

EL EFECTO INVERNADERO: ¿AMENAZA PLANETARIA?

Manuel Toharia

LA TIERRA Y SUS GASES

Nuestro planeta posee, desde su formación, una envoltura gaseosa cuya presencia ha resultado esencial para la posterior aparición de la vida, un fenómeno, por lo que sabemos, único en nuestras proximidades cósmicas y que se inició hace unos 3.500 millones de años. Los gases que conforman esa atmósfera han variado notablemente en su composición a lo largo del tiempo; quizá la más significativa de esas variaciones, desde el punto de vista biológico, fuera la aparición del oxígeno excretado por los primeros seres vivos con clorofila como elemento de desecho altamente venenoso. Gracias a la fotosíntesis, los primeros seres vivos unicelulares pudieron incorporar a su biomasa el carbono procedente del dióxido de carbono atmosférico. Con la base de ese carbono se inició un proceso de construcción de moléculas cada vez más complejas y sofisticadas, pero todas ellas articuladas en torno a una serie de cadenas de átomos de carbono, procedentes todos ellos de la actividad fotosintética.

La vida en la Tierra, tal y como la conocemos actualmente, no hubiera sido posible, y de hecho no sería posible tampoco ahora, sin la presencia en el aire del dióxido de carbono y sin la posibilidad por parte de los seres vivos con clorofila, que hoy denominamos vegetales verdes, de capturar el carbono gracias a la energía solar. «Por culpa» de la vida, la atmósfera terrestre contiene aproxima-

damente tres cuartos de nitrógeno y un cuarto de oxígeno, en lugar de contener, como hubiera ocurrido si no hubiera vida, 98 por 100 de dióxido de carbono (ahora sólo hay 0,03 por 100) y 2 por 100 de nitrógeno (ahora hay 78 por 100).

Cuando una planta verde —y este fenómeno se produce ahora lo mismo que hace miles de millones de años— capturaba moléculas de CO₂ para quedarse con el C, lógicamente expulsaba el residuo sobrante, es decir, el O₂. Así es como se inició la aparición en el aire de la Tierra de ese gas que, por sus características químicas —es fuertemente oxidante, lógicamente, y tiende por tanto a «corroer» las estructuras tanto vivas como inertes—, suponía un grave riesgo para aquellos primeros seres vivientes. Claro que la vida incipiente en la Tierra fue exclusivamente submarina, y el venenoso oxígeno, como los demás gases, se concentraba esencialmente en el aire. Donde, por cierto, a cierta altura, y por efecto de los rayos ultravioletas solares, el citado oxígeno formaba un nuevo gas, el ozono (oxígeno triatómico), cuya presencia acabaría filtrando buena parte de esos ultravioletas que se «entretenían» precisamente en fabricar ozono.

La compatibilidad de la vida con la atmósfera estaba servida; sólo faltaba que los organismos vivos del mar supieran adaptarse al aire, todavía venenoso para ellos a causa del oxígeno.

Con el transcurso del tiempo —mucho tiempo en realidad, un par de miles de millones de años

nada menos—, los seres vivos de las aguas del planeta no sólo enriquecieron el aire con oxígeno, sino que iban absorbiendo CO₂, con cuyo carbono construían sus propias masas vivas. Y por ello alcanzaron tal complejidad que, en un momento dado, tomaron las tierras emergidas por asalto.

No de forma brusca, desde luego, sino muy poco a poco, con intentos casi suicidas y limitados exclusivamente a las zonas de contacto entre mares y continentes, zonas proclives a la vida anfibia, batidas por las olas y las mareas. Y así aparece la vida terrestre hace unos 600 ó 700 millones de años...

Algunos seres vivos terrestres, esencialmente animales, se adaptaron al venenoso oxígeno y construyeron sistemas para utilizarlo en su provecho. Como, además, gracias al ozono los rayos ultravioletas solares eran mucho menos dañinos que al principio para la vida vegetal o animal, los seres aerícolas comenzaron a poblar las tierras con similar eficacia a la mostrada por los seres marinos de los que procedían.

Y así, hasta el hombre... Un hombre que en apenas unos miles de años ha sido capaz de desarrollar instrumentos y culturas, y que en los dos últimos siglos ha dado lugar a dos revoluciones de consecuencias preocupantes: la industrial, basada en un consumo desaforado de energía, y la demográfica, que sitúa la cifra de humanos al borde de los 6.000 millones, en un crecimiento exponencial sin parangón alguno en la historia de la naturaleza.

Los humanos vivimos en la atmósfera como los peces en el agua. Todas nuestras actividades vitales, desde las más elementales y básicas (alimentarnos, reproducirnos) hasta las más sofisticadas (componer música o poesía, programar ordenadores), tienen lugar en el seno de una atmósfera a cuyos cambios está sometido inexorablemente. La humanidad, quién puede dudarlo, es sujeto pasivo de la atmósfera, tributaria de sus veleidades y directa e indirectamente dependiente de sus diversas manifestaciones químicas o físicas.

Como consecuencia de las dos revoluciones antes citadas, la industrial y la demográfica, la humanidad ha comenzado ahora a incidir en la atmósfera, y no ya como sujeto pasivo, sino claramente activo, alterando a escala planetaria un proceso que hasta ahora se había autorregulado por sí solo: el efecto invernadero. Quizá la mayor amenaza que se cierne sobre el futuro de la humanidad; al menos, de la humanidad tal y como hoy la conocemos.

ATMOSFERA Y EFECTO INVERNADERO

Desde que la Tierra es Tierra, es decir, desde hace unos 4.500 millones de años, la capa gaseosa que envuelve al planeta de forma permanente actúa de tal modo que los rayos solares quedan atrapados en el interior de esa atmósfera cuyo comportamiento podría compararse, de forma muy aproximada, al de un invernadero. Porque la atmósfera del planeta Tierra, como le ocurre en mayor medida aún a la del planeta Venus, permite el paso de la energía solar de muy diversas longitudes de onda en el espectro electromagnético, pero obstaculiza la salida hacia el exterior de una buena parte de la energía irradiada a su vez por la superficie terrestre. Ese fenómeno de captación de calor contribuye, obviamente, a aumentar la temperatura global en el interior del sistema. Aunque, lógicamente, el sistema está en equilibrio; es decir, el calor que entra es igual al calor que sale. Lo que resulta ser más elevada, gracias al efecto invernadero, es precisamente la temperatura media del sistema.

No se trata, en contra de lo que las más recientes informaciones periodísticas pudieran dar a entender, de un proceso reciente que sólo ahora afecta a nuestro planeta. El efecto invernadero que hemos descrito someramente no sólo es tan viejo como la propia atmósfera, es decir, como el mismísimo planeta, sino que además ha resultado crucial en los cambios de clima del pasado a causa de sus oscilaciones. Por eso mismo se piensa ahora que pudiera desempeñar un papel básico en posibles cambios futuros.

¿Cuál es, entonces, el problema? Si siempre ha existido el efecto invernadero, y si sus variaciones han propiciado los cambios climáticos del pasado, ¿por qué preocuparse ahora de este tema?

Obviamente, porque la presencia de determinados «gases traza» de efecto invernadero está aumentando de forma muy rápida, como probablemente nunca ocurrió en épocas pasadas, y ello a causa de la mano del hombre. De forma muy específica, a causa de la combustión de elementos fósiles (carbón, petróleo y sus derivados) cuyo carbono fue confinado bajo tierra durante millones de años y que es ahora devuelto masivamente en apenas un siglo. Que es como decir instantáneamente, a escala geológica.

Es obvio que con un problema así planteado la humanidad se enfrenta, quizá por primera vez en su historia, a una cuestión cuyos límites son los del planeta mismo. Si realmente nuestra actividad industrial es capaz de modificar el contenido gaseoso de la atmósfera —en muy pequeña propor-

ción cuantitativamente hablando, pero con graves consecuencias desde el punto de vista cualitativo, como luego veremos—, ello puede dar lugar a distorsiones climáticas todavía difíciles de evaluar, pero sin duda alguna posibles, incluso más que probables.

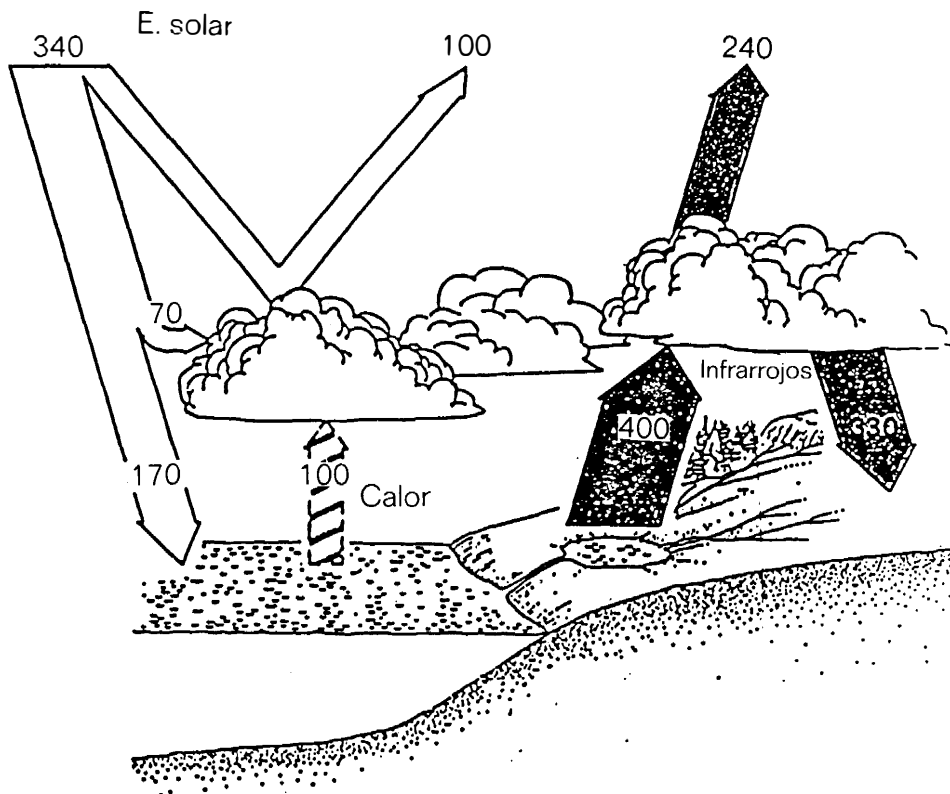
Antes de seguir adelante, conviene precisar que la comparación de la atmósfera terrestre con un invernadero no es demasiado afortunada. El 40 por 100 de la radiación solar que llega a la Tierra es reflejado por la atmósfera hacia el exterior, sin llegar a penetrar hasta la superficie del planeta. Esta reflexión se debe esencialmente a las nubes. Del 60 por 100 restante, un 15 por 100 es absorbido por el aire directamente, sobre todo por las nubes y los numerosos compuestos sólidos (partículas de polvo o microcristales salinos, por ejemplo), líquidos (pequeñas gotas en suspensión —aerosoles— de diferentes productos químicos naturales o artificiales) y gaseosos —distintos gases de origen natural o artificial—. Finalmente, el 45 por 100 restante llega al suelo, donde es absorbido por mares y continentes, y vuelve a ser

reemitido en gran parte como radiaciones de onda larga, es decir, calorífica. Estas radiaciones son absorbidas en su inmensa mayoría por determinados gases, presentes en el aire en muy pequeña cantidad, que son denominados por esa razón gases traza de efecto invernadero; por este fenómeno, la atmósfera conserva mucho más calor que si fuera totalmente transparente a la radiación reemitida desde el suelo. Como puede verse, la comparación con un invernadero es más bien simplista, aunque aceptable porque resulta sobre todo muy gráfica. Conviene recordar, con todo, que la atmósfera no tiene límites discontinuos entre el interior y el exterior tan definidos como los de un invernadero de cristal; y los procesos de captación y transmisión de energía son, obviamente, mucho más complejos y sutiles (*vid.* gráfico 1).

EFECTO INVERNADERO Y CAMBIOS CLIMATICOS

Cuando se alude al efecto invernadero y a su posible intensificación a causa de las emisiones in-

GRÁFICO 1
BALANCE ENERGETICO TIERRA-ATMOSFERA (Wattios/m)
PROMEDIO EN TODO EL PLANETA



La energía solar que llega a la Tierra es de 340 vatios por metro cuadrado. Con esa potencia se alimenta la máquina atmosférica.

dustriales se suele aludir, casi como un corolario indispensable, al cambio climático. Pero conviene aclarar que no es tan sencillo identificar dicho cambio climático. Es muy probable, casi seguro, que los cambios climáticos del pasado han sido una consecuencia de las variaciones del efecto invernadero, derivadas a su vez de las variaciones en la proporción de los gases traza, esencialmente el CO₂ y el vapor de agua, y probablemente también el metano y otros gases menos activos. Hoy día somos capaces de identificar esos cambios climáticos a escala geológica —decenas de milenios como mínimo—; pero no es evidente que seamos capaces de identificar ahora cambios climáticos de ese mismo orden de magnitud trabajando a una escala temporal mucho más corta, de apenas unos decenios y, como mucho, algún siglo.

Hablar del clima implica integrar los valores de los distintos parámetros meteorológicos en un período de tiempo razonablemente suficiente; es decir, bastante grande. El clima nace así como un concepto nuevo, diferente al tiempo meteorológico —que a partir de ahora, y para evitar confusiones con el tiempo cronológico denominaremos «temperie»—, y ligado en cierto modo a los promedios de las variables atmosféricas, como una especie de valor «normal», o sea más probable. Por eso, para definir el clima suele echarse mano de la estadística si nos referimos a un período y a un lugar dado; y si aludimos a zonas más extensas, la noción de clima apela a un sentido más integral de lo que significan esos valores normales o promedios; por ejemplo, analizando el tipo de vegetación, puesto que las plantas son excelentes indicadores, extremadamente sensibles a las variaciones climáticas (regulares y a largo plazo), pero suficientemente constantes en las variaciones meteorológicas (irregulares y a corto plazo).

Los climas de las distintas zonas del planeta obedecen a numerosos factores, empezando por la radiación solar recibida. No es tan importante la cuantía total que nos llega de esa energía exterior, sino la forma en que es utilizada, y en parte rechazada, por la Tierra. El efecto de la inclinación del eje terrestre determina las estaciones alternantes en los dos hemisferios, por ejemplo. Pero esa inclinación varía (el ángulo oscila entre 22 y 25 grados cada 41.000 años), y el eje varía, asimismo, su orientación (gira en 25.800 años la precesión axial o de los equinoccios, con un leve movimiento de penduleo, la nutación). Estas alternancias no hacen variar la radiación solar que llega al planeta, pero sí varían sustancialmente su reparto estacional en las diferentes latitudes. Durante el Cuaternario, estas variaciones han su-

puesto en las zonas polares variaciones del orden del 14 por 100, lo que no es desdeñable.

Pero hay más. No sólo el Sol varía en su actividad cada once años, emitiendo máximos y mínimos de energía, sino que, además, la elipse que traza la Tierra alrededor de la estrella no mantiene una misma excentricidad. Las variaciones de excentricidad nunca han sobrepasado, al menos en los últimos millones de años, un 0,2 por 100 sobre el 6 por 100 que es el valor medio de la elipse (es casi un círculo). Cuando la órbita se hace más elíptica, la Tierra recibe anualmente más calor que cuando es más circular. Pero con variaciones máximas del orden de 0,2 por 100, ello no supondría variaciones térmicas «directas» (es importante subrayar este adjetivo) más que de algunas décimas de grado. Estas variaciones de excentricidad tienen diversos ciclos; los principales son el de 400.000 años, y otros de período entre 120.000 y 90.000 años (se aceptan 100.000 en promedio).

El serbio Milankovich, ingeniero y profesor de mecánica en Belgrado, ideó en sus ratos libres una teoría astronómica capaz de explicar los cambios climáticos del pasado. Enunció las variaciones de la inclinación del eje terrestre y las de la excentricidad de la órbita. Pero murió en 1958 sin que nadie le reconociera la validez de sus hallazgos. Porque en el decenio de los sesenta los meteorólogos insistían todavía en que esas variaciones de radiación solar incidente eran mínimas y no explicaban suficientemente los cambios climáticos. Pero en 1982 nadie albergaba ya la menor duda. El americano Vernekar y el belga Berger mostraron, mediante análisis espectral de las series de datos relacionados con los parámetros astronómicos y los climáticos, que existía una evidente correspondencia entre las variaciones climáticas del último millón de años y los períodos de los principales cambios astronómicos (ondas de 100.000, 41.000 años, etc.).

Dejando al margen los caprichos solares y las variaciones orbitales de la Tierra, lo cierto es que una vez que la radiación solar llega al planeta también sufre variaciones en el proceso de absorción y posterior emisión debido a muy complejos factores geográficos, químicos y, desde luego, biológicos. Y aquí está realmente el elemento clave de nuestra actual preocupación por el incremento del efecto invernadero: la única forma en que el hombre podría estar alterando los climas estriba en modificar, aunque sea levemente, el contenido de algún o algunos de los gases traza de efecto invernadero. Porque los modelos matemáticos, que tan poco son de fiar cuando se utilizan para predicciones a largo plazo, demuestran, no obstante,

que pequeñas causas pueden originar grandes efectos; especialmente debido a mecanismos biológicos capaces de amplificar enormemente pequeñas variaciones iniciales, por ejemplo, de la radiación solar incidente. Lo que explicaría, dicho sea incidentalmente, por qué tenía razón Milankovich en los años cincuenta, y no los físicos que se apoyaban simplemente en ecuaciones lineales. Más adelante volveremos sobre este tema de los sistemas físicos lineales o no lineales, porque tiene mucho que ver con algo que se está convirtiendo en una moda científica, la teoría del caos.

EL FACTOR HUMANO: PEQUEÑAS MODIFICACIONES, GRANDES CONSECUENCIAS

Si aceptamos que pequeñas modificaciones arrastran grandes consecuencias, porque así nos lo muestra la historia natural de los pasados cambios de clima, es posible inferir entonces que pequeñas modificaciones actuales, no naturales sino antropogénicas, pudieran tener, asimismo, grandes repercusiones futuras. Veamos un poco más despacio cómo podría estar el hombre aportando ya esos pequeños cambios de los que cabe temer consecuencias de un orden de magnitud muy superior.

Como hemos visto, nuestra tecnología no nos permite atacar de frente al sistema climático en su conjunto; una pequeña tormenta de verano encierra en sí misma tanta energía como la más potente bomba termonuclear de origen humano, con la «ventaja» añadida para la tormenta de que su energía la emplea inteligentemente, constructivamente (evapora, condensa, mueve aire en vertical y en horizontal, precipita, etc.), mientras que la energía de la bomba humana se expande brutalmente y sin control, de forma desordenada e ineficiente, bien poco inteligentemente, por mantener el mismo tipo de asociación de ideas.

La única forma que podríamos tener de modificar los climas es actuando sobre los gases de efecto invernadero. Y esta actuación, desde luego involuntaria e incontrolada, se ejerce a base de inyectar más CO₂ al aire del que se produciría por razones naturales. Ya lo hemos visto, a base de quemar carbón y petróleo.

El aire está compuesto esencialmente de nitrógeno y oxígeno. En muy pequeña cantidad aparecen otros gases, algunos de los cuales son los que más influyen en el efecto invernadero. Para que un gas sea climáticamente activo debe poseer, por una parte, un tiempo de permanencia en la atmósfera suficientemente largo y, por otra, una eleva-

da actividad radiativa (ojo, radiativa, no radiactiva). Esta segunda propiedad es muy importante: los gases sólo absorben radiación electromagnética en determinadas longitudes de onda y, por tanto, sólo serán activos de cara al efecto invernadero aquellos que absorban radiación en el espectro de ondas largas, en torno al infrarrojo. Conviene recordar que la mayor parte de la energía solar que llega al suelo se encuentra en la banda de 0,3 a 4 micrómetros, mientras que la radiación de la Tierra ocupa una banda de longitudes de onda más largas, entre 4 y 100 micrómetros.

Sin los gases de efecto invernadero capaces de absorber buena parte de esas radiaciones, el balance radiativo del sistema Sol-Tierra sería tal que la temperatura media en la superficie del planeta apenas llegaría a los 18 grados bajo cero en lugar de los que 15 sobre cero actuales.

¿Cómo participan los distintos gases en esos 33 grados de diferencia? No es fácil determinarlo, pero diversos autores asumen que la participación de los gases traza sería la siguiente:

Vapor de agua (entre 2 ppm. y hasta un 4 por 100): 20 grados.

Dióxido de carbono (355 ppm): 7,5 grados.

Ozono troposférico (0,03 ppm): 2,5 grados.

Oxido de nitrógeno (0,3 ppm): 1,5 grados.

Metano (2 ppm): 1 grado.

Otros gases activos (unos 2 ppm): 0,5 grados.

EL AGUA: VAPOR, LIQUIDO, HIELO

Quizá sea para muchos una sorpresa la enorme importancia del vapor de agua, ya que normalmente no suele ser citado como gas climáticamente activo. El más «popular» es, sin duda, el CO₂. Pero el vapor de agua, en fase gaseosa, ejerce una importancia trascendental. Es más, si el CO₂ depende enormemente de los fenómenos biológicos (vegetales sumideros de CO₂, elementos geológicos y biológicos productores de CO₂), el vapor de agua en el aire depende de la temperatura, de la evaporación, de la evapo-transpiración y de muchos otros elementos, de tal modo que supone una retroalimentación compleja, pero sumamente efectiva a la hora de activar el efecto invernadero. A mayor temperatura, mayor evaporación y, por tanto, más vapor de agua en el aire; pero quizá se acelere también el proceso global de precipitación, con lo que no necesariamente habrá más vapor. Además, al haber más nubes (agua líquida y sólida), habría más reflexión de la radiación solar incidente y, consiguientemente, menos aporte energético hacia el suelo...

Cuando aumenta la temperatura de la atmósfera, ¿aumenta globalmente la cantidad de vapor de agua? ¿Y si el exceso de evaporación acaba dando más nubes y más precipitación, con lo cual todo queda como estaba o incluso disminuye el efecto invernadero? ¿Es ésta una de las claves de la retroalimentación negativa que haya servido en el pasado para controlar los excesos térmicos?

Es evidente que los períodos de glaciación alternando con períodos interglaciales se deben a procesos naturales de compensación (retroalimentación positiva y negativa alternativamente) sumamente complejos en los que intervienen las rocas terrestres, el volcanismo, el mar (en superficie y en los depósitos del fondo), la atmósfera, los hielos... Y en el centro de todo este sistema complejo, los gases de efecto invernadero.

El vapor de agua, como vemos, encierra enormes incógnitas. El caso del CO₂ parece más claro, aunque últimamente surgen nuevas y enormes dudas en cuanto al balance global del carbono, sobre todo a la hora de estimar el efecto de sumidero de los fondos marinos.

EL FAMOSO CO₂: EL «CULPABLE» MEJOR CONOCIDO

El dióxido de carbono absorbe radiación con mucha efectividad entre 4,5 y 15 micrómetros. Ello ha sido suficiente para que, a lo largo de los últimos millones de años, su contribución al efecto invernadero global haya sido de más de siete grados. En la transición entre el Terciario y el Cuaternario, su concentración ha oscilado entre un mínimo de 180 ppm durante las glaciaciones y un máximo en torno a los 300 ppm en los períodos de «óptimo interglacial» (el por qué se denomina comúnmente «óptimos» a los períodos más cálidos es algo que siempre me he preguntado; quizá es porque los primeros meteorólogos serios de la historia eran noruegos, de la escuela de Bergen —Bjerkness, Bergeron, etc.—). Sabemos que a mediados del siglo XVIII el CO₂ alcanzaba una concentración de 290 ppm; desde entonces no ha dejado de crecer (*vid.* gráfico 2). En 1988 tenía 350 ppm; hoy llega a 355... En sólo dos siglos, con la revolución industrial la concentración de CO₂ ha aumentado, pues, en un 25 por 100. El índice actual de crecimiento se mantiene en un 0,43 por 100 anual; y a pesar de los acuerdos de la reciente Cumbre de la Tierra en Río no parece que esta tasa vaya a disminuir en los próximos años...

Como decíamos, una de las grandes incógnitas del CO₂ estriba en la estimación del intercambio

de carbono entre el aire y el mar. Este intercambio ofrece una tasa media de unos 18 moles por metro cuadrado y año, a una concentración atmosférica media de 300 ppm. El tiempo medio de residencia en el aire antes de transferirse al mar es de casi nueve años, pero varía mucho en función del oleaje y los vientos (un nuevo mecanismo de retroalimentación, se ignora si positiva o negativa, ligado al cambio climático). También influye la solubilidad del CO₂ en el agua marina, fenómeno que depende también él de otros factores, entre ellos la propia temperatura del agua. En general, el intercambio se realiza pasando CO₂ del aire al agua en las latitudes altas en invierno y en dirección opuesta en las latitudes bajas.

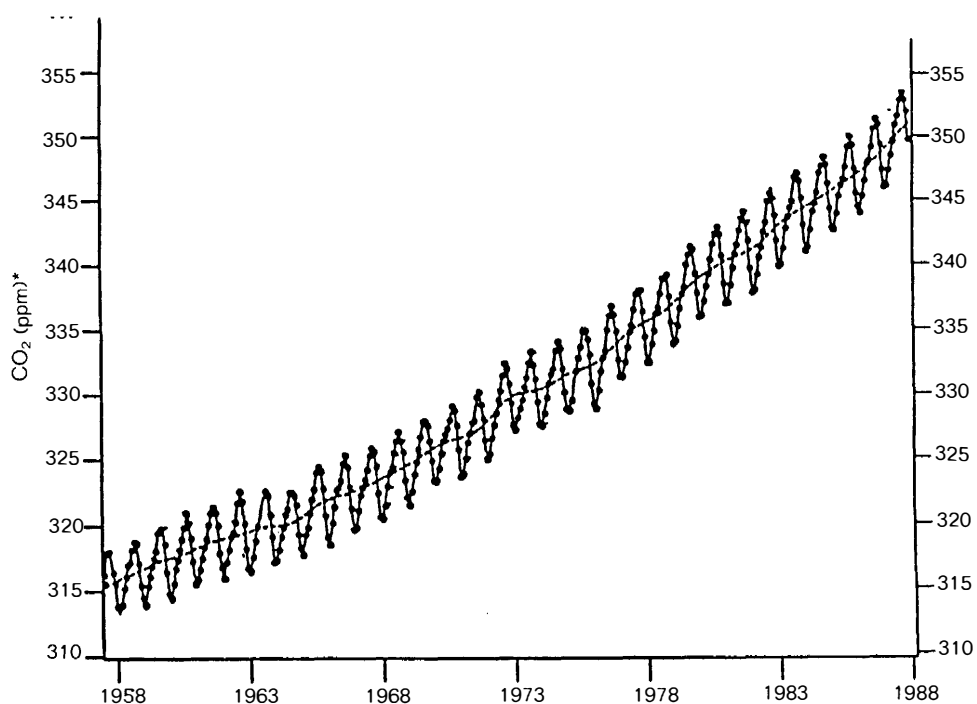
El ciclo del carbono también se ve afectado por las algas superficiales y por la actividad bacteriana marina, fenómenos que sólo aparecen en los primeros cien metros de profundidad. Pero el carbono abisal también desempeña, ya lo hemos dicho, un papel esencial. Conviene recordar que en los mares existen unas 38.000 gigatoneladas de carbono, unas 50 veces más que en toda la atmósfera. Y este carbono está sobre todo en aguas profundas. En aguas someras, la fotosíntesis está limitada por la cantidad de nutrientes, esencialmente fósforo y nitrógeno; la luz constituye igualmente, sobre todo en los mares polares, un factor limitante. En todo el mar, el carbono orgánico alcanza un millar de gigatoneladas; el resto es de origen mineral.

El problema básico, aún no esclarecido, lo constituye la determinación del exceso de CO₂ que es capaz de disolverse en el océano profundo. Algunos datos sobre la penetración del tritio procedente de explosiones nucleares parecen mostrar una mayor accesibilidad de CO₂ hacia las profundidades en las zonas polares (aguas frías) y en cambio una penetrabilidad algo menor en aguas más cálidas.

Recientes estudios parecen indicar que un aumento de la temperatura del aire llevaría al aumento del flujo del carbono hacia el fondo del mar, por limitación del crecimiento del fitoplancton a causa del aumento de la radiación incidente global en aguas ricas en nutrientes. Paradójico efecto, ciertamente, que se sumaría a determinados cambios en la circulación oceánica para disminuir globalmente la capacidad del mar para absorber el exceso de CO₂.

De todos modos, son más las cosas que se ignoran que las que se saben. También aquí, como en el caso del vapor de agua. El ciclo del carbono y su relación con la temperatura del aire es mucho más complejo de lo que se suponía, y resulta

GRÁFICO 2
EVOLUCION DE LA CONCENTRACION DE CO₂ EN EL AIRE



* Partes por millón.

Midiendo el CO₂. Los científicos disponen de medidas directas y fiables de la concentración del dióxido de carbono (CO₂) desde el año 1958, fecha en que se estableció la estación de Mauna Loa, en Hawái, a una altitud de 3.397 m sobre el nivel del mar. Estas medidas, y las que más tarde se comenzaron a realizar en otros observatorios, resultan fiables no sólo por el instrumental utilizado, sino, sobre todo, por la facilidad con que se mezcla este gas en el resto de la troposfera.

casi imposible de modelizar. No obstante, se han conseguido establecer determinadas leyes de comportamiento del CO₂ para construir modelos numéricos que permitan predecir el cambio climático. De esos modelos se obtienen las cifras que se barajan acerca del calentamiento global dentro de cincuenta años.

El ozono troposférico, el N₂O, el metano, el CO y los CFC de origen artificial son otros gases de efecto invernadero que se suman al vapor de agua y al CO₂. Muchos de estos gases han intervenido seguramente también en los cambios climáticos del pasado, pero su incremento actual debe ser superior a causa de la industrialización; y en el caso de los CFC, porque se trata de gases que antes no existían.

PREDICCIONES: RIESGOS QUE SE TEMEN, INCOGNITAS SIN DESVELAR. EL CASO DEL MEDITERRANEO

El dato es incuestionable: los gases traza de efecto invernadero están aumentando, todos ellos, y además de forma sumamente rápida en comparación con períodos de cambio climático anteriores. No es difícil pasar a la conclusión siguiente: nos vamos a enfrentar a un cambio climático igualmente rápido. Al aumentar la capacidad de almacenar calor de la atmósfera, parece, asimismo, obvio que ese cambio climático consistirá esencialmente en un calentamiento global.

Sin duda es lícito pensar que los mecanismos compensatorios que actuaron en el pasado acabarán por contrarrestar ese cambio; quizá tarden mucho, porque el cambio sea más rápido de lo «habitual» (aunque, ¿cómo saber cuán rápidos fueron los cambios climáticos en la Era Primaria, por ejemplo?). Pero los parámetros de Milankovich hacen prever una nueva glaciación para den-

tro de unos cuantos milenios; y por mucha que sea la soberbia humana a la hora de pensar que podemos alterar cuestiones tan trascendentales, parece lógico que esa glaciación llegue más o menos cuando le corresponda. Lo que sin duda sí ocurrirá es que la civilización humana se habrá visto para entonces profundamente alterada por el cambio climático que, a corto plazo, parece venirnos encima. Y ésta es nuestra principal preocupación, lo que ocurra de aquí a cincuenta o cien años; no la próxima glaciación diez mil años más tarde.

Los estudios numéricos del cambio climático, con todas sus imperfecciones, ofrecen, sin embargo, una visión objetiva del futuro a partir del presente y del pasado. Globalmente, casi todos los realizados en los últimos cinco años coinciden en señalar un calentamiento de entre 2 y 4 grados suponiendo que en el año 2050 el CO₂ haya llegado a ser de 600 ppm. Este calentamiento podría ser mayor en latitudes altas que en las ecuatoriales y daría lugar a un aumento del vapor de agua contenido en el aire, con lluvias en general más abundantes, aunque con evaporaciones asimismo mayores.

Los modelos, a este nivel de detalle, alcanzan una precisión espacial más que rudimentaria. En lo referente al Mediterráneo, se estima un calentamiento algo mayor que el promedio, pero sobre un aumento del déficit de agua, especialmente en las zonas semiáridas.

Pero todo esto es poco más que hablar por hablar. Por lo que respecta a nuestras latitudes, no sabemos prácticamente nada acerca de lo que ocurrirá con las nubes o con el tipo de precipitación —probablemente más convectivas, quizá más abundantes donde llueve poco y menos donde llueve mucho—. Además, los modelos tienen escasamente en cuenta el relieve, ni siquiera en las grandes cadenas (Andes, Himalaya) que resultan «limadas» en el proceso. ¿Cómo evaluar, pues, los efectos del cambio climático en un país como España, de relieves menos escarpados pero sumamente irregulares?

Seguir hablando de este tema a escala regional es, hoy por hoy, poco más que perder el tiempo.

LA DUDA DE LOS SISTEMAS NO LINEALES

Por otra parte, no me resisto a comentar un aspecto que antes citaba y que está de plena actualidad. La intervención en estas cuestiones de la reciente teoría del caos. Todas las deducciones que

se pueden hacer acerca del comportamiento del efecto invernadero se basan en el conocimiento, sin duda todavía imperfecto, que tenemos del sistema climático. Un comportamiento que, supongamos, obedece a determinadas leyes físicas complejas a cuya caracterización matemática nos vamos probablemente acercando cada vez con mayor exactitud. Y eso permite esperar predicciones cada vez más fiables. Pero...

El pero se centra en las ecuaciones no lineales. O, si se prefiere, en la física del caos. La mecánica clásica describe perfectamente los movimientos de los cuerpos, por ejemplo, utilizando ecuaciones matemáticas lineales. Pero existen en la naturaleza muchos otros comportamientos que la física siempre manejó mal; y nos estamos refiriendo a la escala macroscópica, no hablamos aquí de la dicotomía mecánica cuántica-mecánica relativista que parece surgir en los tamaños casi infinitamente pequeños. Por ejemplo, muchas cosas relacionadas con la turbulencia: el agua que sale por un grifo, el flujo del aire detrás de un vehículo en movimiento, el movimiento de la sangre en las cavidades del corazón, el mismísimo clima... Desde hace unos años los matemáticos se interesan por estos fenómenos y han llegado a arrastrar en ese interés a los físicos. Así es como nació la nueva «teoría del caos»...

Curiosamente, y aunque hoy día la teoría del caos se emplee para toda clase de cosas, desde los movimientos de las cotizaciones de Bolsa hasta los tumultos multitudinarios de grandes masas humanas, pasando por el tráfico automovilístico o el comportamiento de las ondas cerebrales durante una crisis epiléptica, fueron los climatólogos los primeros que se toparon con las dificultades que presenta la predicción de un sistema tan complejo como la atmósfera terrestre. Y nada menos que en el decenio de los sesenta...

La dinámica atmosférica sólo es aproximadamente lineal en un corto espacio de tiempo. En la práctica, y sobre todo a plazos climatológicos (decenios, siglos, milenios), el sistema climático es obviamente un sistema no lineal. Es decir, extremadamente sensible a las condiciones iniciales. Diferencias diminutas en esas condiciones iniciales arrojan, a la larga, resultados extraordinariamente distintos. Lo cual no significa que en la física del caos todo sea aleatorio e impredecible, ya que siempre existen determinadas regularidades ocultas que todavía no han sido suficientemente estudiadas. Y que, quizá, valgan lo mismo para las cotizaciones de la Bolsa que para el infarto o el cambio climático.

Por eso, entre otras razones que nos harían extendernos en demasía (citaremos sólo dos: la dificultad de obtener datos homogéneos y fiables del clima reciente, por ejemplo de los últimos cien años, y la dificultad de integrar absolutamente todos los parámetros conocidos del sistema climático —de los desconocidos mejor no hablar— en ecuaciones calculables para valores de la variable tiempo de varios decenios), hay que considerar con enorme circunspección los resultados de los modelos matemáticos del clima. Especialmente en lo que se refiere a las precisiones que podrían ofrecernos en cuanto al reparto temporal y espacial del citado cambio climático. Y aunque sólo nos limitemos a dos variables, temperatura y precipitación.

¿Quiero, pues, decir al final de este artículo que todo lo dicho anteriormente no tiene valor alguno? No del todo, aunque sí en parte.

La descripción del fenómeno del efecto invernadero en nuestro planeta es, hasta donde saben hoy los científicos, correcta. Y se cumple con fidelidad, tal y como parece haberse cumplido en épocas geológicas pasadas. La realidad del rapidísimo aumento del CO₂ es incuestionable, como lo es, aunque no lo sepamos con idéntica precisión, el incremento de otros gases de efecto invernadero; todo ello fruto de la mano, industrializada, del hombre. La probabilidad de que ello entrañe un cambio climático global en el planeta es, obviamente, muy alta; los sistemas de compensación que indudablemente han existido en el pasado se van a ver desbordados por la rapidez del movimiento, y aunque lleguen a actuar seguramente no lo harán con eficacia hasta dentro de unos cuantos milenios, que es cuando nos «toca», dicho sea de paso, una nueva glaciación según los parámetros de Milankovich.

Hasta aquí lo que parece muy probable, casi seguro. Avanzar cifras de aumento de temperatura media en un determinado plazo (de 2 a 4 grados dentro de cincuenta años es lo más comúnmente aceptado) es ya otra cuestión. Esgrimir que ese calentamiento se hará más sensible en las zonas subpolares y muy poco en las tropicales es ya otra cuestión. Inferir que va a llover más, o menos, que ahora en unas u otras regiones del globo es ya otra cuestión. Todos esos resultados, que los modernos ordenadores plasman en mapas bellamente coloreados, han sido obtenidos utilizando la física clásica, la de las ecuaciones lineales, y no la nueva física del caos, incapaz por ahora de enfrentarse a esa tarea. Y es probable que, desde esa óptica, tales precisiones sean, aun dentro de

su más que notable imprecisión, poco menos que un despropósito.

¿Qué hacer, pues? Líbreme Dios de aconsejar a los científicos cómo realizar su trabajo. Los matemáticos y los físicos seguirán jugando con sus modelos climáticos reducidos, utilizando ordenadores cada vez más potentes e intentando afinar sus condiciones globales de partida. Los nuevos adeptos de la teoría del caos, por su parte, seguirán trabajando en la comprensión de fenómenos no lineales y quizá dentro de no mucho ofrezcan alguna nueva forma de abordar la cuestión. Y los ciudadanos de a pie deberemos seguir concienciándonos acerca de un fenómeno que se nos echa encima, aunque no sepamos con precisión cuál será la virulencia de su ataque en nuestro entorno concreto.

El Mediterráneo, según los modelos, va a tener sin duda mayor temperatura (en promedio, entre 3 y 6 grados más en cincuenta años) y probablemente más lluvia (aunque no se dice cómo será su reparto, sí se espera que haya más nubes de desarrollo vertical y menos sistemas frontales; más gotas frías, en suma). Si somos capaces de aprovechar esa lluvia, nuestro problema será pequeño. Incluso podremos salir ganando: más calor y más agua suponen, globalmente hablando, un mejor clima para sustentar especies vivas. Para que el agua, que caerá probablemente cada vez más de forma convectiva que zonalmente (lluvias frontales), pueda ser aprovechable y no nos dañe, tendremos que poblar densamente las laderas de vegetación arbórea; así evitaremos la erosión y las riadas devastadoras, y además aprovecharemos el agua caída de forma positiva. Tendremos que acostumbrarnos, y equiparnos para ello, a no dejar escurrirse ni una gota más de lo necesario, porque esa escorrentía lleva en sí misma el germen de la destrucción, de la desertización (gran paradoja: el agua de los aguaceros es el principal agente desertizador). Y tendremos que cultivar con cabeza, regulando inteligentemente los recursos hidrológicos, de superficie y subterráneos, y no buscando, como estamos haciendo hasta ahora, rendimientos económicos elevados a costa de un deterioro ecológico que puede llegar a ser irreversible.

En suma. La gran lección del efecto invernadero estriba en que su incremento va a traer indudablemente un cambio climático, probablemente más calor y más lluvias tormentosas. Poco o nada vamos a poder hacer, no ya a nivel nacional, sino incluso internacionalmente, para detener el proceso. La Cumbre de la Tierra en Río mos-

tró claramente el signo de los tiempos venideros. Los esfuerzos deben, pues, encaminarse a adaptarnos lo mejor posible a ese cambio. Contra el calor poco podremos hacer. Contra las lluvias torrenciales podemos, en cambio, mucho: esencialmente repoblar las laderas, sobre todo en estas regiones mediterráneas en las que los efectos de las habituales gotas frías otoñales llevan ya mucho tiempo dejando sentir sus efectos. La máxima inversión económica, la prioridad número uno de este país debería ser, de aquí a mediados del siglo próximo, la de poblar íntegramente las laderas de bosques, prohibiendo aterrazamientos y ex-

plotaciones agrícolas abusivas con el recurso agua y fomentando cultivos y plantaciones de vegetales acordes con la región.

Ya sé que todo esto resulta poco espectacular, e incluso suena algo derrotista. Pero los humanos le hemos dado un pequeño empujoncito a una poderosa maquinaria, y precisamente porque el sistema climático es un sistema no lineal, caótico dentro de un orden, pero caótico al fin, ese pequeño empujoncito puede suponer consecuencias muy importantes; a escala humana, por supuesto. Porque el planeta Tierra se las ha visto con situaciones mucho peores a lo largo de sus 4.500 años de existencia...