



EL PROBLEMA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

FRANCISCO GARCÍA OLMEDO

Miembro de la Real Academia de Ingeniería y del

Colegio Libre de Eméritos

CONTENIDO

EXTRACTO

INTRODUCCIÓN

EFEECTO INVERNADERO, CALENTAMIENTO Y NIVEL DEL MAR

OTROS POSIBLES CAMBIOS ASOCIADOS AL CALENTAMIENTO

LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DE ESTUDIO

UNA PERSPECTIVA EN TIEMPO GEOLÓGICO

CAMBIOS EN EL ÚLTIMO MILENIO

EL “PANEL INTERNACIONAL SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO” (IPCC)

EI CALENTAMIENTO Y SUS CONSECUENCIAS FÍSICAS, SEGÚN EL IPCC

AGRICULTURA, SALUD, ESPACIOS NATURALES

IMPACTOS, ADAPTACIÓN Y VULNERABILIDAD

RESPUESTAS TECNOLÓGICAS. EL PROBLEMA DE LA ENERGÍA

PONGAMOS PERSIANAS PLANETARIAS

EL CO₂ SE RESISTE A QUE LO SECUESTREN

LOS BIOCOMBUSTIBLES COMO PANACEA

EL MITO DEL HIDRÓGENO

COSTES ECONÓMICOS DE LA MITIGACIÓN Y DE LA ADAPTACIÓN

KYOTO Y OTROS RETOS POLÍTICOS

ÉTICA, LEY Y LITIGIOS

OPINIONES FINALES

REFERENCIAS

EXTRACTO

El planeta está sometido a un proceso de calentamiento originado principalmente por la actividad humana. En 2007, el problema ha aparecido en los medios de comunicación con un vigor sin precedentes debido a varios acontecimientos de distinta importancia: en el otoño de 2006, el estreno de “Una verdad incómoda”, película y libro generados por Al Gore y su entorno; a principios de 2007, la difusión de la “Stern Review on the Economics of Climate Change”, y a lo largo del año, la publicación del 4th *Assessment Report* del *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.

El informe del IPCC de 2007 consta de tres componentes básicos. El primero ha considerado las bases científicas de índole física, las observaciones sobre la atmósfera y las superficies terrestre y marítima, la elaboración de modelos que permitan indagar sobre el paleoclima y sobre los cambios climáticos futuros, así como discriminar entre los factores antropogénicos y naturales (no antropogénicos) que pueden forzar el clima. Desde el tercer informe del IPCC se han realizado nuevas observaciones y se han refinado los modelos, lo que ha permitido mejorar la estimación de las contribuciones relativas del forzamiento humano y del natural al cambio climático. Con una probabilidad de 9 sobre 10, los nuevos cálculos indican que la contribución antropogénica es casi 14 veces superior a la natural, lo que reduce la estimación del forzamiento no antropogénico con respecto al anterior informe.

El segundo grupo de trabajo ha abordado el examen de lo que se puede conocer sobre los impactos del cambio, así como sobre la posible adaptación y la vulnerabilidad de la biosfera al calentamiento. Los posibles impactos del

calentamiento son difíciles de predecir, una vez que se pasa de los más inmediatos a aquéllos sobre los que incide más de un agente causal. Así por ejemplo, es fácil colegir que si se deshuelan los glaciares se forzarán peligrosamente los lagos que se surten de ellos, y que si aumenta la intensidad de los ciclones tropicales será mayor el número de árboles derribados, pero ya no es tan sencillo discriminar los efectos del cambio sobre ecosistemas que están de por sí en constante fluctuación y que sufren múltiples agresiones no mediadas por el clima, aunque sí por el hombre. Así por ejemplo, sobre la biodiversidad ya están operando potentes fuerzas devastadoras, además del calentamiento, que es un efecto a largo plazo. En estas circunstancias resulta difícil cuantificar el papel causal del cambio climático, pero esto no justifica la baja calidad del resumen del informe del IPCC relativo a estos asuntos, que es inconcreto y en buena parte tautológico y mal redactado.

El tercer grupo de trabajo ha examinado las posibilidades de mitigación o prevención de los efectos. Aborda también una estimación de los costes asociados a las distintas estrategias. Según se concluye en el documento-resumen, en el corto y medio plazo, hasta 2030, existe el potencial económico para mitigar las emisiones de gases invernadero hasta eliminar el crecimiento proyectado de emisiones globales e incluso reducirlas por debajo de los niveles actuales. En el sector de la generación de energía, se postula una mejora drástica de la eficiencia del suministro y distribución, así como una sustitución del carbón por gas, energía nuclear y energías renovables y el desarrollo urgente de la tecnología para la captura y secuestro del carbónico. En el ámbito del consumo energético, se urge mejorar la eficiencia en el transporte, los edificios, los hogares y las industrias. En el sector agroforestal, se deberá

promover una gestión sostenible, limitando las emisiones de metano y óxido nítrico, sustituyendo el consumo de combustibles fósiles por biocombustibles y priorizando el papel de los bosques como secuestradores de carbónico. En relación con los residuos, basuras y desechos, se propone la recuperación directa de energía (metano y combustión directa) y el reciclado. Según el informe, aunque todas estas propuestas requieran un cierto grado de innovación tecnológica, gran parte de los objetivos pueden cubrirse, según la visión demasiado optimista del informe, basándonos en lo que ya sabemos, mediante incentivos e iniciativas legislativas apropiadas, y promoviendo cambios en el estilo de vida y en los modos de gestión.

El interés de este capítulo del informe está tal vez en la valoración económica que presenta de las diversas opciones. Así por ejemplo, se ha concluido que en 2030, los costes macroeconómicos de la mitigación de los gases invernadero, consistente con las trayectorias de emisión que conducirían a una estabilización de la composición atmosférica equivalente a 445-710 partes por millón de CO₂, podrían alcanzar como máximo el 3% del PIB. Este cálculo puede considerarse relativamente concordante con el propuesto en el informe Stern.

A largo plazo, más allá del año 2030, se considera que los esfuerzos de mitigación a lo largo de las próximas dos o tres décadas tendrán un gran impacto sobre las oportunidades de conseguir niveles más bajos de estabilización. Se calcula que, para 2050, los costes macro-económicos medios para estabilizar la composición atmosférica a un equivalente de anhídrido carbónico de 445-710 partes por millón estarán entre una ganancia del 1% del PIB y una pérdida del 5,5%.

En el ámbito del IPCC no se han cuantificado las posibles consecuencias económicas de no mitigar, pero sí se ha hecho en el informe Stern, donde se concluye que “si no se actúa ya, los costes y riesgos globales del cambio climático serán equivalentes a una pérdida del 5% de PIB global cada año, ahora y para siempre. Si se tiene en cuenta un repertorio más amplio de riesgos e impactos, las estimaciones del daño podrían elevarse al 20% o más”, algo que se acaba equiparando a las pérdidas económicas asociadas a las grandes guerras mundiales o a las de la gran depresión del primer tercio del pasado siglo.

Pero no basta con mitigar, dado que el calentamiento global progresaría en cierta medida incluso si congeláramos la composición de la atmósfera en los valores actuales. Una estrategia sensata para minimizar daños debe tener el doble objetivo de tratar de evitar lo inmanejable (mitigación) y gestionar lo inevitable (adaptación preventiva). En las últimas dos décadas, la idea de adaptación al cambio climático ha sido problemática para los partidarios de la reducción de emisiones; basándose en que en nombre de la adaptación, podrían encontrarse coartadas para persistir en comportamientos no deseados.

INTRODUCCIÓN

Aunque el convencimiento de que el planeta está sometido a un proceso de calentamiento originado por la actividad humana se viene abriendo paso en la opinión pública a lo largo de las dos últimas décadas, existe todavía en ésta bastante escepticismo respecto al fenómeno en sí y una considerable confusión respecto a sus consecuencias. Esto no debe sorprendernos porque

estamos ante un fenómeno complejo del que nos quedan aspectos importantes por conocer y que genera procesos cuya interpretación no siempre se rinde a la intuición y el sentido común. No estamos hablando del tiempo atmosférico sino del clima, cuya relación con catástrofes puntuales, tales como huracanes, olas de calor y de frío, o inundaciones, está por establecer y del que se conoce, en cambio, su dependencia de la actividad humana, de las variaciones de la actividad solar y de ciertos fenómenos azarosos, como puedan ser las erupciones volcánicas.

De lo acuciante de este problema no se empezó a adquirir conciencia hasta los últimos años del siglo pasado y sólo en tiempos relativamente recientes se han hecho inversiones importantes en el estudio de sus distintas vertientes. Los resultados de estas investigaciones han afianzado las conclusiones básicas relativas al propio calentamiento y a algunas de sus consecuencias más inmediatas, tales como la elevación progresiva del nivel mar, y han logrado acotar con diversos intervalos de incertidumbre otros efectos menos obvios y directos. Dada la urgencia de algunas de las posibles medidas de mitigación, no parece posible esperar a tener un conocimiento más preciso de los procesos implicados, antes de actuar, y esto hace que cualquier decisión paliativa deba tomarse bajo amplios márgenes de duda y pueda estar peligrosamente desenfocada.

En el año 2007, el problema ha aparecido en los medios de comunicación colectiva con un vigor sin precedentes debido a la concurrencia de varios acontecimientos de distinta importancia: en el otoño de 2006, el estreno de la película “Una verdad incómoda”, protagonizada por Al Gore, con su libro correspondiente¹; a principios de 2007, la difusión de la “Stern Review

on the Economics of Climate Change”^{2,3}, y a lo largo del citado año, la publicación del 4th *Assessment Report* del *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.

La película de Al Gore, que ha venido acompañada de toda una ambiciosa campaña destinada a acercar el problema al gran público, hace primar el impacto de unas imágenes cuidadosamente escogidas sobre el rigor del mensaje y no desdeña apelar a los sentimientos del espectador antes que a su razón, dedicando buena parte del metraje a una empalagosa hagiografía del protagonista. Frente a un problema de la magnitud del que nos ocupa es necesario movilizar al conjunto de la sociedad y, en este contexto, la campaña, que incluye la película, el libro y las bien publicitadas (y exorbitantemente pagadas) giras de conferencias y apariciones públicas, representa tal vez una estrategia apropiada para alcanzar el fin propuesto, aunque a algunos inquiete que el abanderado haya fracasado en sus intentos de atajar el problema cuando tuvo el poder político y cause desasosiego ver a alguien, que no practica lo que predica y vive en la opulencia, propugnar el ahorro energético a un público chino cuyo consumo per cápita es ciertamente un orden de magnitud inferior al suyo.

Sir Nicholas Stern, acreditado economista responsable de la oficina económica del Gobierno Británico, ha coordinado y difundido un informe sobre las posibles consecuencias económicas y políticas del calentamiento global. Dicho informe ha tenido una considerable repercusión y ha sido recibido con respeto y elogio, incluso por quienes han criticado algunos de sus supuestos principales.

El IPCC viene emitiendo sus informes con una periodicidad de seis años. El que corresponde al año 2007 constará de cuatro volúmenes. Los resúmenes de los tres primeros, dirigidos a responsables de políticas ambientales en distintos ámbitos, han sido difundidos de forma escalonada (2 de febrero, 6 de abril y 4 de mayo, respectivamente), mientras que el cuarto, recientemente publicado a finales de noviembre de 2007, sintetiza las aportaciones incluidas en los tres anteriores.

Cada volumen o capítulo del informe ha sido producido por un grupo de trabajo distinto y se centra en un aspecto diferente. El primero ha considerado las bases científicas de índole física, las observaciones sobre la atmósfera y las superficies terrestre y marítima, la elaboración de modelos que permitan indagar sobre el paleoclima y sobre los cambios climáticos futuros, así como discriminar entre los factores antropogénicos y naturales (no antropogénicos) que pueden forzar el clima. El segundo grupo de trabajo ha abordado el examen de lo que se puede conocer sobre los impactos del cambio, así como sobre la posible adaptación y la vulnerabilidad de la biosfera al calentamiento. El tercero, en fin, ha examinado las posibilidades de mitigación o prevención de los efectos, y ha tratado de discernir qué opciones se ofrecen a corto, medio y largo plazo para responder a los retos planteados. Aborda también una estimación de los costes asociados a las distintas estrategias, estimación que conviene contrastar con las contenidas en el informe Stern.

Los trabajos preparatorios del informe del IPCC han tenido lugar a lo largo del año 2006, por lo que la literatura científica manejada ha sido, salvo contadas excepciones, la disponible hasta finales del año 2005. En este ensayo, que es una ampliación y continuación de anteriores tratamientos

parciales⁴, nos proponemos acercar el debate a un público culto, usando un lenguaje no técnico, y comentar críticamente el estado actual de los conocimientos sobre el clima, siguiendo el esquema conceptual del mencionado informe del IPCC, esqueleto sobre el que iremos insertando las ideas, opiniones y hallazgos más notables plasmados en la ingente literatura sobre el tema aparecida en los últimos meses. Empezaremos por referirnos al mecanismo subyacente del llamado “efecto invernadero”, que es el mecanismo generador del calentamiento.

EFFECTO INVERNADERO, CALENTAMIENTO Y NIVEL DEL MAR

La temperatura media del planeta ha estado aumentando desde que se empezó a medir con termómetro, no hace más de doscientos años. Como veremos más adelante, más allá de este periodo de medida instrumental directa, las temperaturas de tiempos pasados pueden inferirse mediante modelos de simulación más o menos ajustados. A partir de 1995, se han dado nueve de los diez años más calientes desde que la temperatura se ha medido directamente, disputándose el récord absoluto los años 1998 y 2005, y si nos fijamos de los últimos modelos paleoclimáticos, a partir de 1990 nos hemos venido manteniendo por encima del récord del milenio, producido durante el putativo calentamiento medieval, en torno a los siglos XI-XII.

Algunos cálculos a partir de medidas directas indican que la tierra absorbe más energía del sol de la que emite al espacio (un exceso en torno a 0,85 vatios por metro cuadrado). Esta acumulación energética se debe al efecto invernadero, cuya base científica es fácil de entender para el lego: el

CO₂ (y otros gases) tienen capacidad de dificultar la irradiación de calor al espacio y, en consecuencia, si la concentración atmosférica de estos gases aumenta, la captura de energía será mayor y la temperatura ambiental aumentará. Los principales gases con efecto invernadero son el anhídrido carbónico o dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), a los que hay que añadir el óxido nitroso (N₂O), el hexafluoruro de azufre (SF₆) y diversos gases orgánicos halogenados. El vapor de agua (nubes) y los aerosoles (partículas en suspensión) interceptan la energía entrante y tendrían el efecto contrario. Desde el periodo preindustrial la concentración de CO₂ ha aumentado en un 30 por 100 –de 280 a 380 partes por millón–, debido, al menos en su mayor parte, a las emisiones de origen humano. Se produce CO₂ por la combustión de productos fósiles (carbón, petróleo) y madera, así como por la respiración de los seres vivos, y se elimina de la atmósfera mediante diversos procesos, el más importante de los cuales es su incorporación a la biomasa vegetal mediante la fotosíntesis. El efecto invernadero del metano (efecto por unidad de peso) es mayor que el del CO₂, pero su contribución al efecto global es inferior porque su concentración en la atmósfera es mucho menor. Se conoce desde hace tiempo que el metano se produce en la combustión de biomasa y, sobre todo, por agentes biológicos tales como los microorganismos en anaerobiosis (ausencia de oxígeno) en zonas húmedas, como por ejemplo en las grandes extensiones de cultivo de arroz por inundación o, según se ha comprobado con cierta sorpresa en los últimos meses, en las zonas de inundación de las presas, lo que haría a la energía hidroeléctrica menos neutral respecto al calentamiento de lo que se pensaba. Lo producen también los rumiantes (por delante) y las termitas (por detrás). De hecho, en los últimos

meses han llegado noticias relativas a experimentos, con ovejas en Nueva Zelanda y con vacas en el Reino Unido, que indican que la producción de metano por estas especies puede reducirse con una dieta apropiada, por ejemplo, alimentándolos con trébol blanco. Sin embargo, no parece posible en la práctica un cambio generalizado de dieta en los rumiantes.

Otra sorpresa se produjo en 2006, cuando un grupo del Instituto Max Planck de Alemania publicó que las plantas podrían generar entre el 10 y el 30 por 100 del metano que accede a la atmósfera⁵. Estas observaciones han sido contestadas con posterioridad por un grupo inglés, que no ha logrado verificarlas, y por otros investigadores que han revisado a la baja los cálculos originales. Es importante que se diluciden estas discrepancias porque, de confirmarse lo observado por los alemanes, habría que cambiar nuestra forma de enjuiciar situaciones concretas: por ejemplo, ya no sería necesariamente ventajoso, en términos del ciclo del metano, un bosque frente a una pradera con rumiantes. Junto a los procesos generadores de metano deben considerarse los de su destrucción: su eliminación ocurre mayoritariamente por oxidación en la troposfera y por pérdida al espacio exterior desde la estratosfera.

Es un hecho que la concentración de CO₂ ha aumentado desde el periodo preindustrial debido en buena parte a las emisiones de origen humano, y que se ha producido un aumento concomitante de la temperatura media, pero existía una cierta discusión sobre qué parte de este calentamiento tiene un origen antropogénico. Los cálculos recogidos en el último informe del IPCC dan mucho mayor protagonismo a los forzamientos humanos que a los que no lo son.

La consecuencia más inmediata del calentamiento ocurrido en los dos últimos siglos ha sido la elevación del nivel del mar durante el periodo en que ésta ha sido objeto de registro directo. El aumento de la temperatura causa una dilatación del agua que es responsable de aproximadamente la mitad de la subida registrada, mientras que la otra mitad se debe al incremento de las aportaciones de la fusión de hielos terrestres que el aumento de la temperatura conlleva.

OTROS POSIBLES CAMBIOS ASOCIADOS AL CALENTAMIENTO

El aumento de las temperaturas medias pueden afectar a otros aspectos del clima, tales como los números de días fríos y de días calientes (junto a las temperaturas que se alcanzan en ellos), la superficie sujeta a sequías, la intensidad y frecuencia de los ciclones tropicales, o la incidencia de elevaciones bruscas del nivel del mar. El estado actual de nuestro conocimiento relativo a estos y otros aspectos del impacto físico del calentamiento es la primera cuestión que se examina en el informe del IPCC.

El calentamiento global ocasiona cambios notables en la biosfera que resultan más difíciles de calibrar que los anteriores por estar más alejados del calentamiento en la cadena causal y porque sobre ellos pueden incidir también otros factores, humanos o no. De la destrucción de lagos glaciares y los efectos de los ciclones tropicales a la modificación de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad, son innumerables los elementos que pueden sufrir directa o indirectamente el impacto del cambio climático. Cómo se modificará el medio agrícola y en que medida se afectarán los espacios naturales son otros

aspectos cruciales del problema que afectan de un modo directo a nuestra supervivencia. La cuantificación de muchos de estos posibles efectos se está mostrando en extremo difícil.

El análisis de los posibles impactos económicos y sociales de los cambios futuros del clima es un aspecto fundamental que debe condicionar las respuestas al calentamiento. Las distintas estrategias de mitigación, los escenarios a los que conducirían y el desarrollo de los modelos econométricos para estimar los costes asociados a cada estrategia constituyen tal vez la vertiente más elusiva de dicho análisis. Hasta ahora sólo se ha considerado la mitigación como única alternativa, y sus costes se han comparado con los de dejar que siga la actividad humana como hasta ahora, pero empieza a imponerse la idea de que, por mucho que se mitigue, al menos parte del proceso de cambio va a seguir su curso y la de que, se quiera o no, habrá que abordar también el estudio de los costes de adaptación preventiva. Estos últimos han sido hasta ahora barridos bajo la alfombra sobre la que se celebra el debate con una alusión a que si bien la mitigación tiene que ser un empeño global, los de la adaptación son problemas que deben resolverse a nivel local.

LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DE ESTUDIO

Siempre que un grupo económico ve amenazados sus intereses por algún inconveniente de índole científica, suele buscar especialistas que actúen como verdaderos abogados defensores de su causa. Así ocurrió con la industria láctea cuando se descubrieron los inconvenientes de la grasa saturada en relación con los incidentes cardiovasculares, ocurre ahora en

relación con la energía nuclear y ha empezado a producirse respecto al calentamiento global, a instancias en este caso de los intereses petrolíferos. Al Gore ha querido dejar constancia de que “muchos de los escépticos reciben fondos y apoyos de grupos de intereses sectoriales financiados por corporaciones desesperadas por detener toda acción contra el calentamiento global.” Esta acusación ha sido repetida insistentemente por muchos de los activistas contra el cambio climático y por los medios de comunicación, extendiendo así de modo implícito la idea de que toda oposición total o parcial a las tesis del IPCC tienen un origen venal. Sin embargo, es mejor dejar a un lado lo anecdótico y entrar de lleno en el fondo del debate. El escepticismo y las discrepancias respecto a algunas de las conclusiones del informe del IPCC no se producen sólo a instancias de parte sino que surgen de científicos de diversas especialidades y no obedecen a intereses oscuros en el asunto sino que son debidas sobre todo a la complejidad del problema y a las limitaciones y arcanos de la metodología que no hay más remedio que utilizar. Los militantes del lobby del cambio climático han adoptado modos y maneras cuya vehemencia y tendencia a la simplificación pueden perjudicar su credibilidad ante espíritus más sobrios y rigurosos. El debate y la crítica sobre un asunto que tanto nos importa debe fomentarse, antes que acallarse.

Al tener que recurrir a un órgano colectivo como el IPCC para abordar un asunto científico cabe esperar un cierto grado de babelización. Cuando se anuncian las conclusiones de los distintos grupos de trabajo se suele aludir a los centenares de delegados o expertos de los más de 120 países que han participado en la elaboración. El repertorio temático de cada grupo de trabajo es lo bastante amplio como para que ninguno de los asistentes pueda ser

considerado como especialista en su totalidad, por lo que, en general, cada uno estará especializado en un aspecto concreto del conjunto. Son sin duda numerosos los países que carecen de científicos relacionados con el problema y envían como delegados a profesionales menos centrados en él. Además, una buena fracción de los asistentes son los responsables político-administrativos de los asuntos climáticos de los distintos países. Esta variopinta mezcla da lugar a que, desde el punto de vista científico, la voz cantante la lleven en cada tema los que realmente saben, lo que está bien, y que cada especialista tienda a presionar para que su pieza del pastel temático aparezca en la foto final, una tendencia que acaba dando relevancia a conclusiones que pueden estar a medio cocer. Luego, las posturas de los representantes político-administrativos, así como las revisiones del borrador inicial en cada uno de los países participantes, acaban politizando en mayor o menor grado las conclusiones. Así por ejemplo, en la elaboración del último informe del IPCC, los representantes científicos y políticos de los países en rápido crecimiento, como China, y de los grandes proveedores de energía, como Arabia Saudita, han debatido ferozmente cada punto y cada coma, con objeto de diluir la contundencia de algunas conclusiones que irían en contra de sus intereses. Este comentario no tiene la intención de descalificar un procedimiento para el que no es fácil encontrar alternativa, aunque sea perfeccionable, y cuya indudable ventaja consiste en la gran capacidad de movilización que conlleva, una vez se ha acordado un curso de acción.

Entre las cuestiones metodológicas que merecen comentarse, está la forma en que se han traducido a palabras las probabilidades estadísticas en los dos primeros resúmenes: *prácticamente seguro* (>99% de probabilidad de

ocurrencia); *extremadamente probable* (>95% de probabilidades); *muy probable* (>90%); *probable* (>66%); y *más probabilidad de que sí que de que no* (>50%), y así sucesivamente. Esta desmesura semántica, tal vez uno de los factores que más escépticos genera, desvirtúa la realidad en cuanto exagera injustificadamente la firmeza de ciertas conclusiones. De hecho, como estrategia tiene el efecto contraproducente de restar importancia a los hallazgos más significativos, al adornarlos con otros cuya solidez se exagera, diluyendo así el mensaje que de ellos puede derivarse. Además, el uso de la escala estadística verbal en el segundo capítulo, el relativo a los impactos, suscita serias dudas respecto a su rigor. En cambio, parece muy acertada la forma menos agresiva de transmitir el grado de incertidumbre que se emplea en el tercer capítulo, el relativo a la mitigación, en el que se ha adoptado un sistema bidimensional que combina una estimación del grado de consenso alcanzado (alto, medio o bajo) con la cantidad de evidencia, es decir, el número y calidad de las fuentes independientes de que se dispone (muchas, medias o limitadas).

Otra cautela metodológica importante se refiere a las limitaciones de la modelización de la realidad como método de análisis, una forma de abstracción cuantitativa que tiene un gran protagonismo a lo largo de todo el informe del IPCC. En un libro recién publicado por O. Pilkey y L. Pilkey-Jarvis⁶, se defiende la tesis de “la virtual imposibilidad de un modelado cuantitativo preciso para predecir el curso de los procesos naturales en la superficie de la Tierra.” Es evidente que las limitaciones de los modelos han originado en el pasado fracasos notables, como alguno relacionado con la gestión de la política pesquera, citado como ejemplo en el libro aludido, pero en otros la

modelización nos saca de apuros, como en la predicción diaria del tiempo atmosférico. Sea como sea, las decisiones que se basen en modelos no pueden ser más acertadas que acertados sean éstos, y en la historia de los informes del IPCC ha habido más de un modelo que ha tenido que ser abandonado en la cuneta. En el presente informe se ha producido el notable abandono de uno de estos modelos, al que se ha destinado a un discreto olvido sin dar las razones de su fallecimiento. Se trata del modelo paleoclimático propuesto por M.E. Mann *et al* (1999)⁷ que discutiremos más adelante.

El apresuramiento por utilizar datos recientes, que no han sido todavía decantados, está llevando en ocasiones a vaivenes en ciertas conclusiones. Así por ejemplo, dentro del marco del programa ARGO, se ha venido dejando a la deriva en los océanos una serie de ingeniosas sondas que se sumergen reiteradamente para medir parámetros tales como la temperatura o la salinidad a distintas profundidades. Sorprendentemente, durante el calentamiento excepcional de los años 2003-2005, estos espías delataron un enfriamiento de las aguas marinas. Dicho enfriamiento se ha visto ahora que no era más que un artefacto debido a un defecto del software de los instrumentos de medida cuya corrección ha permitido que las cifras vuelvan a la corrección política. De modo similar, otro tipo de defecto en la medida instrumental había venido induciendo a que se estimara por exceso un parámetro tan fundamental como el grosor de la capa de nubes.

UNA PERSPECTIVA EN TIEMPO GEOLÓGICO

Ante el calentamiento actual cabe preguntarse por la magnitud de los que le precedieron. La reconstrucción de cómo evolucionaron las temperaturas en los últimos milenios ocupa de hecho un lugar central en la discusión sobre cambio climático. En otros periodos geológicos la temperatura del planeta ha sido mayor que la actual y en esos casos se ha encontrado una concordancia entre ésta y la concentración atmosférica de CO₂. El pasado remoto del clima puede hoy inferirse por métodos tales como el análisis de los gases invernadero en las distintas capas del hielo antártico⁸. En los últimos 420 milenios, las concentraciones de gas carbónico y metano han bailado al son marcado por las glaciaciones, o viceversa, en armonía con los cambios estimados de la temperatura. También las técnicas recientes de estimación de la temperatura en la superficie del mar tropical, en función de los foraminíferos depositados en los distintos estratos, han permitido concluir que esta temperatura ha ido variando en consonancia con la concentración de los gases invernadero. Lo que oscurece las relaciones de causa a efecto es que la evidencia apunta a que las glaciaciones se originaron por irregularidades orbitales de la Tierra con respecto al Sol que redujeron la insolación del hemisferio norte. En esas circunstancias, pudo ser el enfriamiento el que redujo la concentración de gases invernadero, vía una mayor absorción por los océanos, y no al contrario.

En la actualidad Groenlandia gana hielo en su interior y lo pierde en la periferia, con unas pérdidas netas que acaban de estimarse en 152±80 kilómetros cúbicos por año para el periodo 2002-2005, un escenario que

parece una repetición de lo ocurrido hace 130.000 años, en la última interglaciación: el hemisferio norte (el Ártico, en particular) alcanzó temperaturas superiores a las de ahora y el nivel del mar estuvo varios metros por encima del actual. Parece que sólo el deshielo de Groenlandia fue responsable de 2,2 a 3,4 metros de la subida.

La actividad humana ha podido influir sobre el clima desde los tiempos prehistóricos, ya que en algunas de sus facetas ha podido suponer una liberación significativa de gases invernadero. En este contexto, W.F. Ruddiman⁹ ha llegado a proponer recientemente la hipótesis de que sin dicha actividad, nuestro clima actual sería poco menos que glacial. Con el invento de la agricultura se puso en marcha la mayor operación de ingeniería de la historia de nuestra especie, en términos de conversión de energía, flujo hídrico o intercambio de CO₂, y la difusión de la nueva tecnología supuso una importante deforestación progresiva que, en forma de CO₂, liberó a la atmósfera el carbono almacenado en los árboles eliminados y, según parece por los resultados antes reseñados, dejó de producir el metano correspondiente a la masa vegetal perdida^{5,9}. Más tarde, hace alrededor de cinco milenios, se puso paulatinamente en marcha la práctica de inundar los campos de arroz, condición de anoxia en la que la flora microbiana produce cantidades significativas de metano que se libera a la atmósfera. Ruddiman ha estimado un valor medio de 0,8°C para el calentamiento terrestre alcanzado hacia el año 1800, debido a la deforestación y a la práctica de la inundación. Esta cifra sería mayor, hasta 2°C, a latitudes más altas, lo suficiente para evitar la formación de glaciares en el norte de Canadá y hacer más habitables ciudades como Londres o Nueva York.

Por otra parte, los cambios climáticos han podido desempeñar un papel crucial en la desaparición de civilizaciones y así se ha venido postulando en diversos casos, entre los que merece mención el considerado en un reciente estudio paleoclimático, que de forma particularmente incisiva correlaciona el colapso de la civilización maya con un periodo seco muy prolongado, puntuado por episodios multianuales de sequía extrema en torno a los años 810, 860 y 910 d.C. El estudio de la distribución del titanio en sedimentos no perturbados de la región (parámetro que correlaciona con la pluviometría anual) ha permitido estimar las disponibilidades de agua en cada momento y comprobar las coincidencias de las crisis hídricas más agudas con periodos cruciales de la historia maya, tales como los designados 'abandono preclásico' y 'periodo clásico terminal'.

CAMBIOS EN EL ÚLTIMO MILENIO

Parece que en el hemisferio norte pasamos bastante frío hace menos de cuatro siglos. Los glaciares alpinos avanzaron sobre Europa, las heladas destruyeron los antiguos naranjales de la China, en la pintura flamenca de la época aparecen ríos helados que no se hielan en la actualidad y en el Támesis congelado se celebraban festivales de invierno. Así se nos ha descrito la pequeña glaciación que sucedió al calentamiento medieval ocurrido en torno a los siglos XI-XII. De los efectos de la pequeña glaciación apenas nos habríamos liberado hace unas décadas, en una prolongada subida que sólo recientemente nos ha hecho superar el récord de temperatura del milenio. El conocimiento de la evolución de las temperaturas en el pasado tiene que

basarse en métodos indirectos, que consisten en el análisis de cómo se comportan a lo largo del tiempo ciertos parámetros cuya correlación con la temperatura se puede calibrar tomando como base el periodo en que ésta se ha medido instrumentalmente. El registro ofrecido por los testigos o testafierros de la temperatura puede ser de alta resolución (sensibilidad temporal entre el año y la década), como es el caso de la anchura de los anillos en secciones de tronco de los árboles, o de baja resolución (entre uno o más siglos), como ocurre con la estratigrafía del hielo, la deposición de polen en los sedimentos de los lagos, la relación magnesio/calcio en las deposiciones marinas de conchas de moluscos, la abundancia isotópica en estratos de foraminíferos y diatomeas, la abundancia isotópica o el grosor de las capas en las estalagmitas y la variación de la composición química en los corales. Las medidas de la propiedad relevante de cada testigo se realiza en perforaciones de sedimentos no perturbados, en el corazón de los hielos, en los corales o en las estalagmitas de sitios concretos, y en cada punto de observación se ha de calibrar la propiedad del testigo, aprovechando los datos disponibles de temperaturas obtenidas por medida instrumental directa. Las temperaturas de los sitios en cada momento se han de relacionar luego con la media global mediante el instrumento computacional apropiado, y a partir de esa plataforma, deducir la evolución de las temperaturas en el pasado sobre la base de seguir la evolución de la propiedad relevante de cada testigo en cada sitio.

Una descripción fidedigna de cómo se elabora un modelo climático sobrepasa los límites de este artículo y merece un ensayo aparte a cargo de un especialista, por lo que aquí nos ha de bastar con una descripción somera. Un modelo climático es el resultado de la integración y acoplamiento de una serie

de modelos parciales, cada uno de los cuales abarca, entre otros, uno de los siguientes aspectos: la atmósfera, la química de la estratosfera, la química de la troposfera, la química del océano, la vegetación, las nubes, el hielo marino, el hielo terrestre y la circulación oceánica. El manejo de tamaña complejidad mediante computadores implica introducir considerables simplificaciones en las ecuaciones que describen los modelos parciales, lo que no puede menos que generar discrepancias y confusión entre los actores de los varios intentos independientes que se llevan a cabo para modelar el clima. Esto también implica que el aumento de la capacidad de computación vaya mejorando los modelos. Para el lego resulta preocupante que se manejen tantos modelos distintos para un mismo fin, sin que se haya consensuado una metodología común.

En lo que se refiere al estudio retrospectivo, aparte de la mayor o menor continuidad de los datos correspondientes a cada testigo, el principal problema técnico está en los métodos de cálculo que se usan para conciliar las distintas escalas temporales y para 'pesar' la importancia relativa de cada una de las series de datos que se integran en el cálculo.

El primer modelo retrospectivo que se obtuvo mediante un método de este tipo fue propuesto en 1998-1999 por Michael Mann y colaboradores de la Universidad de West Virginia⁷, y se basó sólo en testigos de alta resolución (Figura 1). Según este modelo, la temperatura media del hemisferio norte se ha mantenido relativamente estable a lo largo del último milenio hasta la revolución industrial, a partir de la cual se está experimentando una brusca subida, a cuyo patrón gráfico se suele aludir como el del "bastón de jockey". Dicho modelo fue uno de los pilares del informe emitido en 2001 por el IPCC.

El bastón de hockey se convirtió enseguida en icono y hasta en arma arrojadiza en manos de los más radicales, olvidando que, aunque útil y muy meritorio, no se trataba más que de una primera aproximación afectada por un amplio margen de error. El modelo de Mann no detectaba ciertas transiciones climáticas del pasado, como el calentamiento medieval o la pequeña glaciación, y tuvo desde el principio algunos detractores que con insistencia le han venido imputando defectos técnicos. Las críticas al modelo de Mann se vieron reforzadas a principios de 2005 por un nuevo modelo, desarrollado por científicos suecos y rusos (Moberg et al.¹⁰), cuya novedad radicaba en el uso conjunto de testigos de alta y baja resolución temporal que se integran mediante una metodología estadística más sofisticada, capturando así información climática que escapaba a los modelos anteriores. El trazo de las temperaturas obtenido de esta forma para los últimos dos milenios ya no se asemeja al famoso “bastón” sino que presenta unas oscilaciones a lo largo del tiempo que son mucho mayores que las contempladas en ese modelo anterior. Entre dichas oscilaciones, son perfectamente discernibles el calentamiento medieval, en torno a los siglos XI-XII, y la pequeña glaciación, cuyo mínimo habría tenido lugar en el siglo XVII. La conclusión más significativa de esta interpretación del pasado es la de que sólo a partir de 1990, y no desde el comienzo de la revolución industrial a principios del siglo XIX, hemos empezado a batir el récord de temperatura del milenio. Potencialmente trascendente como es esta conclusión, debe ser tomada con la misma cautela que en su día debió aplicarse a la propuesta de Mann y colaboradores, ya que los nuevos cálculos tampoco están exentos de complicaciones. Las limitaciones del modelo del “bastón de hockey” no han sido óbice para que Al

Gore y los suyos sigan aferrándose a él, tanto en el documental como en el libro, eso sí, maquillándolo tramposamente con una indicación del periodo de calentamiento medieval que no se corresponde en absoluto con lo que muestra la curva de temperatura.

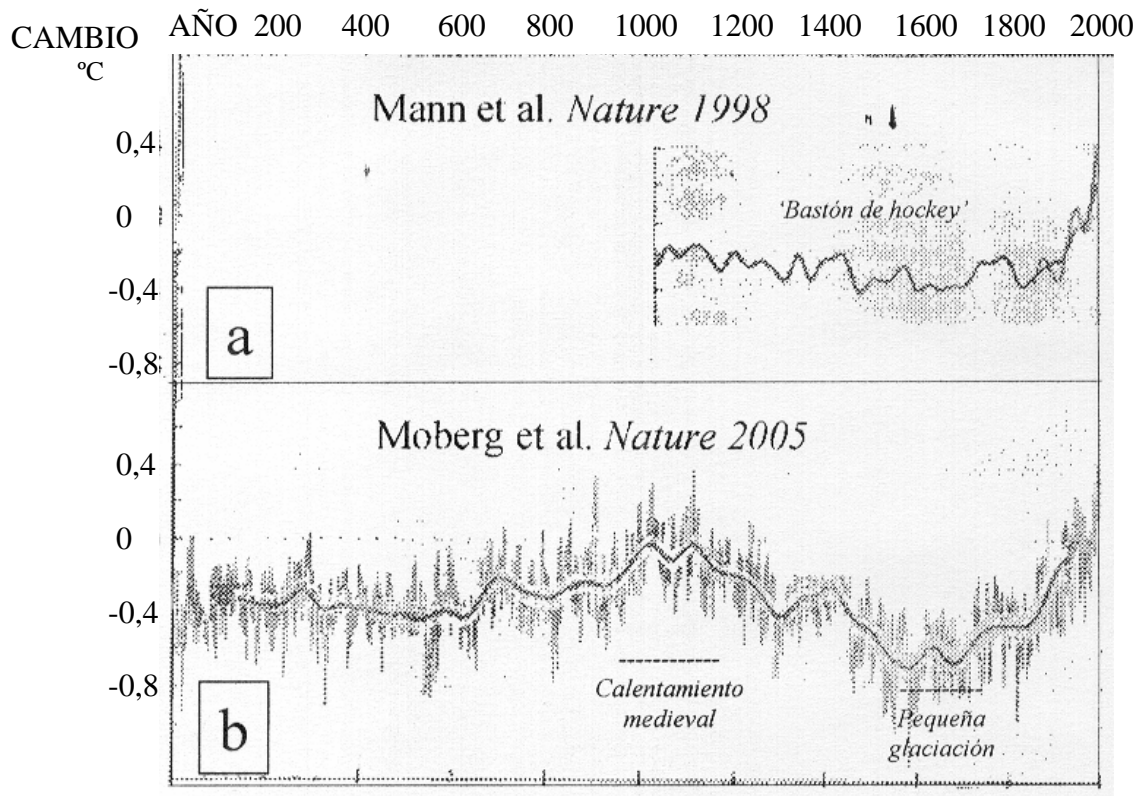


Figura 1. Modelos retrospectivos. Variaciones de la temperatura (°C)

Por grande que sea la tentación de dar por buena esta visión del pasado y de imputar el aludido incremento de la temperatura a factores distintos de la actividad humana, no debemos caer en ella, tanto por las incertidumbres

asociadas a cualquier modelo retrospectivo como por el hecho de que parte de la evidencia relativa al calentamiento antropogénico no se sustenta en dichos modelos.



EL “PANEL INTERNACIONAL SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO” (IPCC)

En el verano de 1979 se reunió en Cape Cod una comisión de distinguidos meteorólogos para elaborar un informe sobre el efecto invernadero destinado a la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos. Según se cuenta, sólo dos de los participantes trabajaban realmente sobre el problema, y éstos expusieron sus respectivos modelos: uno predecía un calentamiento de 2°C para la duplicación del carbónico atmosférico y el segundo, de 4°C. Un poco a capón, asignaron un margen de error de 0,5°C y –como se ve, sin excesivo fundamento – proclamaron a los cuatro vientos el intervalo mágico de 1,5°C-4,5°C, que fue adoptado ya en el primer informe del IPCC. Para el segundo informe del IPCC en 1995, el número de modelos superaba la docena, pero no se alteró el intervalo de predicción, que sí se amplió por arriba (a 5,1°C) para el tercer informe, en el año 2001. Aunque el cuarto informe no se publicará propiamente hasta finales del año 2007, se conocen ya sus conclusiones más relevantes. Según veremos al comentar este informe, los modelos más sofisticados empiezan a converger (en torno a los 3°C de incremento de temperatura para la duplicación del CO₂ atmosférico). Sin embargo, la concordancia entre modelos es más aparente que real porque éstos presentan todavía divergencias importantes en los presupuestos de partida y, sobre todo, en sus predicciones a escala regional.

El IPCC, puesto en marcha por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), es el órgano científico de la Convención Marco sobre Cambio Climático, y un breve examen de su estructura interna, dividida en cuatro

grupos o apartados y distribuida por cinco sedes, puede dar una idea de la complejidad del problema que debe atender: 1) aspectos científicos; 2) impactos económicos y sociales y vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales; 3) opciones para limitar emisiones de gases con efecto invernadero; y 4) contabilidad e inventarios nacionales de dichas emisiones. Es evidente que el problema desborda el mero ámbito de la ciencia y que, incluso en términos científicos, se está más ante la insidia de lo probable que bajo el cobijo de lo probado. La del clima es una ciencia más de observación que de experimento, por lo que el contraste de teorías e hipótesis no es todo lo aseado que cabría desear. Dice el proverbio árabe que “el caballo lo concibió un dios y el camello, un comité de dioses” y en la misma línea podría decirse que para el consenso científico basta un puñado de investigadores, mientras que para la ciencia por consenso hace falta un IPCC. Cuando falta lo primero, la segunda es lo máspreciado que nos queda y no tenemos más remedio que apelar a ella e incluso ir más allá, dando paso a las intuiciones, cábalas y premoniciones de los expertos, si bien debemos escapar de la falsa sensación de certeza que estas elucubraciones puedan generar en espíritus no avisados.

EL CALENTAMIENTO Y SUS CONSECUENCIAS FÍSICAS, SEGÚN EL IPCC

Desde el tercer informe del IPCC se han realizado nuevas observaciones y se han refinado los modelos relativos a la dinámica de los gases invernadero, la actividad solar, las propiedades de la superficie terrestre y la influencia de los aerosoles atmosféricos, lo que ha permitido mejorar la estimación de las contribuciones relativas del forzamiento humano y del natural

al cambio climático. Los incrementos globales del CO₂ han sido debidos al uso de combustibles fósiles y a los cambios en el uso del terreno, mientras que los aumentos de metano y oxido nitroso han sido generados principalmente por la actividad agrícola. En términos cuantitativos, la contribución antropogénica al forzamiento irradiativo sería casi 14 veces superior a la natural [1,6 (0,6 a 2,4) W m⁻², vatios por metro cuadrado, frente a 0,12 (0,06 a 0,30) W m⁻²]. Este nuevo cálculo reduce la estimación del forzamiento natural con respecto al anterior informe, pero debido a los amplios márgenes de incertidumbre y al imperfecto conocimiento del papel de algunos factores naturales, tales como el de la cubierta de nubes, debemos pensar que no estamos ante un cálculo definitivo. Hay que tener en cuenta que el nivel de la comprensión científica de muchos de los factores involucrados, desde los aerosoles a la irradiación solar, es todavía considerado como bajo por los propios expertos. Sin embargo, no debe existir duda alguna de que el calentamiento durante el último siglo está ocurriendo, a juzgar por las medidas de temperatura del aire y de los océanos y los incrementos del nivel del mar, y de que, con una probabilidad de 9 sobre 10 (“muy alta confianza”, en el inflado lenguaje del informe) la actividad humana ha tenido un papel causal dominante, una conclusión más firme ahora que en el tercer informe del IPCC.

Seis meses después de la publicación de esta parte del informe ha surgido una vigorosa crítica que ha cogido a contrapié a los responsables de los modelos predictivos porque procede de distintos expertos en el tema y no del habitual sector neocon (ver ref.11). R. Charlson, de la Universidad de Seattle, S. Schwartz, del Brookhaven National Laboratory, y H Rodhe, de la Universidad de Estocolmo, han criticado como engañosa la forma de referirse

en el informe al grado de concordancia de los 14 modelos usados con el calentamiento observado directamente durante el siglo XX. Según estos climatólogos, el informe transmite más confianza en sus predicciones de la que puede justificarse. En la misma línea se ha pronunciado J. Kiehl, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Colorado (EEUU), quien ha señalado que los distintos modelos poseen distinta sensibilidad al clima, y que cuanto mayor es el calentamiento predicho por un modelo mayor también es el enfriamiento que asigna a un factor clave y todavía mal entendido, como es la influencia de los aerosoles atmosféricos. Los críticos acusan a los modeladores no tanto de deshonestidad como de torpeza en su forma de comunicar sus conclusiones al público no especializado. Insisten en que el grado de incertidumbre es tal que, a finales del siglo XXI, la temperatura podría evolucionar tanto por encima como por debajo de los intervalos de variación propuestos para los distintos escenarios y políticas posibles.

A lo largo de la década 1993-2003 el aumento observado del nivel del mar ha sido de $3,1 \pm 0,7$ milímetros por año (mm/año), estimándose que la expansión térmica contribuyó $1,6 \pm 0,5$ mm/año, el deshielo de glaciares y otras nieves $0,77 \pm 0,22$ mm/año, el de los hielos de Groenlandia $0,21 \pm 0,07$ mm/año y el del hielo antártico $0,21 \pm 0,35$ mm/año. Los expertos concluyen que los nuevos datos sobre las pérdidas en las capas de hielo (exceso de fusión sobre nieve caída) de Groenlandia y la Antártida han contribuido con una probabilidad de 9 sobre 10 a la elevación del nivel del mar en la citada década. En este caso, los datos posteriores a los recogidos en el informe parecen indicar que estas últimas pérdidas se siguen produciendo a una tasa muy

superior a la previamente observada, por lo que cabría esperar un agravamiento del efecto.

Las proyecciones de los aumentos de la temperatura y del nivel del mar para la última década del siglo XXI con respecto a la última década del siglo XX varían según el escenario contemplado. Si se mantuviera el actual régimen, que implica un uso intensivo de energía fósil, se produciría un aumento de la temperatura media de 4°C (2,4 a 6,4°C) y una subida del nivel medio del mar entre 0,26 y 0,59 metros, estimación esta última que no tiene en cuenta futuros cambios rápidos en los flujos de hielo.

Al publicarse estas estimaciones, ha habido críticos que se han apresurado a señalar que una elevación de 59 centímetros no es ni mucho menos la predicción más desfavorable, ya que la fusión más rápida de los hielos podría añadir 20 centímetros más y si la temperatura alcanzara el límite superior de la predicción, habría que sumar otros 15-20 centímetros. En concreto, coincidiendo exactamente con la publicación del tercer resumen del IPCC (4 de mayo de 2007), siete distinguidos climatólogos de cinco países, entre los que se encontraba James E. Hansen, máximo responsable de estos asuntos en la NASA, publicaron una seria advertencia sobre las conclusiones del IPCC, basándose en el contraste de las observaciones directas con las predicciones anteriores basadas en modelos¹². Esos autores señalaron que la elevación observada del nivel del mar progresaba más rápidamente de lo que se había previsto (25% más rápida que cualquier periodo de 20 años en los últimos 115 años), y que si las predicciones del incremento del CO₂ atmosférico se habían ajustado casi exactamente a lo esperado, el hecho se debía, parcialmente, a una coincidencia, ya que los errores respecto a las emisiones

de CO₂ se habían compensado con los de sentido contrario relativos a la capacidad de absorción de sus sumideros. Las temperaturas han evolucionado por la parte alta del intervalo de predicción, a pesar de que las emisiones de los gases de efecto invernadero, excluido el CO₂, han estado por debajo de lo previsto. Parece que un efecto menor que el esperado de los aerosoles puede explicar la discrepancia, aunque no se descartan posibles errores de los modelos como responsables de una subestimación de la sensibilidad del clima al CO₂.

Para fijar la composición atmosférica en sus valores actuales tendríamos que hacer un gran esfuerzo de reducción de las actividades que generan gases invernadero. Aun si cumpliéramos con este objetivo, lo que es muy difícil, no lograríamos frenar del todo el calentamiento, debido a la considerable inercia del sistema climático. En dos estudios recientes se ha concluido que, a composición constante, la mera inercia térmica de los océanos haría que para el siglo XXIV la temperatura aumentara 1°C y el nivel del mar, 10 centímetros (entre 1 y 30 cm), mientras que si nos conformamos con no aumentar las emisiones actuales, una hipótesis menos restrictiva, el calentamiento sería de 2°C-6°C y la elevación del nivel del mar de 25 centímetros (entre 7 y 50 cm).

La inercia térmica de los océanos da lugar a un desfase o retardo de la respuesta climática con respecto a cualquier cambio en los factores y forzamientos externos que la determinan. Debido a esta inercia y a los cambios ya producidos en la composición de la atmósfera, el sistema climático continuará cambiando durante décadas (siglos a nivel del mar) a partir del momento en que cesen los cambios en los factores causales. A esto se ha llamado calentamiento “pendiente de realizar”, “comprometido” o “residual”, si

se alude al cambio de temperatura, y “cambio climático comprometido”, cuando se incluye también el aumento del nivel del mar.

Si aumentan las temperaturas medias, es lógico que cambien también otros aspectos climáticos relacionados, tales como los números de días fríos y días calientes, junto a las temperaturas que se alcanzan en ellos. Sin embargo, los indicios de una contribución humana a estos cambios no se han establecido aún satisfactoriamente desde un punto de vista estadístico, aunque se espera confirmarlos cuando se disponga de series temporales de datos más extensas. Este es el caso, por ejemplo, de los aumentos de la superficie sujeta a sequías, de la intensidad de los ciclones tropicales o de la incidencia de elevaciones extremas del nivel del mar (excluidos los tsunamis), aspectos para los que en el informe se considera que “es más probable de que sí (se dé) que de que no” se dé la influencia humana, una afirmación que es casi como no decir nada. Sin embargo, esta indefinición no ha impedido que, en apariciones públicas, algunos portavoces (incluidos miembros de los grupos de trabajo) den por establecidos dichos efectos.

Queda todavía mucho por saber sobre los mecanismos de retro-regulación que pueden acelerar o frenar el proceso de cambio o sobre la capacidad de los océanos para absorber anhídrido carbónico y atraparlo en el carbonato cálcico de las conchas y esqueletos de los organismos marinos. La elevación de la concentración del mencionado gas en la atmósfera puede aumentar la acidez del océano e interferir así con las tasas de calcificación, lo que a la postre reduciría la capacidad oceánica de absorción. Con posterioridad a la publicación del informe del IPCC se ha reforzado la evidencia de que la capacidad del mar como sumidero de CO₂ está disminuyendo.

Otro aspecto que merece mencionarse es que si bien para algunas áreas los modelos predicen efectos precisos y bien entendidos, los análisis a nivel regional son todavía muy toscos. Entre las bien establecidas están las predicciones de una menor cubierta de nieve en las Montañas Rocosas de Estados Unidos y, desgraciadamente, la de unos veranos más calientes en España. También después del informe del IPCC, se ha publicado la predicción de que es inminente una transición hacia un clima más árido en el suroeste de Estados Unidos¹³. En cambio, mientras en los trópicos es posible ligar con cierta seguridad la creciente intensidad de las tormentas al aumento de la temperatura de la superficie marina, no ocurre lo mismo todavía en las latitudes medias.

A pesar de las críticas que ha sido de rigor hacerle, se debe concluir que en este cuarto informe del IPCC se han realizado avances importantes en el afianzamiento de las principales conclusiones sobre las bases físicas del proceso y que lo ya concluido debe deshacer cualquier duda sobre la gravedad del calentamiento. En la medida en que se confirma un importante forzamiento humano sobre el clima, se hace cada vez más patente la urgencia de un cambio del actual modelo energético. Como consecuencia de este afianzamiento, el centro de gravedad del debate se desplaza ahora hacia los aspectos contemplados en las otras dos partes del informe, relativas, respectivamente, a los impactos del calentamiento y a su remediación.

AGRICULTURA, SALUD, ESPACIOS NATURALES

El calentamiento global tiene importantes efectos directos e indirectos sobre la biosfera, de los que nos limitaremos a ilustrar algunos.

Los expertos de la Organización Mundial de la Salud han estimado que el cambio climático de origen antropogénico ha ocasionado unas 150.000 muertes anuales en los últimos treinta años, y en un reciente análisis se ha encontrado un incremento de morbilidad y mortalidad asociadas al calentamiento pasado y futuro que afecta a las enfermedades cardiovasculares, respiratorias e infecciosas¹⁴. También se ha postulado un efecto del calentamiento sobre la incidencia de la fiebre del heno.

La actividad agrícola está íntimamente ligada al marco climático y tendrá que adaptarse a los cambios que éste sufra. Además, unos modelos climáticos suficientemente precisos en sus predicciones deberían permitir que los planes de política agraria y las decisiones productivas anuales se adoptaran más racionalmente. Por avanzado que esté el conocimiento agronómico actual, las conjeturas que podamos hacer sobre los posibles efectos del cambio climático sobre la producción de alimentos no pueden ser más que hipótesis basadas en hipótesis.

A pesar de las discrepancias de detalle entre los modelos de predicción climática, existen algunas coincidencias, tales como la probable menor afectación del subcontinente norteamericano o la concentración de los cambios más dramáticos en la franja comprendida entre los trópicos, precisamente allí donde se espera una mayor expansión demográfica. Si esto es cierto, una vez más, los pobres llevarían todas las de perder. Es evidente que una elevación

de la temperatura podría llevar hacia el declive a las más prósperas regiones agrícolas actuales, mientras que áreas del globo que eran inhóspitas hasta ahora podrían convertirse en óptimas para la agricultura. También la distribución geográfica de los espacios naturales sufriría un cambio radical. El aumento de la concentración atmosférica de CO₂ podría favorecer el crecimiento y la producción vegetal, al mejorar la eficiencia del proceso de fotosíntesis, pero la elevación conjunta del CO₂ y la temperatura podría alterar profundamente el abanico de plagas, enfermedades y malas hierbas, aumentando su efecto adverso sobre las plantas cultivadas. El previsto aumento de la concentración superficial de ozono también sería adverso para la producción agrícola.

Respecto a la vida salvaje también empiezan a detectarse efectos preocupantes. Así por ejemplo, en un estudio de 36 especies marinas en el Mar del Norte, dos tercios de ellas, incluido el bacalao, han migrado hacia el norte o hacia aguas más profundas. La fenología de plantas y animales (por ejemplo, tiempo de floración o de migración) también se afecta, según un estudio que ha incluido 145 especies¹⁵. Empiezan a sorprender algunos datos sobre la facilidad con que se han producido algunas migraciones recientes. Así por ejemplo, se ha investigado el ADN de nueve especies vegetales de la isla ártica de Svalberg y se ha comprobado su procedencia de los más diversos y alejados sitios del hemisferio norte.

Los efectos del calentamiento sobre los seres vivos pueden ser también indirectos: en América Central y del Sur, dos tercios de las 110 especies que se han descrito de la rana arlequín han desaparecido. Inicialmente se pensó que la causa de estas extinciones estuviera en un incremento, mediado por la

temperatura, de la virulencia de uno de sus patógenos fúngicos. Sin embargo, estudios posteriores al último informe del IPCC han desvelado que el proceso es más general, ya que afecta también a especies de reptiles que no comparten agentes patógenos con los anfibios¹⁶.

IMPACTOS, ADAPTACIÓN Y VULNERABILIDAD

Los posibles impactos del calentamiento son difíciles de predecir, una vez que se pasa de los más inmediatos a aquéllos sobre los que incide más de un agente causal. Así por ejemplo, es fácil colegir que si se deshielan los glaciares se forzarán peligrosamente los lagos que se surten de ellos, y que si aumenta la intensidad de los ciclones tropicales será mayor el número de árboles derribados, pero ya no es tan sencillo discriminar los efectos del cambio sobre ecosistemas que están de por sí en constante fluctuación y que sufren múltiples agresiones no mediadas por el clima, aunque sí por el hombre. Si por ejemplo examinamos la literatura relativa a la pérdida de biodiversidad, uno de los posibles impactos del cambio climático más publicitados, nos encontraremos, por un lado, con grandes discrepancias sobre la importancia cuantitativa de ésta y una considerable falta de fundamento en la elaboración de las cifras de especies extinguidas y, por otro lado, con que sobre la biodiversidad ya están operando potentes fuerzas devastadoras, además del calentamiento, que es un efecto a largo plazo. La destrucción y fraccionamiento de habitats, las especies invasoras de plantas y animales o la creciente contaminación de aguas y suelos son factores que erosionan la biodiversidad a

corto y medio plazo. En estas circunstancias resulta difícil cuantificar el papel causal del cambio climático.

La dificultad señalada no justifica sin embargo la baja calidad del resumen del informe del IPCC relativo a estos asuntos, que es inconcreto, a ratos tautológico, y en general está mal redactado. El lector que lo lea buscando algunas precisiones, se encontrará a menudo con las nubes de humo y la tinta de calamar de un lenguaje burocrático. Causa verdadera perplejidad la lectura de frases tales como la siguiente: “Algunos eventos climáticos de gran escala tienen el potencial de causar grandes impactos, especialmente después del siglo XXI.”

Como hemos indicado, es posible ya discernir efectos del calentamiento global sobre el medio natural y el entorno humano más inmediato. La acelerada fusión de los hielos en distintas regiones del mundo supone una rápida reducción de hábitat para muchas especies. Es abundante la evidencia de que la primavera se adelanta progresivamente en muchos sitios: los satélites detectan antes el reverdecimiento de la superficie terrestre; los glaciares y los picos nevados hacen cada vez más pronto su máxima descarga de agua a los ríos; y el progresivo adelantamiento de la aparición de la primera hoja y la floración de muchas especies vegetales, la migración o la deposición de huevos en ciertas especies de pájaros o la subida de los ríos por determinadas especies de peces. Numerosas especies vegetales y animales están desplazando sus hábitats hacia el norte y hacia arriba en los sistemas montañosos, y la abundancia y las zonas de distribución de algas y plankton están sufriendo cambios discernibles. Parece que en el hemisferio norte, una subida de 4°C supondría un desplazamiento de los habitats hacia el norte de

500 km (o una subida en altitud de 500 m). La habilidad de las distintas especies de adaptarse a tal situación dependerá del tiempo que tengan para hacerlo y de su capacidad de cambiar el comportamiento fisiológico y estacional. En contraste con este fenómeno bien establecido, es dudoso que de momento puedan imputarse rigurosamente al calentamiento global las muertes posiblemente asociadas a una reciente ola de calor estival en Europa o ciertos desmanes que afectan a nuestras costas.

En las proyecciones de futuros impactos, el informe, salvo contadas excepciones, apenas puede ir más allá de ingenuas afirmaciones cualitativas, guiadas por el mero sentido común, sobre lo que ocurrirá si determinado fenómeno causal se llega a producir. Así por ejemplo, si aumenta el área afectada por la sequía, en el ámbito agrícola “las cosechas rendirán menos”, en el de los recursos hídricos “se producirá más estrés”, en el de la salud humana “habrá más hambre y sed”, o en el socio-industrial “habrá escasez de agua”.

Si el calentamiento no ocurriera demasiado deprisa y no superara ciertos límites, bastarían las iniciativas locales y regionales de adaptación preventiva y de disminución de la vulnerabilidad para responder al reto. No otra cosa se ha venido haciendo desde la pequeña glaciación de hace tres siglos y, según se refleja en el informe, algunas medidas de adaptación se están llevando a cabo en la actualidad, como por ejemplo la construcción de defensas costeras en las islas Maldivas y en los Países Bajos, el diseño apropiado de puentes en Canadá, o la prevención de desbordamientos en lagos glaciales en Nepal. Sin embargo, el esfuerzo de adaptación preventiva deberá ser continuado y más intenso, sobre todo a largo plazo, cuando la magnitud de los impactos se haga progresivamente mayor. No hay que olvidar que existe ya un cambio climático

comprometido, que aun en el utópico caso de que se logran mantener las concentraciones actuales de gases invernadero, la temperatura y el nivel del mar seguirán subiendo.

La vulnerabilidad futura depende no sólo de los cambios climáticos que se produzcan sino de la ruta o modelo de desarrollo que se elija en cada caso. Las estrategias de desarrollo sostenible tenderán a disminuir la vulnerabilidad futura al cambio, entre otras obvias razones, porque deberían contribuir a frenar dicho cambio.

Afirmar, como se hace en este resumen, que “muchos impactos se pueden evitar, reducir o retrasar mediante la mitigación” es una gran perogrullada. Suscribo la apelación final, en este volumen del informe, a una más intensa investigación y más extendida observación sistemática. Añadiría por mi parte la demanda de una síntesis mejor elaborada de las observaciones y las investigaciones ya realizadas.

RESPUESTAS TECNOLÓGICAS. EL PROBLEMA DE LA ENERGÍA

Muchos expertos proponen limitar la concentración atmosférica de CO₂ a 500 ± 50 partes por millón, por debajo del doble de la concentración preindustrial, como forma de evitar las consecuencias más extremas del cambio climático. A la luz de lo que sabemos sobre las tecnologías actuales, no parece haber ningún avance previsible que por sí solo nos pudiera permitir alcanzar una parte significativa del objetivo propuesto, por lo que hay que apelar a un amplio repertorio de posibilidades, tratando de superar las barreras y dificultades que cada una de ellas presentan en su aplicación¹⁷. El aludido

repertorio puede dividirse en cuatro capítulos: a) mejora de la conservación y la eficiencia energéticas, incluyendo vehículos y edificios más eficientes; b) técnicas de captura y almacenamiento de carbónico; c) fuentes alternativas de energía, incluidas las nucleares (fusión), los biocombustibles y el hidrógeno; d) prácticas agrícolas y forestales, tales como el laboreo mínimo, la repoblación forestal y la introducción de nuevas plantaciones arbóreas.

Los problemas que plantea el uso de combustibles fósiles han empujado a que se pongan las esperanzas en fuentes alternativas de energía, algunas de las cuales han empezado ya a adquirir cierto protagonismo. Así por ejemplo, acaba de publicarse¹⁸ la noticia de que nuestra comunidad de Navarra bate el récord mundial de dependencia de la energía eólica, con casi el 52%, y que España en su conjunto, con el 8,8%, ocupa el segundo lugar entre los países del mundo, sólo superada por Dinamarca. Sin embargo esta fuente de energía sigue siendo cara, a pesar de que se ha abaratado, plantea problemas de gestión y tiene algunos inconvenientes ambientales.

La energía fotovoltaica tiene un brillante porvenir y ocupará sin duda un nicho especializado importante en el futuro panorama energético, pero es cara en extremo, plantea problemas de gestión y de reciclado de los materiales que componen las placas de conversión.

Es bien conocido que la nuclear no es una fuente renovable de energía, aunque no contribuya significativamente al calentamiento global y ahorre emisiones. También es sabido que no se ha encontrado todavía una solución satisfactoria al grave problema de los residuos, aunque se hayan hecho progresos en los protocolos de su gestión y en las medidas de seguridad de las centrales. Con la creciente conciencia popular del calentamiento climático, la

aceptación o rechazo de esta fuente de energía ha devenido una elección entre dos males que en muchas regiones del planeta puede que se decante hacia una mejor aceptación de las centrales nucleares. Sin embargo, conviene señalar que incluso una adopción generalizada de esta fuente de energía no resolvería por completo el problema de las emisiones, si bien supondría un paliativo importante. Por estas razones, el posicionamiento de esta fuente de energía en el último informe del IPCC es mucho más favorable que en informes anteriores.

No cabe aquí considerar el conjunto del iceberg casuístico que se esconde bajo la etiqueta de energías alternativas, pero sí urge que nos detengamos brevemente en torno a cuatro problemas concretos que inciden en distinta medida en la forma de atajar el calentamiento global y que están siendo reflejados en los medios de una forma claramente desenfocada: posibilidades de intercepción de la energía incidente, el secuestro de CO₂, el uso de biocombustibles y el papel del Hidrógeno.

PONGAMOS PERSIANAS PLANETARIAS

El 1816 fue un “año sin verano”, un año trágico de excepcionales heladas, tormentas e inundaciones que resultaron de la erupción en 1815 del volcán del monte Tambora, en Indonesia. El enfriamiento producido devastó la producción agrícola en el norte de Europa, el noreste de EEUU y la China, se produjeron hambrunas y auténticas rebeliones, con el número de muertes humanas en los cientos de miles. Más suaves han sido los efectos de la erupción del volcán Pinatubo en 1991, acontecimiento que ha permitido

estudiar detalladamente las consecuencias de poner persianas a la tierra para poder graduar a voluntad la fracción de la irradiación solar que incida sobre la superficie terrestre. La idea de hacer geoingeniería a escala planetaria no es en consecuencia tan quimérica que se pueda excluir sin más del debate científico, aunque a nadie se le escapa que no está entre las susceptibles de una pronta y aseada prueba experimental. En un artículo reciente, P.G. Brewer¹⁹ ha comentado las publicaciones más relevantes sobre este asunto, en particular una simulación realizada por Matthews y Caldeira²⁰ con el Earth System Climate Model de la Universidad de Victoria. Entre los posibles modos propuestos para interferir la incidencia de luz solar se incluyen los siguientes: pintar de blanco todos los tejados y carreteras para aumentar el albedo planetario, localización de reflectores en el espacio y la proyección a la estratosfera (lanzaderas, cohetes, grandes cañones) de material reflectante, como, por ejemplo, aerosoles de sulfato. Como en el caso de los efectos de la erupción del Pinatubo, las respuestas previstas mediante la simulación aludida también serían rápidas y efímeras, de tal modo que para un efecto permanente sería necesaria una inyección continua de aerosoles a la estratosfera. El problema está, al parecer, en el efecto rebote que se predice si cesa accidentalmente la intervención: un calentamiento brusco de carácter catastrófico. Si ya está resultando difícil para los ecosistemas poder adaptarse a la tasa actual de calentamiento, es fácil imaginar lo que les ocurriría ante los retos de un sistema climático yo-yo en el que todo dependiera del ajuste fino de un mecanismo regulador tosco en extremo. ¿Cuál sería el destino de las toneladas de sulfato proyectadas a la atmósfera? A la vista de lo que sabemos,

un experimento de la magnitud de los simulados no podría llevarse a cabo más que como último acto de desesperación planetaria.

EL CO₂ SE RESISTE A QUE LO SECUESTREN

Una forma de reducir drásticamente las emisiones de CO₂ sería secuestrándolo en los lugares fijos de emisión, tales como las centrales térmicas que queman carbón mineral o gas natural, y almacenándolo en depósitos apropiados. No sería viable secuestrar CO₂ de los emisores en movimiento, tales como aviones, automóviles o barcos. La idea del secuestro se empezó a abrir paso hace no más de media docena de años y todavía no ha superado una tímida fase de experimentación a la que los gobiernos más comprometidos, como es el caso de los miembros del G8 en la cumbre de 2005, vienen prestando un vigoroso apoyo verbal y un apoyo material miserable.

Estamos hablando de un reto que se mide en miles de millones de toneladas de CO₂, hasta casi cuatro mil millones de toneladas anuales para 2025 y hasta quince mil millones de toneladas anuales hacia el 2050. En principio, parece posible esconder cantidades ingentes en los acuíferos profundos de cuencas sedimentarias, cuya capacidad de almacenamiento podría ser entre diez y cien veces la requerida. Por otra parte, muchas compañías petrolíferas logran rescatar los restos de petróleo de yacimientos casi vacíos inyectándoles CO₂, que puede quedar almacenado en ellos durante miles de años. Estos posibles almacenes serían en principio más estancos que algunos acuíferos, de los que podría rezumar el gas almacenado.

El aparato técnico necesario para un secuestro de la magnitud requerida estaría ya desarrollado y sería de la misma naturaleza y, desgraciadamente, de la misma escala y coste que el empleado para la extracción de crudo. En la actualidad se ha experimentado con el secuestro a una modesta escala industrial en Canadá, Argelia y Noruega. En los dos primeros casos se ha hecho en combinación con la extracción de petróleo, con una mejora del rendimiento de crudo y una rebaja de los gastos de secuestro. El proyecto noruego, que empezó en 1996, ha supuesto inyectar apenas 10 millones de toneladas de CO₂ a mil metros de profundidad en el subsuelo del Mar del Norte. Se planean más de una decena de proyectos adicionales en EEUU, Canadá, Alemania, Noruega y Australia, y en el Reino Unido se ha abierto un concurso nacional de iniciativas. La tecnología tendrá que ser mejorada e integrada en el proceso de producción en las futuras plantas térmicas, ya que la reconversión de las existentes es bastante cara y de difícil implementación física. No se excluye que una combinación de incentivos apropiados y nuevos avances tecnológicos puedan hacer más viable la reconversión de viejas plantas. Sea cual sea el perfeccionamiento de las nuevas plantas, la obligación de secuestrar el CO₂ encarecerá necesariamente la electricidad producida.

La biomasa muerta devuelve su carbono a la atmósfera en forma de CO₂ en un tiempo relativamente corto. Esto implica que un bosque secuestra dicho gas de forma neta sólo mientras está aumentando su masa forestal; alcanzado el límite, o el punto en que crecimiento y decremento se compensan, se convertiría en un reservorio estable. Sin embargo, si la biomasa muerta la convertimos en carbón vegetal, como el que consumíamos en nuestros hogares no hace tanto, dicho carbón no volverá a la atmósfera en forma de

CO₂ durante siglos o tal vez milenios. Se ha propuesto la distribución en suelos agrícolas de carbón vegetal finamente dividido como método de secuestro, lo que tendría la ventaja adicional de mejorar la textura y capacidad de retención de nutrientes de los suelos en cuestión. Para que esta propuesta sea viable a gran escala sería necesario combinar la pirolisis a baja temperatura de la masa vegetal con la captura simultánea de los gases producidos en el proceso y el aprovechamiento de éstos para generar energía en forma de calor, electricidad, biocarburante o hidrógeno.

En resumen, los esquemas de secuestro de CO₂ arriba esbozados, junto a otros que omitimos mencionar, no son de inmediata aplicación a gran escala, aunque podrían empezar a ser eficaces a partir del 2030. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se trata de un proceso que demanda considerable energía y que tiene asociada una huella medioambiental nada desdeñable.

LOS BIOCOMBUSTIBLES COMO PANACEA

A pesar de la regresión de las fuentes bioenergéticas durante los dos últimos siglos, a escala global, el 10% de la energía que consumimos procede de la biomasa, por lo que actualmente esta fuente supera en importancia a cualquier otra renovable, así como a la energía nuclear.

En Estados Unidos, uno de los principales objetivos de la 'Advanced Energy Initiative' para el año 2025 consiste en sustituir tres cuartas partes de las importaciones de petróleo por energía renovable derivada de la biomasa, y en la Unión Europea se acaba de fijar en un 20% la proporción que deben representar las energías limpias para el año 2020.

Los biocombustibles se ponen de moda cada vez que entramos en un periodo de crisis respecto a los combustibles fósiles, y tanto los políticos como los medios de comunicación se refieren a ellos como si fueran una panacea que nos salvará de todo mal, sea la carestía del petróleo, la vulnerabilidad del suministro de éste o las amenazas del calentamiento global. Sin embargo, en su realidad actual y en sus desarrollos futuros, las fuentes biológicas de energía adolecen de inconvenientes y limitaciones que conviene sopesar y tener presentes si queremos beneficiarnos de sus indudables ventajas, las principales de las cuales son sin duda la de ser renovables, producirse de forma descentralizada, mejorar la balanza de pagos y, en el marco europeo, la de dar utilidad al suelo laborable que progresivamente se está dejando baldío y la de generar empleo en la agricultura, evitando así que los agricultores abandonen en masa su profesión.

Las plantas pueden considerarse como artefactos capaces de convertir energía luminosa en energía química y de fijar (secuestrar) CO_2 en forma de biomasa orgánica. Como tales convertidores energéticos, las plantas no son particularmente eficientes, ya que no logran colectar anualmente más de 1-2 vatios de energía por metro cuadrado de la superficie terrestre. Sin embargo, en comparación con las pilas solares, que son mucho más eficientes, las plantas tienen la ventaja de su bajo coste, ya que bastan cantidades moderadas de agua y nutrientes para que se fabriquen a sí mismas. En contraste con la energía fósil, ofrecen la ventaja enorme de que idealmente no aportan a la atmósfera más carbónico del que previamente han secuestrado. Esto último no se cumple por completo en las distintas aplicaciones prácticas porque la recolección, transporte, procesado industrial y distribución pueden

consumir más energía que la contenida en el combustible final obtenido (alcohol o biodiesel). El ímprobo esfuerzo de recolectar, trocear y transportar los vegetales, combustibles de baja concentración de energía, ha sido la principal razón por la que esta fuente haya cedido el protagonismo a los combustibles fósiles a lo largo de los últimos dos siglos. Los biocombustibles potencialmente derivados de la biomasa son los siguientes: bioalcohol (etanol y alcoholes superiores, aditivos para gasolinas), biodiesel (ésteres metílicos y etílicos de ácidos grasos), biohidrógeno (producido químicamente a partir de biomasa o producido por microorganismos que aprovechen la energía luminosa), metano y otros hidrocarburos. Los dos primeros son ya una realidad, aunque en extremo incipiente y pendiente de futuros desarrollos, y los restantes constituyen básicamente un reto para el futuro. Tanto la biomasa como el bioalcohol y el biodiesel derivados de ella tienen la ventaja de ser fácilmente incorporables a los sistemas energéticos existentes: la biomasa puede usarse de modo intercambiable con el carbón mineral en diversos tipos de instalaciones térmicas, paliando así el impacto ambiental de la combustión de éste, y lo mismo ocurre con el etanol y el biodiesel, que son intercambiables con los derivados del petróleo en distintos tipos de motores. Además, las futuras biorefinerías deberán abordar el procesamiento integrado de la biomasa para atender un doble uso, la producción de combustibles y la de sustratos para la industria química.

En la actualidad, las necesidades energéticas mundiales equivalen a unos 170 millones de barriles de petróleo al día. Una hipotética pradera de *Miscanthus* (2% de eficiencia de conversión de la energía luminosa; 80% aprovechable; 35% recuperación como electricidad) debería ocupar algo más

del 3% de la superficie terrestre para cubrir nuestras necesidades energéticas. Como es evidente que la citada planta no puede crecer en cualquier sitio y que las demás posibles fuentes vegetales distan mucho de rendir las 45 toneladas de biomasa por hectárea que ésta puede llegar a producir, hay que concluir, sin salirnos del plano de la hipótesis, que la producción biológica de la energía que consumimos requeriría del orden del 7-8% de la superficie terrestre, una fracción que sería ya comparable a la que dedicamos a producir alimentos (~11,5 % de la superficie global). La producción masiva de biocarburantes tendría un nada desdeñable impacto adicional sobre el medio ambiente. Tampoco conviene olvidar que en el escenario bioenergético actual, el equivalente en grano de la dieta de un ser humano sería siete veces inferior al de un automóvil que recorriera 20.000 kilómetros al año.

Debido a que en comparación con la producción de carbohidratos, la proporción de biomasa que resulta convertida en lípido es mucho menor, el biodiesel tiene un menor uso potencial que el bioalcohol. Así por ejemplo, el rendimiento medio de una hectárea de soja o de colza estaría en torno a la media tonelada de aceite, cuyo equivalente calórico es muy inferior al del alcohol que podría producirse en la misma superficie. En un estudio reciente, hecho para el Congreso de los Estados Unidos, se concluye que si se usara todo el lípido vegetal y animal producido en dicho país para convertirlo en biodiesel no se cubriría ni el 3% de sus necesidades de combustible líquido. Esta consideración es extensible a los demás países desarrollados, por lo que el biodiesel no está llamado a desempeñar un papel cuantitativamente importante en el futuro de los biocombustibles.

Si se dedicara toda la cosecha de grano de maíz de Estados Unidos a producir bioalcohol y toda su producción de haba de soja a biodiesel, apenas se sustituiría el 12% de sus necesidades de gasolina y el 7% de las de biodiesel de este país. En cambio, el aceite de palma (*Elaeis sp.*) puede desempeñar un papel importante en los países en desarrollo situados en la franja ecuatorial, ya que llega a rendir hasta 7 toneladas de aceite y 10 toneladas de biomasa por hectárea sin requerir apenas insumos.

El potencial de la producción de alcohol a partir de celulosa y otros polímeros de la pared celular es considerable. Se estima que Estados Unidos podría cubrir la mitad de sus necesidades de automoción si aprovecha sus residuos agrícolas (hojas y tallos de maíz, paja de trigo, etc.) y siembra algo menos de 20 millones de hectáreas de suelos no explotados en la actualidad con gramíneas perennes, tales como las poáceas *Panicum virgatum* y *Miscanthus gigantea*.

Es esencial realizar una auditoría energética de la generación de cada tipo de biocombustible para estar seguros de su conveniencia. El balance neto de energía (BNE), la relación entre el contenido energético del producto y la energía gastada en su producción, es muy alto en el caso de los combustibles fósiles (BNE entre 70 y 100) y se estima un BNE en torno a 8-10 para el alcohol de caña, mientras que existe considerable controversia respecto a su valor para otros procesos. En el cálculo de la energía gastada deben incluirse partidas tales como los costes energéticos de sembrar y recolectar el grano, las labores agrícolas, la fabricación, el transporte y la distribución de fertilizantes y fitosanitarios, la fabricación de la maquinaria agrícola y de la instalación industrial, además de las propias del proceso de producción de alcohol, tales

como la molienda, la destilación y la deshidratación. Algunos escépticos, como el ecologista David Pimentel, consideran que mientras el BNE correspondiente a quemar algunas plantas perennes puede ser elevado (BNE entre 10 y 15), el de la conversión de éstas a alcohol puede ser desfavorable (BNE de 0,7), y lo mismo ocurre con el que adjudica al alcohol de maíz, menor que la unidad, lo que implicaría que la energía del etanol producido sería inferior a la necesaria para producirlo. Un riguroso análisis, recientemente publicado, es más optimista al concluir que la producción de alcohol a partir de grano de maíz rinde un 25% más de energía de la que consume (BNE = 1,25). Si, como se hace en algunas plantas de Estados Unidos, se usa energía fósil en dicha producción, desde el punto de vista de las emisiones de CO₂, el alcohol deja en gran parte de ser una energía renovable. En el caso del alcohol producido a partir de pared celular, el BNE podría ser bastante elevado, pero sólo una vez que se mejore el proceso, ya que en la actualidad es ruinoso.

Como ya se ha indicado, el proceso de trans-esterificación de aceites vegetales para producir biodiesel es muy sencillo y apenas consume energía. Por esta razón, el BNE del biodiesel a partir de aceite de soja es más favorable que el del alcohol a partir de maíz: en este caso se produce un 93% más energía de la que se consume (BNE = 1,93).

Es evidente que las especies bioenergéticas más apropiadas serán diferentes en cada región agrícola. China experimenta con la batata, Canadá se inclina por el maíz y el trigo, Estados Unidos, por el maíz, y Tailandia, Malasia e Indonesia optan por el aceite de palma, mientras países como la misma China, Austria, Ghana, Nueva Zelanda y, sobre todo, Suecia llevan tiempo desarrollando combustibles sólidos y líquidos a partir de biomasa

forestal. Sea cual sea la opción agroenergética, habrá que tener en cuenta sus consecuencias en relación con el uso del suelo laborable y con respecto al medio ambiente.

La caña de azúcar es una especie agrónomicamente generosa: convierte directa y eficientemente la energía luminosa en azúcar fermentable, se planta cada cinco años y requiere pocos insumos en comparación con el maíz. Así por ejemplo, en la mayor parte de su área de cultivo en Brasil no necesita irrigación. El del maíz, en cambio, es un cultivo exigente e intensivo, que además rinde mucho menos combustible por hectárea que la caña. En Brasil se cultiva la caña en 5,7 millones de hectáreas, una pequeña parte de los 850 millones de hectáreas disponibles, y algunos expertos opinan que el cultivo podría extenderse hasta unos 100 millones de hectáreas de viejos suelos agrícolas y pastizales en el centro-sur del país, sin competir con la producción de alimentos y sin destruir bosque tropical. Frente a las opiniones más optimistas, hay que tener en cuenta a los críticos que llaman la atención sobre efectos colaterales del cultivo de caña, tales como la alta erosión de suelo laborable (hasta 30 toneladas por hectárea y año) y la contaminación atmosférica producida al “chamuscarse” los campos dos veces al año antes de la recolección. Además, el éxito de Brasil en este cultivo se ve empañado por las penosas condiciones en que viven los que trabajan en él, especialmente los que sufren todavía un régimen de estricta esclavitud, como se ha reflejado en una noticia reciente.

Las grandes plantaciones de palma y especies afines están proliferando en África, India y el sureste Asiático de la mano de grandes intereses

industriales, y por desgracia, la superficie plantada en países como Indonesia y Malasia estaba a menudo previamente ocupada por bosques tropicales.

El apoyo al desarrollo de las tecnologías bioenergéticas fue sustancial durante la crisis petrolífera de los años setenta y se desvaneció tan pronto como bajaron los precios de estos carburantes. Ahora estamos en una nueva crisis, no de reservas sino de precios, y el apoyo a la i + d y al uso de la tecnología bioenergética ha resurgido con fuerza, esta vez con la novedad de que se están uniendo en el esfuerzo compañeros de viaje tan improbables como empresas petrolíferas (Shell, British Petroleum y otras), grupos ecologistas, fabricantes de automóviles (Toyota, General Motors y otros), grandes industrias químicas (DuPont) y aventurados neófitos (Acciona, Abengoa y otros). Organizaciones como la OCDE, EuropaBio (Bruselas) y BIO (Washington), junto a conocidos asesores financieros, apoyan la aventura y defienden su viabilidad a partir de precios del barril de petróleo por encima de los 40 \$, una condición que lleva camino de mantenerse, principalmente por las guerras y conflictos que afectan a importantes áreas de producción. Hasta el inefable George W. Bush acaba de subirse al carro. Aunque los costes de producción de biocombustibles han ido disminuyendo casi tan deprisa como han aumentado los precios de la energía fósil, todavía son lo bastante altos como para necesitar toda suerte de estímulos y subvenciones que permitan progresar hacia sucesivos abaratamientos que hagan competitiva la fuente renovable frente a la que no lo es. Podría bastar una bajada brusca de los precios del petróleo para desinflar las velas del barco bioenergético y cabe preguntarse si, en algún momento, los productores de petróleo no podrían plantearse una estrategia de este tipo para desestabilizar a sus competidores.

En Europa, debido a su sistema de comercio con los cupos de emisiones, se favorece la práctica de la combustión directa de la biomasa, mientras que el marco político-económico en Estados Unidos da preferencia a la producción de biocombustibles líquidos para el transporte.

El precio del alcohol brasileño, a 0,20 € el litro en 2005, estaba ya por debajo de los de la gasolina (antes de impuestos) en Estados Unidos y la Unión Europea. El alcohol norteamericano, a pesar de la subvención a los productores y a los procesadores del maíz, no podía competir con el brasileño, por lo que George W. Bush ha impuesto una tasa a la importación de alcohol, con gran indignación de su hermano Jeb, gobernador del estado de Florida, que es gran cliente de los brasileños. De todas formas y para mantener el sentido de la proporción, conviene señalar que el etanol producido en Brasil es menos de la cuarta parte del petróleo total consumido en dicho país.

La producción de alcohol a partir de granos, inviable económicamente salvo subvención, únicamente se podría justificar como prólogo capacitador y promotor de infraestructuras para el advenimiento de la potencialmente más rentable, pero todavía muy problemática, producción de alcohol celulósico. En Estados Unidos, el desvío de un mero 16% de la cosecha de maíz hacia la producción de etanol, junto con el aumento de la demanda china, ha supuesto que en 2006 la cotización del grano en el mercado de materias primas de Chicago se duplique (de ~80 \$/tonelada a ~160 \$/tonelada). La subida ha evaporado el entusiasmo y congelado la sonrisa de los inversores en la industria del bioetanol, cuyos beneficios dependen de fuertes subvenciones y altas barreras arancelarias para el etanol importado; y lo que además es realmente mucho más grave, es que ha motivado que países como México

reduzcan sus importaciones de maíz-pienso (transgénico) y que la “etanoinflación” se transfiera al maíz blanco de producción autóctona, alimento básico de la población, ya que es el ingrediente de las míticas tortillas y de otros platos fundamentales. La duplicación del precio de las tortillas ha provocado masivas manifestaciones de protesta que han inundado el Zócalo de Mexico DF a principios de este año. También han encarecido todos los alimentos básicos relacionados con los granos, tales como el pan, los lácteos y los cárnicos. Estos acontecimientos ilustran dos conclusiones importantes: a) producir biocombustibles, en ciertas circunstancias, puede suponer que para vestir a un santo se esté desnudando a otro y b) las plantas transgénicas están ya aliviando el hambre en el mundo.

Existe un importante sector crítico entre los científicos que propone una bien argumentada visión alternativa. Si la primera prioridad de la política de biocombustibles es mitigar las emisiones de CO₂, sería más sensato que en las próximas tres décadas, aparte de mejorar la eficiencia del uso de carburantes fósiles, los responsables políticos se concentraran en conservar los actuales bosques y sabanas, restaurar bosques naturales y pastizales en suelos que no se necesitan para producir alimentos, así como convertir grandes extensiones de terreno en bosques secundarios. Cuando se hacen las cuentas, parece que ese conjunto de medidas tendría un potencial de reducir emisiones a corto plazo que el más vigoroso programa de biocombustibles.

Aunque en caso extremo los biocombustibles podrían cubrir todas nuestras necesidades energéticas, en la práctica sólo llegarían a sustituir a una fracción limitada, aunque sustancial, de la energía fósil que consumimos, y

precisamente por las limitaciones de su producción, ésta no debe servir de coartada para seguir despilfarrando energía como hasta ahora.

La productividad y la composición de las especies y variedades vegetales utilizadas con fines energéticos no han sido todavía optimizadas para esa aplicación (técnicas de cultivo, mejora vegetal, ingeniería genética) y el desarrollo de métodos para la conversión industrial de biomasa en biocarburos está todavía en su infancia.

Aparte de los escollos de su desarrollo tecnológico, las principales limitaciones de la producción de biocombustibles son su posible competencia por el suelo laborable con la producción de alimentos y la invasión de habitats naturales, degradados o no.

La aventura brasileña, aunque no exenta de inconvenientes y contraindicaciones, es por ahora la única que progresa por sí sola. El uso de granos de maíz y otros cereales para producir alcohol adolece de unos costes elevados, un BNE desfavorable y de unos efectos económicos perniciosos sobre el precio de alimentos básicos y sobre el problema del hambre en el mundo.

La producción de biodiesel es cara por ineficiente, salvo en el caso de las plantaciones de palma. Sin embargo, dichas plantaciones suponen un verdadero desastre ecológico y una aberración económica, desde el punto de vista de los países donde se realizan, aunque sean beneficiosas para los intereses industriales que las controlan.

EL MITO DEL HIDRÓGENO

Se dice con demasiada alegría que “pronto cambiaremos la cultura del petróleo por la del hidrógeno, que es mucho más limpia”. La primera, entre las diversas trampas que dicha afirmación contiene, es la de que nos coceremos como mariscos si nos limitamos a esperar al futuro desarrollo de dicha tecnología. Ésta, además, plantea tales problemas que no parece que pueda estar disponible antes de la mitad del presente siglo.

Para empezar, el hidrógeno no es una fuente primaria de energía, sino mero vehículo energético. Como tal, es tan limpio o tan rematadamente sucio como el proceso que se use para generarlo, nunca generará más energía de la que se gaste en producirlo, y su energía siempre será más cara que la de partida. A temperatura ambiente es un gas muy ligero, nervioso y escurridizo que presenta problemas de almacenamiento, transporte, licuefacción y seguridad, todos los cuales tendrán que ser resueltos antes de que pueda desempeñar su papel de intermediario en una nueva cultura energética.

En la actualidad el 96 por 100 del hidrógeno que se produce con fines industriales usa gas natural, otros hidrocarburos o carbón gasificado como fuente primaria de energía, fuentes todas ellas que generan CO_2 como subproducto, con el consiguiente efecto invernadero. Sólo el 4 por 100 se produce por electrolisis del agua, costoso proceso que consume electricidad y no genera CO_2 de modo directo, pero sí de forma indirecta si la electricidad no es de origen eólico, solar o nuclear. Todavía no se ha conseguido la disociación térmica del agua a escala industrial, que de nuevo no generaría CO_2 , salvo que lo produzca la fuente de energía térmica utilizada. Los sistemas

microbianos que producen hidrógeno lo hacen con muy baja eficiencia energética (menos del 2 por 100), aunque algunos pioneros de la biología sintética, tales como el famoso Craig Venter, parecen tener bien guardadas ideas sobre cómo mejorar la situación. La energía nuclear y la geotérmica permiten producir hidrógeno sin la concomitante generación de CO₂. Estados Unidos parece dirigirse sigilosamente hacia un esquema futuro de energía nuclear, como fuente primaria de energía, e hidrógeno, como forma de transporte y distribución. Islandia, con su gran capacidad geotérmica, está en las mejores condiciones para ser vanguardia de la nueva era. ¿Cómo se va a organizar en Europa?

El almacenamiento estático de hidrógeno no plantea problemas, salvo que a presión atmosférica, el volumen que ocupa es 3.000 veces mayor que el de una cantidad energéticamente equivalente de gasolina. El almacenamiento en forma comprimida durante el transporte requiere un volumen ocho veces mayor que el equivalente energético de gasolina, mientras que en forma líquida ocupa un volumen más manejable, pero requiere depósitos altamente aislados y el proceso de licuefacción consume un tercio de la energía que contiene el hidrógeno. Además, durante el transporte se producen pérdidas muy importantes, que pueden representar un 40 por 100 de la carga en un trayecto de 500 kilómetros. Entre las barreras a salvar para implantar la cultura de hidrógeno no es la menos importante la de los costes de una infraestructura específica de distribución.

Las ya inventadas pilas de hidrógeno, que se alimentan de dicho gas para producir electricidad, serían la pieza clave en automoción, pero tendrán que hacerse mucho más robustas que las actuales para tolerar el bronco

tratamiento que caracteriza esta aplicación. Estas pilas requieren níquel como catalizador, y está por ver si las existencias de este caro metal serían suficientes para abastecer una demanda tan gigantesca como la que se produciría si el hidrógeno sustituyera a la gasolina y el gasoil. Además, el hidrógeno detona con facilidad y forma mezclas combustibles con el aire en una amplia gama de concentraciones (entre 4-75 por 100 en volumen), por lo que los dispositivos de seguridad han de extremarse si no queremos que las excursiones se conviertan en sesiones de fuegos artificiales.

COSTES ECONÓMICOS DE LA MITIGACIÓN Y DE LA ADAPTACIÓN

El tercer grupo de trabajo del IPCC, reunido en Bangkok, se ha ocupado de estudiar la posible mitigación del cambio, junto a las políticas, medidas e instrumentos disponibles para conseguirlo, así como de calcular los costes económicos asociados a cada opción planteada. Sus conclusiones deberían influir positivamente en las negociaciones globales que en diciembre se reanudarán en Bali, Indonesia, para alcanzar un acuerdo sólido que reemplace al descafeinado Protocolo de Kyoto, vigente hasta 2012.

No hay toda la concordancia deseada entre los dos tipos de modelos económicos utilizados en el estudio, aunque ésta ha mejorado notablemente respecto al anterior informe. En los modelos de “abajo a arriba” se fracciona la economía por sectores y se predice en cada uno de ellos cómo distintas combinaciones tecnológicas serán capaces de reducir las emisiones carbónicas. En cambio, los modelos de “arriba a abajo” simulan la totalidad económica para analizar cómo las distintas estrategias globales, tales como la

elección de los objetivos a los que se decida estabilizar la composición de la atmósfera, influirán a través de las fuerzas del mercado. Uno de los problemas de este segundo tipo de modelos es al parecer que en la práctica ignoran el coste implícito de hacer que los habitantes del planeta elijan opciones que no desean.

Según se concluye en el documento-resumen, en el corto y medio plazo, hasta 2030, existe el potencial económico para mitigar las emisiones de gases invernadero hasta eliminar el crecimiento proyectado de emisiones globales e incluso reducirlas por debajo de los niveles actuales. En el sector de la generación de energía, gran protagonista del problema, se postula una mejora drástica de la eficiencia del suministro y distribución, así como una sustitución del carbón por gas, energía nuclear y energías renovables y el desarrollo urgente de la tecnología para la captura y secuestro del carbónico. En el ámbito del consumo energético, se urge mejorar la eficiencia en el transporte, los edificios, los hogares y las industrias. En el sector agroforestal, se deberá promover una gestión sostenible, limitando las emisiones de metano y óxido nítrico, sustituyendo el consumo de combustibles fósiles por biocombustibles y priorizando el papel de los bosques como secuestradores de carbónico. En relación con los residuos, basuras y desechos, se propone la recuperación directa de energía (metano y combustión directa) y el reciclado. Según el informe, aunque todas estas propuestas requieren un cierto grado de innovación tecnológica, gran parte de los objetivos pueden cubrirse basándonos en lo que ya sabemos, mediante incentivos e iniciativas legislativas apropiadas, y promoviendo cambios en el estilo de vida y en los modos de gestión.

Entre las propuestas que acabamos de resumir no hay grandes novedades, si se exceptúa el respaldo a la controvertida energía nuclear, un respaldo al que por cierto se ha adelantado el ecologista y padre de la teoría de Gaia, James Lovelock, en su último libro²¹, quien al parecer decidió apoyar la energía nuclear el día que le plantaron un generador eólico en el idílico entorno de su casa.

El interés de este capítulo del informe está tal vez en la valoración económica que presenta de las diversas opciones. Así por ejemplo, se ha concluido – con “alto acuerdo, y mediana evidencia”, según la terminología empleada en el informe – que en 2030, los costes macroeconómicos de la mitigación de los gases invernadero, consistente con las trayectorias de emisión que conducirían a una estabilización de la composición atmosférica equivalente a 445-710 partes por millón de CO₂, podrían alcanzar como máximo el 3% del PIB. Este cálculo podría considerarse relativamente concordante con el propuesto en el informe Stern². Un estudio del Instituto Alemán de Investigación Económica concluye que en Alemania, las consecuencias de no mitigar el cambio climático representarían en torno al 20 % del PIB para el año 2050, en línea con el informe Stern. Sin embargo, Richard Tol, autor del modelo en que se basa dicho estudio, ha discrepado de sus conclusiones en una reciente carta a la revista Nature y ha señalado que sus predicciones son mucho más optimistas, añadiendo que hay menos pesimismo en la literatura especializada (evaluada por los pares) que en la literatura gris (por ejemplo, la representada por el informe Stern).

A largo plazo, más allá del año 2030, se considera que para estabilizar la concentración atmosférica de gases invernadero, las emisiones deberán

declinar después de alcanzar un máximo. Con “alto acuerdo y mucha evidencia” se concluye que cuanto más bajo sea el nivel de estabilización, más pronto tendrán que ocurrir tanto el máximo como el declive. De aquí que los esfuerzos de mitigación a lo largo de las próximas dos o tres décadas tendrán un gran impacto sobre las oportunidades de conseguir niveles más bajos de estabilización. Se calcula que, para 2050, los costes macro-económicos medios para estabilizar la composición atmosférica a un equivalente de anhídrido carbónico de 445-710 partes por millón estarán entre una ganancia del 1% del PIB y una pérdida del 5,5%.

En resumen, las conclusiones de la tercera parte del informe del IPCC transmiten un cierto optimismo, en comparación con el tono más catastrofista previamente imperante en el IPCC. Según éstas, la mitigación es posible, en el supuesto de que nos enfrentemos a ella inmediatamente, y aunque será costosa, no está fuera de nuestras posibilidades. Se trata en esencia del mismo mensaje animoso que trata de transmitir Al Gore en su campaña.

KYOTO Y OTROS RETOS POLÍTICOS

La política sobre el clima debe afrontar retos cuya escala de tiempos está entre las varias décadas y el siglo, aunque por supuesto no se excluyan acciones a más corto plazo como primera línea de ataque. En un siglo debería alcanzarse una economía prácticamente “descarbonizada”, es decir, exenta de emisiones de gases invernadero, y este objetivo no es alcanzable con las tecnologías de bajo coste actuales, que no lograrían contrarrestar los aumentos de emisión proyectados para las poblaciones en expansión de los países en

desarrollo. Además, se ha estimado que el coste de mitigación sube rápidamente hasta valores prohibitivos cuando las emisiones per cápita se reducen a la mitad. A las incertidumbres científicas del diagnóstico se suman por tanto las inherentes a las posibles soluciones tecnológicas y a su coste económico.

La política, como en cierto modo la ciencia, es el arte de gestionar la incertidumbre, pero es bien conocido que el horizonte político no suele estar más allá de unos pocos años, y es por esto por lo que las soluciones políticas al problema global son tan difíciles de encontrar. Ante un panorama de tanta complejidad y tan hueco de certezas, caben tres actitudes alternativas, según la psicología y la ideología de cada uno: la de olvidar o negar que el calentamiento existe, la de ir adaptándose a él, según se produzca, y la de intentar atajarlo cuanto antes.

Los que adoptan la primera actitud se suelen aferrar al hecho de que los modelos climáticos actuales son obviamente imperfectos, lo que para ellos llega a equivaler a posiblemente erróneos e incluso falseados. Los afiliados a la segunda opción admiten que existe un calentamiento global, pero piensan que la componente antropogénica puede no ser tan importante como proponen algunos, en cuyo caso el ingente coste de la mitigación rendiría unos resultados desdeñables y sería mejor dedicar dicha inversión a adaptar nuestra vida a un planeta más caliente, que algún día entrará en una fase de enfriamiento como ya ha hecho en el pasado. Para muchos de los partidarios de enfrentarse vigorosamente al problema de frenar el calentamiento, no parece haber duda de que somos responsables casi exclusivos del fenómeno y de que estamos a tiempo de enmendarlos.

No vale taparse los ojos ante el cambio observado, tanto si representa la mera salida de la pequeña glaciación, impulsada por factores naturales, como si es consecuencia directa de la actividad humana. La copa del conocimiento estará siempre medio vacía y medio llena, y no cabe apoyarse en lo que ignoramos para justificar la inacción, algo que se hace con inusitada frecuencia en los tiempos actuales. Los modelos son efectivamente imperfectos, ya que, como hemos señalado, la aparente convergencia de sus conclusiones numéricas esconde presupuestos de partida no siempre compatibles entre sí y divergencias notables a nivel regional, pero dicha imperfección sólo añade dificultad a un proceso decisorio que no debe por ello interrumpirse. Dentro de una década tendremos seguramente modelos más afinados, pero si esperamos hasta entonces será más difícil alcanzar el objetivo. En cualquier caso, el mejor de los modelos sólo nos ofrecerá probabilidades y no certezas.

La iniciativa plasmada en el Protocolo de Kyoto, que tras la firma de Rusia ha entrado en vigor en 2004, representa la vanguardia de los que piensan que hay que actuar sin dilaciones, apoyándose en lo que se sabe, por incompleta que sea la información disponible. Según dicho protocolo, que surgió de una reunión de 160 naciones que tuvo lugar en 1997, la mayoría de los países desarrollados se comprometerían a reducir sus emisiones en un 5-10 % respecto a los niveles de emisión de 1990.

Estados Unidos ha declarado que no firmará el protocolo porque representa una táctica errónea: a) existe una considerable incertidumbre sobre su fundamento científico, lo que no siendo incierto, implica olvidar que la estimación del calentamiento previsto puede estar equivocada tanto por exceso como por defecto; b) el precio de cumplir su mandato sería prohibitivo para la

economía americana, en contra de los cálculos más optimistas del IPCC; c) no sería justa porque países grandes en desarrollo, tales como la India y la China, no estarían obligados a cumplir las restricciones, sin admitir que sería más injusto aún no dejar que los países en desarrollo aspiren a cotas de bienestar equivalentes a las de los desarrollados; y d) no sería efectiva porque, al no incluir a los países menos favorecidos, no se conseguiría una reducción global de las emisiones, lo que es un inconveniente cierto y grave, tanto más cierto y más grave si Estados Unidos no reduce sus emisiones, que actualmente representan un 25 % del total mundial. En esta situación, la deslocalización de industrias contaminantes hacia la India o la China ya no se vería estimulada sólo por las ventajas salariales, lo que reforzaría el impacto que el desarrollo de estos países va a tener sobre las emisiones globales.

En la reunión sobre el clima que se celebró en Montreal en diciembre de 2005 hubo pocas novedades: en el último momento la delegación de Estados Unidos se avino a discutir estrategias futuras, pero se hubo de aceptar que estas discusiones se desenvolverán por dos rutas paralelas, la de los firmantes del acuerdo de Kyoto y la de los adherentes a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, que incluye a Estados Unidos. En la práctica, lo que se busca es involucrar en las limitaciones a grandes países en desarrollo, tales como China, India y Brasil, cuya exención se dio como motivo por Australia y Estados Unidos para autoexcluirse del acuerdo.

La atmósfera política respecto al cambio climático ha empezado a cambiar en Washington a partir de la victoria demócrata en las últimas elecciones y Bush ha tenido que ir variando su discurso sobre la marcha. El pasado Mayo de 2007, anunció un “nuevo marco” para los esfuerzos

internacionales para confrontar el cambio climático. Aunque presentado como un cambio de postura de la Casa Blanca, el texto en sí no parece aportar nada nuevo, según los analistas. Bush propone para finales de 2008 una reunión (a la que ya no asistiría él como presidente) de los países que son los mayores emisores con el objetivo de fijar compromisos a largo plazo respecto al clima. Es difícil no pensar que Bush sólo trata de echar balones fuera, ya que, como se ha dicho, para diciembre de 2007 están ya convocadas en Bali, Indonesia, las negociaciones globales para prolongar el espíritu del Protocolo de Kyoto. Esta prolongación se presenta problemática, dados los malos augurios surgidos de la reunión preparatoria que ha tenido lugar en Viena, en agosto de 2007.

Entre los problemas candentes que apenas se han tocado hasta ahora y que requieren acuerdos internacionales está el del brutal y creciente impacto del transporte aéreo sobre el total de emisiones. Si no se tiene en cuenta el espectacular crecimiento del número de viajeros, al que contribuyen notablemente las líneas de bajo coste, no será posible cumplir ningún plan de reducción de emisiones. ¿Quién será capaz de proponer una reducción del número de vuelos? Al menos la Unión Europea propuso a finales del año pasado que los vuelos domésticos estuvieran sujetos al mercado de tasas de emisión.

No todo son noticias negativas desde Estados Unidos, ya que existe un decidido movimiento de abajo arriba (grupos sociales, grandes ciudades, estados) para controlar las emisiones. Arnold Schwarzenegger, gobernador de California, se ha dejado aconsejar por expertos como Arthur Rosenfeld, último discípulo de Fermi, y se ha propuesto reducir las emisiones en su estado: por

debajo de las del año 2000 en el 2010, por debajo de las de 1990 en el 2020 y al 80 por 100 de esta última cantidad para el 2050. En California, el consumo de energía per capita es ya de 6.800 kilovatios-hora, inferior al consumo de los años 70 y casi la mitad de los 12.800 kilovatios-hora que corresponden a la media de todo el país. Además, esta política conlleva importantes ahorros económicos para los residentes.

California no es el único estado que ha empezado a tomar medidas. Así por ejemplo, ocho estados del noreste han acordado, entre otras medidas, limitar las emisiones en sus 600 centrales eléctricas, y lo mismo parece que va a ocurrir con otros estados y grandes municipios, hasta representar la mitad del producto interior bruto de todo el país.

La casuística de los distintos países es muy variada. Así por ejemplo, las emisiones per capita de China, que ocupa el lugar 139 entre 142 países en cuanto a sostenibilidad, son la décima parte de las de Estados Unidos y han aumentado un 49 por ciento desde 1990, por lo que sería crucial encauzar su inevitable expansión económica por una vía limpia. Una noticia muy reciente indica que las emisiones totales de China han superado por primera vez a las de Estados Unidos, aunque la medida de emisiones en este país no está entre las más precisas. China incorpora entre una y dos nuevas centrales térmicas por semana para producir electricidad a partir de carbón mineral, a pesar de lo cual ha empezado a tomarse en serio el problema de limitar las emisiones, entre otras razones porque las predicciones indican que algunos de los cambios más adversos pueden llegar a afectar a distintas regiones de su amplio territorio.

Rusia, cuyas emisiones per capita son la mitad que las de Estados Unidos y tiene una industria en extremo obsoleta y contaminante, ha disminuido sus emisiones en un 23 por ciento y tiene hasta la posibilidad de vender derechos de emisión. España, incumpliendo su compromiso, ha sido el país de la Unión Europea que más ha aumentado sus emisiones, después de Chipre, y aun así parece que se permitirá el lujo de gastar energía en desalar agua de mar para regar campos de golf.

Los ecologistas escépticos, a la Lomborg, propugnan un análisis coste-beneficio de las alternativas ante el cambio climático, incluida la del Protocolo de Kyoto, y en general al establecimiento de prioridades para las distintas acciones ambientales, para concluir que es mucho más rentable permitir la mayor parte de las emisiones –y pagar sus consecuencias según vayan llegando– que tratar de restringirlas en exceso. Según éstos, a Kyoto no le saldrían las cuentas y los beneficios de retrasar un poco el calentamiento global serían sólo marginales. Hay que reconocer que se suelen resaltar las consecuencias negativas del cambio pero no los costos asociados a una política encaminada a evitarlo, pero esta objeción afecta tanto al Protocolo de Kyoto como a sus alternativas.

ÉTICA, LEY Y LITIGIOS

El Protocolo de Kyoto se sustenta en tres pilares de distinta consistencia: un cierto consenso científico, un componente importante de ciencia por consenso y un insuficiente consenso político internacional. Tanto su formulación como la falta de un acuerdo global sobre su puesta en práctica

hacen que, en el mejor de los casos, sea sólo parte de la solución. Sin embargo, desde el punto de vista ético, tendría un doble significado: como testimonio a nuestros descendientes de que al menos nos hemos sacrificado por atenuar sus problemas y como acto de devolución a los más desafortunados de parte de los recursos de nuestro planeta de los que nos hemos apropiado en el proceso de desarrollo.

Las instituciones religiosas se han mantenido esencialmente al margen del problema. Por esto ha causado cierta sorpresa que, a principios de 2006, nada menos que los evangélicos, base electoral de G.W. Bush, uno de sus conversos recientes, hayan propugnado pasar a la acción respecto a dicho problema, excepcionalmente buscando en la ciencia lo que no les proporciona la verdad revelada.

A pesar de que las relaciones de causa y efecto en el cambio climático se han establecido con bastante imprecisión hasta el momento, se ha abierto un nuevo frente en la lucha contra dicho cambio que pudiera con el tiempo –cuando se refinan los modelos – ser más eficaz que la meramente política: la vía legal. ¿Son las empresas emisoras de gases con efecto invernadero retrospectivamente responsables de la ola de calor del verano de 2003, que según algunos llevó a la muerte a miles de personas? De momento no, porque no es evidente que exista dicha relación de causa a efecto. Sin embargo, ya es posible litigar respecto a daños futuros. Así por ejemplo, en 2004, ocho estados y la ciudad de Nueva York han demandado judicialmente a cinco compañías eléctricas norteamericanas para que reduzcan sus emisiones de carbónico, y más recientemente, el grupo ambientalista *Friends of the Earth* ha entablado una batalla legal contra el gobierno de Estados Unidos respecto a las

subvenciones para proyectos energéticos fuera del territorio. El Departamento de Justicia ha reclutado como experto de la defensa a David Legates, director del Centro de Investigación Climática de la Universidad de Delaware, quien en un detallado informe ha argumentado que está por ver si el calentamiento climático tiene origen antropogénico. Por parte de los demandantes, Michael MacCracken, antiguo jefe de la Oficina del Programa de Investigación sobre Cambio Global, ha defendido con no menos vigor las opiniones propugnadas por el IPCC. Es seguro que los futuros avances en el conocimiento del clima y en la legislación ambiental tenderán a exacerbar este tipo de confrontaciones legales.

Una reciente decisión judicial (2 de abril de 2007) de especial trascendencia ha sido el fallo del Tribunal Supremo de los Estados Unidos que confirma la obligación de la Agencia Nacional de Protección Ambiental (EPA) de considerar a los gases de efecto invernadero como “contaminantes” y, por tanto, bajo su control legal. A partir de ahora, la EPA tendrá que vigilar a los infractores y, entre otras posibles consecuencias, Arnold Schwarzenegger saldrá reforzado en su amenaza de pleitear con la mencionada agencia si no le deja regular legalmente las emisiones de camiones y automóviles en el estado que él gobierna.

OPINIONES FINALES

En el ámbito del IPCC no se han cuantificado las posibles consecuencias económicas de no mitigar, pero sí se ha hecho en el informe Stern. En el resumen de dicho informe se señala que “si no se actúa ya, los

costes y riesgos globales del cambio climático serán equivalentes a una pérdida del 5% de PIB global cada año, ahora y para siempre. Si se tiene en cuenta un repertorio más amplio de riesgos e impactos, las estimaciones del daño podrían elevarse al 20% o más”, algo que el autor acaba equiparando a las pérdidas económicas asociadas a las grandes guerras mundiales o a las de la gran depresión del primer tercio del pasado siglo. El endulzamiento relativo de los costes de la mitigación y el énfasis en los aspectos catastróficos de no mitigar, muestran en blanco y negro un escenario que conviene retocar con toda la escala de grises.

A la hora de resumir los distintos estudios, el acento se pone en los valores medios de los incrementos de temperatura, nivel del mar, frecuencia de los huracanes o costes económicos, cuando en realidad lo relevante está en estimar la magnitud de los máximos efectos y en establecer las regiones máximamente afectadas por eventos extremos. La intensidad y frecuencia de inundaciones, sequías, huracanes y olas de calor que ocurren en sitios concretos constituyen datos esenciales para poder responder al cambio, y esta información es por el momento insuficiente. Aunque dentro del informe del IPCC se han hecho ya análisis regionales, estos son todavía relativamente toscos. Si se pone énfasis en las estimaciones de los costes medios de la mitigación, según las distintas rutas y escenarios, y se expresan como porcentaje del PIB global, añadiendo que existen cuantiosos recursos para sufragarlos, se está escondiendo el hecho de que las variaciones de dichos costes y las de la disponibilidad de los recursos necesarios para la mitigación no bailan juntas en los mapas del mundo. Una cifra como la del 3% del PIB para el año 2030 encierra ya catástrofe económica y miseria para muchas

regiones del mundo si no se buscan e implementan fórmulas conciliatorias. Hay economistas que advierten de una posible recesión a corto plazo como resultado de los intentos de mitigar el cambio.

Por otra parte, la frialdad de una cifra estimativa de los costes de la mitigación no debe hacernos olvidar las barreras y frenos no económicos que han de salvar las medidas a implementar, por tímidas que sean. En el informe del IPCC se hace una enumeración, en general adecuada, de los potentes intereses económicos sectoriales y de las dificultades que se oponen a la introducción de cambios incluso muy pequeños, pero contrarios a muchos de nuestros hábitos vitales más arraigados. Además, las distintas estrategias propuestas serán siempre de difícil consenso porque tanto beneficios como riesgos varían considerablemente según los países e incluso los individuos. Así por ejemplo, Nicholas Stern y su principal crítico, William Nordhaus²², acaban de volver a enfrentarse en un número de julio (2007) de la revista *Science*^{23,24}. Nordhaus postula unos itinerarios de mitigación menos estrictos que los de Stern, aduciendo que una política eficiente debe implicar “reducciones modestas de las emisiones en el corto plazo, seguidas de reducciones más agudas en el medio y largo plazo.”

Pero no basta con mitigar, dado que el calentamiento global progresaría en cierta medida incluso si congeláramos la composición de la atmósfera en los valores actuales. Una estrategia sensata para minimizar daños debe tener el doble objetivo de tratar de evitar lo inmanejable (mitigación) y gestionar lo inevitable (adaptación preventiva)^{25,26}. En las últimas dos décadas, la idea de adaptación preventiva al cambio climático ha sido problemática para los partidarios de la reducción de emisiones; alguien ha llegado a decir que sus

opponentes han considerado dicha idea “con la misma aversión que la extrema derecha religiosa trata la educación sexual en los colegios”; en nombre de la adaptación, podrían encontrarse coartadas para persistir en comportamientos no deseados. Ya en 1992, Al Gore fue muy explícito al respecto, al declarar que proponer la adaptación suponía “una cierta clase de holgazanería, una fe arrogante en nuestra habilidad para reaccionar a tiempo para salvar nuestros pellejos.”

A pesar de que se está produciendo un viraje en la opinión pública respecto a este tema, la adaptación preventiva aparece de un modo relativamente tangencial tanto en el informe Stern como en el del IPCC, ninguno de los cuales entra en el espinoso tema de sus costes económicos. En un reciente artículo, Pielke *et al*²⁷ proponen levantar el tabú sobre la adaptación. Esgrimen al menos tres razones en favor de su propuesta: el considerable desfase temporal entre cualquier medida de mitigación y la materialización de efectos discernibles; la vulnerabilidad al cambio climático aumenta también por causas ajenas a la emisión de gases de efecto invernadero, tales como el crecimiento de la población en las costas y en áreas con recursos hídricos limitados; y algo habrá que hacer respecto a las consecuencias del cambio climático que se va a producir por mucho que se mitigue.

En el ámbito de las Naciones Unidas se trata el concepto de adaptación en un sentido demasiado estrecho, ya que se limita a considerar como tal al conjunto de “las acciones tomadas en respuesta a los cambios climáticos que resultan de las emisiones antropogénicas de gases con efecto invernadero”⁸. En el contexto de las estrategias para un desarrollo sostenible, esta definición

se queda corta porque excluye las medidas necesarias para disminuir la vulnerabilidad extrema de muchas regiones del mundo al clima tal como es ahora o ha sido en las últimas décadas. Muchos han catalogado la destrucción de Nueva Orleans como el primer episodio notable de la nueva era, pero en realidad estamos ante una catástrofe anunciada desde hace tiempo que podía haber ocurrido mucho antes; un episodio previsto por los especialistas, para el que hubiera sido relativamente fácil tomar medidas de adaptación que no se tomaron. Esta catástrofe ilustra las enormes dificultades que suponen incluso las medidas más claras y aparentemente sencillas en relación con los problemas climáticos: la nación más próspera del mundo fue incapaz de disminuir la vulnerabilidad de una ciudad tan singular y, por supuesto, no está siendo capaz hasta ahora de mover un solo dedo para restaurarla.

La mayoría de los futuros impactos del cambio climático vienen a sumarse marginalmente a las gigantescas pérdidas actuales relacionadas con el clima. En contraste con la mitigación, cuyo objetivo se resume en la reducción de las emisiones de gases invernadero, la adaptación se dispersa en miles de objetivos de carácter local, que convenientemente se vienen dejando a cargo de las agencias locales. Esto supone la incongruencia de que, en los lugares más desasistidos, pueden recibirse ayudas internacionales para los gastos marginales de mitigación, pero no para los gastos principales de protección frente a las inclemencias actuales del tiempo atmosférico. Pielke *et al*²⁷ citan apropiadamente el caso de ciertos emplazamientos costeros en Filipinas: mientras se habla de elevaciones del nivel del mar de entre 1 y 3 milímetros por año, el nivel del terreno costero en partes de ese país está

descendiendo más de 100 milímetros por año como consecuencia de la excesiva explotación de los acuíferos de agua dulce.

Al subrayar que la mitigación es no sólo económicamente factible sino técnicamente abordable con los medios actuales, como por ejemplo parecen sugerir los mensajes resumidos que más se han difundido del informe del IPCC y algunas decisiones políticas en Estados Unidos y en la Unión Europea, se está implícitamente trivializando la magnitud de los retos tecnológicos que habrá que vencer para cumplir los objetivos y las limitaciones de las materias primas necesarias para la generación de algunas de las energías alternativas. Así por ejemplo, no se sabe cómo y cuándo se resolverán los problemas que afectan a la producción de etanol a partir de lignocelulosa o al secuestro de anhídrido carbónico, y no está claro de dónde va a salir todo el níquel que se requiere no sólo para el acero inoxidable sino para las pilas de hidrógeno. Sin embargo, a ambos lados del Atlántico, los políticos dan como hecho que los biocombustibles pueden desempeñar a corto plazo un papel importante como fuentes de energía renovable y limpia y también se les llena la boca anunciando que el futuro está en la cultura del hidrógeno. Ante este infundado triunfalismo, conviene resaltar que los retos tecnológicos de la mitigación son todavía formidables.

Por último, no debiéramos terminar sin unir nuestra voz a las de los que reclaman una reorganización radical del IPCC, de tal modo que asegure la calidad de sus informes y agilice su difusión entre los responsables políticos más directamente relacionados con el problema. En la coyuntura actual el formato empieza a ser inadecuado y la periodicidad de la emisión de los informes, insuficiente.

REFERENCIAS

- ¹ Al Gore, "Una verdad incómoda", Gedisa Editorial, Barcelona, 2007.
- ² N. Stern, "*The Economics of Climate Change, The Stern Review*", Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- ³ R. Ortega, *Revista de Libros*, nº 125 (2007), pp. 10-13.
- ⁴ F. García Olmedo (2005) *Revista de Occidente*, nº 290-291 pp. 150-165.
(2006) *Revista de Libros*, nº 115-116, pp. 33-39. (2007) *Revista de Occidente*, nº 313, pp. 70-85. (2007) *Revista de Libros*, nº 127-128, pp. 6-11.
- ⁵ F. Keppler et al. (2006) *Nature* 439:187-191.
- ⁶ O. Pilkey & L. Pilkey-Jarvis, "*Useless Arithmetic: Why Environmental Scientists Can't Predict the Future*", Columbia University Press, Nueva York, 2007.
- ⁷ M. Mann et al. (1999) *Geophysical Research Letters* 26:759-762.
- ⁸ J.R. Petit et al. (1999) *Nature* 399:429-436.
- ⁹ W.F. Ruddiman (2003) *Climatic Change* 61:261-293.
- ¹⁰ A. Moberg et al. (2005) *Nature* 433:613-617.
- ¹¹ R.A. Kerr (2007) *Science* 317:28-29
- ¹² S. Rahmstorf et al. (2007) *Science* 316 :709
- ¹³ R. Seager et al. (2007) *Science* 316 :1181-1184
- ¹⁴ J.A. Patz et al. (2005) *Nature* 438:310-317.
- ¹⁵ T.L. Root et al. (2005) *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102 :7465-7469.
- ¹⁶ D.B. Wake (2007) *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*

104:8201-8202

- ¹⁷ S. Pacala & R. Socolow (2004) *Science* 305:968-972.
- ¹⁸ D. Fairless (2007) *Nature* 447:1046-1048
- ¹⁹ P.G. Brewer (2007) *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*
104: 9915-9916
- ²⁰ H.D. Matthews & K. Caldeira (2007) *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104:9949-9954
- ²¹ J. Lovelock, "La venganza de Gaia", Editorial Planeta, Barcelona, 2007.
- ²² W.D. Nordhaus (2006) *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103:3510-3517.
- ²³ N. Stern & Ch. Taylor (2007) *Science* 317:203-204.
- ²⁴ W. Nordhaus (2007) *Science* 317:201-202.
- ²⁵ D.A. King (2003) *Science* 303:176-177.
- ²⁶ Q. Shiermeier (2006) *Nature* 439:374-375.
- ²⁷ R. Pielke, Jr, G. Prins, S. Rayner & D. Sarewitz, (2007) *Nature* 445 : 597-598.

