EDUCACIÓN

OLIMPIADA VENEZOLANA JUVENIL DE CIENCIAS 2026

cenamec
Fundación Centro Nacional para el Mejoramiento de la Enseñanza de la Ciencia

Olimpiada Venezolana Juvenil de Ciencias

EFECTO INVERNADERO

Miguel Ángel Alario y Franco

2026

EFECTO INVERNADERO

MIGUEL ÁNGEL ALARIO Y FRANCO
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN

Como es notorio, la Tierra está envuelta en una capa de materia, esencialmente gaseosa que juega un papel determinante en multitud de facetas de la existencia de vida sobre aquélla y resulta en estos tiempos una obviedad que, en realidad, para la (única) forma de vida que conocemos, la atmósfera, *esta* atmósfera, es una condición *sine qua non*. Desde el primer momento de su existencia como producto de las reacciones nucleares y otras en el interior del planeta y, al menos en parte, como resultado de la acreción de gases del exterior, probablemente gracias a los cometas, la atmósfera terrestre ha ido evolucionando. Tras la aparición de vida en la Tierra esa evolución dio un cambio radical en el que el papel principal lo juega la fotosíntesis, que ha dado lugar a una atmósfera cualitativamente bastante homogénea pero cuantitativamente variable con el curso del tiempo y en la que abunda el oxígeno, especie química esencial para la vida denominada aeróbica. La masa gaseosa que constituye la atmósfera se conoce comúnmente como *aire*, y es una mezcla compleja (tabla I) en la que, si bien predomina el nitrógeno, hay multitud de otros componentes, unos quince en total con concentraciones relativamente altas, y bastantes más, en su mayoría de origen antropogénico presentes en concentraciones menores pero en ocasiones extremadamente importantes por sus efectos –a menudo perniciosos– como los clorofluorocarburos, destructores a través del cloro de la capa de ozono, o los denominados «compuestos orgánicos volátiles» (VOC en la bibliografía en lengua inglesa) agentes importantes de la contaminación.

El asunto que nos ocupa en este artículo, el *efecto invernadero*, depende en primera instancia de dos de esos componentes, agua y CO_2, aunque en el momento actual, en realidad desde hace unos años, las cosas se han complicado y hay otras especies químicas que también influyen y todo ello ha dado lugar a un cierto incremento en la temperatura media de la atmósfera, lo que se ha dado en llamar el calentamiento global. Para poder entender el efecto invernadero, esencial para la existencia de la vida terrestre (y marina y aérea...) y cómo ha podido modificarse en los últimos años, es necesario profundizar un poco en los mecanismos por los cuales la atmósfera se calienta gracias, esencialmente, a la energía solar que llega continuamente a la Tierra, y cuya cantidad es de una parte enorme, unos 340 vatios por metro cuadrado, lo que equivale a iluminar una habitación de unos diez metros cuadrados con treinta y cuatro bombillas de 100 vatios y, de otra, gratis. Digamos, haciendo un inciso, que al precio actual de la energía eléctrica en España, que es de aproximadamente un duro por kw/hora, eso nos costaría nada menos que unas diecisiete pesetas por metro cuadrado y por hora. Si ahora multiplicásemos por la superficie de la Tierra, unos 130 billones de metros cuadrados, la energía que en una hora llega a la Tierra valdría, al precio del mercado eléctrico doméstico, nada menos que ¡doscientos veinte billones de pesetas! Pero volvamos a nuestro asunto, ¿se está efectivamente calentando la Tierra?, más propiamente deberíamos decir la atmósfera y, afinando un poco más, la pregunta sería, ¿se está efectivamente calentando la troposfera?, porque la atmósfera tiene diferentes regiones, de las que la más importante en este contexto es precisamente la más próxima a nosotros, la troposfera. La figura 1 muestra la evolución con la altura de la temperatura de la atmósfera. En relación con aquélla, puede observarse que al ascender desde el nivel del suelo la temperatura desciende de manera notable, cosa que todo el que ha subido a un promontorio ha experimentado y que resulta lógica por cuanto al subir nos vamos separando del foco de calor que es el suelo calentado por los rayos solares. Sin embargo, al alcanzarse unos diez kilómetros de altura se observa un cambio en la pendiente y la temperatura empieza a crecer, lo que se debe tanto a la absorción de energía por las moléculas como a procesos fotoquímicos de ionización o de disociación y sus correspondientes recombinaciones, que producen calor.

Por ejemplo, la ionización del oxígeno tiene lugar por medio de fotones de radiación electromagnética de longitud de onda $\lambda = 99.3$ nm

$$O_2 + h\nu \Rightarrow O_2^+ + e^-$$

y le corresponde una energía de 1.205 kj/mol. Dicha energía se desprende en cuanto el catión oxigenilo resultante

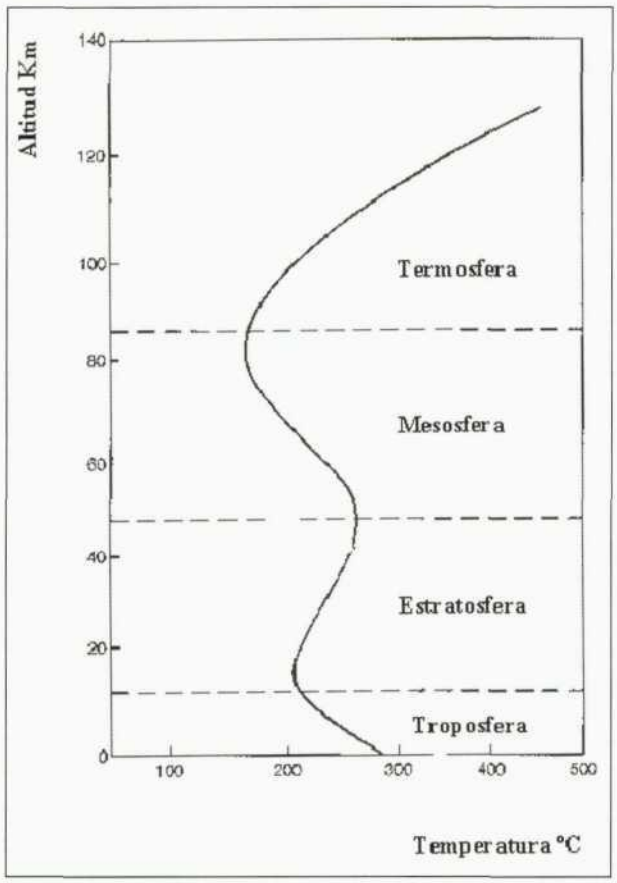

Fig. 1.– Evolución de la temperatura de la atmósfera con la altura.

y el electrón se encuentran en presencia de un tercer cuerpo, otra molécula de gas por ejemplo, que se lleve el exceso de energía del choque –esencialmente energía cinética.

$$O_2^+ + e^- + M \Rightarrow O_2 + M^* + Q = 1205 \text{ kj/Mol}$$

Y situaciones análogas se producen en los procesos de disociación fotónica: por ejemplo

$$O_3\,(g) + h\nu \rightarrow O_2\,(g) + O\,(g)$$
$$O\,(g) + O(g) + M \rightarrow O_2\,(g) + M^*(g) + Q$$
$$O_3\,(g) + O(g) \rightarrow 2\,O_2\,(g) + Q = +394 \text{ kj/Mol}$$

Con lo que en la estratosfera la temperatura *crece* con la altitud; al llegar a los 50 y a los 85 km se producen otros cambios en la temperatura que se reflejan en los cambios de pendiente; se pasa, así pues, a la mesosfera y después a la termosfera para, por encima de 120 km, entrar en el dominio de la ionosfera, donde la mayoría de las especies están ionizadas. A las regiones que limitan las diferentes capas que no son, por supuesto, fronteras rígidas, se las denomina regiones *pausa: tropopausa, estratopausa, mesopausa, termopausa* e *ionopausa.* Bien, pues los datos tomados de temperaturas en los últimos años del siglo XX indican que la temperatura media global de la superficie de la Tierra ha crecido de manera notable, quizá un grado centígrado en los últimos cien años (figura 2). Al tratarse de una temperatura media sobre toda la Tierra, es obvio que los extremos de la misma se extienden mas allá de más/menos un grado, ya que la propia atmósfera no tiene una temperatura uniforme: es mucho mayor en el ecuador que en los polos y sus variaciones tampoco son uniformes. Otra importante observación es la de que la mayoría de los glaciares se van retirando (figura 3), se van, pues, fundiendo y junto a una cierta fusión de los casquetes polares y de las denominadas «nieves perpetuas» el nivel del mar ha subido algo, entre 10 y 25 cm, en los últimos cien años. Pero no sólo eso, quizá uno de los motivos de mayor preocupación para la Humanidad es que el clima está también cambiando mucho en la escala local. No sólo la última década ha sido la más cálida del siglo XX, sino que los tres años más cálidos han sido los tres últimos (figura 4a); pero, sobre todo, en el año 1999 ha habido grandes alteraciones [1] meteorológicas: grandes sequías e inundaciones en zonas no habituales o más amplias en las que sí lo son, olas de frío y de calor, etc.

También es posible percibir el problema considerando los costos de los desastres naturales en los últimos años, a partir de la información de las compañías de seguros (figura 4b). Puede observarse un crecimiento importantísimo de dichos gastos que casi se han decuplicado en los últimos veinte años.

En términos generales, pues, podemos decir que además de los cambios del tiempo atmosférico que observamos continuamente en nuestra vida diaria: unos días llueve y otros no, hace frío o calor, etc., estamos observando un cambio del clima. Vamos, pues, a comenzar por ver qué es el clima. De acuerdo con Creutzen (premio Nobel de Química en 1995) y Graedel [2], el clima es el *comportamiento estadístico a largo pla-*

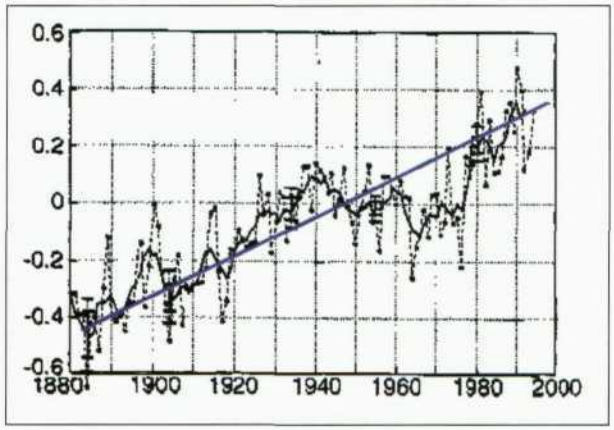

Fig. 2.– Temperatura media global en los últimos 120 años: línea de trazos media anual; línea continua media quinquenal. La línea azul es una guía visual de los datos.

[1] Véase, por ejemplo, el diario *El País* de 20 de enero de 2000 para una descripción detallada de estas anomalías.
[2] P. Creutzen y Graedel, *Atmospheric Change,* 1992.



Fig. 3.– Disminución del glaciar del Ródano en Gietsch, Suiza, en los últimos ciento cincuenta años. Tomado de *National Geographic* (mayo, 1998).

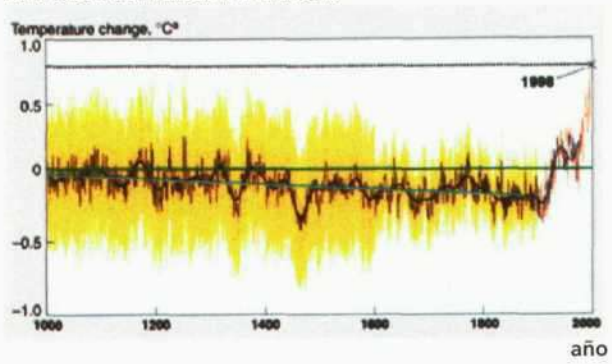

Fig. 4a.– Cambio en la temperatura media global del hemisferio norte en los últimos mil años (IPCC, 2000).



Fig. 4b.– Evolución anual de las indemnizaciones pagadas por las compañías de seguros en relación con los gastos ocasionados por catástrofes naturales.

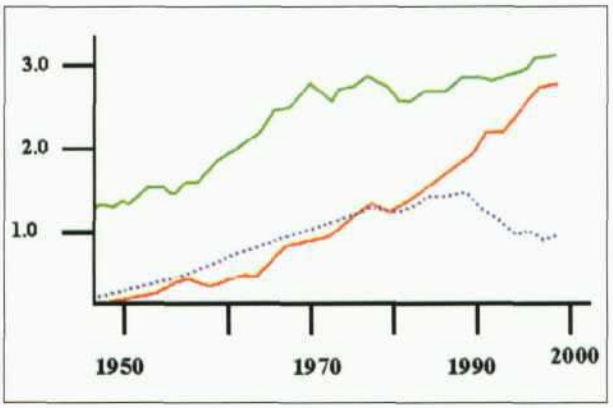

Fig. 5.– Producción industrial de CO_2, en millardos de toneladas; *verde: países industrializados; rojo: países en vías de desarrollo; azul:* países del antiguo bloque soviético.

zo de temperatura, irradiación solar, nubosidad, régimen de vientos y precipitación en una región geográfica determinada. Al clima le afectan diferentes factores que, de acuerdo con esos autores, son en orden de importancia decreciente: La atmósfera, la biosfera (incluyendo el hombre), la hidrosfera, la criosfera y la pedosfera o edafosfera –esto es, el suelo–. Otra observación importante es que, en los últimos años, la concentración de CO_2 en la atmósfera ha ido aumentando (figura 5). La pregunta que surge inmediatamente es: ¿están estos hechos relacionados?, ¿qué consecuencias puede tener ese calentamiento global caso de continuar?, y, por último, ¿es posible detener ese incremento de temperatura? Para contestar a estas importantes preguntas, es necesario comenzar por comprender el origen del calentamiento natural de la atmósfera, el efecto invernadero, y después trataremos de aclarar si efectivamente está siendo modificado y si las causas de dicha modificación son naturales o antropogénicas.

EL EFECTO INVERNADERO

La Tierra recibe calor del sol por medio de ondas de radiación electromagnética, esto es, una sucesión de campos eléctricos y magnéticos que se propagan en el vacío y que, como toda onda, se caracterizan por su longitud de onda, frecuencia, velocidad (obviamente de la luz, en este caso) y amplitud. Energía y frecuencia están relacionadas por la ecuación de Planck

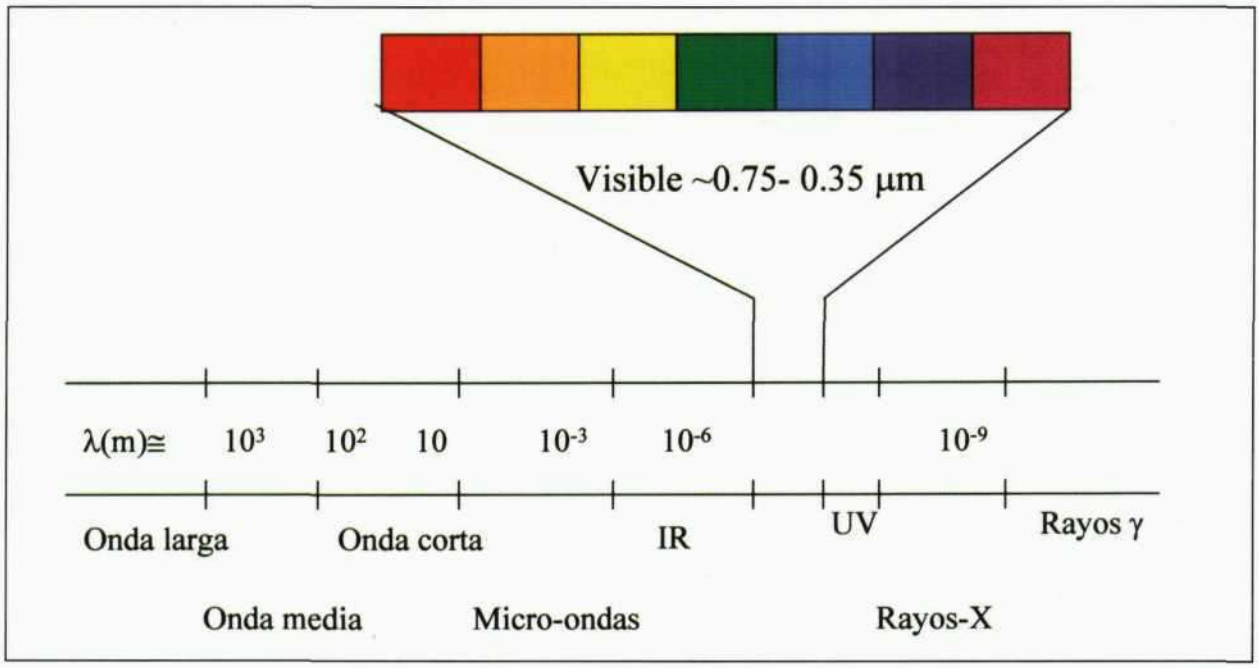

Fig. 6.– Espectro de radiación electromagnética.

$$E = h\nu$$

donde la constante de relación, *h*, se denomina constante de Planck y vale 6.626×10^{-34} J s.

El espectro de radiación solar (figura 6), es muy amplio, y abarca desde muy altas energías, los rayos gamma, y consecuentemente longitudes de onda pequeñas, llamadas ondas cortas, del orden del nanometro e inferiores, hasta las longitudes de onda de radio, del orden del kilómetro y muy bajas energías, llamadas ondas largas. Entre medias, y en orden decreciente de energías, se sitúan los rayos X, la zona ultravioleta –de tanta importancia en relación con el ozono–, el visible, el infrarrojo que, como veremos a continuación es el que nos interesa en relación con el calentamiento de la atmósfera, y, por fin, la radio de onda media.

De todo este amplio margen de energías, las moléculas existentes en el aire atmosférico absorben unas u otras dependiendo de los diferentes procesos de interacción entre radiación y materia.

Una molécula aislada, esto es, independiente de otras moléculas, tal y como se encuentra en fase gaseosa, puede absorber energía pasando de unos estados a otros. El de menor energía se denomina estado fundamental y los demás estados excitados.

La energía total absorbida es debida a la suma de tres términos correspondientes a las tres maneras fundamentales de ganar energía sin cambiar su naturaleza, esto es, sin ionizarse ni disociarse

$$E_{total} = E_{rotacional} + E_{vibracional} + E_{electrónica}$$

Pero la cantidad de energía que se puede absorber por una molécula no es cualquiera sino que está cuantizada, esto es,

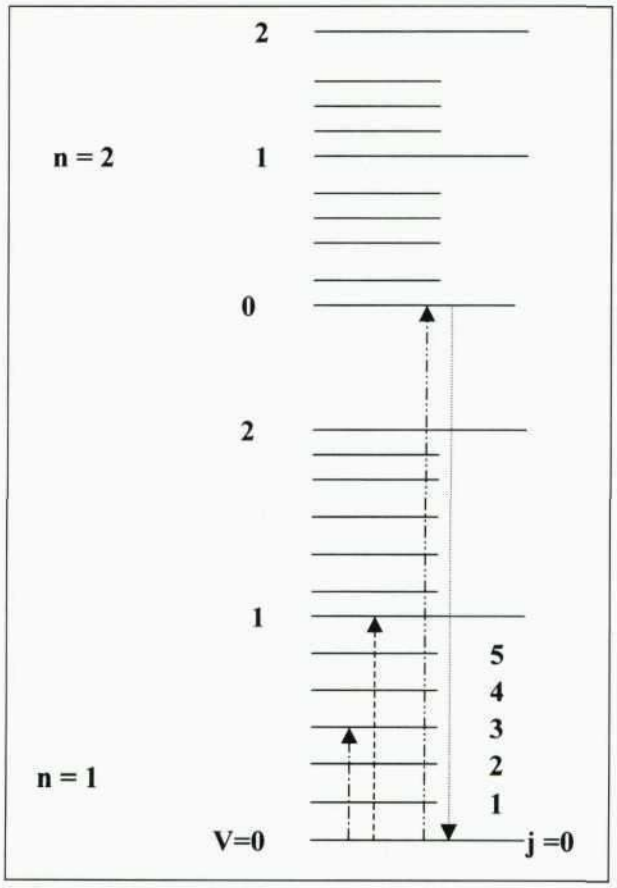

Fig. 7.– Diagrama de niveles de energía de una molécula en el que se observan los diferentes estados energéticos translacionales, vibracionales y rotacionales, caracterizados por los números cuánticos *n*, *v* y *j* respectivamente. Las flechas indican posibles cambios energéticos por absorción o emisión de energía.

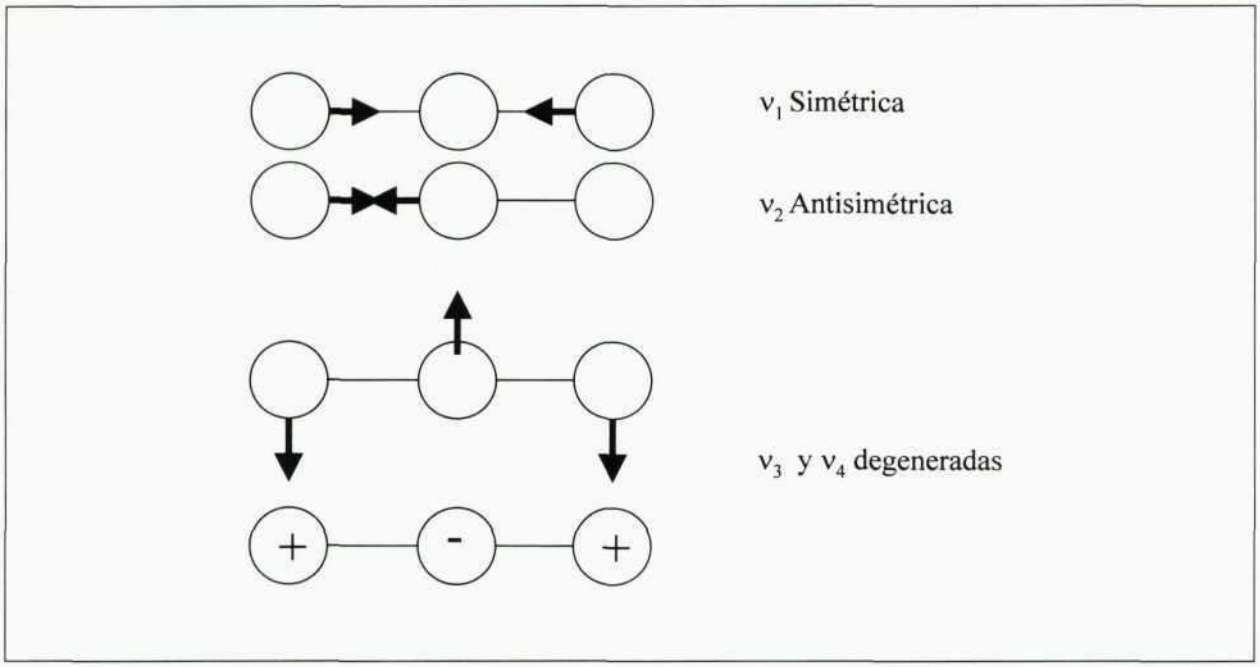

Fig. 8a.– Modos de vibración de una molécula triatómica lineal, e.g. CO_2.

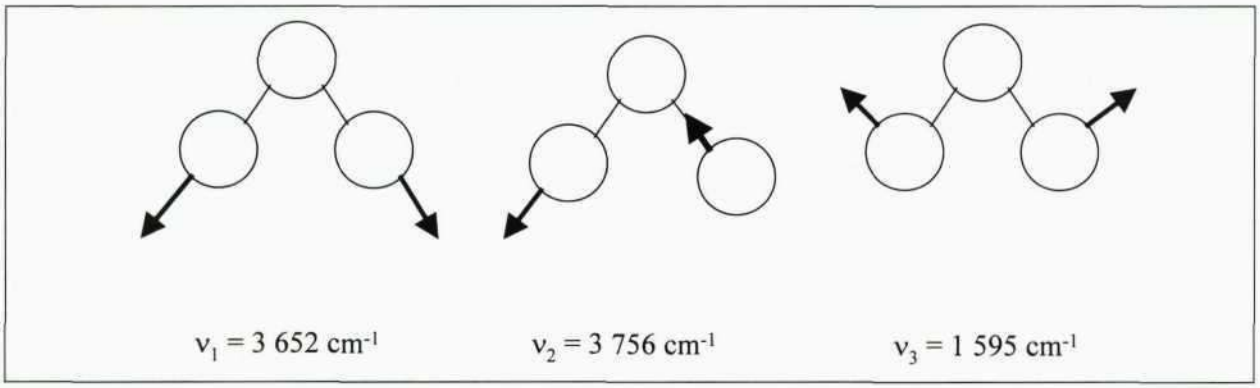

Fig. 8b.– Modos de vibración de una molécula triatómica angular, e.g. H_2O.

las moléculas pueden absorber cuantos de energía. En un símil bastante elemental, pero a la vez intuitivo, podríamos decir que las moléculas pasan de unos estados a otros ascendiendo o descendiendo por una escalera pero no por una rampa. Si consideramos el caso de la energía vibracional, por ejemplo, y suponiendo que la molécula es un oscilador armónico, puede absorber energía de acuerdo con

$$E = (n+½)\ h\nu$$

Donde n = 0,1,2,3... es un número cuántico y ν la frecuencia de vibración de dicho oscilador. Es interesante señalar que, de acuerdo con esa fórmula fundamental de la Mecánica Cuántica, incluso en el estado de mínima energía total, aun sin traslación ni rotación, esto es, cuando n = 0, lo que equivaldría al cero absoluto de temperatura, la molécula tendría aún una energía de vibración, de valor $E = h\nu$.

Por otra parte, una molécula determinada no puede vibrar de cualquier manera, sino que existen unos modos particulares de vibración, que dependen esencialmente del número de átomos, N, de la molécula y de su forma, esto es, si la molécula es lineal o angular. Las moléculas diatómicas sólo tienen un modo de vibración: que los átomos se separen, o se junten, en la vibración, o sea, que cambie la distancia del enlace entre ellas. En general, en una molécula lineal, el número de modos de vibración es (3N-5), con lo que, obviamente, si hay dos átomos sólo hay un modo de vibración. El CO_2 es una molécula lineal triatómica, y tiene $3 \times 3 - 5 = 4$ modos de vibración. De ellos, $N - 1 = 2$, son modos llamados de tensión, en los que sólo varía la distancia de enlace, y otros $2N - 4 = 2$ modos de flexión o deformación, en los que sí varía el ángulo (figura 8a). Por su parte, la molécula de agua también es triatómica, pero angular. En este caso, el número de modos de vibración es $3N - 6 = 3 \times 3 - 6 = 3$ (figura 8b).

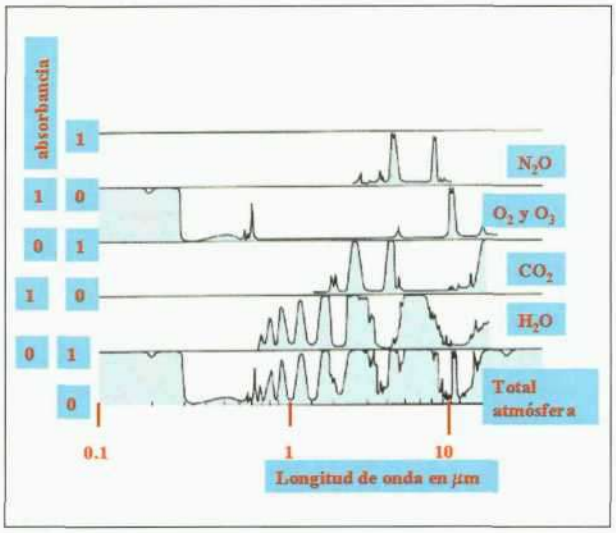

Fig. 9.– Absorción de radiación electromagnética por la atmósfera y varios de sus componentes gaseosos.

Y la molécula de agua sólo absorbe radiación a esas tres energías; por cierto, que las energías correspondientes a los modos de vibración se expresan en unidades típicas espectroscópicas para la región del infrarrojo, cm^{-1}, que corresponde al inverso de la longitud de onda: Así, la vibración ν_1 de tensión del agua, con $\lambda^{-1} = 3\,652\ cm^{-1}$, corresponde a una longitud de onda de 0.27 μm y a una energía de 5.4×10^{-27} julios. Así pues, los gases de la atmósfera terrestre absorben radiación en la región del infrarrojo a energías determinadas (figura 9).

La radiación solar que llega a la Tierra procede de una fuente de energía, el Sol, que se encuentra a una temperatura muy elevada, 6000 K (figura 10b); dicha energía calienta la superficie de la Tierra que a su vez reemite a una temperatura media de unos 25 °C (298 K) (figura 10c). Y cabe recordar aquí la ley de Stephan-Boltzman, según la cual la intensidad y la longitud de onda de la radiación –la energía– emitida por un emisor perfecto, lo que se denomina *cuerpo negro*, depende de la temperatura (figura 10a).

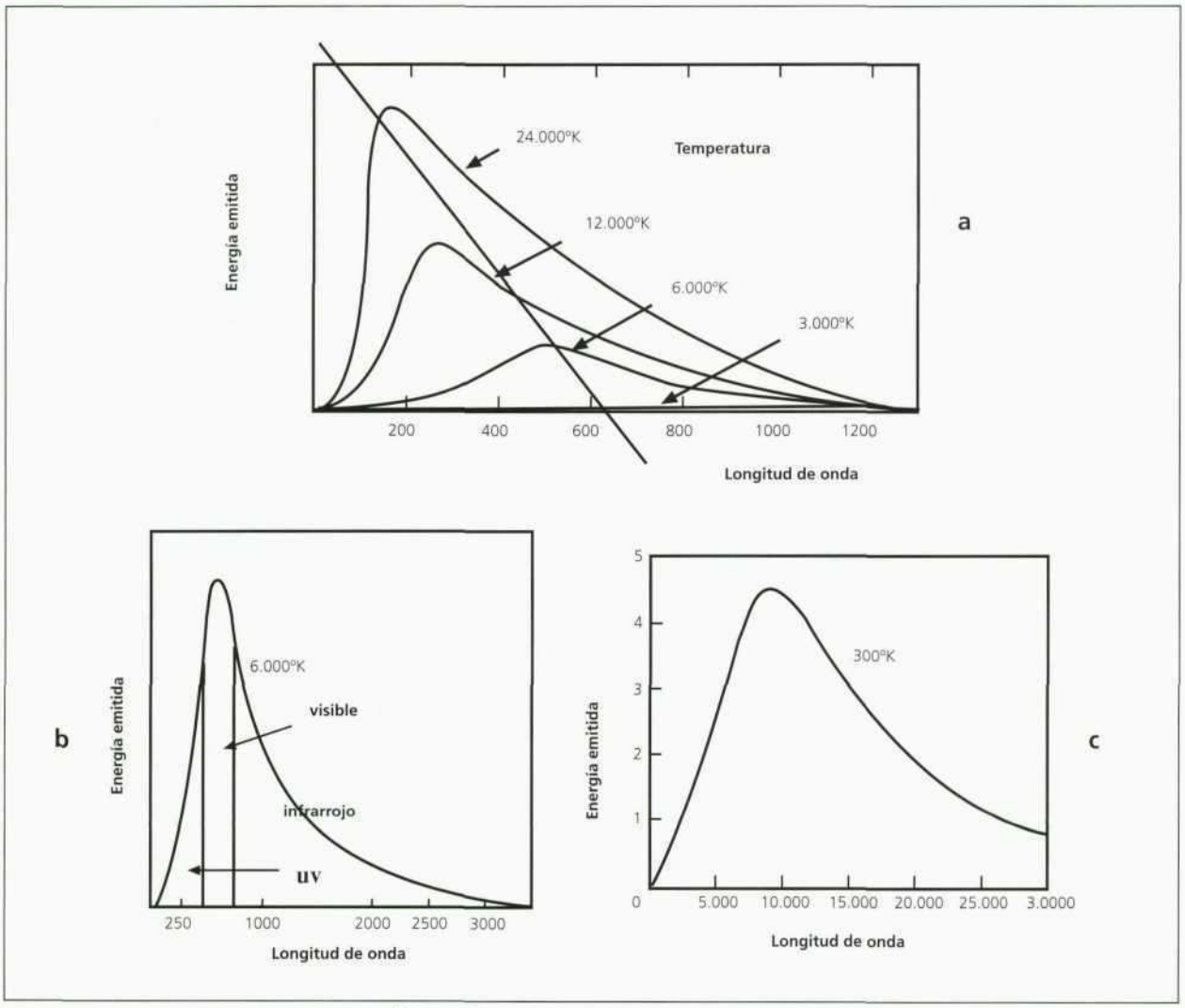

Fig. 10.– a) emisión de un cuerpo negro (10^{-2} cal cm^{-2} min^{-1}) en función de su temperatura (K) y de la longitud de onda (nm) –la línea continua inclinada es una ayuda visual–; b) emisión solar; c) emisión terrestre.

De este modo, la mayor parte de la radiación procedente del sol atraviesa la atmósfera terrestre –hay una parte reflejada por la atmósfera, que vuelve directamente al espacio– y llega a la superficie donde calienta suelo y mar; a continuación, esa radiación es reemitida al espacio, pero como la fuente, el suelo, está a una temperatura distinta, es reemitida con una energía correspondiente a la región del infrarrojo; como consecuencia de ello, parte de esa radiación devuelta al espacio es absorbida como energía –esencialmente– vibracional por las moléculas del aire y eso da lugar a un incremento en la temperatura que es el denominado «efecto invernadero». Se comprende así que la magnitud del efecto invernadero dependa de la naturaleza de la atmósfera y que será distinto en Marte o Venus que en la Tierra. En ésta se estima que su valor es del orden de los 35 grados, o sea, que si no fuera por el efecto invernadero, la temperatura media de la Tierra sería del orden de los 18 a 20 grados bajo cero, con lo que la vida tal como la conocemos sería, por lo menos, complicada.

Esta interpretación del efecto invernadero, se inicia en realidad en el siglo XVIII, con H. B. de Saussure, un geólogo suizo, famoso también por haber hecho la primera escalada al Mont Blanc. De Saussure pensó que la atmósfera era como un invernadero y para probarlo construyó una serie de cajas concéntricas, del estilo de las famosas *matruschkas* rusas, en las que cada muñeca incluye a las de menor tamaño que ella; en dichas cajas, la temperatura era mayor cuanto más en el interior. La primera explicación científica del efecto invernadero fue dada por Joseph Fourier, famoso matemático francés quien indicó «Éste es el modo en que aumenta la temperatura de la Tierra», ya que «el calor tiene menos dificultad para atravesar el aire cuando está en el estado de luz que para escaparse a su través cuando se encuentra en forma de calor negro» –con lo que Fourier estaba intuyendo la diferencia entre las longitudes de onda de las dos formas de radiación a que antes hacíamos referencia, visible e infrarrojo–. Posteriormente, John Tyndall y Charles Pouillet establecieron que los principales gases responsables de la calefacción eran agua y dióxido de carbono y fue Svante Augustus Arrhenius, uno de los fundadores de la Química quien, a principios del siglo XX, efectuó la primera estimación de la magnitud de dicho efecto, obteniendo un valor bastante próximo al que se acepta hoy día.

El propio Fourier y Sadi Carnot sentaron las bases de la termodinámica y éste describía la Tierra como una máquina térmica. Fourier tuvo además la intuición de considerar que «las actividades humanas, diferentes de los fenómenos naturales, pueden modificar el clima» y en su *Teoría analítica del calor* hizo unas «consideraciones acerca de la temperatura de la Tierra y la del espacio interplanetario».

CICLOS DE MILANKOVICH

Es bien conocido que la Tierra no ha tenido siempre la misma temperatura y que a lo largo de los años se han producido modificaciones sustanciales de la misma que recoge el registro fósil. A partir de porciones de hielo extraído de los polos, del contenido isotópico en carbono y oxígeno de las conchas de los moluscos presentes en los sedimentos marinos y otras fuentes geoquímicas análogas, está bien establecido por medio de una ciencia que se denomina Paleoclimatología, que en la historia de la Tierra ha habido *periodos glaciales* cada, aproximadamente, 100.000 años; dichos periodos han durado unos 90.000 años y están separados entre sí por los denominados *periodos interglaciales* que duran, pues, unos 10.000 años. Ante fenómeno de semejante naturaleza, es razonable tratar de relacionar dichos periodos con los movimientos de la Tierra en torno al Sol.

El más obvio de los movimientos de nuestro planeta, el de rotación en torno a un eje imaginario que pasa por los polos, es el que da lugar a la sucesión del día y la noche, y notoria es la diferencia de temperatura entre esas dos partes de la jornada, lo que permite relacionar como ya dijimos el calentamiento de la Tierra con la luz solar. Pero también es notable la sucesión de las estaciones, debida a la rotación de la Tierra a lo largo de la eclíptica en torno al Sol. Ello y el que el eje de rotación no sea perpendicular al plano de la órbita da lugar de una parte a las estaciones y de otra a las diferencias estacionales entre los dos hemisferios en que el ecuador diferencia al globo terráqueo. Así mismo, la ausencia de verticalidad del eje de rotación con respecto a la órbita justifica la nocturnidad de los inviernos polares y la larga duración del día estival en los mismos y en momentos opuestos. Todo esto es, pues, sencillo y, a la escala de una vida humana, prácticamente inmutable.

Sin embargo, con estos solos movimientos no podrían explicarse los periodos glaciales e interglaciales a los que hemos aludido. Fue el científico serbio Milankovich quien, estando en la cárcel como prisionero político, estableció la relación entre esos ciclos y las variaciones que muestran tanto la excentricidad de la órbita, como la inclinación del eje terrestre. Existen, pues, tres periodicidades superpuestas a las anual y diurna que acabamos de describir: Una cada ~100.000 años, asociada a los cambios en la excentricidad de la eclíptica, lo que da lugar a que el sol caliente más o menos y que acompaña a las glaciaciones, pero dentro de ellas existe otra periodicidad de unos 25.000 años, asociada a la variación de la inclinación del eje con relación a la órbita. Además, hay un tercer movimiento de precesión o cabeceo del propio eje terrestre, que da lugar a la denominada *precesión de los equinoccios,* que origina el que varíe la latitud a que tiene lugar el equinoccio de verano, 23 de junio, día en que el Sol está en la vertical, por lo que luz y oscuridad son ambas de igual duración –*equi noccio*–, y que tiene una periodicidad de 41.000 años. Estas tres periodicidades se observan de manera bastante clara en los registros paleoclimáticos, lo que permite justificar los periodos glaciales referidos. El último periodo interglacial, en el que nos encontramos actualmente, empezó hace unos 20.000 años, y el anterior entre unos 120.000 y 140.000 años atrás.

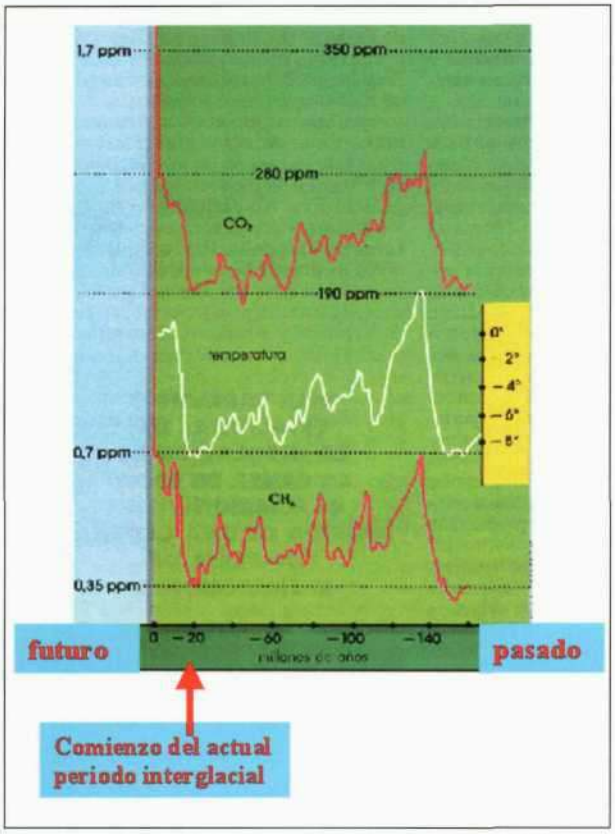

Fig. 11.– Evolución de la temperatura media global, y de las concentraciones (en partes por millón) de dióxido de carbono y metano en los últimos 160.000 años. Tomado de Lorius et al, *Nature* 347, 139 (1990). Véase también «Mundo Científico», julio 1992.

Tabla I. Composición *actual* de la atmósfera (% en volumen)

Elementos Químicos

Nitrógeno: N_2	78,03 (en masa 75,51 %)
Oxígeno: O_2	20,99 (en masa 23,14 %)
Argón: Ar	0,93 (en masa 1,3 %)
Neón :Ne	0,015
Hidrógeno: H_2	0,010
Helio: He	0,005
Kriptón	0,00001
Xenón: Xe	0,000008

Compuestos Químicos

• Dióxido de carbono CO_2:	0,033 (descomposición de materia orgánica, combustión, equilibrio atmósfera/océano; industria; automoción).
• Monóxido de carbono CO:	0,05 (descomposición de materia orgánica; aire «limpio»).
• —:	1-50 (zonas urbanas con alta densidad de tráfico).
• Monóxido de nitrógeno NO:	0,01 (descargas eléctricas; aire «limpio»).
• —:	0,02 (motores de combustión interna, áreas con *neblhumo* «smog»).
• SO_2:	< 0,01 (volcanes, fuegos forestales, combustión de materia orgánica).
• —:	1-2 (zonas industriales; generación térmica de electricidad).
• O_3:	~0.1 (aire limpio: tormentas). ~0.05 («smog»). ~0.05 estratosfera.
• CH_4:	1-2 (descomposición de materia orgánica, rumiantes, hormigas.

• La concentración de agua varía mucho en función de la latitud y puede ir desde <~ 1 % en las zonas desérticas hasta >~ 4 % sobre una selva tropical. La temperatura también influye marcadamente en el contenido en agua que no es el mismo en los polos que en el ecuador.

CALENTAMIENTO GLOBAL

Quizá las dos observaciones más importantes referentes al problema que nos ocupa son el incremento de la temperatura media global y el de la concentración de dióxido de carbono en los últimos 160.000 años (figura 11). Puede observarse que ambas llevan un curso bastante parecido, prácticamente paralelo, y algo similar ocurre con la concentración de metano, aunque ésta es mucho menor como lo indica su escala de ordenadas, ppb, partes por millardo en volumen, mientras que la de CO_2 es de partes por millón, esto es, 1000 veces mayor. Cabe señalar así mismo que la temperatura ha estado en general por debajo de la media global actual, indicada por el cero en la escala de temperaturas. Parece claro, pues, que existe una relación importante entre las concentraciones de estos gases, llamados a veces de efecto invernadero, y la temperatura de la atmósfera, de lo que se deduce que un incremento en la concentración de los mismos, y en particular del dióxido de carbono, puede llevar a un calentamiento global que a su vez podría causar trastornos, quizá irreversibles, al entorno natural. La concentración de CO_2 en la atmósfera, que era de 0,018 % al final de la última glaciación, subió a 0,028 % hacia 1800 y hoy es, como indica la tabla I, de 0,033 %. Si se observan datos más recientes (figura 12), resulta claro que, sobre la tendencia creciente de la concentración de dióxido de carbono, se superponen dos incrementos bien diferenciados: uno en las proximidades de 1880, que señala el comienzo de la denominada revolución industrial, cuando el desarrollo por Watt de la máquina de vapor supuso el comienzo de la industrialización de Occidente y dio lugar a un tremendo incremento en el consumo de madera y de carbón para alimentar la creciente industria. El segundo incremento se

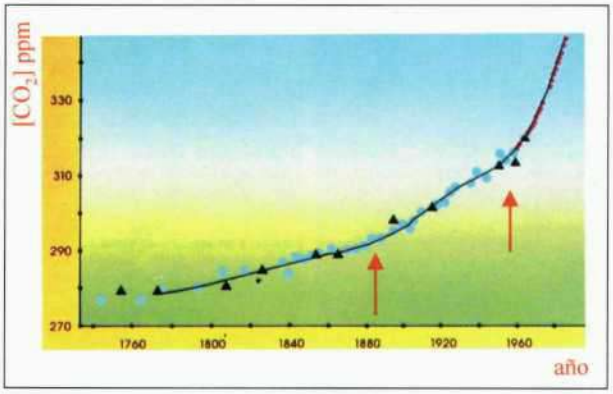

Fig. 12.– Evolución de la concentración de dióxido de carbono en los últimos 250 años.

produce tras el fin de la Segunda Guerra Mundial, cuando tras la reconstrucción europea y de Japón, y el consiguiente proceso de bonanza económica, se produjo casi una segunda revolución industrial. De tal manera que en un esquema algo simplista pero indudablemente válido, y aceptado ya por la mayoría de los científicos, puede decirse que hay, efectivamente, una correlación entre el incremento en la temperatura de la atmósfera y la concentración de esos gases, denominados a menudo «de efecto invernadero» junto con los clorofluorocarburos, el ozono troposférico y algunos otros (tabla II). Cabe señalar, no obstante, el papel capital del agua en este proceso, aunque por su elevada y muy variada concentración en la atmósfera poco puede influirse en ella.

Tabla II. Concentración de los *gases de efecto invernadero* y tiempo medio de vida en la atmósfera (τ,(*))
(IPCC, segundo informe, 1995)

	CO_2 ppm(1)	CH_4 ppb(2)	N_2O ppb	CCl_2F_2 ppt(3)	$CHClF_2$ ppt	CF_4 ppt
Concentración preindustrial	~280	700	275	0	0	0
Concentración en 1994	358	1721	311	503	110	70
τ, años	50-200	12(3)	120	102	12	50.000

(*) Tiempo que tarda en ser eliminado de la atmósfera por alguna reacción química.
Ppm: 1 en 10^6, por ejemplo mg por kilo.
Ppb: 1 en 10^9, por ejemplo mg por tonelada.
Ppt: 1 en 10^{12}, por ejemplo µg por tonelada.

PRODUCCIÓN DE CO_2

Por lo que se refiere al propio CO_2 existen dos importantes equilibrios químicos naturales entre, por un lado, la atmósfera y el mar y la vegetación por otro. Cada uno de esos equilibrios supone de hecho el intercambio anual de unos cien mil millones de toneladas métricas de dióxido de carbono. La contribución antrópica si se produce, y todos los indicios indican que sí se produce, supone un incremento sobre dicha cantidad natural. La cantidad de CO_2 producida anualmente por la actividad humana es del orden de un ocho por ciento del intercambio atmósfera vegetación, esto es, unos 8.000 millones de toneladas, lo que supone, aproximadamente, unas seis toneladas de dióxido de carbono por habitante y año. De esos 8.000 millones de toneladas, entre 1.000 y 2.000 se atribuyen a la deforestación, 3.500 van a la atmósfera; los mares retienen unos 2.000 millones y el resto, 1.500 a 2.000 millones de toneladas, es utilizado por las plantas en su crecimiento[3]. Sin embargo, dada la estrecha relación observada entre la producción industrial y la concentración de CO_2 en la atmósfera, es obvio que la contribución de los habitantes de la Tierra al calentamiento global debe ser muy desigual, por cuanto las diferencias en potencia industrial de los diferentes países también lo son. Efectivamente, los habitantes de Estados Unidos producen, por término medio, más del triple de la media, mientras que los de un país industrializado como Países Bajos, producen, por término medio, unas 10 toneladas anuales de CO_2. En Francia, que tiene el más importante parque de centrales nucleares del mundo en relación con su tamaño, cada habitante produce por término medio cuatro toneladas; la media de los habitantes de los países del denominado tercer mundo, y algo eufemísticamente llamados «países en desarrollo», sólo contribuyen con una tonelada de CO_2 por habitante, y año. España se sitúa, con 6,2 toneladas anuales por habitante, algo por encima de la media mundial, que es de seis. Sin embargo, el reparto de esa media entre las diferentes comunidades autónomas es tremendamente desigual y paradójico, a la par que injusto. Así, Asturias, Aragón, Castilla y León, Castilla-La Mancha y Galicia son, por este orden[4] las comunidades que más emisiones de CO_2, lanzan a la atmósfera, mientras que Valencia, Madrid y Baleares están muy por debajo de la media. Lo paradójico es que aquéllas producen la energía que consumen en las restantes comunidades; más aún, quitando Aragón, las demás están por debajo de la media de PIB por habitante; las comunidades más beneficiadas son Cataluña, La Rioja, Madrid y Baleares.

A la hora de recortar esos excesivos incrementos del CO_2 atmosférico a nivel mundial o local, surge un debate político, económico y social considerable y, de hecho, dado que la sociedad industrial está inevitablemente basada en el consumo energético, y que éste es casi exclusivamente de origen térmico, el problema de la reducción de gases de efecto invernadero es complejo y no hay todavía acuerdo internacional unánime...

Antes de seguir adelante sobre el tema político, merece la pena detenerse un momento a considerar con algún detalle las posibilidades que hay de modificar la estructura actual del sistema energético mundial: producción y consumo. Por un lado, se trata de disminuir el consumo energético. Por otro, de utilizar fuentes alternativas de energía. Un ejemplo de lo primero lo constituye la iluminación, que es responsable de un 25% del CO_2 producido en el mundo. Se ha estimado que si se sustituyen las lámparas de incandescencia, las bombillas, por tubos fluorescentes, se ahorraría hasta un 7% de energía, con lo que la iluminación eléctrica daría lugar a un 6% menos de CO_2 del que se produce actualmente. Pero también cabe un uso más racional de la energía, procurando no dilapidarla, recordando aquel tópico de que el ahorro de energía es una fuente de la misma.

En el lado de la producción, cabe recordar que la mayor parte de la energía utilizada por el hombre procede

[3] C. O'Driscoll, *Chemistry in Britain*, febrero 2000, pág. 31.
[4] *El calentamiento global en España*, F. Hernández Álvarez (ed.), CSIC, Madrid; citado por M. Germán en *Estratos*, primavera 2000.

de procesos de combustión. Así, por ejemplo, en el caso ya citado de los Estados Unidos, el reparto energético según las fuentes de energía utilizadas fue en 1998, el siguiente: petróleo, 39%; carbón, 23%; gas natural, 23%; lo que da nada menos que un 85% de energía de origen térmico. La energía eléctrica de origen nuclear supuso un 8% y el resto lo constituyen las energías renovables, que se reparten a su vez de la manera siguiente: hidroeléctrica, 50%; biomasa, 43% –que también es de naturaleza térmica, combustión–; geotérmica, 5%; solar, 1%, y eólica el resto, algo por debajo del 0,5%.

Por lo que se refiere a España, según los datos del Ministerio de Industria y Energía para 1998, la energía consumida procede de fuentes térmicas en casi un 80%; la de origen nuclear, un 14%; la hidráulica, un 3%, y las restantes renovables, en otro 3%.

Es obvio que no resulta posible, ni fácil, aun si existiera la voluntad política, pasar a no emitir CO_2 de la noche a la mañana, y tampoco las demás fuentes de energía citadas pueden desarrollarse mucho más. La situación es parecida en el caso de la Unión Europea y en Japón y aún peor en los restantes países donde la parte de energías renovables es generalmente muy inferior. Por otro lado, en un proceso de estabilidad económica como el actual, con economías en crecimiento en la mayoría de los países occidentales y con los gigantes poblacionales como India y China incrementando con rapidez su desarrollo, la situación no puede sino empeorar en lo que a las emisiones de CO_2 se refiere, a menos que se cambie la estructura social y económica de la humanidad, lo que es poco realista como propósito, por lo menos a corto plazo. Por ello no sorprende que las últimas predicciones del denominado «Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático» (IPCC), reunido en Shanghai en los primeros días de este siglo XXI, sean mucho más preocupantes que los anteriores, que dieron lugar al denominado Protocolo de Kioto de 1995, y que preveía relativamente modestas reducciones en la producción de los denominados gases de efecto invernadero y, en particular, de CO_2, pero cuyo protocolo no ha sido ratificado por un número de países suficientes como para hacerlo efectivo y eficaz.

En el texto del último informe del IPCC[5] se recogen afirmaciones como «de acuerdo con la evidencia más reciente, la mayor parte del calentamiento observado en los últimos cincuenta años se debe al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero» y por ello «se ha incrementado la temperatura media global de la tierra en unos 0,6 grados en los últimos cien años, unas cuatro veces más de lo que se creía anteriormente». Teniendo en cuenta las circunstancias actuales y las previsiones que pueden hacerse, parece que «de seguir la tendencia de incremento de producción de CO_2 y la deforestación progresiva de los bosques terrestres –que suponen un buen sumidero para el dióxido de carbono gracias al proceso natural de la fotosíntesis–, la temperatura media global podría crecer entre 1,5 y unos 6 grados de aquí al comienzo del siglo XXII». Esto constituye un incremento mucho mayor que el previsto en el anterior informe, el de 1995, que suponía que la subida de temperaturas estaría entre 1 y 3,5 °C y, más aún, no tiene precedentes en los últimos 10.000 años.

Cabe señalar también que en el mismo informe se afirma que es discernible una influencia humana en el clima –y en el calentamiento global–: La variación no posee sólo causas naturales y las actividades humanas son por lo menos parcialmente responsables del incremento térmico.

Ciertamente existen factores que pueden limitar el calentamiento global, como por ejemplo las erupciones volcánicas, que liberan partículas sólidas y gaseosas que pueden reflejar la luz solar, como en el caso reciente del volcán Pinatubo[6], y también los aerosoles y especies polucionantes antropogénicos, como el SO_2, procedente de la combustión de carbón o petróleo y derivados ricos en azufre, pero la opinión generalizada entre los científicos que componen el IPCC es que esos factores, si acaso, han contribuido a enmascarar el problema general del calentamiento imparable observado en las actuales condiciones.

El calentamiento global puede originar la fusión parcial, en el límite, total, de los casquetes polares. Aunque es obvio, dadas las diferencias de densidad entre agua y hielo, que la fusión de los icebergs flotantes no produciría incremento en el nivel del mar, la de los casquetes polares sí lo originaría, y de acuerdo con las estimaciones realizadas por el IPCC, esto podría suponer un incremento de entre quince y noventa centímetros en el nivel medio del mar a lo largo de los próximos cien años. Ello sería, evidentemente, nefasto para las regiones costeras y los deltas y, cabe recordar a este respecto, que muchas de las ciudades más importantes del mundo, como Nueva York, Barcelona, Amsterdam, Buenos Aires o Bombay, por citar sólo unos cuantos ejemplos, están situadas al borde del mar.

Por otra parte, podría suponerse que un incremento en la concentración de CO_2 fuera beneficioso para las plantas, que crecerían más y más deprisa. Sin embargo, los procesos de acopio de dióxido de carbono por la masa vegetal son complejos y no sólo dependen de la concentración de CO_2 sino también de la temperatura, del tipo de suelo, de nutrientes y fertilizantes, etc. De acuerdo con el IPCC, parece probado que un ligero incremento en la concentración de CO_2 podría ser beneficioso, pero a partir de un cierto exceso, que depende de muy diversos factores, ello sería perjudicial y las plantas no crecen. Se trata, no obstante, de un problema aún no bien conocido y

[5] www.ipcc.ch.

[6] J. M. Fuster Casas, «Vulcanismo y cambio climático», en *Las fronteras de la ciencia,* Real Academia de Ciencias (A. Martín Municio, dir.), Espasa Calpe, Madrid, 2000.

actualmente objeto de estudio. El incremento en la temperatura global media podría, no obstante, ser favorable para los países más septentrionales, en concreto Canadá y Rusia, que poseen inmensas extensiones de territorio sin cultivar debido a las actualmente bajas temperaturas en ellos reinantes. Sin embargo, en términos globales, el previsible incremento de la desertización en otras zonas de la Tierra compensaría dicho beneficio local. Este es también otro tema de difícil predicción y en curso de estudios de modelización.

SECUESTRO DEL DIÓXIDO DE CARBONO

Dado que se está produciendo un exceso de dióxido de carbono en la atmósfera, se ha pensado en la posibilidad de retirar parte del mismo y enterrarlo en antiguas minas, en pozos de petróleo y gas vacíos e, incluso, en el fondo del mar donde a las importantes presiones prevalentes se forman unos hidratos de dióxido de carbono que un grupo de investigadores de la Universidad de Sizhuoka en Japón estudia como posibles sumideros del exceso de CO_2. En este sentido, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica ha dedicado dos mil millones de pesetas para investigaciones en este tema y espera doblar el presupuesto para el año actual, 2001. En el momento presente se estima, sin embargo, que el costo de atrapar y retirar una tonelada de dióxido de carbono se sitúa entre 100 y 300 $ USA y se supone que para estos procedimientos sean rentables, es necesario rebajar esos costes hasta los 10 o 15 $/Tm, lo que se supone podría ocurrir, al ritmo actual de las investigaciones, hacia el año 2015.

Por su parte, la compañía estatal noruega «devuelve» al pozo de gas natural aproximadamente la mitad del dióxido de carbono que acompaña a sus extracciones de gas, y ello para ahorrar una ecotasa –o tasa ecológica– impuesta por ese país para la industria instalada dentro de sus fronteras en relación con la producción de CO_2. En el año 2000, esto supuso la no despreciable cantidad de 700.000 Tm de CO_2 menos a la atmósfera.

Otras líneas de investigación sobre este problema estudian la posibilidad de utilizar microorganismos, asociados generalmente al mundo vegetal, para eliminar el dióxido de carbono.

Todavía es pronto, sin embargo, para saber si esas técnicas solas o, más bien, conjuntamente, podrán resolver el problema de los gases de efecto invernadero, puesto que, como decíamos, se trata de varios, y no sólo de CO_2, por más que éste sea ingrediente esencial del asunto, el más importante tras la incontrolable agua. Más aún, de momento, los resultados de todos estos trabajos son insuficientes para asegurar si por esos medios se podría rebajar de manera significativa el exceso de dióxido de carbono existente en la atmósfera terrestre y, menos aún, si, como parece previsible, dicha concentración sigue aumentando.

A MODO DE CONCLUSIÓN

De lo que antecede, resulta evidente que hay que empezar por limitar y reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero y eso debe, además, ser complementado por las técnicas de secuestro, energías alternativas, etc. Además, hay que comenzar cuanto antes ya que en caso contrario los daños al sistema pueden ser irreparables y, en el límite, poner en peligro la propia existencia de vida en la Tierra, en particular de vida humana...[7].

[7] La decisión del presidente de Estados Unidos, G. W. Bush, tomada en abril de 2001, de no ratificar el Protocolo de Kioto supone una tremenda disminución de su posible eficacia y abre un período de incertidumbre y desesperanza sobre el futuro de las condiciones de vida en la Tierra.