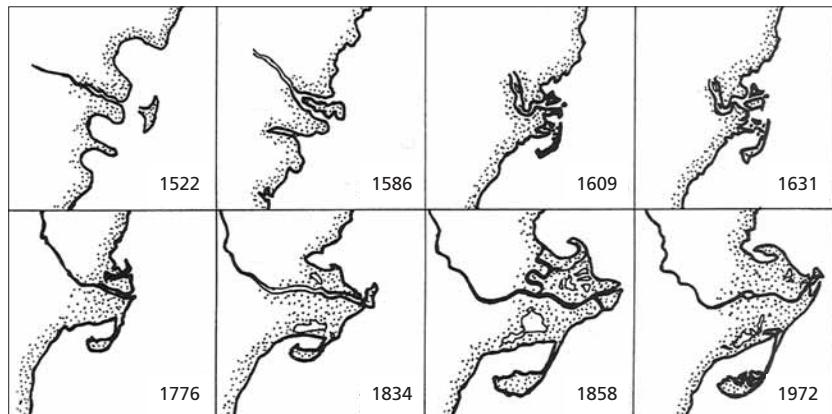


Fig. 8.10. Evolución del delta del Ebro desde el siglo XVI al siglo XX.

Fuente: adaptado de Maldonado 1972.

formaciones y su alta sensibilidad a las actividades humanas, también se demuestra por la lenta pero constante regresión que el delta del Ebro está sufriendo en los últimos decenios. Este segundo cambio importante en la dinámica del delta del Ebro se debe a la

construcción de numerosos embalses a lo largo del río Ebro que impiden que éste aporte en la actualidad una cantidad suficiente de sedimentos. Así, el delta del Ebro y su historia es un ejemplo del impacto de las actividades antropogénicas en los ecosistemas a escala regional.

Referencias

- ARROJO, P. y MARTÍNEZ, F. J. (1999). *El agua a debate desde la Universidad. Hacia una nueva cultura del agua*. Institución Fernando el Católico (CSIC). Excma. Diputación de Zaragoza. Zaragoza.
- COOK, M. A (2003). *Brief history of the human race*. Norton, New York.
- DIAMOND, J. (2004). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. Viking Adult.
- DIETZ, THOMAS y EUGENE A. ROSA (2001). "Human Dimensions of Global Environmental Change". En Riley E. Dunlap and William Michelson (eds.), *Handbook of Environmental Sociology*. Greenwood Press. Westport, CT. Pp. 370-406.
- EUROPARC-ESPAÑA (2005). Anuario 2005. Fundación Fernando González Bernáldez. Fundación BBVA.
- FAGAN, B. (2004). *The Long Summer: How climate changed civilization*. Basic Books.
- FOLEY, J. A. ET AL. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574.
- GARCÍA MORA, R. & MONTES, C. (2003). *Vínculos en el paisaje mediterráneo. El papel de los espacios protegidos en el contexto territorial*. Consejería de Medio Ambiente.
- KATHiresan, K. y RAJENDRAN, N. (2005). "Coastal mangrove forests mitigated tsunami", *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 65: 601-606.
- LEAL FILHO, WALTER (ED.) (2002). *International Experiences on Sustainability*. Peter Lang Publisher, Frankfurt, Berlín, Berna, Bruselas, Nueva York, Oxford.
- MALDONADO, A. (1972). *Bolet. Extratigr.* 1:1-486. Universitat de Barcelona.
- MILLER, K. (DIR.) (2004). Securing protected areas in the face of global change. *Issues and strategies*. IUCN. WCPA.
- PARDO, M. (2002). *La evaluación del impacto ambiental y social para el siglo XXI: Teorías, Procesos, Metodología*. Editorial Fundamentos. Madrid.
- PÉREZ ARRIAGA, J. I.; SÁNCHEZ DE TEMBLEQUE, L. J.; PARDO, M. (2004). "Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible". En: Fundación Encuentro. *Informe España 2004, Una interpretación de su realidad social*. Fundación Encuentro. Madrid.
- PIMM, S. L. & RAVEN, P. (2000). "Extinction by numbers". *Nature* 403: 843-845.
- ROSA, E. (Committee Co-Author) (2005). *Thinking Strategically: The Appropriate Use of Metrics for the Climate Change Science Program*. Report of the Committee on Metrics for Global Change Research. National Research Council/National Academy of Sciences. Washington, D.C.
- STERN TEAM (2006). *Stern Review on the economics of climate change*. Cambridge University Press.
- TIBBETTS, J. (2006). Louisiana's Wetlands: "A Lesson in Nature Appreciation". *Environ Health Perspect* 114: 40-43.



Puesta de sol sobre la costa.

9. ¿Cómo afrontar el cambio global?

Mitigación y adaptación al cambio global

“Si no desviamos nuestros pasos probablemente acabemos donde nos dirigimos.”

Proverbio chino

Para el sociólogo americano Alvin Toffler la humanidad después de la revolución agrícola e industrial ha entrado en lo que denominó la “tercera oleada” o la revolución tecnológica. Para Toffler es un periodo definido por un estilo de vida que caracteriza a la civilización del siglo XXI altamente tecnológica, economicista y antiindustrial, que genera cambios radicales, profundos y globalizantes. El problema no es el cambio, la humanidad se ha construido en un ambiente cambiante, sino la aceleración de un cambio profundo y global para el

que ni el ser humano ni sus instituciones están preparadas. Para afrontar el problema del cambio global, que líderes mundiales identifican como el mayor reto que la humanidad ha de afrontar, es preciso, en primer lugar, reconocer claramente el problema, sus causas y sus incertidumbres, y fomentar, desde los distintos niveles de la sociedad, desde los ciudadanos a las políticas, actitudes adaptativas que permitan afrontar este problema con éxito. En esta sección ofrecemos algunos pensamientos y pautas sobre cómo conseguir esta capacidad adaptativa.

9.1. Cómo construir capacidad adaptativa frente al cambio global

El científico y divulgador norteamericano Jared Diamond en su reciente libro de gran éxito, *Colapso* (2004), argumenta que la capacidad de unas sociedades para perdurar mientras otras desaparecen depende fundamentalmente de su capacidad adaptativa en términos de cambio social. En base al estudio de múltiples casos documenta cómo las sociedades que no fueron capaces de adaptarse a cambios graduales y catastróficos, casi siempre asociados a impulsores de cambio de carácter ecológico ya fueran de origen humano como el deterioro ambiental (destrucción de ecosistemas, sobreexplotación de recursos, extinción de especies) o debidos a procesos naturales como cambios climáticos, sufrieron un drástico descenso del tamaño de su población y de su complejidad política y socioeconómica llegando muchas de ellas a desaparecer. A diferencia de lo que ha ocurrido en la historia de la humanidad, en esta nueva era del Antropoceno la coevolución entre naturaleza y sociedad tiene lugar a escala planetaria y a una velocidad mucho más rápida y con consecuencias más impredecibles que en el pasado.

Seguimos y seguiremos necesitando servicios de aprovisionamiento, como alimentos, madera, agua, fibra, combustible, etc., pero sobre todo y a

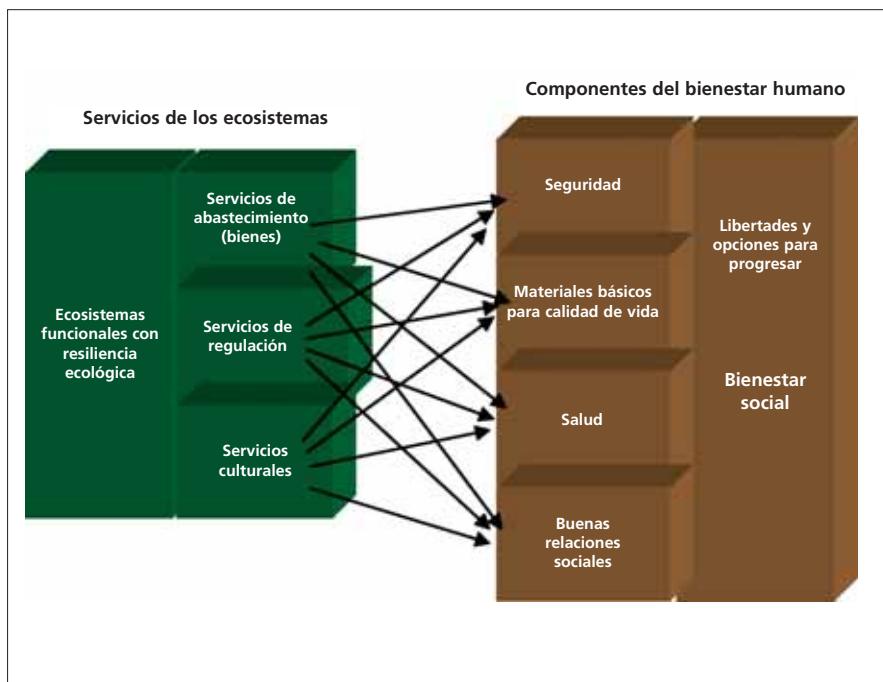


Figura 9.1. Existe una interdependencia entre humanos y ecosistemas que se manifiesta en la variedad del flujo de servicios que éstos generan a la humanidad y determinan el bienestar de sus sociedades. Los cambios tanto locales como globales afectan a este flujo de servicios con consecuencias en la economía, la salud, las relaciones socioculturales, las libertades y la seguridad de los humanos.

Fuente: Millennium Ecosystem Assessment, 2005, modificada.

pesar de que sean invisibles para el mercado y no tengan precio, seguiremos dependiendo de los servicios de regulación, como son el secuestro de carbono para el control del sistema climático, de la polinización para la producción de las cosechas, de la depuración del agua, de la formación de suelo, de la regulación de enfermedades, de la asimilación de nutrientes, etc. Tampoco podemos olvidarnos del valor

social de los servicios culturales de los ecosistemas reflejados en sus valores estéticos, educativos, de recreación o espirituales. De hecho, el *Informe Stern* sobre el impacto económico del cambio global (Stern team, 2006) califica el cambio global de fracaso colosal de la economía de mercado, pues se generan grandísimos daños económicos a través de procesos que inciden fundamentalmente en bienes ajenos al sistema de mercado.

Hoy sabemos que para poder disfrutar de los servicios de los ecosistemas lo importante no es gestionar correctamente los servicios de aprovisionamiento o de regulación sino conservar o restaurar las funciones o procesos ecológicos esenciales que los soportan (figura 9.1.).

Necesitamos mantener ecosistemas sostenibles, es decir, sistemas naturales que conserven sus funciones biogeofísicas (producción primaria, ciclo de nutrientes, ciclo del agua). En esta necesidad reside el desafío actual del uso humano del capital natural del planeta. El problema esencial al que se enfrenta la civilización de inicios del milenio es cómo gestionar la resiliencia, o capacidad de recuperación frente a perturbaciones como las asociadas al cambio global, de los ecosistemas, para asegurar un desarrollo social y económico en el contexto de un mundo rápidamente cambiante. De una forma simple, la resiliencia ecológica hay que entenderla como la capacidad de un sistema ecológico de conservar sus funciones mientras soporta perturbaciones. Los ecosistemas resilientes son capaces de absorber perturbaciones externas y acontecimientos no previstos. Tienen capacidad para amortiguar perturbaciones, renovarse y reorganizarse después de un cambio. Un ecosistema sin resiliencia es vulnerable a perturbaciones externas y está sometido a una amplia variedad de tensiones y cambios. Carece de capacidad para adaptarse y modular los cambios por lo que no es capaz de reducir los daños

que pueda sufrir en el futuro. Gestionar la resiliencia de los ecosistemas tiene por tanto consecuencias en la subsistencia, la vulnerabilidad, seguridad y conflictos de la sociedad humana.

La resiliencia de los ecosistemas reside en las interrelaciones que se establecen entre sus componentes geóticos y bióticos. En este contexto la biodiversidad juega un papel esencial en el mantenimiento de la resiliencia de los ecosistemas. Este papel está relacionado con la diversidad y el número de individuos de grupos funcionales de especies en un ecosistema (biodiversidad funcional), es decir, de los organismos que polinizan, depredan, fijan nitrógeno, dispersan semillas, descomponen la materia orgánica, transforman la energía lumínica en química, capturan o emiten CO₂, etc. La pérdida de grupos funcionales tendrá un efecto directo e intenso sobre la capacidad de los ecosistemas de reorganizarse después de una perturbación.

A la luz de los resultados de múltiples estudios científicos realizados sobre los efectos de las actividades humanas en la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas acuáticos y terrestres del planeta emergen, en el contexto del cambio global, dos errores fundamentales relacionados con los pilares que sustentan la mayoría de las políticas de gestión de los sistemas naturales (Folke, 2004). El primer error está relacionado con la presunción de que las respuestas de los

ecosistemas al uso humano son lineares, predecibles y controlables. El segundo está relacionado con el supuesto de que los humanos y la naturaleza son entidades diferentes que pueden ser conceptualizadas y gestionadas independientemente. Sin embargo las evidencias acumuladas en diversas regiones del planeta sugieren por un lado que los comportamientos de la relaciones naturaleza-sociedad no son lineares y muestran umbrales que de sobrepasarse devienen en cambios muy pronunciados. Por otro lado la naturaleza y la sociedad hay que conceptualizarlas como un sistema socioecológico o socioecosistema dado que la sociedad humana es parte de la biosfera y sus actividades están ensambladas en el sistema ecológico.

Todos los ecosistemas del planeta están sometidos a los distintos componentes del cambio global pero la percepción de sus efectos y cómo abordarlos difiere según dos modelos de gestión fuertemente contrastados. Desde las políticas de gestión más tradicionales se asumen una respuesta gradual, suave y predecible al cambio global y sus componentes. Se supone que la naturaleza está o tiende a un estado de equilibrio o casi equilibrio y el modelo de gestión óptimo denominado “Dominio y Control” (Holling & Meffe, 1996) se relaciona con actividades que conduzcan al sistema natural hacia un estado de equilibrio canónico o clímax que hay que mantener. Se busca situaciones de

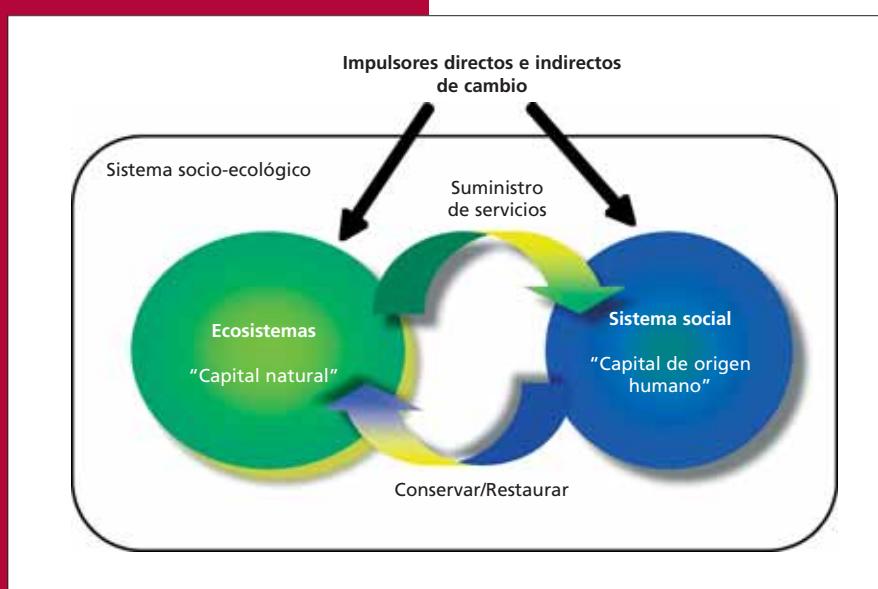


Figura 9.2. Desde el concepto de socioecosistema, los humanos y los ecosistemas constituyen un sistema e interactúan de manera interdependiente a una escala local y global. Bajo esta trama conceptual de ver las interrelaciones (el bosque) en vez de sus componentes aislados (los árboles) podemos desarrollar las políticas del cambio global con mayor eficacia al abordar los problemas con toda su complejidad.

mínima complejidad e incertidumbre en un contexto cambiante. Todo cambio se considera una degradación. Hay que “conservar lo que cambia” por lo que es necesario controlar las perturbaciones naturales o sus efectos como fuegos, inundaciones, sequías, huracanes, etc.

En oposición al modelo de “Dominio y Control” se encuentra el modelo de la “Gestión de la Resiliencia”. Desde esta perspectiva los cambios lineares y suaves son interrumpidos de forma repentina y drástica por perturbaciones naturales que, a menudo, no se pueden predecir ya que presentan un comportamiento estocástico, como es el caso de huracanes, fuegos, sequías, etc. Estos eventos discretos en el espacio y en el tiempo

(aunque hay espacios y tiempos con más probabilidades por razón de las actividades humanas) desencadenan cambios de estado en los ecosistemas que no se pueden predecir con mucha certeza. Estos cambios de estados hoy sabemos que son una característica inherente a los sistemas complejos adaptativos como es el caso de la biosfera.

Por tanto, la forma más práctica y efectiva de enfrentarse al desafío del cambio global y a sus componentes es construir resiliencia, de los estados deseados de los ecosistemas, es decir, de aquellos cuadros ecológicos que tienen mayor valor social en términos de la calidad del flujo de servicios ecosistémicos. Desde el modelo de la gestión de la resiliencia, los humanos y la naturaleza no son entidades independientes sino que conforman un sistema denominado sistema socioecológico o socioecosistemas por lo que tienen que ser gestionados como un todo, como entidad integrada y unitaria. Los socioecosistemas son ecosistemas que de una forma compleja se vinculan e interactúan de manera dinámica e interdependiente con uno o más sistemas sociales (figura 9.2.).

El concepto socioecosistema aporta una visión global de la complejidad de los problemas que implica el cambio global que sirve para tender puentes entre las ciencias biogeofísicas, sociales y las tecnologías, generando un marco transdisciplinar que permite a ecólogos,

economistas, sociólogos e ingenieros compartir no sólo el objeto y objetivo de los programas sobre cambio global sino también un marco conceptual y metodológico. Facilita la toma de decisiones ya que permite integrar las dimensiones biogeofísicas y sociales del cambio global a través del conocimiento de la organización, funcionamiento y dinámica de los sistemas ecológicos, y de la incorporación de aspectos económicos, sociológicos y políticos de la componente humana del cambio global. Desde esta aproximación un socioecosistema es sostenible si es resiliente, es decir, si conserva las capacidades adaptativas al cambio creando, innovando, probando a la vez que se generan y se mantienen las oportunidades de autoorganización (Folke *et al.*, 2002).

Además del desarrollo de escenario, la otra herramienta esencial con la que cuenta el modelo de la gestión de la resiliencia es la gestión ambiental adaptativa. El camino de la sostenibilidad exige construir capacidad adaptativa de los socioecosistemas para que se puedan ajustar a las nuevas condiciones generadas por los cambios sin perder sus oportunidades de futuro. La capacidad adaptativa de los socioecosistemas está estrechamente relacionada con el aprendizaje. Dado que las relaciones entre naturaleza y sociedad están en continuo cambio es muy difícil predecir

las consecuencias de nuestras acciones de gestión, por lo que una estrategia para abordarlas es tratarlas como hipótesis que permitan su tratamiento posterior como experimentos, de forma que aprendamos haciendo. Si estos experimentos son seguidos y analizados adecuadamente mediante un sistema de indicadores, los gestores pueden aprender sobre la administración de los socioecosistemas en un contexto de cambio, incertidumbres e imprevistos. En este contexto es necesario que las políticas relativas al cambio global promuevan el desarrollo de indicadores de cambios graduales y de alerta temprana que detecten señales de pérdida de resiliencia y de posibles umbrales de cambios de régimen en socioecosistemas frente a presiones.

Por último hay que tener en cuenta que el éxito o fracaso del modelo de gestión adaptativa que promueve la gestión de la resiliencia dependerá de los procesos institucionales y políticos que promuevan los proyectos sobre el cambio global. Por esta razón es importante introducir en las políticas de cambio global el concepto de gobernanza adaptativa para analizar las estructuras y procesos mediante los que los seres humanos tomamos decisiones sobre la gestión de los servicios de los ecosistemas y compartimos su ejecución. Bajo este marco las nuevas políticas del cambio global deberían estimular la creación de foros o espacios participativos para el

análisis y el debate de los problemas y las consecuencias de los cambios en marcha. Se deberían promover plataformas cívicas apoyadas por instituciones abiertas que se apropien y ejecuten modelos de gestión adaptativa para aprender y construir capacidad adaptativa de los socioecosistemas donde se desarrollan las comunidades.

Para Diamond en su libro ya citado sobre el colapso de las civilizaciones, la esperanza de futuro de esta civilización de los albores del tercer milenio radica en saber utilizar algo que no tuvieron las sociedades del pasado que se extinguieron en un total aislamiento; un flujo de información globalizada que nos permite conocer en tiempo real lo que está ocurriendo en cualquier parte del planeta. Por primera vez podemos aprender rápidamente de los errores pero también de los aciertos de las sociedades que nos precedieron y de las actuales por muy remotas que sean. El saber utilizar correctamente esta herramienta de aprendizaje global y con ella construir capacidad adaptativa está en nuestras manos.

9.2. El papel de la ciencia

La contribución de la ciencia es central para comprender, anticipar y reaccionar al problema del cambio global. Esta contribución ha de venir de un esfuerzo científico transdisciplinar, que integre

las múltiples dimensiones del cambio global, desde sus raíces sociopolíticas a la comprensión detallada de los mecanismos biogeoquímicos que intervienen en el funcionamiento de la biosfera que permita formular modelos predictivos fiables, el examen de acontecimientos pasados en la historia del planeta y de la humanidad que nos ofrecen oportunidades para evaluar la fiabilidad de los modelos, a la observación de los síntomas de cambio con particular atención a las huellas y signos de alerta de oscilaciones en el comportamiento y distribución de organismos y ecosistemas, la consideración de contingencias sociopolíticas o derivadas de avances tecnológicos (tabla 9.1.).

En cualquier caso, satisface constatar que el esfuerzo de la comunidad científica española en el ámbito del cambio global ha aumentando notablemente (figura 9.3.) durante los últimos 15 años, multiplicando por 10 su esfuerzo de investigación durante esta época. El esfuerzo de investigación global es muy superior, de forma que se producen, anualmente, más de 20.000 artículos científicos relevantes al cambio global a nivel mundial. Progresivamente estos esfuerzos se van articulando a nivel internacional. A finales de los años 90 se creó el Programa Internacional de la Geosfera y Biosfera (IGBP) con el fin de mejorar, a partir de programas temáticos centrados en el

Disciplina	Aportación
Paleociencias	Reconstrucción de climas y biosferas pasadas que permitan comprobar la fiabilidad de modelos climáticos desarrollados para predecir climas futuros.
Física de la Atmósfera	Modelos climáticos, predicción climática, modelización de eventos extremos (ciclones, etc.).
Oceanografía	Papel del océano y su biota en la regulación climática y del funcionamiento del sistema Tierra. Aumento del nivel del mar.
Ecología	Huellas del cambio global en los organismos, las poblaciones y los ecosistemas, posibles extinciones, consecuencias para el funcionamiento de la Biosfera y los servicios que ésta presta a la sociedad.
Ciencias de la Tierra	Dinámica de la hidrosfera, atmósfera y cíosfera, intercambios de materiales y respuesta al cambio global; dinámica de la línea de costa en respuesta al cambio global.
Biología molecular	Consecuencias del cambio global sobre la expresión génica; papel de la diversidad genética sobre la adaptación al cambio global.
Biogeoquímica	Regulación del ciclo de elementos activos en la regulación climática y elementos biogénicos, acidificación del océano.
Química	Química atmosférica, flujos de contaminantes orgánicos persistentes.
Hidrología	Impactos del cambio global sobre la hidrosfera y el ciclo de agua. Dinámica de acuíferos.
Historia	Reconstrucción de cambios en el uso de recursos por la humanidad, así como las consecuencias de cambios ambientales a escala regional sobre civilizaciones pasadas.
Teoría de Sistemas Complejos	Comportamientos no lineales, comportamiento exible y procesos caóticos en el sistema Tierra.
Ciencias de la Salud	Impacto del cambio global sobre la salud humana (enfermedades emergentes, interacción entre agentes químicos y cambios ambientales, etc.).
Sociología	Percepción pública del cambio global; mecanismos de consensos y gobernanza globales; organización social.
Economía	Impacto económico del cambio global.
Computación y Matemáticas	Algoritmos eficientes en modelos de circulación global; propagación de incertidumbre en modelos; enlazado de modelos de distintas escalas.

Tabla 9.1. Aportación de distintas disciplinas de la ciencia a la investigación del cambio global.

océano, ecosistemas terrestres, y atmósfera entre otros, nuestro conocimiento del funcionamiento del planeta (ver sección Enlaces). Más adelante surgen los programas internacionales Diversitas, que aborda

la investigación sobre diversidad biológica y su conservación a nivel global, y el programa IDHP centrado en la dimensión humana del cambio global (ver enlaces). Poco a poco emerge un nuevo concepto, más

integrador e interdisciplinar, del que surge el Consorcio para la Ciencia del Sistema Tierra (ESSP, ver enlaces), que incorpora, en un único foro en el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), todos estos programas internacionales de investigación, que movilizan decenas de miles de investigadores en todo el mundo. Estos programas, considerados “*Big Science*” (ciencia grande) por sus presupuestos multimillonarios, juegan un papel clave, pero han de conjugarse con las aportaciones que pueden partir de ideas surgidas a nivel de investigador individual o grupo de investigación, evitando así convertirse en *lobbies* científicos que desincentiven, por su estructura jerárquica, donde comités integrados por unas docenas de investigadores dictan la agenda científica a seguir por los miles de participantes, y que tienden a auto-perpetuarse más allá de la consecución de sus objetivos.

En España, siguiendo al ESSP y ampliándolo, se ha creado el Comité Español de Investigación en Cambio Global, CEICAG (ver enlaces), con el objetivo de desarrollar esta comunidad epistémica.

A pesar de las incertidumbres en cuanto a la importancia de distintos motores del cambio global, las interacciones entre ellos y el alcance futuro del cambio global, existe un amplísimo consenso en la comunidad

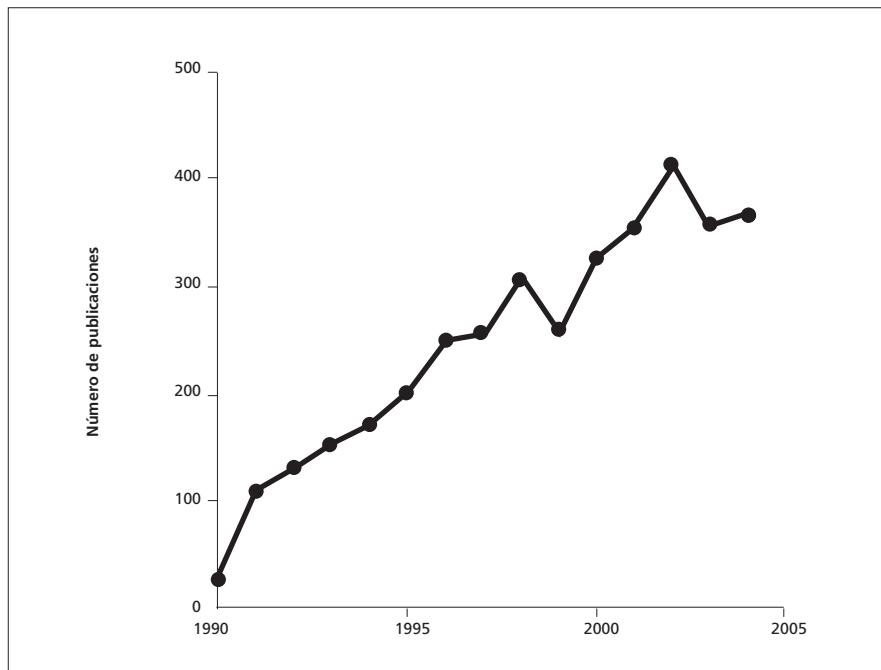


Figura 9.3. Aumento en el número de publicaciones científicas de investigadores de instituciones españolas sobre cambio global.

Fuente: Web of Science.

científica en torno a la constatación del cambio climático, con una tendencia al calentamiento del planeta en el que la actividad humana juega un papel fundamental, así como el papel de la presión humana sobre la degradación de los ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos.

Como se ha indicado, este consenso se articula a partir del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, que es un foro que, a través

de la participación de cientos de investigadores de decenas de países, emite informes periódicos (cada 4 años) que integran el conocimiento científico sobre la evolución del clima y sus causas (ver sección 7).

Este proceso permite el avance del consenso científico, pero es un avance lento, pues desde que una nueva idea o concepto se presenta a la comunidad científica hasta que éste se consolida pueden transcurrir varios años o, en casos extremos, décadas. Este retraso



Alcornoques viejos en el Parque Nacional de Cabañeros (Ciudad Real).

Fotografía: F. Valladares.

en la incorporación de conocimiento científico en el proceso que eventualmente interviene en la toma de decisiones y los convenios internacionales supone un riesgo en un contexto en el que un retraso de diez años en adoptar decisiones acertadas puede restar capacidad adaptativa frente al cambio global. Es importante pues que la comunidad científica articule mecanismos más ágiles a partir de los cuales nuevos conocimientos científicos puedan contemplarse en escenarios plausibles del cambio global, antes incluso de que hayan pasado a formar parte del *corpus* de conocimiento científico consolidado.

Toda vez que el calentamiento global se perfila como el más importante de los problemas asociados al cambio global, están empezando a surgir propuestas para intentar reducir el problema mediante técnicas de geoingeniería, que implican la intervención humana para alterar el

balance térmico del planeta. Las propuestas incluyen desde el estímulo de la captación de CO₂ a través de la adición de hierro al océano y la siembra de sulfuro en la estratosfera a la puesta en órbita de lentes para desviar la radiación solar. Estas propuestas, inicialmente planteadas como tests de nuestro conocimiento sobre los procesos que controlan el clima se están comenzando a considerar seriamente, suscitando polémicas en el seno de la comunidad científica, parte de la cual considera estas propuestas como ejercicios de “aprendices de brujo” que pueden originar problemas imprevistos y que pueden ser utilizadas políticamente para detraer de los esfuerzos para disminuir la liberación de gases de efecto invernadero, que debiera acometerse sin mayor dilación.

Un reto adicional de la contribución científica al problema de cambio global es el de la difusión eficiente del

conocimiento científico a la sociedad, actividad en la que la comunidad científica muestra carencias intrínsecas que afectan a éste y otros ámbitos de la investigación. De hecho no sólo es necesario informar a la sociedad sobre los progresos científicos en la comprensión y predicción del problema del cambio global, sino que es necesario informar sobre la naturaleza misma de la ciencia, de forma que conceptos importantes, como el de incertidumbre en ciencia, se comprendan adecuadamente. En particular, el concepto de incertidumbre en ciencia se ha utilizado erróneamente, a veces por ignorancia y muchas de forma intencional para sembrar dudas en el ciudadano bajo el argumento de “que los científicos no se ponen de acuerdo”. La incertidumbre es consustancial a la ciencia moderna que, a diferencia de otros períodos de la historia, admite la discrepancia como motor de progresión. La certeza pertenece a otros ámbitos distintos de la actividad humana, como el

pensamiento religioso, pero desde luego no a la ciencia que se construye sobre la base de que todas las teorías y conocimiento actual son inciertas y, por tanto, susceptibles de mejora.

La forma en la que los investigadores abordan el problema de la diseminación a la sociedad es típicamente la de publicación de páginas web donde se dan a conocer los resultados de los proyectos de investigación. Sin embargo, la efectividad de este proceso es cuestionable debido a la saturación de información en Internet, donde en una búsqueda en agosto de 2006 (Google) aparecen 640 millones de páginas relacionadas con el cambio global. Muchas de las páginas que supuestamente ofrecen información científica, son publicadas por fuentes sin solvencia científica, de forma que el visitante que no es especialista se encuentra con multitud de opiniones y visiones muchas veces en conflicto unas con otras, generando confusión. Por otra parte la información ofrecida en muchas de ellas es genérica o específica a regiones que no atienden a los intereses particulares de los visitantes. La creación de observatorios del cambio global, como puntos focales puentes que permitan la integración de conocimiento científico y su divulgación a la sociedad junto con un compendio de hechos relevantes, puede ayudar a paliar esta deficiencia y asegurar la disponibilidad de un flujo

de información fiable, rigurosa, contrastada y relevante a la sociedad.

El amplio esfuerzo transdisciplinar necesario para la investigación del cambio global supone un desafío a la estructura actual de la investigación científica, compartimentalizada en pequeñas especialidades con escasa vinculación con otras especialidades próximas, no digamos ya con otras disciplinas, los mecanismos de comunicación científica, igualmente estructurados en *gethos* para especialistas inaccesibles a investigadores de otra especialidad, y la formación universitaria y de postgrado articulada en torno a departamentos y facultades de temática especializada.

El problema del cambio global pone al descubierto el agotamiento del modelo de crecimiento enciclopédico de la ciencia, que se ha ido articulando desde una concepción general “filosófica” inicial a una compartimentalización creciente del conocimiento en los últimos tres siglos. A lo largo de este proceso, la ciencia ha erigido pieza a pieza una nueva Torre de Babel del conocimiento, castigada —como en mito bíblico— con el castigo de la proliferación de lenguajes incomprendibles que impiden la comunicación entre científicos de distintas disciplinas. De entre los millones de documentos científicos publicados anualmente, sólo una fracción mínima (< 0,1%) son

comprendibles a un investigador dado, que sólo consigue ojear —no ya leer— una de cada 10.000 publicaciones. Cabe dentro de lo posible que descubrimientos aparentemente intranscendentales en un campo lejano al de la investigación del cambio global pudiesen aportar soluciones clave para algunas de las tareas enunciadas. Sin embargo, la probabilidad de que estos hallazgos lleguen al conocimiento de los investigadores capaces de establecer su relevancia para el problema del cambio global es mínima. Es necesario, tanto para abordar con garantías de éxito el problema del cambio global como otros problemas que implican sistemas complejos, generar una nueva concepción de la ciencia que fomente la actividad transdisciplinar, elimine barreras a la comunicación y el flujo de conocimiento. Esto requiere de cambios fundamentales desde la estructura de la actividad científica hasta la redefinición de currículos universitarios, que estamos aún lejos de abordar.

Es necesario, además, articular centros o redes de investigación con suficiente masa crítica como para abordar el problema de cambio global desde sus distintas dimensiones. Existen aún pocos centros de investigación que hagan esto de forma eficiente, pues normalmente se especializan en alguno de estos componentes, como clima, atmósfera, océano o sociedad. En nuestro país, en particular, no existe

aún ningún centro de investigación que haga del cambio global su objetivo principal, destinando a este objetivo recursos, personal y transdisciplinariedad suficientes. Quizá sea más realista y efectivo en nuestro país, caracterizado en general por escasa masa crítica en ciencia, promover ejes de institutos y grupos de investigación que puedan articular su investigación con la masa crítica y dimensión transdisciplinar suficientes para abordar el cambio global que pretender agregar todas estas capacidades y las distintas infraestructuras que precisan bajo un mismo instituto. De hecho, existen excelentes investigadores en muchos de los ámbitos específicos del cambio global en nuestro país, pero actúan típicamente en pequeños grupos de 2 a 5 investigadores. Articular estos grupos para crear masa crítica debiera ser pues objetivo prioritario de la política científica española.

La investigación científica, con su énfasis en el desarrollo de modelos capaces de generar predicciones, supone una plataforma privilegiada para la formulación de análisis prospectivos que apoyen actuaciones adaptativas. En el caso de nuestro país, este análisis permite identificar la sequía y la disminución de los recursos hídricos como la amenaza más importante, en la que las áreas excedentarias en agua desaparecerán, excepto por reductos de la cornisa cantábrica, de nuestra

geografía. Los efectos de esta disminución de recursos hídricos serán particularmente importantes en las zonas costeras mediterráneas, donde al incremento del déficit hídrico por motivos climáticos se ha de sumar el aumento de la demanda por el aumento de población transeúnte y, en menor medida, residente, y la salinización de acuíferos asociada al aumento del nivel del mar. Estas predicciones, que se derivan de forma consistente de los distintos modelos climáticos disponibles, deberían hacernos reflexionar e iluminar actuaciones encaminadas a lograr el ahorro de agua (e.g. aumento de la eficiencia de sistemas de irrigación, canalización y reciclado, implementación de tecnologías de ahorro en ámbitos doméstico e industrial, etc.), la recarga de acuíferos en los períodos húmedos que puedan darse entre sequías y la recuperación de ecosistemas que, como las zonas húmedas, contribuyen positivamente a la economía del agua. No parece lógico plantear, a la vista de estas predicciones, planes hidrológicos basados en transvases, que requieren como premisa *sine qua non* de la existencia de regiones excedentarias que puedan donar agua a las zonas deficitarias y que disminuirán de nuestra geografía.

Ampliando el horizonte de nuestra visión del futuro, es evidente que la sequía y la disminución de recursos

hídricos serán aún más agudas en las riberas sur y este de la cuenca mediterránea. Si esta predicción se conjuga con las elevadas tasas de crecimiento de algunos países de esa región, notablemente Egipto, y la debilidad de las economías de los países de esta región para adaptarse a estos desafíos, la lectura inevitable es la posibilidad de un importante aumento de los flujos migratorios hacia Europa y la proliferación de conflictos e inestabilidad en la región. Es evidente que, en un mundo globalizado, las actuaciones para mitigar los impactos del cambio global no pueden circunscribirse a nuestras fronteras. Los efectos en unas regiones tienen consecuencias sobre otras, generando posibles efectos dominó que sólo pueden anticiparse desde la actividad investigadora, conjugando las capacidades de ciencias naturales con las de las ciencias sociales.

9.3. El papel de las tecnologías

Todas las sociedades, desde la de cazadores-recolectores a la industrializada, han impactado el medio ambiente biogeofísico generalmente hasta donde su desarrollo tecnológico lo ha permitido. Aún con algunas excepciones, ésta es una ley histórica general (Crosby & Worster, 1986). En el caso de las sociedades

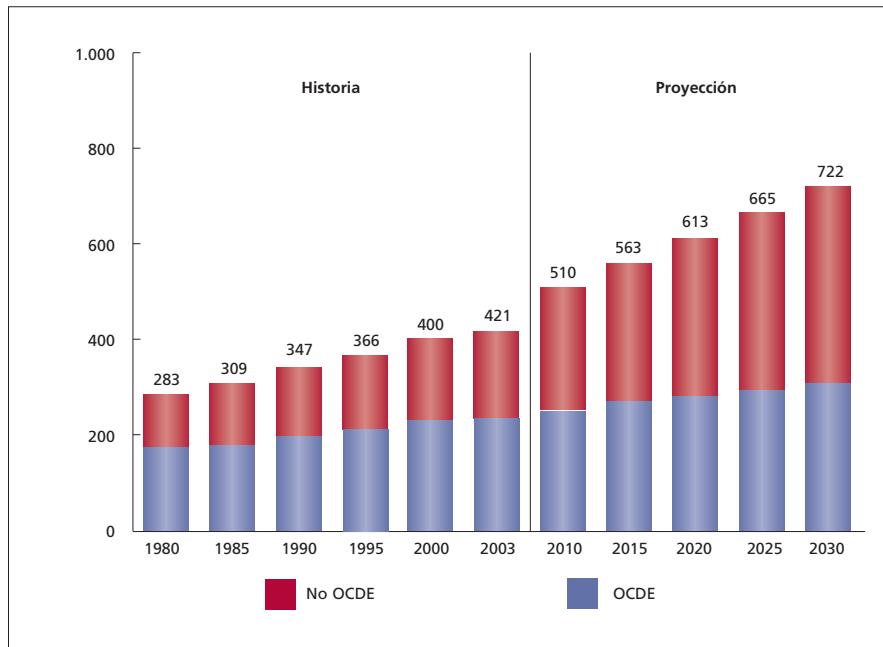


Figura 9.4. Evolución del consumo energético de mercado en países desarrollado (OCDE) y en desarrollo (no OCDE) entre 1980 y 2030. Datos en equivalentes térmicos de 10^{15} unidades térmicas británicas.

Fuentes: Administración de la Información de Energía (EIA, www.eia.doe.gov/iea) y EIA (2006).

económicamente desarrolladas actuales, el desarrollo científico-tecnológico ha alcanzado un nivel sin precedentes, por lo que tiene un protagonismo central en la producción del cambio global, pero también en su mitigación y adaptación. Concretamente, la tecnología de la energía basada en la combustión de fósiles, y su creciente uso, y las tecnologías químicas se encuentran entre las principales causas antrópicas del cambio global, y, por ello, son una de las principales áreas a transformar.

El uso de energía sigue creciendo en una espiral imparable, y aunque el uso de energías renovables está aumentando, su contribución porcentual parece anclada en el 8-9% (EIA 2006), mientras que la energía nuclear parece también anclada en torno al 5-6% del consumo total. Así pues, el consumo total de combustibles fósiles seguirá creciendo (figura 9.4.). Se predice que el consumo de energía aumentará en un 71% entre 2003 y 2030, creciendo a un ritmo cercano al 2%



Parque eólico cerca de Tarifa en pleno Parque Natural de Los Alcornocales, en una zona de elevada biodiversidad y riqueza de endemismos, con el mar Mediterráneo al fondo.

Fotografía: F. Valladares.

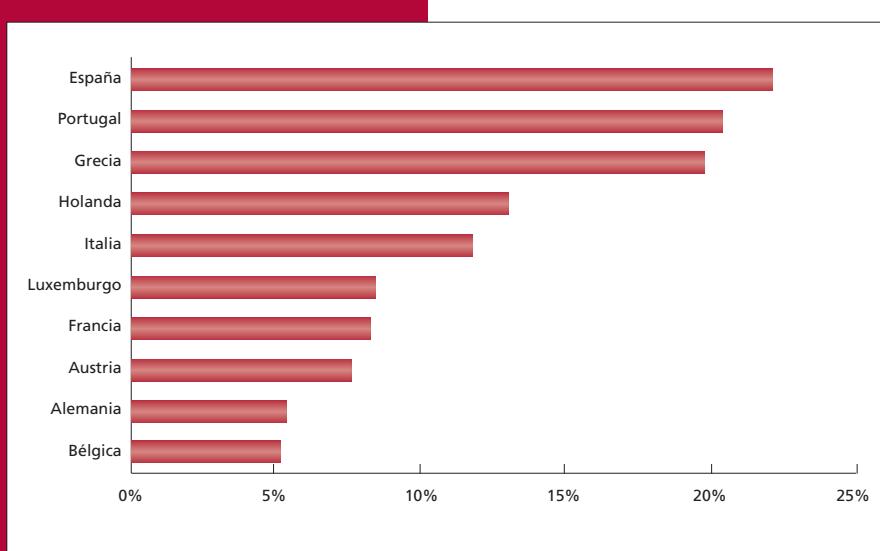


Figura 9.5. Incremento de la demanda de energía eléctrica, países de la UCTE (Unión para la Coordinación de la Trasmisión de Energía), 1999-2003.

Fuente: Red Eléctrica Española, 2004.

anual (figura 9.5.). Sin embargo, el crecimiento es mayor en Asia, con un 3,7% anual, un 2,8% anual en América Central y Sudamérica, un 2,6% anual en África, y un 2,4% anual en Oriente Medio. Este crecimiento es particularmente abrupto en nuestro país (figura 9.5.).

El automóvil es un ejemplo de tecnología que produce un importante impacto ambiental (emisión de gases), aunque también permite la adaptación (motores más eficientes que consumen y emiten menos). Su eficiencia, sin embargo, queda contrarrestada por el gran aumento de la flota automovilista, lo cual lleva a que las políticas de disminución del impacto se dirijan no sólo a las mejoras tecnológicas, sino

también al cambio social en el uso del vehículo (mayor uso del transporte colectivo), aunque todavía se está lejos de políticas y comportamientos realmente eficaces al respecto. Así, el parque de vehículos sigue creciendo de forma notable (figura 9.6.).

Año	Parque vehículos
1980	10.192.748
1985	11.716.339
1990	15.696.715
1995	18.847.245
1996	19.542.104
1997	20.286.408
1998	21.306.493
1999	22.411.194
2000	23.284.215
2001	24.249.871
2002	25.065.732
2003	25.169.452
2004	26.432.641
2005	27.700.000

Figura 9.6. Cifras del parque automovilístico.

Nota: Los datos de 2005 son estimados.

Fuente: Dirección General de Tráfico, 2005.

El desarrollo de energías limpias que no produzcan gases de efecto invernadero (el caso de los combustibles fósiles) es uno de los primeros retos respecto al cambio global. Concretamente, el desarrollo masivo de *energías renovables*, y en particular la energía solar, eólica

	Producción en términos de energía primaria (ktep)	2010		
		Escenarios de energías renovables		
		Actual	Probable	Optimista
Total áreas eléctricas	5.973	7.846	13.574	17.816
Total áreas térmicas	3.538	3.676	4.445	5.502
Total biocarburantes	228	528	2.200	2.528
Total energías renovables	9.739	12.050	20.220	25.846
Escenario energético: tendencial				
Consumo de energía primaria (ktep)	141.567	166.900	167.100	167.350
Energías renovables / energía primaria (%)	6,9%	7,2%	12,1%	15,4%
Escenario Energético: eficiencia				
Consumo de energía primaria (ktep)	141.567	159.807	160.007	160.257
Energía Renovables / energía primaria (%)	6,9%	7,5%	12,6%	16,1%

Figura 9.7. Plan de Energías Renovables, España.

Fuente: IDAE.

(1) Datos provisionales. Para energía hidráulica, eólica, solar fotovoltaica y solar térmica, se incluye la producción correspondiente a un año y medio, a partir de las potencias y superficie en servicio a 31 de diciembre, de acuerdo con las características de las instalaciones puestas en marcha hasta la fecha, y no el dato real de 2004. No incluidos biogás térmico y geotermia, que en 2004 representan 26 y 8 ktep.

y maremotriz¹, junto a la cogeneración, es una de las respuestas centrales al problema del cambio climático. Complementario, y muy importante, es el desarrollo de *políticas de ahorro y eficiencia energética*, pues, con independencia del tipo de energía, se requiere llevar a cabo una gestión para minimizar la creciente demanda energética. El lento —aunque firme— desarrollo de estas energías no es tanto un problema tecnológico como social, en el sentido de las barreras sociopolíticas que todavía existen para el necesario avance.

Existen fuentes de energía aún por explotar, entre las que destacan la energía del oleaje (figura 9.8.) y las mareas, que se aprovechaban en la Península Ibérica a través de molinos de marea, posiblemente de origen árabe, introducidos en Europa en el siglo XI y de los que quedan algunos en pie y operativos en el litoral atlántico de la Península Ibérica. El aprovechamiento de la energía marina permitiría prescindir de gran parte del uso de combustibles fósiles de encontrarse tecnologías adecuadas.

1. El potencial de Galicia en energía marina es “comparable a un gran pozo de petróleo”, según el experto Tony Lewis, de University Collage Cork (*Faro de Vigo*, 28/19/2005).



Figura 9.8. Niveles de energía de ola (kW/m).

Fuente: Iberdrola.

Otras *tecnologías adaptativas* son los sistemas de refrigeración, las tecnologías de desalinización, la mejora de semillas, entre otras, que representan algunas de las opciones que pueden llevar a minimizar los impactos del cambio global. Avances en el diseño de viviendas que permitan mantener niveles de confort y calidad ambiental elevados con una menor inversión en energía son también componentes importantes de estas tecnologías adaptativas.

La desalación se utiliza de manera creciente por sus ventajas relativas frente al uso alternativo de otras fuentes de recursos. La desalación de agua marina tiene un enorme potencial de combinarse con el uso de energía marina y resolverse el problema de disolución de las salmueras que genera. De hecho, John F. Kennedy dijo hace más de 40 años “Si fuese posible obtener a un coste modesto agua dulce de agua del mar, este logro serviría los intereses de la humanidad a largo plazo de tal manera que empequeñecería cualquier otro logro de la ciencia”. Este logro se encuentra ya cercano: algunas capitales españolas abastecen a su población mayoritariamente mediante agua desalada (e.g. Palma de Mallorca, Alicante). La Comunidad de Regantes de Mazarrón (Murcia) tiene una en

funcionamiento desde noviembre de 1995, que les aporta 4.500 m³/hora para regar 3.600 hectáreas. Los 1.800 agricultores de la Comunidad de Regantes de Cueva de la Almazora en Palomares (Almería) riegan 5.500 hectáreas con los 25.000 m³ que les asegura la planta de desalación de los acuíferos de la zona. La eficiencia energética de la desalación ha mejorado de manera muy importante en los últimos años, lo que ha permitido una gran disminución en el coste por m³. En España hay unas 700 plantas desalinizadoras, y el país se orienta a constituirse como líder en el uso de esta tecnología, contando con algunas empresas líderes en este sector en el ámbito internacional, aunque la ubicación de algunas de estas plantas ha suscitado fuerte oposición social².

Es más que posible que algunas tecnologías que pueden resultar clave en el futuro para reducir las emisiones de gases invernadero sean hoy en día impensables y se originen de desarrollos relativamente inesperados. De hecho, la historia de la ciencia está plagada de ejemplos de desarrollos científicos sin aparentemente utilidad práctica para sus descubridores (como el ADN), algunos de los cuales han dado pie a enormes desarrollos tecnológicos (e.g. biotecnología). Por otro lado,

es igualmente posible que grandes esfuerzos y enormes inversiones para el desarrollo de alguna tecnología prometedora, como la fusión nuclear, no aporten los réditos esperados.

La capacidad de las sociedades para desarrollar a la velocidad necesaria las tecnologías de mitigación y adaptación al cambio global es un asunto clave. La tecnología no es una esfera independiente de la sociedad, sino grandemente dependiente de los contextos sociales (MacKenzie y Wajcman, 1998), por lo que se requieren cambios y esfuerzos por parte de las diversas instituciones y agentes sociales (gobiernos, empresas, organizaciones sindicales, organizaciones sociales en general) para superar las barreras (desconocimiento, rutinas, descoordinación, intereses particulares espurios, financiación...) y, por el contrario, aprovechar las oportunidades que el cambio global abre a un desarrollo tecnológico limpio y socialmente justo.

9.4. El papel de la política

Los importantes cambios sociales necesarios para abordar la mitigación y adaptación al cambio global³ hacen más relevante si cabe el papel protagonista

2. Por ejemplo, los conflictos en torno a la planta desaladora que se está construyendo en la margen izquierda de la Rambla de Valdelentisco, entre Mazarrón y Cartagena (Murcia).

de la esfera de la política, y particularmente de las políticas públicas. El “mercado” (o la competitividad económica) no puede resolver por sí mismo estos graves problemas, ni en general la protección del medio ambiente como bien común que es. De hecho, el mercado forma parte del problema —al basarse sobre todo en el beneficio pecuniario y el corto plazo— y, precisamente por ello, también ha de ser una parte importante de la solución. El cambio global requiere potenciar fuertemente las políticas públicas de mitigación y adaptación en los ámbitos internacionales y nacionales, pero también en los autonómicos y locales.

Conviene aclarar que las políticas públicas no se refieren sólo a la legislación —aunque ésta es la base imprescindible⁴— sino que son *estrategias* y líneas de acción determinadas por el interés común, dirigidas a guiar, articular y promover las acciones de los diversos actores, como son: el Estado, las empresas privadas y las organizaciones civiles, en este caso en el ámbito del cambio global. Las políticas públicas se desarrollan a través de instrumentos diversos: legislativos, económicos, fiscales y sociales, pero lo importante (y complejo) es que todos

esos instrumentos trabajen de forma coordinada con el objetivo común de la minimización del cambio global.

El relevante papel de la política se pone de manifiesto, por ejemplo, en Alemania en relación a la reducción de emisiones y el consumo de energía: las emisiones de gases de efecto invernadero se han reducido en un 19% durante el periodo 1990-2005 (EEA, 2005). Esta tendencia se debe —además del cambio en los combustibles utilizados— a las nuevas políticas y medidas como resultado de los tratados internacionales, y por desacoplar el crecimiento económico del consumo energético. Los cambios en el consumo ciudadano y la implementación de eco-tasas⁵ también han tenido una influencia en esa disminución.

La tabla 9.2. sintetiza algunos de los instrumentos políticos más importantes que se han desarrollado hasta el momento con relación a la mitigación y adaptación al cambio global, con resultados diversos. Cabe destacar que las políticas de mitigación, por su propia naturaleza, no son al cien por cien eficaces y que, además, el cambio global lleva ya un largo recorrido y contiene inercias que obligan a actuar también sobre los efectos. Es decir, se

requiere políticas de mitigación pero también de adaptación, entendidas como aquellas orientadas a paliar el impacto del cambio global, o al menos a no magnificarlo.

Las herramientas políticas para abordar el cambio global deben buscar, claramente, el concierto más amplio en el conjunto de las naciones.

Probablemente los tres convenios de ámbito global más importantes para afrontar el problema del cambio global son los siguientes:

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

(Cmnucc,

Unfccc.Int/Portal_Espanol/Items/3093.Php

Conocida popularmente como el Protocolo de Kioto, en la Convención se fija el objetivo último de estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero “a un nivel que impida interferencias antrópicas peligrosas en el sistema climático”. Se declara asimismo que “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”. La convención ha entrado

3. Véase los informes de referencia del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

4. La perspectiva desreguladora minimiza la importancia de la esfera legislativa y normativa formal. Para profundizar en esta perspectiva, véase: Kahn, Alfred E. (1988).

5. Las ecototas para disminuir el impacto ambiental deben cuidar el no producir mayor desigualdad social.

Tema	Nivel	Tratados
Agua	Europeo Nacional	Directiva Marco de Aguas (2000/60/CE) Plan Hidrológico Nacional (Ley 11/2005) Programa A.G.U.A. (2004-2008) Libro Blanco del Agua
Conservación	Internacional	Convenio RAMSAR: Humedales de Importancia Internacional Convenio CITES: Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora silvestre Convenio de Bonn: Conservación de las Especies Migratorias de Vida Silvestre
	Europeo	Convenio de Berna: Conservación de la Vida Silvestre y del Medio Natural en Europa Estrategia Forestal Europea Directiva 79/409/CEE para la conservación de las aves Directiva 92/43/CEE relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres Directiva 90/219 sobre uso confinado de Organismos Transgénicos Directiva 90/220 sobre liberación intencionada de Organismos Transgénicos en el medioambiente Convenio sobre el Paisaje
	Nacional	Estrategia Forestal Española / Plan Forestal Español (2002-2032) Estrategia Española para la Conservación y Uso sostenible de la Diversidad de los Ecosistemas Estrategia de Conservación de Especies Amenazadas Plan Estratégico para la Conservación y Uso Racional de los Humedales
Calidad ambiental	Internacional	Protocolo de Montreal: relativo a las sustancias que agotan la capa de Ozono
	Nacional	Ley 16/2002, para la prevención y control integrado de la contaminación
Cambio climático	Internacional	Protocolo de Kioto
	Nacional	Plan Nacional de Asignación Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
Costas	Nacional	Ley de Costas
Desertificación	Internacional	Convenio de Lucha contra la Desertificación
	Nacional	Programa de Acción Nacional contra la Desertificación
Diversidad biológica	Internacional	Convenio sobre la Diversidad Biológica
Energía	Europeo	Directiva 2001/77/CE, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad Directiva 2004/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al fomento de la cogeneración Directiva Comunitaria de Eficiencia Energética de Edificios ORDEN PRE/472/2004, creación Comisión Inter-ministerial para aprovechamiento energético biomasa
	Nacional	Plan de Energías Renovables (2005-2010) Estrategia Española Eficiencia Energética (2004-2012) Plan Renove Electrodomésticos, Plan de Equipamiento y Uso eficiente de la Energía en la Administración Pública Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética (2005-2007) Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)
Ecosistemas marinos	Internacional	Convenio de Barcelona / Plan de Acción del Mediterráneo. Convenio para la protección del medio ambiente marino del Atlántico del noreste (OSPAR) Convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias (Convenio de Londres)
Educación Ambiental	Nacional	Libro Blanco de la Educación Ambiental
General	Europeo	Estrategia Europea de Desarrollo Sostenible
	Nacional	Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (pendiente aprobación)
Residuos	Nacional	Plan Nacional de Residuos (2000-2006)

Tabla 9.2. Algunos de los instrumentos básicos para abordar el cambio global.

ya en vigor, pero existe todavía un contingente importante de países, entre ellos el que más emisiones genera, EE.UU., que no lo han ratificado.

Se está trabajando ya en buscar nuevos objetivos a implementar a partir del año 2012.

El Convenio sobre la Diversidad Biológica

(cbd; www.biodiv.org/default.shtml)

Los objetivos del presente convenio, que se han de perseguir de conformidad con sus disposiciones pertinentes, son la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos.

Convención de las Naciones Unidas para Combatir la desertificación

(UNCCD; www.unccd.int/)

El objetivo de esta convención es combatir la desertificación y mitigar los efectos de las sequías en países que sufren sequías severas y/o desertificación, particularmente en África.

Mientras que es importante alcanzar convenios globales, también es necesario desarrollar políticas regionales, nacionales y locales, ya que la problemática causal y de impactos del cambio global varía a todas estas escalas.

Las convenciones y herramientas indicadas anteriormente obligan

generalmente a los Estados, pero sólo en contados casos las responsabilidades se trasladan a los actores privados y ciudadanos, lo que les resta efectividad. De hecho, sólo la modificación de conductas individuales puede en último término curvar la progresión de la presión humana sobre el planeta que es, en grado último, el sumatorio de las actividades individuales y las derivadas de sus prácticas de consumo. Mientras que en aspectos relacionados con la salud pública, como el caso del tabaco, se ha regulado con éxito el comportamiento individual, parece lógico pensar que el consumo excesivo de recursos pueda ser sujeto de una regulación normativa similar. De hecho, las tarifas de consumo de agua son habitualmente progresivas, donde el coste por m³ aumenta progresivamente por tramos de consumo. Sin embargo, el consumo de energía, que conlleva la emisión de gases de efecto invernadero, podría estar sujeto a medidas progresivas similares para incentivar el ahorro. En nuestro país la reciente legislación que obliga a la instalación de placas solares en nuevas viviendas es un paso adelante en la regulación normativa de medidas encaminadas a mitigar el problema del cambio global. La aceptación social de medidas normativas que afectan las pautas de consumo requieren, sin embargo, un amplio consenso sobre la importancia de afrontar estos problemas, lo que a su vez requiere un nivel de conocimiento que quizá no se

ha alcanzado aún en algunas sociedades como la nuestra, donde las ecotisas encuentran aún considerable resistencia. Esta resistencia requiere también de políticas encaminadas a educar y concienciar a la sociedad, como la campaña *El total es lo que importa* del Ministerio de Medio Ambiente, que acierta plenamente en el mensaje transmitido. Algunas administraciones, notablemente la Administración actual de EE.UU. parecen fiarlo todo a la capacidad de la tecnología para encontrar soluciones. Sin embargo, la discusión precedente (sección 9.3.) indica claramente que ésta es una vía arriesgada, pues no existen garantías de que las tecnologías, incluso si se presentan como muy prometedoras, como, por ejemplo, la fusión nuclear, generen los resultados esperados en un plazo de tiempo aceptable.

La formulación de políticas requiere, en muchas ocasiones, del asesoramiento científico. Uno de los problemas con los que se enfrenta el legislador es, en ese caso, la selección de asesores científicos, lo que requiere de criterios claros de fiabilidad. El desastre del buque *Prestige* puso de manifiesto cómo en una situación de crisis, como se pueden dar en el contexto del cambio global (extinciones de especies, desastres naturales, mortalidad asociada a olas de calor, sequías, riadas, etc.), emergen legiones de "expertos" cuyas opiniones son frecuentemente divergentes, lo que

genera confusión. Es esencial, por tanto, que los legisladores y responsables políticos adquieran criterios de fiabilidad en relación a la ciencia y los científicos. Esto requiere del uso de múltiples criterios, que pasan por la puesta en marcha de comités de asesoramiento, compuestos por investigadores cuya excelencia se sustancie en indicadores objetivos, pertenecientes a organismos e instituciones solventes y que no se encuentren contaminados por compromisos o intereses de las partes. Las dificultades en la selección de expertos solventes no son exclusivas de nuestro país. Baste considerar que el escritor de *best sellers* y médico de formación, Michael Crichton, prestó testimonio en el Comité de Medio Ambiente del Senado de EE.UU. como experto científico en cambio climático con el único mérito de ser autor del libro *Estado de miedo*, plagado de errores y que presenta el problema del cambio climático como una confabulación de grupos eco-terroristas en connivencia con científicos.

Además de políticas normativas ejecutadas por la vía de sanciones e impuestos, los presupuestos públicos y la inversión del mercado pueden ser herramientas importantes también en la mitigación del cambio global. En España el mercado medioambiental ha crecido de manera significativa en los últimos diez años, representando en la actualidad



Desierto y fuerte erosión en los alrededores del Mar Muerto, con Israel al fondo.

Fotografía: F. Valladares.

el 1,7% del PIB. Si se incluye el gasto e inversión de todos los sectores medioambientales tradicionales (agua, residuos, energías renovables y atmósfera) junto a los nuevos sectores emergentes (el forestal, la agricultura biológica y el turismo rural) se superarían los 12.000 millones de euros al año. A nivel mundial, la cifra actual del mercado medioambiental ronda los 330.000 millones de euros, y la previsión de crecimiento para el 2010 se sitúa en un 30%. Durante los últimos 15 años, la mayoría del mercado medioambiental ha registrado crecimientos superiores al incremento industrial o al de la economía en general, y la tendencia observada en diversos países europeos indica que

continuará este aumento durante los próximos cinco años, para después estabilizarse. El cambio global, y en particular el cambio climático, ha actuado de catalizador de este empuje económico del mercado medioambiental.

Por su parte, el sector de las energías renovables factura 620.000 euros —sin incluir la cogeneración— y emplea a 5.000 personas. En total, son 219.382 personas las que trabajan en España en el sector del medio ambiente, de las cuales casi una cuarta parte se encuentran en el sector público. A nivel europeo, el mercado medioambiental emplea globalmente al 2,3% de la población ocupada, lo que supone que más de 3,5 millones de trabajadores en este sector. Además, cerca de un 87% de empresas españolas destina hoy en día un presupuesto a gastos derivados de la gestión medioambiental, fundamentalmente destinados a gestión de residuos, tratamiento y gestión de aguas residuales, emisiones atmosféricas y formación de empleados.

No obstante, aunque existe la tendencia hacia un mayor peso del medio ambiente en el gasto público y en la inversión privada, los datos actuales revelan que su prioridad aún es baja. De hecho, los presupuestos generales del Estado del Ministerio de Economía y Hacienda no contemplan incrementos relevantes en las partidas incluidas en apartados medioambientales.

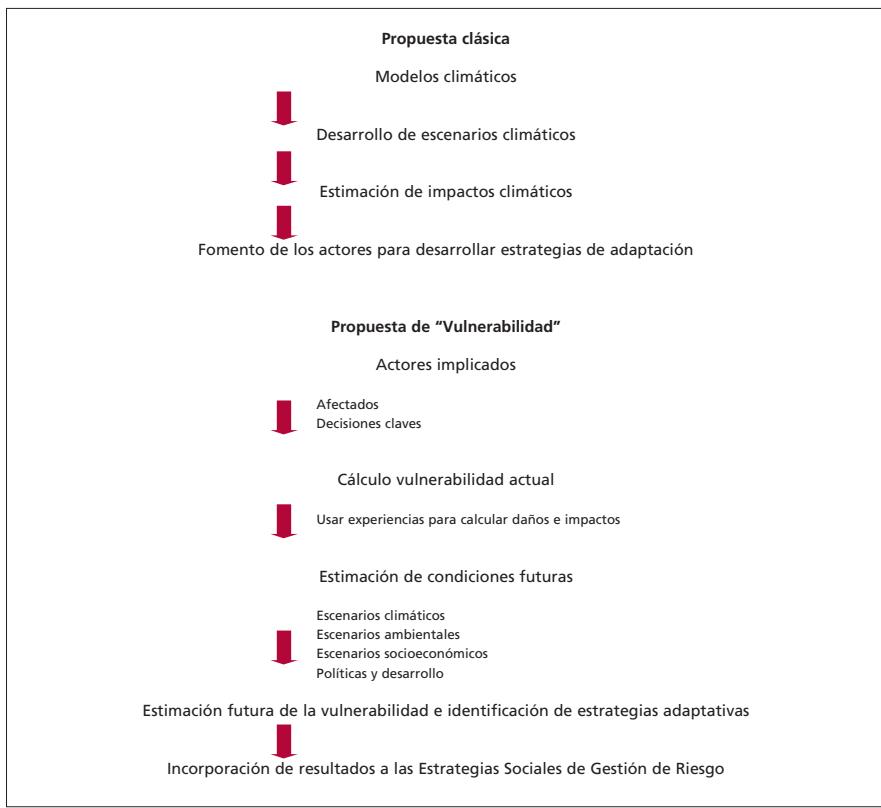


Figura 9.9. Enfoques investigadores y políticos diferentes.

Por último, se requiere avanzar en la *horizontalidad*. La problemática del cambio global requiere integrar la cuestión medioambiental en los análisis y decisiones económicas en todos los sectores económicos y a todos los niveles, así como involucrar a la sociedad civil en su solución (concienciación, información, participación social). La figura 9.9. ilustra las diferencias de enfoques.

Los nuevos enfoques sobre políticas públicas conciben el gobierno como la gobernanza (CE 2001), es decir, como la toma de decisiones basada en la apertura y transparencia, en la amplia participación de los diversos agentes sociales, en la corresponsabilidad, en la eficacia y en la coherencia, integrando la protección del medio ambiente con el resto de las políticas. El nuevo enfoque de gobernanza

responde no sólo a la concepción democrática de la sociedad, sino también a razones de eficacia en la resolución de los graves problemas del cambio global, que requieren la participación activa del conjunto de la sociedad. De hecho uno de los objetivos más importantes de las políticas en relación con el cambio global ha de ser buscar la implicación activa de los ciudadanos.

La participación social en la formulación de políticas frente al cambio global se ha canalizado en buena medida a partir de organizaciones no gubernamentales vinculadas al movimiento ecologista, que participan en mesas del Ministerio de Medio Ambiente, Patronatos de Parques Nacionales y, a nivel internacional, en las convenciones internacionales que se ocupan del problema de cambio global. Todas ellas se muestran muy activas en el ámbito del problema del cambio global, donde realizan una importante labor de sensibilización de la sociedad, propuestas de políticas avanzadas y actitudes individuales para afrontar el problema de cambio global. Sus propuestas van principalmente encaminadas a la mitigación, pero no tanto a la adaptación, del cambio global.

La aplicación de políticas al cambio global ha abierto además nuevos debates que requieren de nuevos conceptos y *corpus jurídicos*, como es el de los derechos de las generaciones futuras, que plantean retos aún por resolver al Estado de derecho.

9.5. El papel de la educación y la sensibilización ambiental

La insuficiente conciencia ambiental frente al cambio global pone de manifiesto que además de los retos económicos y tecnológicos existen otras barreras que dificultan o incluso impiden el cambio de la percepción del problema y la puesta en práctica de actitudes individuales y colectivas responsables. Existen evidencias claras de un escaso conocimiento e ideas erróneas en torno al cambio global en general y al climático en particular y, lo que es más grave, sobre la estrecha relación que existe entre el bienestar humano y la conservación de los ecosistemas. Esta situación es explicable si tenemos en cuenta que aproximadamente la mitad de la población humana vive en las ciudades y que la vida urbana hace perder la conciencia de la dependencia de la humanidad de los servicios de los ecosistemas. La concienciación ambiental no requiere necesariamente que se genere más información en una sociedad donde a través de Internet la información está globalizada. De hecho la información puede llegar a ser abrumadora y si no se sabe divulgar será difícil que los individuos sean capaces de entender y lo que es más importante internalizar la dimensión del problema y generar un cambio en su patrón de consumo. El Programa de Naciones

Unidas de Evaluación de los Ecosistemas del Milenio consciente de este problema no lo aborda generando más información sino con la integración de la información en forma de visiones positivas sobre a dónde vamos en las relaciones entre los humanos y los ecosistemas. Por esta razón elabora una serie de escenarios creíbles alternativos al modelo de desarrollo actual en donde se exponen variables fundamentales y puntos de bifurcación que promueven actitudes de cambio. Bajo estos escenarios los problemas y las crisis son percibidos como oportunidades para generar cambios hacia un mundo actual y futuro mejores. Las generaciones actuales tenemos en nuestra mano decisiones que afectan a las condiciones de vida de las generaciones futuras.

Es evidente que las nuevas políticas del cambio global deben promover procesos educativos y participativos que incrementen la percepción social de la interrelación insustituible entre los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano. Esta acción debería facilitar el diseño e implementación de modelos de desarrollo que mejoren la resiliencia de los sistemas socioecológicos reconociendo la existencia de umbrales de cambio, incertidumbres y sorpresas.

A nadie escapa la importancia de la educación y la sensibilización en materias de medio ambiente para

mitigar y adaptarse al cambio global. En la última década se ha progresado mucho en el campo de la protección medioambiental. Sin embargo, aunque el público parece estar concienciado de los temas medioambientales, hay una discrepancia entre las convicciones expresadas y el comportamiento de *facto* en amplios segmentos de la población. La educación medioambiental dirigida tanto a los adultos como a los escolares, podría ayudar a estrechar la brecha y a mejorar las condiciones necesarias para alcanzar la sostenibilidad. Varias rutas inexploradas de educación medioambiental, situadas en la intersección entre la información, la educación, la tecnología y la ciencia, podrían ofrecer alternativas que también pueden y deben ser capaces de alcanzar a los adultos.

En la Enseñanza Primaria en España los contenidos de educación ambiental se abordan dentro de la materia de Conocimiento del medio, y en la Enseñanza Secundaria Obligatoria (ESO), que cursan los estudiantes entre 12 y 16 años, los contenidos de educación ambiental se incluyen en las áreas de Ciencias de la naturaleza, Ciencias de la tierra y del medio ambiente, y Ciencias sociales y Tecnología. En los seis primeros años de la Enseñanza Primaria no aparecen temas relacionados con el cambio global. En los últimos cursos de la Enseñanza Primaria

Mosaico de cultivos de cereal de secano con matorral mediterráneo y sabinas en una zona de notable abandono rural en el Parque Natural del Alto Tajo.

Fotografía: F. Valladares.



y en los dos ciclos de la ESO ya sí se incluyen temas directamente relacionados con el cambio global, destacando el efecto invernadero, la influencia del ser humano en el clima, la deforestación, la capa de ozono, la lluvia ácida, la desertificación y los riesgos climáticos. Los contenidos se vinculan con los siguientes objetivos: a) conocer la realidad del ambiente; b) desarrollar la sensibilidad e interés por el ambiente y c) fomentar la adquisición de hábitos y conductas de respeto, conservación y mejora del ambiente. Algunas actividades en relación con la educación ambiental incluyen, por ejemplo, recogida selectiva de papel y pilas, ahorro de agua y energía, huerto escolar, ecoauditorías, visitas a centros de interpretación, etc.

En el ámbito universitario, los temas en relación con el cambio global están incluidos en las carreras de Físicas, Químicas, Biológicas, Geológicas, Geografía, Ciencias Ambientales y Sociología, así como en otras relacionadas con la educación, como son: Magisterio y Pedagogía. Representantes de profesores de Primaria, Secundaria y universidad de

ámbitos tanto públicos como privados manifestaron un cierto grado de escepticismo respecto al estado actual y a la evolución de la educación ambiental (extraído de la Estrategia Navarra de Educación Ambiental).

Sin embargo, la educación y la sensibilización ambiental no se dirigen exclusivamente hacia el sector educativo formal sino al conjunto de la sociedad (ciudadanos, instituciones políticas, empresas, organizaciones políticas y sociales...). Se trata de actividades dirigidas a la concienciación, negociación y capacitación para la acción ambiental de las instituciones y las personas para el cambio de creencias, normas, valores y comportamientos para la mitigación y adaptación al cambio global, y se articula en torno a tres instrumentos que considera el *Libro Blanco de Educación Ambiental* en España:

- Información. Ley 27/2006, de 18 de julio por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).
- Formación y capacitación ambiental.
- Participación social.

La participación de la sociedad es la clave fundamental para obtener los cambios que se necesitan y para ello es preciso incrementar la sensibilidad ante la degradación medioambiental. Sólo a través de la participación se puede conseguir la cohesión social necesaria para resolver los complicados problemas a los que se enfrentan las sociedades actuales ante el cambio global. Es importante promover la interrelación entre educación medioambiental



El luminoso sotobosque del quejigar es muy rico en especies de flora y fauna, algunas como las peonías del primer plano de gran valor naturalístico y estético.

Fotografía: F. Valladares.

y participación ciudadana en decisiones concernientes al medio ambiente. La voluntad de los ciudadanos de involucrarse en procesos públicos de decisión depende del grado en que se sientan afectados personalmente por el tema, así como de su sentido individual de “competencia subjetiva” (Fiorino, 1990). Con toda probabilidad, ambos criterios pueden fácilmente ser influenciados por la educación medioambiental. Simultáneamente, la creciente participación ciudadana puede ser vista como una valiosa contribución a la educación medioambiental así

como una contribución a la búsqueda de la sostenibilidad.

Además de varias actividades nacionales dentro de los países miembros europeos, la Unión Europea/Comunidad Europea, el Consejo de Europa, el Centro de Investigación e Innovación Educativa de la OCDE (CERI) y la UNESCO desarrollan programas de educación medioambiental. Organizaciones internacionales sin fines de lucro también están iniciando y llevando a cabo programas y estableciendo redes internacionales para ayudar a las instituciones antes mencionadas. Un ejemplo de esto es la Fundación para la Educación Medioambiental en Europa (FEEE), fundada en 1981, que desarrolla programas para jóvenes y escolares (por ej.: la iniciativa “European Eco-Schools” y el programa “Young Reporters of the Environment”), así como programas destinados a los adultos, tales como “European Blue Flag” programa sobre playas y puertos deportivos.

Puesto que la educación medioambiental está en la actualidad dirigida a las escuelas —lo que significa que es aplicable principalmente a jóvenes y niños— son precisas más acciones destinadas a los adultos. Si bien hay consenso en que la educación medioambiental no se limita al grupo de los jóvenes, en general las actividades en el campo de la educación de adultos

en temas medioambientales no están siendo explotadas en suficiente profundidad. Éstas podrían, por ejemplo, consistir en medidas que alentasen la formación profesional continua y holística en apoyo y como suplemento de esfuerzos en curso; se podrían desarrollar o adaptar para su uso en educación medioambiental nuevos métodos y tecnologías de la información; incluso se podrían explorar medios legislativos y educativos con el fin de aumentar la participación ciudadana en decisiones relativas al medio ambiente; finalmente, se podrían fomentar o desarrollar conceptos que incrementaran el atractivo de los estilos de vida y patrones de consumo ecológicamente deseables. Puesto que las metas medioambientales entran parcialmente en conflicto con el crecimiento económico y la prosperidad creciente, podría ser útil que la generalizada interpretación de prosperidad como “abundancia” se sustituyese por una interpretación en términos de “calidad de vida”, que pudiera incluir una expansión de los aspectos no materiales del bienestar. Tal cambio podría estimularse y apoyarse por la innovación tecnológica, pero su éxito depende de la innovación social y de un cambio de actitud.

Las experiencias de buenas prácticas en relación a la mitigación y adaptación al cambio global pueden jugar un papel importante. Según las Naciones Unidas,

las buenas prácticas no son lo que pudiese considerarse como la mejor actuación imaginable sobre un determinado asunto del cambio global, sino aquellas actuaciones que suponen una transformación en las formas y procesos de actuación, y que pueden suponer el germen de un cambio positivo en los métodos de actuación tradicionales. Demostrando que la práctica produce, aquí y ahora, mejoras tangibles en las condiciones socioambientales en cualquiera de las esferas temáticas propuestas y no sólo esperanzas en cambios futuros o hipotéticos. En ese sentido, las buenas prácticas incluyen aspectos como la colaboración de varias entidades, de diversos órdenes públicos y privado. Una buena práctica también implica un refuerzo de las redes sociales y de la participación social. Las buenas prácticas son “ejemplos” que tienen una fuerte potencialidad de impactar el cambio social por “imitación”. Un área importante de buenas prácticas es la que puedan desarrollar aquellas instituciones y personas con potencialidad de producir un fuerte impacto en la sociedad y, por tanto, pueden ser “ejemplificadores”. Un buen ejemplo en este sentido es la reciente iniciativa de la Presidencia del Gobierno de España de adaptar el edificio de La Moncloa a sistemas de eficiencia energética ante el problema del aumento del consumo de energía, un problema central del cambio climático.

9.6. El papel de los medios de comunicación

La información es esencial, sin embargo, el público se encuentra abrumado por un exceso de información con mensajes a veces diametralmente opuestos. Por ejemplo, los escaparates de las librerías muestran en estos días ejemplares de los libros *Homenaje a Gaia* (Laetoli, 2005), del investigador James Lovelock, autor del concepto de Gaia como un planeta que se autorregula como un organismo vivo, y la novela *Estado de miedo*, (Plaza Janés, 2005) del autor de best sellers Michael Crichton. Mientras Lovelock postula que los impactos de la humanidad sobre el funcionamiento del sistema Tierra son tan intensos que es ya inevitable una crisis ambiental global que diezmará la población humana, Crichton —que no es un científico— articula el argumento en una trama de ficción con una patina de ciencia a través de numerosas notas a pie de página y referencias, muy sesgadas y frecuentemente incorrectas, a artículos e informes científicos, de que las medidas correctoras propuestas para paliar el cambio climático carecen de base científica y obedecen a intereses ocultos de ciertos grupos que se esconden detrás de la promoción de la trama de la crisis ecológica global, inexistente según el autor.

Está claro que existe una necesidad de aportar información fiable y rigurosa al público, y que los medios de comunicación, incluyendo la actividad editorial de libros, supone la vía principal a partir de la cual los ciudadanos reciben información, creando opinión y decantando la toma de posición y actitudes de la sociedad, que a su vez retroalimenta la toma de decisión por los responsables políticos. Dado que se trata de un problema con una componente científica fundamental, los informadores responsables de transmitir la información a la sociedad debieran contar con una especialización en ciencia y sociedad. Sin embargo, muy pocos medios de comunicación, los más poderosos económicamente, pueden permitirse el lujo de contar con comunicadores especializados en ciencia y sociedad. Esto plantea a veces una barrera de comunicación entre los investigadores o los resultados de su investigación y los comunicadores que se traduce más frecuentemente de lo que debiera en imprecisión en la comunicación.

Para que la comunicación entorno a los aspectos científicos del cambio global, tanto en lo que respecta a la información como a la divulgación, sea responsable y verídica, es necesario que los medios dispongan de profesionales con formación adecuada. En este sentido, desde hace ya unos años en algunas universidades se vienen

impartiendo estudios de comunicación y periodismo científico. Por ejemplo, el diario *El País*, la universidad autónoma de Madrid y la Fundación BBVA imparten, en su escuela de periodismo, especialidades de periodismo ambiental y periodismo científico. Cabe esperar que, ante el creciente interés social por los retos ambientales, los medios de comunicación incrementen su demanda de dichos profesionales.

La mayor implicación de los investigadores en la diseminación a la sociedad y el establecimiento de una alianza sólida entre científicos y profesionales de la comunicación, para asegurar que la información trasmisita es precisa y veraz, resulta también imprescindible. Esta alianza estratégica debe vencer reticencias por ambas partes: por un lado, los científicos sienten muchas veces pudor en ver sus opiniones plasmadas en la prensa porque originan frecuentemente críticas de sus colegas. Esto se debe a que el proceso de traslación de la información científica al tratamiento sintético y comprensible para el ciudadano medio redunda frecuentemente en una simplificación del mensaje y, más veces de las deseables en errores de interpretación, que son utilizados por otros científicos para cuestionar el conocimiento del investigador citado como fuente de la noticia. La comunidad científica está imbuida de un agudo espíritu crítico, prevalente en todos los colectivos cuya

actividad implica una componente importante de creatividad, quizá particularmente desarrollada en nuestro país, donde la envidia, según Pablo Neruda, tiene carácter legendario, aunque también se ha dicho que no es que haya más envidia en España que en otros países, sino que la nuestra es de mejor calidad. Los riesgos de ser víctimas de las críticas y mofas de los colegas, junto con el esfuerzo adicional que supone participar en tareas de comunicación desaniman frecuentemente a los investigadores de participar en éstas.

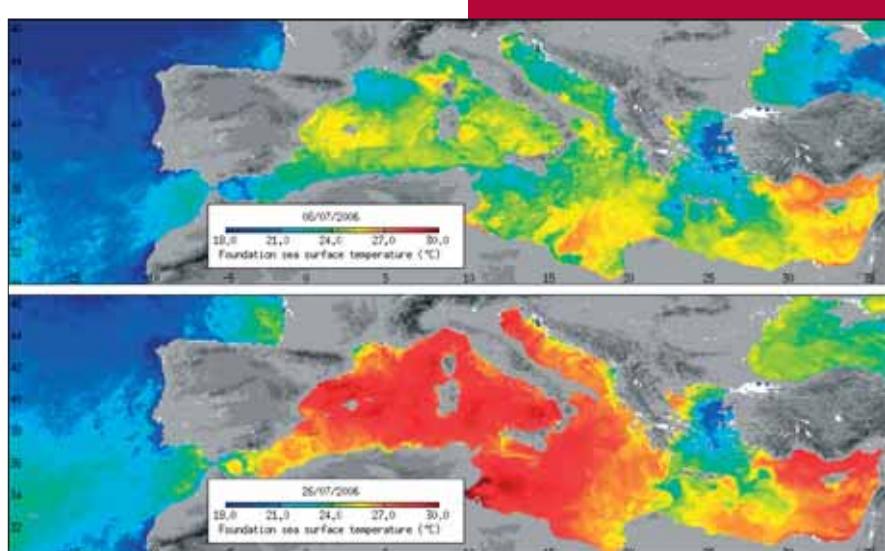
Por otro lado, los comunicadores tienen dificultades en evaluar la fiabilidad de las fuentes, en el caso de problemas, como es el caso del cambio global, en los que pueden encontrar opiniones divididas. Los comunicadores podrían resolver estas dudas conociendo los indicadores de excelencia habituales en la evaluación científica y utilizarlos como indicadores, además de contrastando opiniones entre varios científicos fiables. Muchos investigadores son reticentes a atender a los comunicadores, y cuando lo hacen frecuentemente ofrecen información ambigua o plagada de matices solamente comprensibles para otros expertos y de escasa utilidad como información para el ciudadano medio. La alianza necesaria entre científicos y comunicadores requiere, por tanto, de la construcción de confianza entre ellos, que quizás se pueda ver facilitada por un

manual de buenas prácticas elaborado conjuntamente.

En primer lugar es necesario romper con la visión apocalíptica con la que se nos muestra la mayoría de las veces el cambio global o alguno de sus componentes en especial el cambio climático, que se asemeja en muchos informes a una historia de horrores (inundaciones, sequías, extinciones en masa) propia de una película de catástrofes. Hoy sabemos que mensajes en negativo de carácter catastrofista generan rechazo e inmovilismo social frente a actitudes y comportamiento proactivos que estimulan y modulan el cambio de los patrones de consumo de los humanos. Este tratamiento negativo del problema puede explicar la paradoja de que todos los sectores sociales consideran al cambio climático como el mayor reto ambiental de la humanidad en el siglo XXI, mientras que es evidente que la respuesta social no se corresponde con la importancia del problema. Es necesario, para vencer esta inercia, enfatizar los cambios de actitud y estilo de vida que pueden adoptar los ciudadanos para contribuir a mitigar el problema de cambio global y adaptarse a sus consecuencias.

¿Es esto el cambio global?

Uno de los casos más frecuentes de confusión en los medios de comunicación y, por tanto, en la percepción de la sociedad es la



propensión a plantear si un evento inusual determinado es o no una manifestación del cambio global. Ejemplos recientes de éstos son, por ejemplo, el calentamiento extremo de las aguas del Mediterráneo occidental durante julio de 2006 (figura 9.10.) y la proliferación de medusas en las costas del Levante español en agosto de 2006.

La cuestión de si estos acontecimientos puntuales, u otros como el huracán Catrina de 2005, son manifestaciones del cambio global o el cambio climático no pueden tener respuesta definitiva, pues el cambio global o cambio climático no se componen de eventos concretos sino de una pauta o u patrón estadístico de series de eventos consistentes con tendencias esperables o predicciones.

Figura 9.10. Mapa de temperatura superficial del agua de mar del Mediterráneo occidental mostrando un calentamiento de unos 8°C entre el 8 de julio y el 26 de julio de 2006, alcanzándose temperaturas extremas de 30°C.

Fuente: European Space Agency.



Cortesía de Antonio Fraguas, Forges (2006).

Por ejemplo, la aparición de masas de medusas en las playas alicantinas depende, entre otras cosas, del régimen de corrientes, vientos, etc., y una serie de situaciones específicas independientes del proceso de cambio global. El calentamiento inusual del Mediterráneo depende del régimen de vientos, desplazamientos de masas de aire, nubosidad, corrientes marinas y otras condiciones específicas de la zona, que están afectadas sólo parcialmente por el calentamiento global. A nadie se le ocurre argumentar que un accidente de tráfico concreto, que depende de la pericia de los conductores, estado de las vías, condiciones meteorológicas, etc., pueda demostrar la eficacia o no del carnet por puntos establecido

recientemente en nuestro país, pues todos entendemos que la efectividad de este sistema sólo puede evaluarse sobre una estadística suficiente. Esta misma condición aplica también al problema del cambio global.

Sí es posible evaluar, por ejemplo, si estos eventos específicos son consistentes con los patrones de variación esperados en función del cambio global y cambio climático. Así, estos eventos individuales podrían considerarse, si son consistentes con los patrones esperables, "huellas" del cambio global (ver sección 3). Así, el calentamiento anómalo de las aguas del Mediterráneo continúa una tendencia hacia el aumento de las temperaturas máximas que se ha constatado durante

décadas y que parece haberse acelerado en los últimos cinco años, con máximos progresivos de temperatura en 2001, 2003 y 2006. La mayor intensidad, superficie afectada y duración de las proliferaciones de medusas continúa siendo una tendencia constatada durante las últimas décadas (Mills, 2004), en las que la abundancia de medusas se ha triplicado, y que es la esperable en función de la conjunción de la sobre pesca, que ha diezmado sus predadores y competidores, y el calentamiento global, que acelera el crecimiento de estos organismos. Enmarcados en estas tendencias y las predicciones del cambio global es cuando estos eventos toman sentido más allá de las condiciones particulares que pueden haber ocurrido en ellos. De hecho el cambio global es la teoría científica más sencilla capaz de explicar el cúmulo de huellas del tipo de las tratadas aquí que vienen acumulándose año tras año, de forma que cada nueva huella refuerza el concepto y predicciones del cambio global.

Conflictos de intereses y desinformación sobre el cambio global

El cambio global es un problema en el que concurren importantes intereses, muchas veces con un trasfondo económico importante, que son particularmente aparentes en el caso del uso de combustibles fósiles y su papel

en el cambio climático, que podría afectar al negocio de petroleras, empresas del sector, industrias asociadas (e.g. automóvil) y los intereses económicos de poderosos países productores. En la presencia de fuertes intereses, económicos, políticos y corporativos, enfrentados en torno a esta cuestión es preciso estar alerta a campañas de desinformación.

Uno de los baluartes de estas campañas de desinformación es y sigue siendo la incertidumbre científica. Como hemos indicado ya, la incertidumbre es una característica inherente de la ciencia moderna, dejando atrás épocas en que la certeza científica se defendía quemando en la hoguera a herejes que se atrevían a disentir de las teorías “ciertas”. La ciencia no puede demostrar que algo es cierto, sino que su capacidad se limita a demostrar que algo no lo es o, más formalmente, falsificar hipótesis. Todas las teorías científicas que se pueden encontrar hoy en día en libros de texto son inciertas y están abocadas a ser sustituidas por otras teorías, que expliquen mejor y de forma más sencilla y general las observaciones. Éste es el motor de la ciencia, que se debe entender adecuadamente sin que esto signifique que las teorías actuales no son fiables, sino simplemente que son mejorables. La ciencia no es la única actividad que ha de realizar su labor en presencia de incertidumbres y la actividad jurídica está frecuentemente aquejada de incertidumbres comparables. De hecho,

esta similitud permite situar esta argumentación en términos quizás más familiares: lo que se puede plantear a la comunidad científica, en este caso particular, es si hay evidencia, *más allá de una duda razonable*, de que el planeta está sufriendo cambios fundamentales en su funcionamiento y que la actividad humana tiene un papel fundamental en estos cambios. La respuesta es claramente afirmativa, como recoge el IPPC en su informe de 2001, y presenta un amplísimo —aunque no universal— consenso en el seno de la comunidad científica.

Aún así, una parte importante de los pocos investigadores que han mostrado argumentaciones críticas o escépticas en relación al cambio global han visto frecuentemente su argumentación manipulada por grupos de presión interesados en sembrar dudas. Los periódicos *Los Angeles Times* y *New York Times* han publicado recientemente (julio 2006) escritos de investigadores (la historiadora de la ciencia Naomi Oreskes y el geólogo Meter Doran, respectivamente) que han visto cómo su trabajo ha sido utilizado y manipulado por agentes interesados en sembrar esceticismo frente al cambio global, incluso ante el Senado de EE.UU., y manifestando claramente su convencimiento de que el planeta se está calentando como resultado de la actividad humana. Más recientemente el libro *Estado de miedo*, de Michael

Chrichton, siembra dudas, mediante un uso torticero y sesgado de la evidencia científica, sobre el cambio climático, presentándolo, en esta novela de ficción, como un complot eco-terrorista con la implicación de la comunidad científica. El mensaje de esta novela de ficción —que no ha sido, como tal, sujeta a los estrictos controles de veracidad y rigor aplicables a la literatura científica— ha sido utilizado políticamente como evidencia científica. Así, Amy Ridenour, presidenta del Centro Nacional para Investigación en Política Pública de EE.UU., escribe “Crichton presenta abundante evidencia científica de que ni la temperatura del planeta ni el nivel del mar están aumentando” (Ridenour, 2005). Mientras que los miles de artículos científicos publicados por los investigadores más prestigiosos en las revistas científicas más exigentes sólo son leídos por varios centenares de especialistas, el *best seller* de M. Crichton vende millones de copias. Está claro que la literatura científica no es el vehículo para crear opinión en la sociedad, a la que los investigadores sólo pueden tener acceso a través de los medios de comunicación de masas.

Un nuevo riesgo de desinformación en un contexto geopolítico de aumento del número de países que ambicionan dotarse de armamento nuclear es la introducción de posibles agendas de desarrollo de armamento nuclear,



Playa en la isla Rottenest
(Australia Occidental).

Fotografía: C. M. Duarte.

camouflaged bajo la argumentación de la necesidad de desarrollar fuentes de energía que no generen emisiones de gases de efecto invernadero. El desarrollo de energía nuclear para disminuir estas emisiones se ha de considerar seriamente, pero siempre con garantías suficientes de que no se persiguen otros fines.

Es fundamental que los comunicadores estén alerta a estos efectos, conozcan los mecanismos que existen en el seno de la comunidad científica para validar y

evaluar conocimiento científico y busquen la opinión y asesoramiento de investigadores avalados por indicadores objetivos de excelencia.

Medios de comunicación y consumo

El aumento imparable del consumo de recursos es uno de los motores del cambio global. Los medios de comunicación tienen un claro impacto en la sociedad, tanto por los contenidos de su programación regular, que reflejan distintos modelos de estilos de vida, como por el impacto de la publicidad, que se canaliza a los consumidores preferentemente a través de los medios de comunicación y que incluyen muchas veces invitaciones a comportamientos contrarios al desarrollo sostenible. Este impacto conlleva una responsabilidad de los medios de comunicación sobre los patrones de consumo que directa o indirectamente promueven que se debería reflejar en una voluntad ejemplificadora en la sociedad. Esta misión ejemplarizadora debiera considerarse con particular atención en los medios públicos, cuya misión principal es prestar un servicio público.

La programación de los medios de comunicación públicos y privados debería incluir la divulgación de la problemática del cambio global y de las buenas prácticas en la vida cotidiana y proporcionar roles ejemplificadores en toda su programación de producción

propia. Este comportamiento responsable de los medios de comunicación requiere una consideración especial en la adaptación de sus códigos deontológicos. Así, por ejemplo, el Estatuto de RTVE (Ley 4/1980) indica que el Consejo de Administración es responsable de dictar normas reguladoras del contenido de los mensajes publicitarios, lo que se entiende que debiera hacerse en función de la concepción de este ente que en sus Estatutos incluye "... se concibe como vehículo esencial de información y participación política de los ciudadanos, de formación de la opinión pública, de cooperación con el sistema educativo..." .

9.7. El papel de los ciudadanos

En las sociedades de consumo de masas, la responsabilidad en la creación de impacto ambiental se localiza en todas las instancias de la sociedad: la esfera de producción, del consumo, en el trabajo, en el hogar, en los ámbitos de ocio... Es por ello que abordar la mitigación y adaptación al cambio global requiere *la participación correspondiente* —con diferentes niveles de responsabilidad— de todas las instancias políticas, económicas, sociales, así como de todos los individuos que componen esa sociedad. En concreto, en las sociedades democráticas, la representación política —fundamental en el

	Total	Sí	No	DK
EU25	24.786	85%	10%	5%
EU15	15.529	83%	11%	6%
NMS10	9.257	91%	5%	4%
BE	1.000	80%	18%	2%
DK	1.059	84%	13%	3%
DE	1.561	81%	15%	4%
EL	1.000	95%	2%	3%
ES	1.031	87%	6%	7%
FR	1.001	87%	9%	3%
IE	1.000	81%	7%	12%
IT	1.018	79%	12%	9%
LU	506	83%	10%	7%
NL	1.011	75%	20%	4%
AT	1.007	74%	11%	15%
PT	1.000	85%	6%	9%
FI	1.013	84%	14%	1%
SE	1.000	86%	12%	2%
UK	1.322	87%	7%	6%
CY	508	91%	5%	5%
CZ	1.025	89%	6%	4%
EE	1.002	91%	5%	4%
HU	1.005	90%	5%	5%
LV	1.011	85%	9%	6%
LT	1.004	91%	5%	4%
MT	500	89%	8%	3%
PL	1.000	92%	5%	4%
SK	1.203	89%	6%	5%
SI	1000	94%	4%	2%

Figura 9.11. En su opinión, ¿deberían los políticos considerar el medio ambiente tan importante como las políticas económicas y sociales?

Fuente: El Eurobarómetro Especial de la Unión Europea (abril, 2005) sobre las actitudes de los ciudadanos europeos hacia el medioambiente.

funcionamiento del sistema— es “reflejo” de la sociedad que la ha elegido, y, además, debe tender a responder a su electorado si aspira a seguir siendo elegida.

Pero el cambio global requiere *importantes esfuerzos colectivos no siempre fáciles* de llevar a cabo, por lo que se precisa un fuerte liderazgo por parte de las instituciones para comprometerse ellas mismas y movilizar a la ciudadanía, y viceversa, que la ciudadanía más consciente y activa incida en las instancias políticas.

El *nivel de conciencia de las sociedades* sobre la cuestión medioambiental se ha desarrollado de forma muy destacable en las últimas décadas. El Eurobarómetro Especial de la Unión Europea (abril, 2005) sobre las actitudes de los ciudadanos europeos hacia el medio ambiente así lo pone de manifiesto (figura 9.11.).

Además, se ha producido un fuerte desarrollo de *movimientos sociales* a favor del medio ambiente, destacando el movimiento ecologista, pero también los

sindicatos⁶, y otros, que cumplen —como instituciones de mediación social que son— una función importantísima en la concienciación y movilización de las sociedades a favor del medio ambiente.

Sin embargo se requiere avanzar mucho más en la *creación de canales de participación* en los asuntos medioambientales. Un ejemplo es la obligada por ley⁷ participación pública en las Evaluaciones de Impacto Ambiental, cuya aplicación es todavía muy limitada y burocratizada (Pardo, 2002).

Los procesos de participación social permiten el fomento, apoyo y creación de *redes sociales* (de carácter permanente) que profundicen en los contenidos y que asuman las acciones. Estas redes son la base para las políticas de coordinación.

La creación de canales estables de participación pública en las cuestiones del cambio global permite asegurar los siguientes objetivos:

- Establecer nexos entre la Administración y los ciudadanos.
 - Informar a la población sobre los proyectos a realizar para minimizar y adaptarse al cambio global.
 - Recoger información, aspiraciones y necesidades de la población.
 - Implicar a la población en los procesos de decisión públicos.
- Respaldar las estrategias elegidas por los representantes políticos.

Los ciudadanos tienen un poder real en las sociedades democráticas para inducir las políticas ambientales adecuadas y necesarias para adaptarse al cambio global en sus diversas facetas. Primero de todo, los ciudadanos deberían exigir un cumplimiento adecuado de las directivas y normativas ya vigentes, algo que no siempre ocurre. Además, los ciudadanos debemos por un lado pedir el desarrollo de las normativas adecuadas para acelerar la implementación de políticas para la mejora del consumo energético, y también para reducir el consumo energético que ayudaría a controlar las emisiones de gases invernaderos y contaminantes. Estas exigencias de políticas ambientales, en todo caso, complementarán las mejoras en prácticas individuales y de estilo de vida de cada ciudadano. Los ciudadanos deben exigir, además, a los partidos políticos que incluyan su política medioambiental de forma clara y prominente en sus programas electorales y utilizar estos compromisos como una de las bases principales para apoyar o no en las urnas un determinado programa. Hasta que esto no ocurra es improbable que el medio ambiente y el cambio global

ocupen el lugar destacado que debieran, como una de las principales amenazas a la sociedad, en la agenda política.

Sin embargo, las respuestas al cambio global por las sociedades humanas, sobre todo las desarrolladas, pasan por el cambio del estilo de vida de los individuos. Parece claro que cualquier respuesta racional al fenómeno implica un conjunto de medidas relacionadas con el ahorro energético, energías alternativas y el uso racional de los servicios ambientales de los ecosistemas y la autocontención en el consumo. Este cambio requiere de un proceso de educación ambiental para el desarrollo sostenible promovido desde las instituciones a todos los niveles educativos, incrementando la toma de conciencia de los ciudadanos y la capacidad para generar actitudes de cambio que impliquen el rechazo a determinados comportamiento irresponsables con el mantenimiento de la integridad ecológica de los ecosistemas y la aceptación de otros más racionales. Es ante todo fundamental que los ciudadanos entiendan que ellos no se encuentran impotentes ante el cambio global, sino que con pequeños cambios en sus estilos de vida pueden mitigar los efectos del cambio global y adaptarse mejor a éstos, y que su derecho al voto supone una herramienta fundamental —ejercida responsablemente— para que se desarrollen políticas que contribuyan,

6. Greenpeace; Ecologistas en Acción; Amigos de la Tierra, Adena-WWF, SEO-Birthlife, Comisiones Obreras, UGT, CGT, entre otros.

7. RD1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental.



junto con la suma de esfuerzos individuales, al mismo fin. Existen herramientas disponibles para ayudar a los ciudadanos a calcular cómo cambios en sus hábitos de vida pueden contribuir a disminuir su “huella” de carbono

(i.e. las emisiones de CO₂ asociadas a su actividad), como, por ejemplo, la herramienta de calculadora de uso de carbono disponible en www.mycarbonfootprint.eu/es/. Algunas de estas herramientas permiten también

Desierto con promontorios: formaciones geológicas en el Pinnacle. National Park, Australia Occidental.

Fotografía: C. M. Duarte.



La aviación aérea es uno de los sectores que más emisiones de gases invernadero emite. La imagen muestra un avión volando a 10,000 m de altura sobre Islandia.

Fotografía: C. M. Duarte.

evaluar la posibilidad de tomar medidas de mitigación para secuestrar parte del CO₂, que cada uno de nosotros emitimos. Estas herramientas contribuyen a concienciar al ciudadano sobre el importante papel que todos tenemos en esta cuestión y la posibilidad de reducir las presiones ambientales, en este caso las emisiones de CO₂, a partir de cambios asumibles en nuestro comportamiento y estilo de vida.

9.8. El papel de las empresas y el sector privado

Las actividad industrial y empresarial es responsable de buena parte de las presiones sobre el medio ambiente que configuran el cambio global. Han de ser, por tanto, importantes actores en la solución de estos problemas. El fomento de buenas prácticas medioambientales y de códigos medioambientales propios han de servir a este fin. La noción de que estos códigos pueden mermar la producción y los beneficios no están fundamentados. De hecho, casi todos los sectores productivos son vulnerables, por

una razón u otra, al cambio global, que puede afectar negativamente sus perspectivas económicas. Por ejemplo, la gran multinacional Du Pont adquirió, años antes de que se ratificase el Protocolo de Kioto, el compromiso de reducir sus emisiones de CO₂, habiendo reducido sus emisiones en un 72% en relación a las emisiones en 1990 y manteniendo su consumo total de energía constante desde 1990, mientras que se ha propuesto que un 10% de ésta provenga de fuentes renovables para 2010 (www2.dupont.com). El ahorro de energía al incorporar sistemas más eficientes ha reportado un ahorro de 2.500 millones de euros adicionales a esta corporación. Este ejemplo pone de manifiesto que las acciones para mitigar el impacto del cambio global no sólo no merman necesariamente el balance económico de las empresas, sino que pueden también generar beneficios. De hecho, las grandes corporaciones y empresas, así como sectores específicos como el bancario y de seguros comparten la característica de contar con horizontes estratégicos de décadas. Estos sectores han de incorporar

necesariamente escenarios de cambio global en sus planes estratégicos para evitar pérdidas y aprovechar oportunidades. Podría ocurrir que estos sectores devengan en consumidores destacados de conocimiento y asesoramiento científico en el área de escenarios de cambio global, que necesariamente han de incorporar a su planificación.

Las empresas y el sector privado tienen un papel adicional, fundamental para conseguir afrontar con éxito el cambio global: utilizar las oportunidades de negocio que surgen en el contexto de cambio global. Esto requiere, sin embargo, una labor de prospectiva que facilite la identificación de áreas emergentes de actividad y oportunidades de negocio. Nuestro país se encuentra bien situado para atender a algunas de estas áreas emergentes, como el sector de energías renovables o desalinización, en las que nuestro país cuenta con algunas de las empresas líderes en el mundo. El volumen de negocio potencial en relación al cambio global tiene, al igual que los potenciales impactos negativos de

estos cambios, dimensiones colosales. Las empresas y países que sepan identificar y aprovechar estas oportunidades podrán ver sus beneficios y balanzas económicas incrementados hasta compensar, o incluso superar, los impactos del cambio global. Es posible anticipar que las grandes empresas están mejor capacitadas para adaptarse y aprovechar las oportunidades del cambio global que las Pymes. Éstas requerirán de ayuda para abordar estos desafíos.

Un papel con una importancia creciente del sector privado es contribuir, a través del mecenazgo, a fomentar el desarrollo del conocimiento científico necesario para formular estrategias de mitigación y adaptación al cambio global, y contribuir a desarrollar iniciativas que impulsen las actividades con estos mismos objetivos en la sociedad. Ejemplo de éstas en nuestro país son el programa de Conservación de la Biodiversidad de la Fundación BBVA (www.fbbva.es) o el programa de Desarrollo Sostenible de la Fundación Santander-Central-Hispano (www.fundacion.gruposantander.com).

9.9. El papel de lo imprevisible

Aún así el problema del cambio global radica, esencialmente, en un problema de predicción. La predicción es sin embargo, como dijo Niels Bohr, “algo muy difícil, sobre todo si se trata del

futuro”. Las predicciones que se pueden formular en cuanto a la evolución del clima y sus posibles consecuencias están sujetas a grandes incertidumbres derivadas, por ejemplo —como se ha indicado antes—, de las posibles interacciones complejas, no lineales, entre componentes del cambio global. Entre estas incertidumbres se encuentran contingencias o eventos que no pueden ser anticipados ni predichos, incluidos desarrollos tecnológicos y contingencias sociopolíticas. Así por ejemplo, es posible que el cambio en patrones de uso de energía no resulte de la necesidad de disminuir las emisiones derivadas del consumo de combustibles fósiles para mitigar el efecto invernadero, sino que vengan eventualmente de consideraciones de seguridad geopolítica por las que sociedades occidentales impulsan el uso de energías que no generan gases invernadero en un intento de disminuir su dependencia de los combustibles fósiles para evitar así verse afectados por perturbaciones en las regiones productoras. Igualmente el aumento del precio del petróleo podría inspirar el afán de contención del consumo que la concienciación individual no ha alcanzado a desarrollar.

Algunas de estas contingencias se pueden contemplar en forma de escenarios que, como hemos visto, combinan modelos científicos de regulación climática con hipótesis,

o escenarios de la evolución de los motores antrópicos del clima. Sin embargo, en un horizonte de 100 años, a los cuales aspiran a alcanzar estos escenarios, es más que probable que contingencias tan remotas como para evitar el que puedan ser incluidas en escenarios plausibles acaben por jugar un papel importante. Estas contingencias pueden tener su base en procesos asociados al cambio global (por ejemplo, cambios bruscos en clima, disponibilidad de agua o perturbaciones), contingencias en política internacional o avances imprevisibles en la ciencia y la tecnología. Es importante que la sociedad, y sus líderes en particular, estén particularmente alerta, en un contexto de gestión adaptativa del cambio global, a la aparición de tales contingencias para aprovechar sin demora las oportunidades que ofrezcan o afrontar —en caso de contingencias negativas— los nuevos riesgos que generen.

Se puede pensar en muchas de estas incertidumbres como un problema de gestión de riesgos. Por ejemplo, el coste de un 1% del PIB global para evitar daños derivados del cambio climático que podrían alcanzar un 20% del PIB global equivale a pagar un 5% del coste de un evento incierto, pero probable. Esta cantidad relativa es similar al coste de una prima de seguro de vehículos, cuando la probabilidad de los cambios asociados al cambio global es ya mucho mayor que la de un siniestro total en el caso de un vehículo cualquiera.

Referencias

- CE (2001). *La Gobernanza Europea, un Libro Blanco*, COM (2001) 428 final de 25.7.2001. Copenhagen, 2005.
- CROSBY, ALFRED, W. Y DONALD WORSTER (1986). *Ecological Imperialism: The Biological Expansion of Europe, 900-1900*, Cambridge University.
- DIAMOND, J. (2005). *Colapso. Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen*. Debate. Barcelona.
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2006). The International Energy Outlook 2006.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2005). *The European Environment. State and Outlook EEA*.
- FIORINO, D. J. (1990). "Citizen Participation and Environmental Risk: A Survey of Institutional Mechanisms". *Science, Technology and Human Values*, 15 (2) Primavera.
- FOLKE, C. (2004). "Enhacing resilience for adapting to global change". In : Steffen,W. et al *Global Change and the earth system*. A planet under pressure: 287. The IGBO Series.
- FOLKE, C. ET AL. (2002). "Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformation". ICSU Series on Science for Sustainable Development N° 3.
- HOLLING, CS. & MEFFE, GK. (1996). "Command and Control and the pathology of natural resource management". *Conservation Biology* 10: 328-337.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 3 volúmenes.
- KAHN, ALFRED E. (1988). *The Economics of Regulation: Principles and Institutions*, MIT Press.
- MACKENZIE, D. y WAJCMAN J. (ED.) (1998). *The Social Shaping of Technology*, Buckingham: Open University Press.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). Ecosystems & Human Well-Being: Wetlands and water Synthesis. World Resources Institute, Washington, D.C.
- MILLS, C. E. (2004). "Jellyfish blooms: are populations increasing globally in response to changing ocean conditions?", *Hydrobiologia* 451: 55-68.
- RIDENOUR, A. (2005). "Michael Crichton's State of Fear: Climate Change in the Cineplex?", *National Policy Analysis*, nº 524, febrero 2005.

10. Perspectiva

La exposición precedente ha aportado respuestas, esperamos claras, a algunos de los interrogantes planteados al inicio. Está claro que estamos plenamente inmersos en un proceso de cambio global, que afecta a todos los procesos que gobiernan el sistema Tierra cuyo funcionamiento está afectado por la actividad humana.

El conocimiento científico disponible permite prever cuáles serán los cambios más importantes que tendrán lugar durante el siglo XXI, dentro de amplios márgenes de incertidumbre en cuanto a la magnitud de estos cambios que dependen a su vez de incertidumbres en la progresión de la presión de la actividad humana, pero que recogen las tendencias que con toda probabilidad viviremos y configurarán el planeta que conocerán las generaciones futuras.

El cambio global es una fuente potencial de conflictos sociales, deterioro de la salud humana y pérdida de la capacidad de mantener el bienestar y seguridad de la humanidad tanto presente como la de generaciones futuras.

Es necesario pues generar cambios sociales dirigidos a fomentar buenas prácticas que permitan que la sociedad se adapte y mitigue estos impactos y los riesgos asociados. Para ello es esencial alcanzar una cuota de utilización de los recursos que contiene la biosfera que permita conservar su diversidad biológica y funcional, asegurando así la provisión de bienes y servicios a toda la humanidad.

El cambio global es un problema de tal complejidad y consecuencias para nuestra calidad de vida que no hemos de escatimar esfuerzos para comprender



Playa de Es Cargol (Mallorca).

Fotografía: C. M. Duarte.

mejor sus causas, mejorar nuestra capacidad de predecir sus consecuencias y desarrollar capacidad de mitigarlas a la vez que adaptarnos a los cambios. Esta tarea requiere el esfuerzo de todos sin excepción y un comportamiento especialmente solidario con los más

débiles y desfavorecidos que sufrirán las consecuencias del cambio global de forma particularmente aguda. La capacidad de liderazgo se demostrará, a nivel local, regional, nacional y global, por la visión y firmeza en afrontar este desafío.

11. Enlaces recomendados

- Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, <http://www.eea.eu.int>) publica informes periódicos de gran interés, algunos traducidos al castellano. Particularmente útil es el informe de cambio climático publicado en agosto de 2004 (EEA Report 2 2004). Información en español se puede obtener en <http://reports.es.eea.eu.int/>
- Alianza para la Resiliencia. Consorcio de investigadores centrados en el estudio de los sistemas socio-ecológicos. www.resalliance.org/1.php
- Centro Hadley para Predicción e Investigación Climática. www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/index.html
- Comité Español de Investigación del Cambio Global, CEICAG. www.uc3m.es/ceicag/. Es un comité que engloba en España, entre otros, a los comités de investigación internacionales en cambio global integrados en el Earth Science System Partnership (ESSP) de ICSU, con el fin de promover la participación de los investigadores españoles en los programas internacionales, así como de crear una comunidad epistémica de cambio global en España.
- Consorcio para la Ciencia del Sistema Tierra. Consorcio internacional de investigadores para la integración científica en torno a la ciencia del sistema Tierra. www.essp.org/
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Protocolo de Kioto y otros desarrollos para la prevención del cambio climático. http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php

Convención para la Diversidad Biológica. www.biodiv.org/default.shtml
Diversitas, Programa Internacional de Investigación en Biodiversidad.
www.diversitas-international.org/

Energy Information Administration (EE.UU.). Proyecciones y estadísticas de uso de energía global. www.eia.doe/oiaf/ieo/index.html

Evaluación del Milenio. La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (Millenium Assessment, MA) es un programa de trabajo internacional diseñado para dar a gestores, políticos y público en general información científica sobre las consecuencias de los cambios en los ecosistemas para el bienestar humano y las opciones de respuesta frente a esos cambios. www.maweb.org/en/index.aspx. El cambio climático queda enmarcado dentro de los demás motores del cambio global. Los informes están en inglés, pero hay versiones en español. Acaba de hacerse pública una evaluación integrada (Synthesis report) que puede consultarse en <http://www.millenniumassessment.org/>

Frena el cambio climático. Campaña de divulgación ciudadana de varias ONGs sobre las consecuencias del cambio climático y cómo mitigarlo modificando pautas ordinarias de comportamiento. www.frenaelcambioclimatico.org

Global Change Master Directory. Directorio de datos y servicios sobre cambio global.
<http://gcmd.nasa.gov/>

Greenhouse Effect Research Today. Revista mensual en inglés sobre noticias variadas en relación al cambio climático, gratuita y muy recomendable.
(<http://greenhouseeffect.researchtoday.net>)

Greenpeace (<http://archivo.greenpeace.org/Clima/cambioclim.htm>). Contiene buenos resúmenes sobre los tres informes del IPCC y también sobre el Protocolo de Kioto.

Grupo de Observación de la Tierra, GEO, www.earthobservations.org

Informe sobre el cambio climático y sus impactos realizado en Portugal, muy completo, en inglés, y cuya segunda fase está en curso, puede consultarse (y descargarse los capítulos) en <http://www.siam.fc.ul.pt>

Informe Stern sobre el impacto económico del cambio climático. Estudio de gran impacto mediático sobre las consecuencias económicas del cambio climático encomendado por el gobierno británico.
http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm

IPCC. Panel Internacional para el Cambio Climático. Foro científico para el análisis y formulación de escenarios de cambio climático. www.ipcc.ch/

La Criosfera de Hoy. Tendencias Globales en la Extensión de Hielo. Universidad de Illinois, USA. <http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/>

National Oceanic and Atmospheric Administration, USA. Página principal:
www.noaa.org ; Investigación en el Ártico: www.arctic.noaa.gov; Sistema de Observación Terrestre: www.noaa.org/eos.html. Centro Nacional de Huracanes: www.nhc.noaa.gov/

Observatorio de la Tierra de la Agencia Espacial Europea.
www.esa.int/esaEO/index.html

Observatorio de la Tierra de la NASA. <http://earthobservatory.nasa.gov>

Oficina Española de Cambio Climático, perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente, tiene una página web con información actualizada (<http://www.mma.es/oecc>). De momento lo más interesante es la extensa evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático de la que pueden descargarse los capítulos en http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/documentacion_cc/historicos_cc/impactos2.htm

Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988. Se trata de un grupo abierto a todos los miembros de las Naciones Unidas y de la OMM. El IPCC es el principal órgano internacional de referencia en cambio climático y hace una evaluación periódica del estado del conocimiento. Actualmente está disponible el tercer informe realizado en 2001 y que se articula en tres secciones, la base científica, impactos y su mitigación. Los documentos originales están en inglés, pero hay buenos resúmenes en castellano en <http://www.ipcc.ch/languageportal/spanishportal.htm>

Organización Metereológica Mundial, www.wmo.int

Portal de cambio climático del Ministerio de Medio Ambiente de España,
www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/

Programa Internacional IHDP. Programa Internacional de la Dimensión Humana del Cambio Global. <http://www.ucm.es/info/iuca/IHDP.htm>

Red temática del programa internacional CLIVAR (CLImate VARiability and Predictability) del World Climate Research Programme (WCRP).
www.clivar.org/

Redes de Observación e Investigación de Ecosistemas a Largo Plazo. España:
www.redote.org; EEUU: www.lternet.edu; Europa: www.alter-net.info; Internacional: www.ilternet.edu.

Secretaría de la Convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC de las siglas en inglés) presenta información en inglés sobre el marco internacional, los convenios, acuerdos y protocolos como el de Kioto que quedan bajo su directa responsabilidad (<http://unfccc.int>). Tiene una sección en español en http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php
Secretaría de la Convención de Lucha contra la Desertificación, www.unccd.int/



Cala Santa María (Parque Nacional
de Cabrera, Islas Baleares).

Fotografía: C. M. Duarte.