

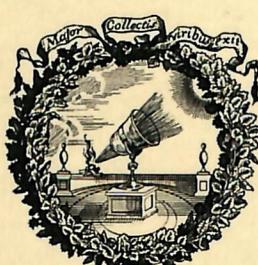
INSTITUTO DE ESPAÑA  
REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA DE ESPAÑA

**DESCARBONIZACIÓN Y SALUD  
¿POR QUÉ? ¿CÓMO? ¿QUIÉN?**

por el  
**EXCMO. SR. D. CARLOS SEOANE PRADO**  
Académico de Número

**DISCURSO**

leído en la solemne Sesión Inaugural del Curso Académico 2025,  
celebrada el día 14 de enero



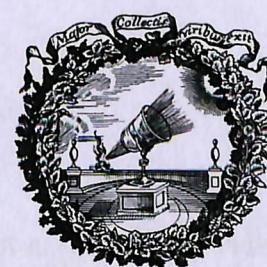
MADRID, 2025

INSTITUTO DE ESPAÑA  
REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA DE ESPAÑA

**DESCARBONIZACIÓN Y SALUD  
¿POR QUÉ? ¿CÓMO? ¿QUIÉN?**

por el  
EXCMO. SR. D. CARLOS SEOANE PRADO  
Académico de Número

**DISCURSO**  
leído en la solemne Sesión Inaugural del Curso Académico 2025,  
celebrada el día 14 de enero



MADRID, 2025

## SUMARIO

UN CONTEXTO PREVIO.....	7
1. ¿POR QUÉ? .....	11
2. ¿CÓMO? .....	30
3. ¿QUIÉN? .....	42
EPÍLOGO.....	73
BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE .....	74

ISBN: 978-84-123335-7-2  
Depósito Legal: M-26542-2024

EXCMO. SR. PRESIDENTE DE LA REAL ACADEMIA NACIONAL DE MEDICINA DE ESPAÑA,  
EXCMAS. Y EXCMOS. SRAS. Y SRES. ACADÉMICOS,  
DOCTORES PREMIADOS,  
SEÑORAS Y SEÑORES:

*«With all technology, there is a good side, a bad side, and a stupid side that you weren't expecting»*

Margaret Atwood

## UN CONTEXTO PREVIO

Quiere el azar de la cronología que, en años sucesivos, somos académicos de ciencias básicas, el Prof. Antonio Campos y yo mismo, los encargados de dirigirnos a ustedes en esta casa de la Clínica y la Cirugía.

Los problemas medioambientales se han abordado desde las perspectivas de diferentes especialidades, por varios ilustres académicos de Medicina: muy recientemente en cirugía, por el Prof. Rodríguez Montes y en diversos momentos por los Profesores Aguilar, de Física, Carreras, de Medicina Nuclear, Ribera en Geriatría, Gilsanz en Anestesia, Alvar en enfermedad tropical y González de Posada, desde la visión ética y social.

Trataremos hoy simplemente de presentar las bases químico-físicas, y su conexión con la vida y la salud, que subyacen

a las alteraciones atmosféricas generadas como consecuencia de las actividades de la humanidad contemporánea. Se trata de evitar el incremento del efecto invernadero en nuestro planeta, lo que ha venido a denominarse con el mediático, pero no muy afortunado, término de «descarbonización». Su encomiable, aunque no fácil, objetivo se dirige a controlar los efectos de esta civilización de combustiones masivas que, con otro llamativo nombre, Stephen Pyne ha bautizado como «Piroceno, dentro de la Era del «Antropoceno». Todo esto nos ha ido llevando a una general demonización del carbono, la «huella de carbono», elemento químico que los medios y la opinión pública parecen ya considerar un contaminante tóxico.

Seamos rigurosos: el dióxido de carbono no es solamente un componente natural e imprescindible de la atmósfera terrestre; es además, y sobre todo, el compuesto químico natural que permite la existencia de toda vida, también la humana, sobre la Tierra. Los compuestos químicos que forman nuestro cuerpo, y el de los animales y las plantas, proceden en última instancia de una reacción química realizada por otra molécula singular y extraordinaria, la clorofila, que permite a la fotosíntesis vegetal captar el dióxido de carbono en la atmósfera y convertirlo en hidratos de carbono asimilables por las plantas en el esencial ciclo químico natural del carbono (Figura 1). De carbono son también las restantes moléculas bioquímicas, las macromoléculas de las proteínas, el ADN de los genes, los tejidos y órganos de vegetales, animales y humanos, que derivan de esta prodigiosa molécula, el dióxido de carbono. Primo Levi ha escrito un delicioso y poético texto sobre el átomo de carbono y su dióxido en el ciclo de la vida, dentro de su colección de relatos «El Sistema Periódico».

El carbono, un elemento que se encuentra en cantidad ínfima en el universo, y en el propio planeta Tierra, se concentra precisamente en la vida y constituye casi un tercio de nuestro cuerpo (Figura 2).

No es, por tanto, un elemento químico del que podamos prescindir; no existiríamos sin él.

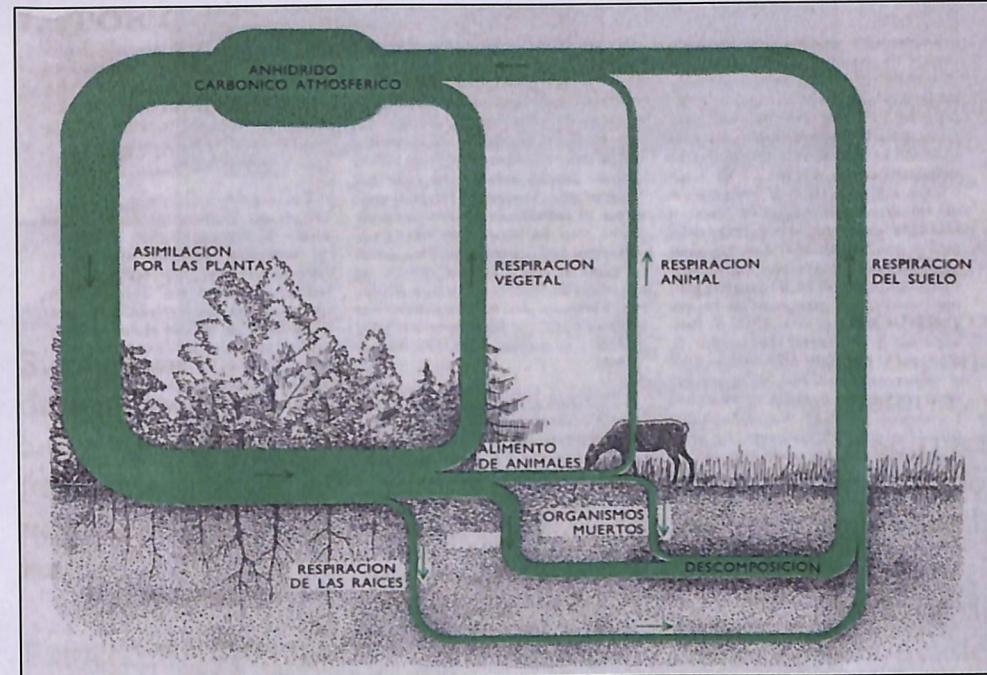


Figura 1. El ciclo natural del carbono.

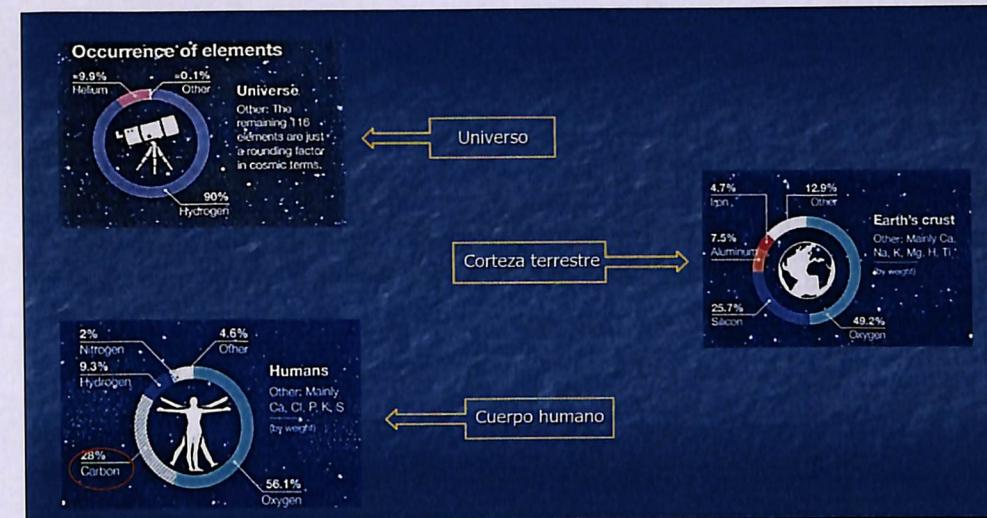


Figura 2. El elemento carbono en la naturaleza.



Figura 3. Una afirmación no científica.

Se trata solo, y nada menos, de evitar un excesivo incremento de la concentración de su dióxido en la atmósfera. Entristecen a un científico ver en nuestros parques naturales paneles afirmando que a «menos  $CO_2$ , más vida» (Figura 3), una barbaridad científica, incapaz de distinguir la totalmente imprescindible existencia de carbono y su dióxido del exceso del mismo; es el exceso, en su origen antropogénico, lo que debe preocuparnos.

Tres aspectos trataremos esta tarde, para dar una perspectiva más rigurosa:

- 1) Qué es la descarbonización y por qué hemos de hacerla.
- 2) Cómo podemos abordarla.
- 3) A quién, quienes, nos compete esa responsabilidad.

## 1. ¿POR QUÉ?

«Ver el planeta no solo como la tierra recibida de nuestros padres, sino como la que dejaremos a nuestros hijos»

J.L. Arsuaga

Estocolmo, invierno de 1903.

El Comité Nobel acaba de premiar a un gran químico sueco, Svante Arrhenius, creador de la fundamental teoría iónica, una de las claves para comprender la estructura de la materia, y autor de la esencial ecuación de Arrhenius por la que se rigen todos los procesos químicos, incluida la infinidad de reacciones enzimáticas que nos mantienen vivos al hacer funcionar la fisiología humana.

Arrhenius (Figura 4) había fundado la Sociedad Física de Estocolmo, una institución paralela a nuestras Reales Academias, donde se impartían conferencias científicas y se discutía sobre los últimos avances de la ciencia de entonces. Un asunto que les interesó especialmente era el origen de las apariciones y desapariciones sucesivas de las glaciaciones en la Tierra. El paisaje sueco ofrecía claras pruebas de formación y desaparición de glaciares, ríos y bosques que se habían destruido y formado de nuevo repetidamente. Se examinaron diversas teorías para explicarlo, en particular la relación entre las glaciaciones y los sutiles cambios en la órbita terrestre como la causa de los brutales enfriamientos y calentamientos del paleoclima de nuestro planeta, en ciclos de decenas, centenas o millares de miles de años.

El entonces joven Arrhenius se obsesionó durante meses en un estudio pionero con complejísimos cálculos meteorológicos y climáticos, que le costaron ser irreversiblemente abandonado por su recién embarazada esposa, Sofía Rudbeck, también brillante química, y, según sus contemporáneos, mujer de arrebatadora belleza.



Figura 4. Svante Arrhenius.

Arrhenius se centró en ese componente químico natural de la atmósfera, el dióxido de carbono, cuya molécula los químicos representamos como  $\text{CO}_2$ , que tiene la curiosa propiedad de «atrapar calor»<sup>1</sup>, que él ya conocía, aunque sin comprender bien la causa de la absorción infrarroja y las longitudes de onda en que ocurría para esta molécula. La Química no había avanzado aún lo suficiente. ¿Sería tal vez la variación natural de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera el motivo de esas prehistóricas oscilaciones térmicas del planeta que creaban y destruían glaciares?

<sup>1</sup> Un interesante precedente es el experimento de la norteamericana Eunice Newton Foote.

Al hacer pasar luz solar a través de dos ampollas, una llena de aire y otra en la que había hecho el vacío, comprobó que la primera se calentaba más que la segunda. Concluyó, correctamente, que el aire o quizás alguno o algunos de sus componentes, eran capaces de atrapar calor de la radiación solar.

Ideó para ello el primer y rudimentario modelo climático basado en los datos de temperatura disponibles en diferentes puntos del planeta e hizo uso del bolómetro, un instrumento para medir radiación infrarroja inventado por el astrónomo norteamericano Samuel Pierpont Langley, Secretario de la Smithsonian Institution. Realizó en solitario y sin ayuda, pues no existían ordenadores ni calculadoras<sup>2</sup>, decenas de miles de cálculos sobre el sistema atmosférico, con las interacciones y retroalimentaciones de un gran número de parámetros. Corresponden estos momentos, finales del siglo XIX, a un enorme incremento del uso del carbón tras la revolución industrial y la consiguiente emisión masiva de dióxido de carbono a la atmósfera. Arrhenius calculó qué si la concentración de este gas se doblase, la temperatura media global subiría entre 2 y 4 grados centígrados.

Fue este un gran logro para su época, pues los más precisos datos actuales indican un aumento entre 2,5 y 4 grados para esa duplicación en dióxido de carbono. Sus resultados parecen aún hoy extraordinarios, pues sabemos que las glaciaciones son el resultado de una compleja combinación de cambios en la órbita terrestre, las variaciones de actividad solar y, en efecto, las variaciones de la concentración atmosférica de dióxido de carbono. La conclusión final de Svante Arrhenius fue, entonces, optimista: el clima cambiaría a mejor y en Suecia dejaría de hacer tanto frío. «*Nuestros descendientes serán más felices bajo un cálido cielo*». Una felicidad, en todo caso, distante, pues estimó en 3000 años el tiempo que tardaría en duplicarse la cantidad de  $\text{CO}_2$  atmosférico. Por desgracia, no es así. Si las cosas continúan al ritmo actual, tal duplicación podría alcanzarse en décadas.

<sup>2</sup> Cabe aquí especular que, de haber tenido mayor comunicación con la ciencia y técnica españolas, tal vez Arrhenius hubiese podido conocer las «máquinas algebraicas» y, eventualmente, el «aritmómetro electromecánico» de Leonardo Torres Quevedo, cuyos extraordinarios inventos han sido sistematizados y difundidos por González de Posada y González Redondo.

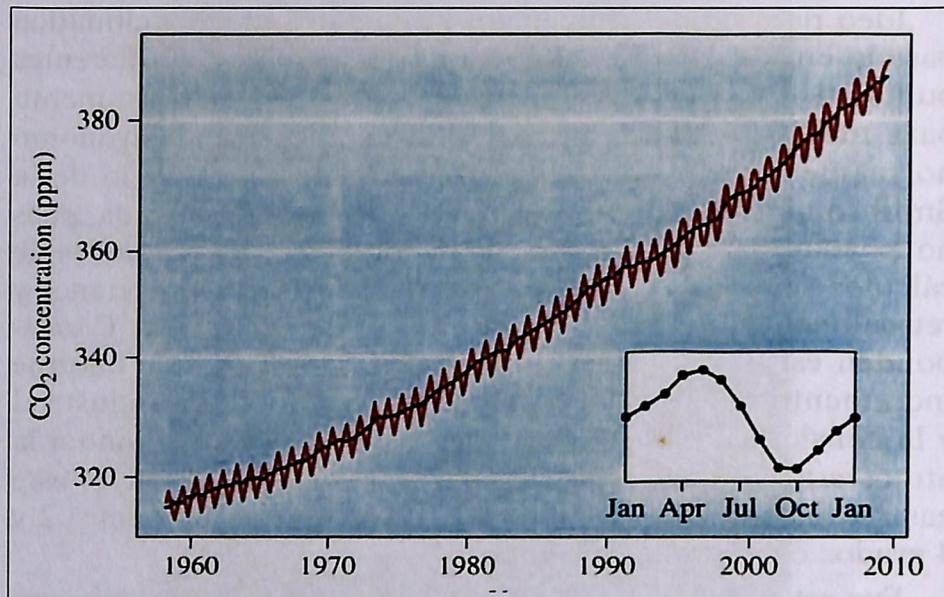


Figura 5. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

Desde los años cincuenta del siglo XX, David Keeling, un meteorólogo que trabajaba en Hawaii, fue tomando en Mauna Loa, lejos de focos de contaminación, muestras de aire y analizando su contenido de CO<sub>2</sub>. Construyó con ello un gráfico, la curva de Keeling (Figura 5), que muestra que el valor medio anual ha subido, y sigue subiendo, de forma continua hasta la actualidad. Desde un valor de menos de 300 partes por millón (0,03%) de CO<sub>2</sub> al inicio de sus medidas, alcanzó 390 ppm en los años 2000. Keeling observó también que se producían oscilaciones con las estaciones del año, pues las plantas incrementan o reducen su actividad fotosintética, y con ello la captación de CO<sub>2</sub>, según varía la insolación de verano a invierno.

Al CO<sub>2</sub>, sabemos desde Arrhenius, se debe parte del efecto invernadero natural con que la atmósfera mantiene una temperatura habitable en la superficie terrestre, sumado al efecto debido al vapor de agua. Sin las grandes concentraciones de dióxido de carbono en nuestra atmósfera primigenia no habría aparecido la vida.

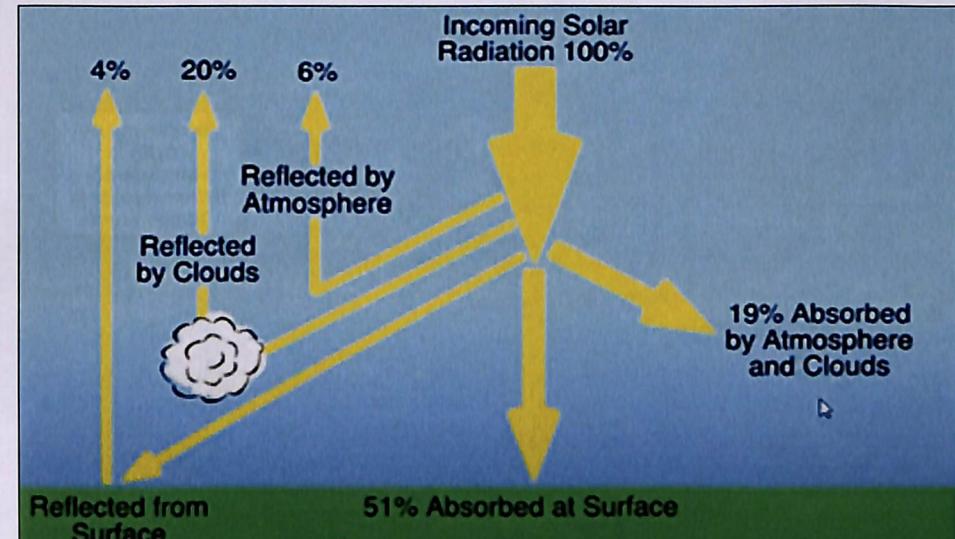


Figura 6. Albedo medio de la Tierra.

Hoy entendemos bien este efecto invernadero natural. La Tierra absorbe solo el 70% de la radiación solar que recibe, con un albedo medio del 30% que devuelve al espacio (Figura 6). Pero ese 30% de radiación es reemitiida principalmente a longitudes de onda más largas, en el espectro infrarrojo. Y esa es la clave: la molécula de CO<sub>2</sub>, a través de la vibración cuántica de sus enlaces covalentes, es capaz de absorber radiación infrarroja. El CO<sub>2</sub> presente en el aire absorbe aproximadamente la mitad de la radiación infrarroja que escapa con longitudes de onda comprendidas entre 14 y 16 μm, y una importante parte entre 12-14 μm y 16-18 μm, justamente dentro del rango de longitudes de onda que la superficie terrestre reemite. Por ello, parte de la radiación «rebotada» por la superficie terrestre es retenida por la atmósfera y al espacio retorna solo una parte de la radiación reemitida por la Tierra. Una subida de temperatura, como en un invernadero, es el resultado (Figura 7).

Así pues, el efecto invernadero existe como fenómeno natural debido a esta absorción infrarroja del dióxido de carbono y del agua en la atmósfera, gracias a lo cual la superficie terrestre no está permanentemente congelada y es apta para la vida.

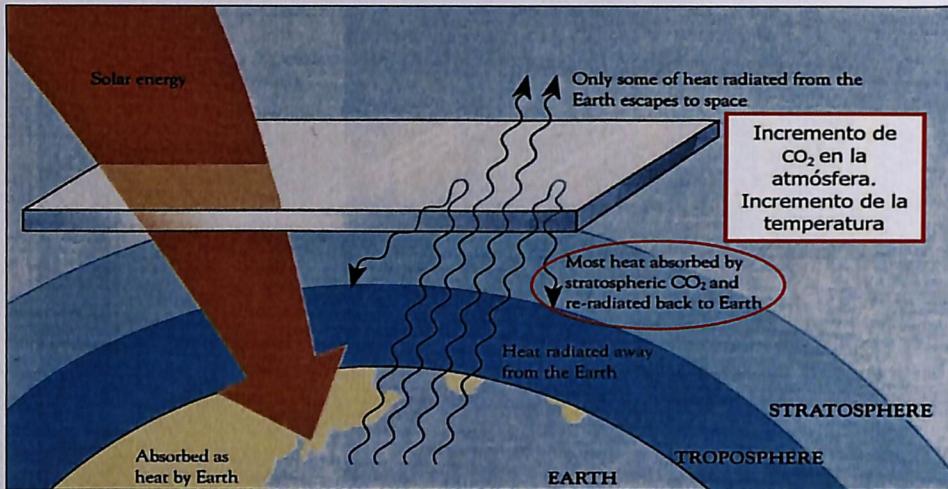


Figura 7. Radiación solar y efecto invernadero.

Conviene señalar que el principal factor en el efecto invernadero natural es el agua, tanto la contenida en las nubes como el vapor de agua invisible que contiene el aire. Dependiendo de zonas geográficas, entre el 50 y el 70% del efecto invernadero se debe al agua atmosférica. Su cantidad natural es tan enorme que la actividad humana no le afecta. El resto del efecto invernadero se debe a otros gases que contribuyen ese 30-50% restante (Figura 8), pero son generados por la actividad humana y en su presencia en la atmósfera sí que tenemos influencia. El CO<sub>2</sub> es, con mucho, el principal entre ellos. Le siguen el metano, el óxido nitroso y los gases fluorados, conocidos como CFCs.

Por tanto, si seguimos aumentando la cantidad de CO<sub>2</sub>, la temperatura subirá más. El hecho experimental es que, desde 1850, la temperatura media se ha elevado en 0,5°C aproximadamente (Figura 9).

Naturalmente, en este proceso es crucial la potencia de la radiación solar que incide sobre la Tierra, y esta no es constante. El Sol tiene ciclos periódicos y se ha estudiado la correlación de la potencia solar cíclica con la temperatura terrestre media durante un siglo.

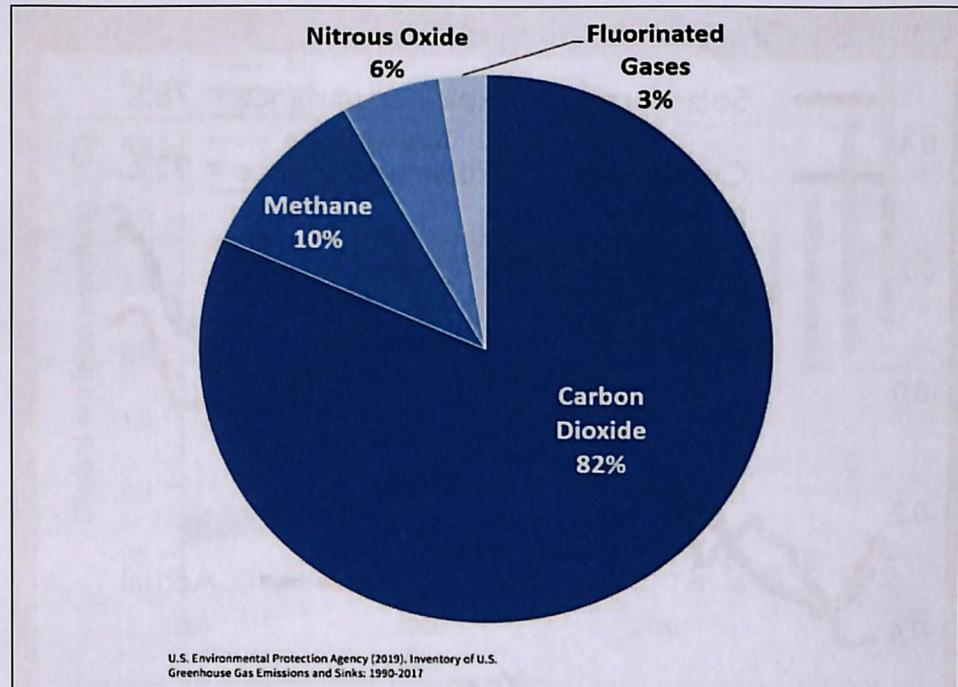


Figura 8. Contribución de gases invernadero con origen antropogénico.

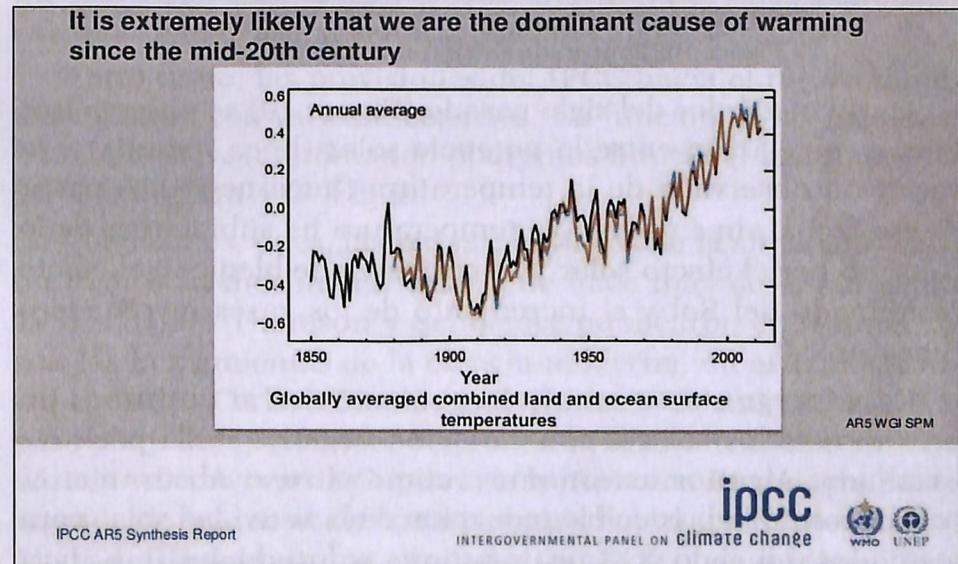


Figura 9. Elevación de temperatura observada desde 1850.

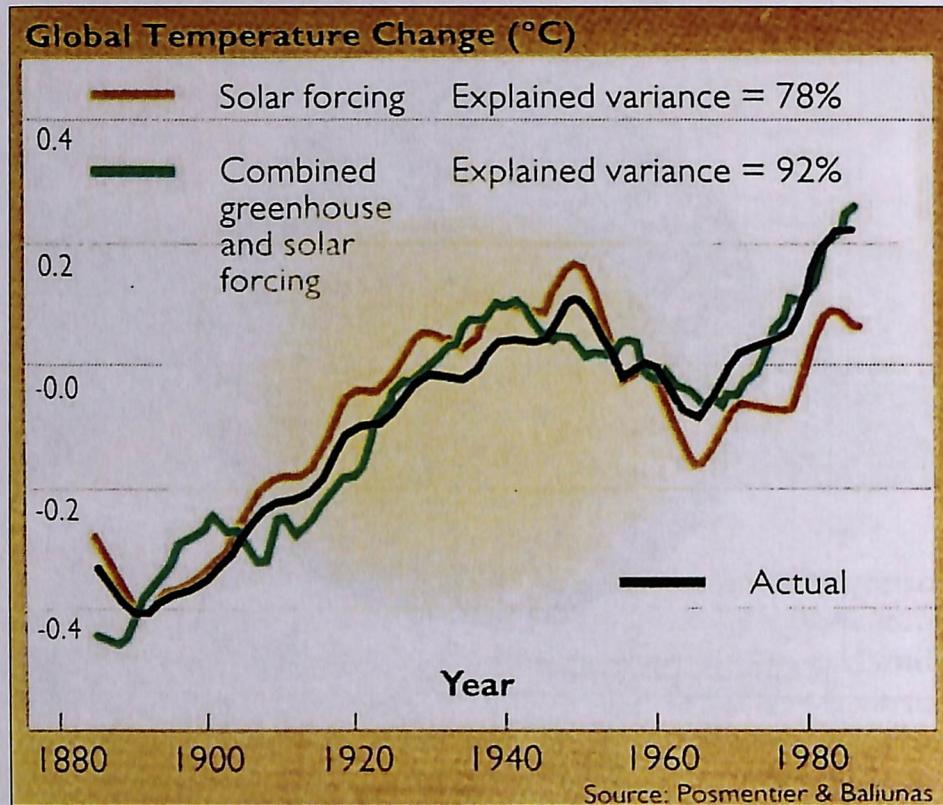


Figura 10. Temperatura real frente a efecto solar.

Hasta mediados del siglo pasado (Figura 10) se observa una buena correlación entre la potencia solar (línea naranja) y la variación observada de la temperatura (línea negra). A partir de esa fecha, sin embargo, la temperatura ha subido más de lo causado por el efecto solar y se corresponde bien con el efecto combinado del Sol y el incremento de los gases invernadero (línea verde).

Cabe preguntarse entonces qué ocurrirá si entramos en próximos ciclos solares con variación negativa de la potencia irradiada. Algunos astrónomos, como el ruso Absusamatov, basándose en la predecible reducción de la actividad solar para mediados del siglo XXI, estiman que se producirá una clara disminución de la temperatura. Durante un tiempo, la gran

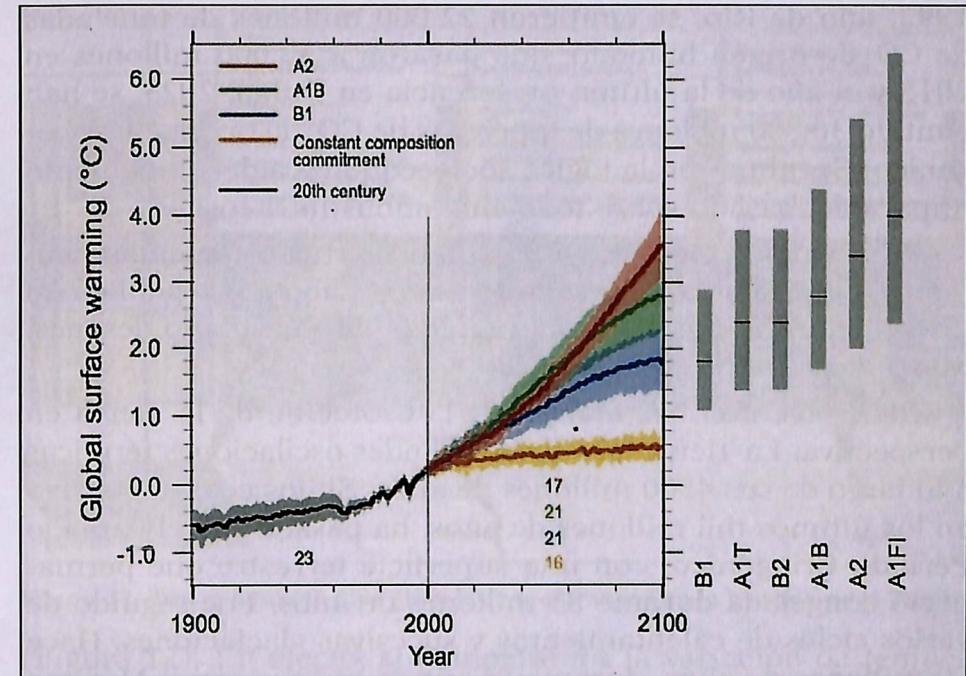


Figura 11. Distintos niveles de calentamiento según posibles escenarios.

inercia térmica de los océanos la amortiguará pero, según sus cálculos, empezaría a sentirse hacia el 2060. Veremos.

Entre tanto, las previsiones del IPCC hacia el futuro inmediato juegan con varios escenarios. En función de las medidas, o no, que se vayan tomando podremos limitar el incremento a 0,5°C o llegar a 4°C (Figura 11).

Conocemos, pues, las bases científicas de la situación, pero no hemos hecho mucho caso. Fue hace más de 40 años, en 1981, cuando Thomson y Schneider publicaron en Nature, ya con las herramientas de la ciencia moderna, un artículo seminal titulado «Carbon Dioxide and Climate: Ice and Ocean», que pasó muy desapercibido. Naciones Unidas tardó más de una década en convocar la Cumbre de la Tierra en Río, alegremente seguida de una serie de conferencias climáticas: Kyoto, Roma, Madrid, Glasgow, Dubai, preñadas todas de buenas intenciones y pomposas declaraciones políticas. Pero lo cierto es que, en

1992, año de Río, se emitieron 22.000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> de origen humano, que pasaron a 32.000 millones en 2015 y el año de la última conferencia en Dubai, 2023, se han emitido 36.800 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> de origen antropogénico. Seguimos en la lógica socioeconómica del crecimiento imparable, basado sobre todo en combustibles fósiles.

Y los valores medios de dióxido de carbono siguen aumentando. El NOAA Earth System Research Laboratory publicó un valor de 420,52 ppm en Mayo de 2023 y solo un año después, Mayo de 2024, ha subido a 423,43 ppm.

Debemos, no obstante, poner la evolución de la Tierra en perspectiva. La Tierra ha sufrido grandes oscilaciones térmicas a lo largo de sus 4500 millones de años. Si nos centramos solo en los últimos mil millones de años, ha pasado por el llamado Periodo Criogénico, con una superficie terrestre que permaneció congelada durante 85 millones de años. Fue seguido de varios ciclos de calentamientos y sucesivas glaciaciones. Hace 90 millones de años, durante lo que se conoce como Máximo Térmico del Cretácico, los océanos eran baños calientes. Pero incluso muy recientemente en nuestra propia era, el Cuaternario, ha habido cambios drásticos, que han supuesto varias glaciaciones, seguidas de sucesivos calentamientos sin contribución humana, durante los últimos 2,5 millones de años. Hace solo 12.000 años que el fin de la, hasta ahora, última glaciación permitió el comienzo de lo que llamamos «civilización».

El clima es muy complejo, lleno de incertidumbres. Hay cosas que sabemos, cosas que ignoramos... y cosas que ni siquiera sabemos que ignoramos. Por ejemplo, las razones precisas por las cuales en el periodo Ordovícico, dentro del Paleozoico, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera era entre 3000 y 9000 ppm, hasta 20 veces las de nuestra época, pero con un incremento limitado de la temperatura, probablemente debido a una menor actividad solar y a diferencias en la órbita terrestre en esa era.

Pero si sabemos cuál es la diferencia respecto a esas variaciones térmicas de eras anteriores: el ritmo del cambio

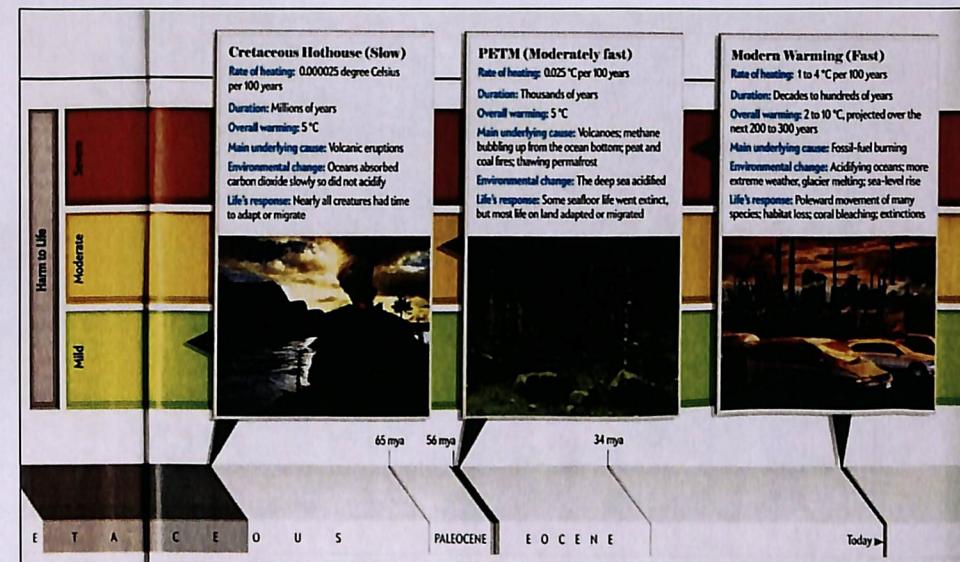


Figura 12. Tres calentamientos globales comparativos en la historia de la Tierra.

(Figura 12). En efecto, si comparamos la variación de temperatura y la duración del proceso, vemos como en el Cretácico un calentamiento de 5°C ocurrió entre los 120 y 90 millones de años; otro incremento de esos mismos 5°C hasta llegar al PETM (Paleocene-Eocene Thermal Maximum) fue 1000 veces más rápido y produjo mucho más serias consecuencias, y aun así requirió varios miles de años. Ambos causaron grandes alteraciones ecológicas, pero muchos seres vivos, sobre todo en el Cretácico, tuvieron tiempo de adaptarse o evolucionar a nuevas especies adaptadas a las cambiantes condiciones climáticas.

En ciclo actual, si las peores predicciones se cumplen, el incremento transcurriría en un rango de décadas (1-4°C en un siglo), un tiempo demasiado escaso para adaptarse y con consecuencias mucho más drásticas para los seres vivos que actualmente poblamos la Tierra.

Es cierto también que en el último milenio ha habido variaciones menores, que los meteorólogos denominan «anomalías climáticas», en ciclos de varios siglos. Centrada en los siglos XVI-XVII se produjo la llamada «pequeña edad

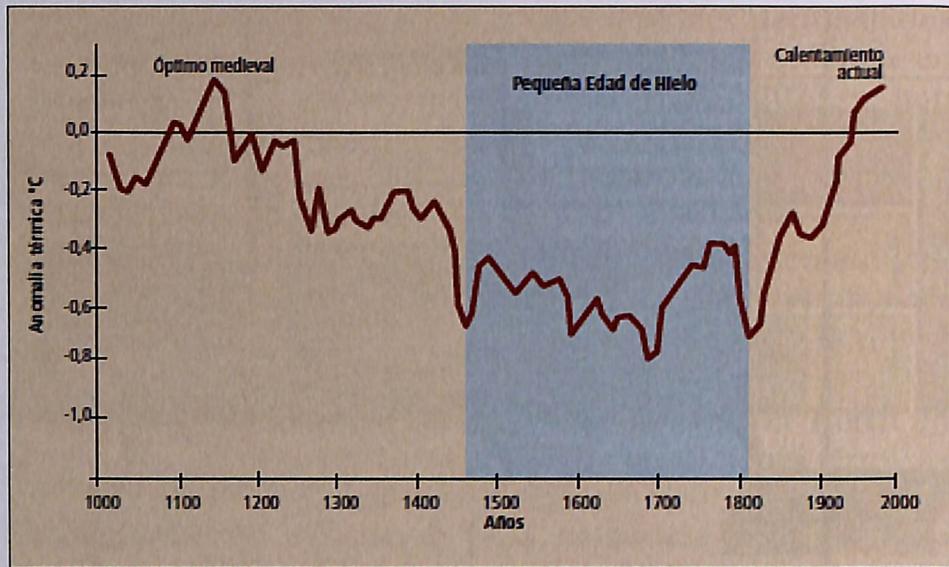


Figura 13. Del máximo térmico medieval a la pequeña edad de hielo.

de hielo» (Figura 13), que aparece frecuentemente reflejada en los paisajes helados de pintores de la época, como en los conocidos cuadros de Peter Brueghel El viejo (Figura 14), y que supuso un enfriamiento medio de 1°C desde el máximo medieval del siglo XII.

A la templada situación térmica de ese máximo medieval corresponde la reciente aparición de asentamientos vikingos en Groenlandia, visibles ahora por la reducción de sus glaciares. Eran construcciones de madera, que parecen probar que el clima de entonces hacia de Groenlandia un lugar habitable en el que construir aldeas.

Cabe preguntarse como conocemos lo ocurrido hace centenares o miles de años, la paleoclimatología. La clave está en los hielos polares (Figura 15); la profundidad de cada capa de hielo se corresponde con un determinado periodo cronológico y la concentración de CO<sub>2</sub> en el hielo de cada nivel permite correlacionarla con la que tenía la atmósfera en ese periodo.

Los niveles actuales (Figura 16) son los mayores de los últimos 800.000 años.



Figura 14. «Cazadores en la nieve». Pieter Brueghel El Viejo, 1565.

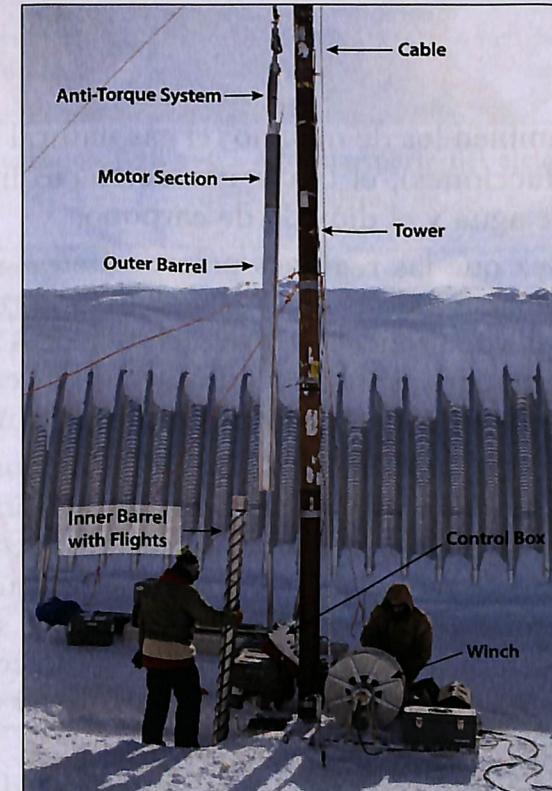


Figura 15. Técnica de exploración de hielos polares.

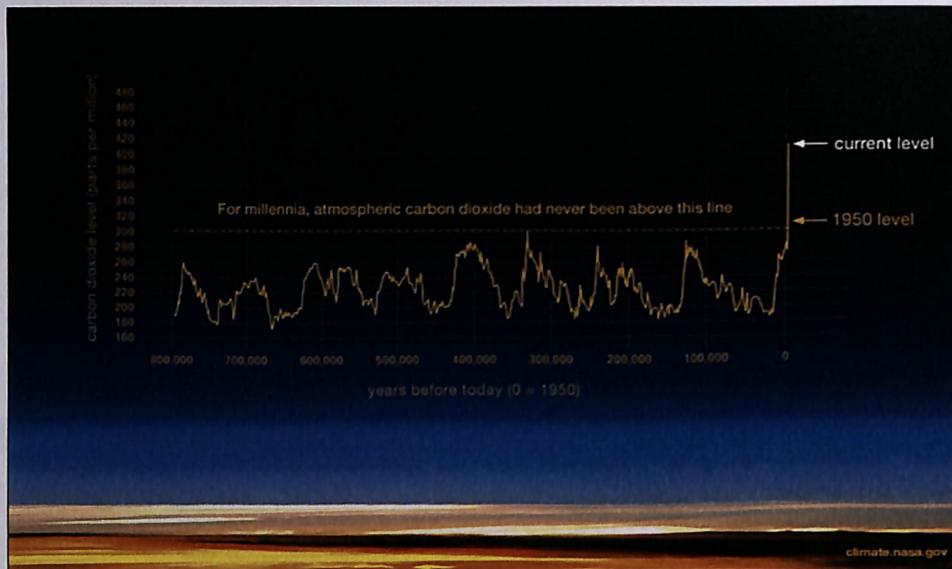


Figura 16. Concentración atmosférica de dióxido de carbono durante 800.000 años.

Altos son también los de metano (el gas natural de nuestras cocinas y calefacciones), el tercer gas de efecto invernadero, tras el vapor de agua y el dióxido de carbono.

La última vez que las regiones polares fueron más cálidas que hoy parece haber sido hace 125.000 años y la reducción de hielos polares elevó entonces el nivel del mar de 4 a 6 metros. Los datos paleoclimáticos indican que el ritmo de calentamiento del último siglo es inusual, al menos en 1300 años.

La razón de este fenómeno es que los humanos hemos alterado el ciclo químico natural del carbono. Gigantescas cantidades de este elemento en forma de carbón, petróleo y gas natural, producto de masas vegetales y plancton, que quedaron enterradas en anteriores eras geológicas, están saliendo de nuevo a la atmósfera (Figura 17). Lo hacen como consecuencia de su combustión para abastecer a una sociedad tecnificada, creciente y hambrienta de energía.

Proyectando este crecimiento de emisiones de pasado a futuro (Figura 18), de nosotros depende despejar la incógnita

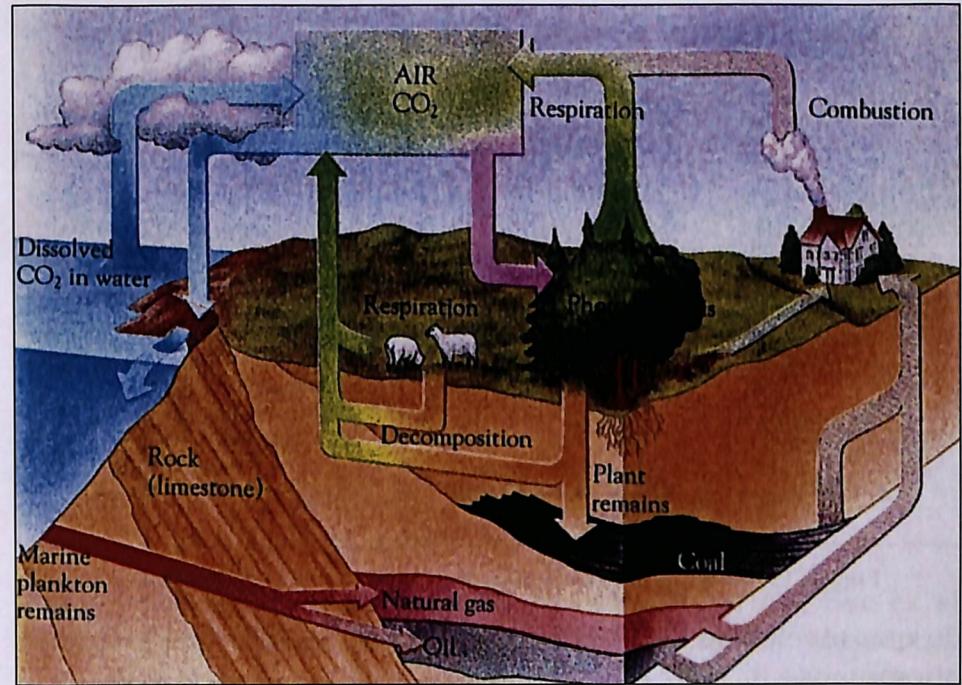


Figura 17. El carbono fósil entra a formar parte del ciclo natural a través de la atmósfera.

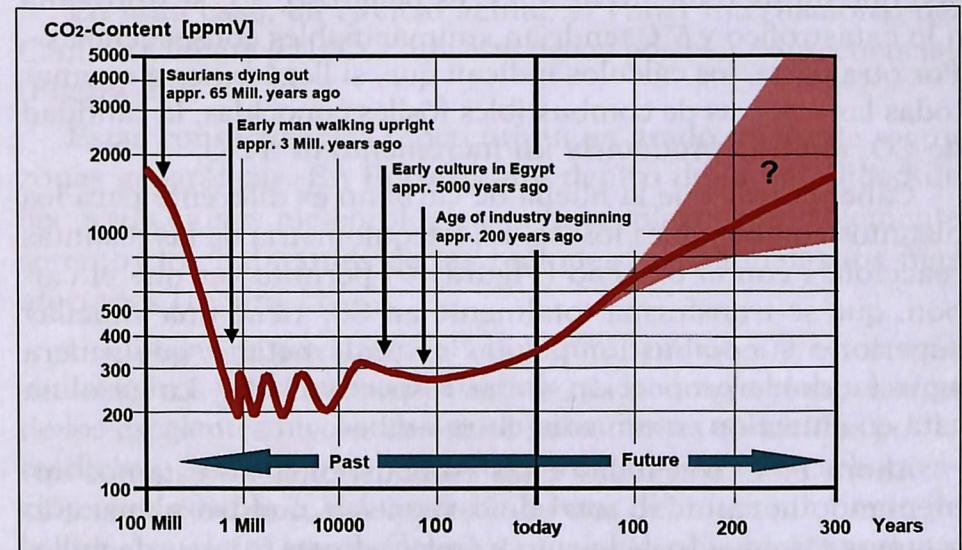


Figura 18. Del pasado conocido al futuro que forjemos.

### CARBÓN:



### GAS NATURAL:



### GASOLINA:



Figura 19. Reacciones de combustión de los combustibles fósiles.

de que niveles de  $CO_2$  hemos de alcanzar, según qué y cuánto quememos.

Si no se controla este aumento de  $CO_2$ , los recientes estudios, de la Scripps Institution y la Universidad de Texas concluyen que un incremento de 1,5°C es peligroso, 3°C se aproxima a lo catastrófico y 5°C tendrían «inimaginables consecuencias». Por otra parte, los cálculos indican que, si llegásemos a quemar todas las reservas de combustibles fósiles conocidas, la cantidad de  $CO_2$  emitida produciría un incremento de 11°C.

Cabe indicar que la huella de carbono es diferente para los distintos combustibles fósiles. La estequiometría de las distintas reacciones con el oxígeno (Figura 19) permite ver que el carbono, que se transforma totalmente en  $CO_2$ , tiene una «huella» superior a la combustión del gas natural, metano, que genera agua en doble proporción molar respecto al  $CO_2$ . La gasolina está en situación intermedia entre ambos.

Ahora bien, con todas estas combustiones no estamos aumentando la cantidad total de carbono de nuestro planeta; lo estamos cambiando de lugar, sacándolo de sus tumbas de millones de años para, en forma de gas  $CO_2$ , pasarlo a la atmósfera

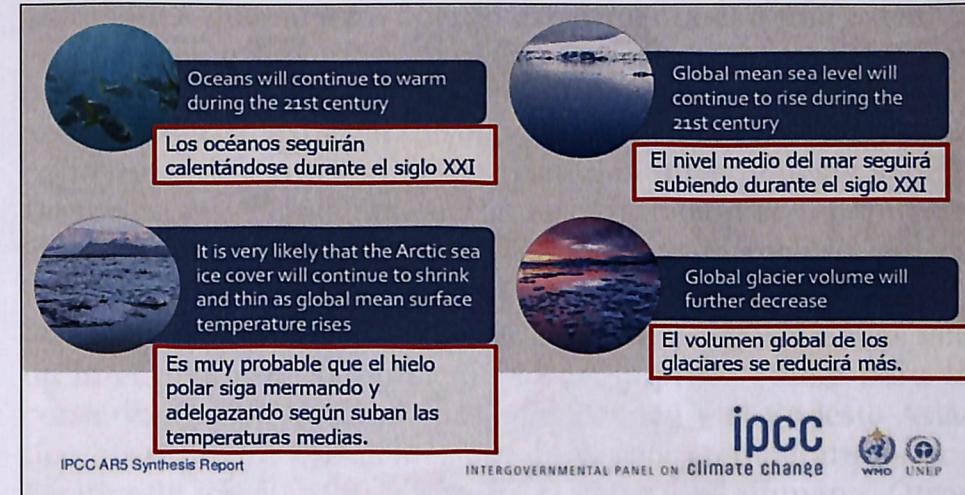


Figura 20. Efectos climáticos previsibles.

tras combinarlo con el oxígeno en la combustión. Ese es el riesgo; el carbono no entra ni sale del planeta. La «descarbonización» que pretendemos tampoco será una eliminación de carbono. Será, también, una mudanza de localización física y, principalmente, química.

En todo caso, en el ciclo actual, el Panel Internacional del Cambio Climático (IPCC) advierte de las posibles consecuencias (Figura 20):

Estas consecuencias repercutirán en grado diferente según zonas geográficas. En Europa, aún dentro de la falibilidad de las predicciones meteorológicas a largo plazo, probablemente seremos los habitantes de las regiones meridionales los más afectados (Figura 21).

Un último y fundamental ¿por qué?, previo a efectos más catastróficos y visiones apocalípticas, es la simple conservación de los excelentes niveles de salud, nunca antes conocidos por la medicina. Sin duda se beneficiarán de cuanta «descarbonización» sea posible o, más correctamente, del mantenimiento de los niveles de  $CO_2$  atmosféricos a que los ecosistemas terrestres estamos acomodados.

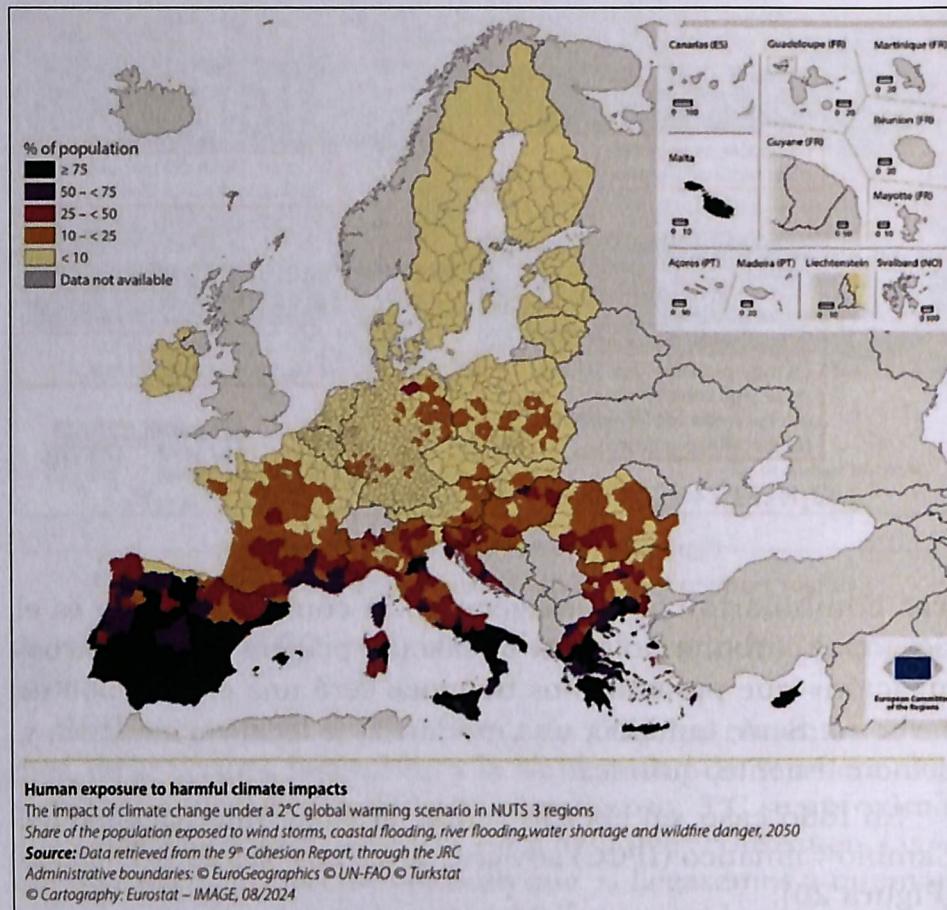


Figura 21. Regiones europeas para las que se prevén mayores efectos adversos.

Del exceso térmico derivan efectos fisiológicos y de salud muy importantes. Para un organismo no poiquilotermo, como el humano, un aumento excesivo de la temperatura ambiente, especialmente acompañado de alta humedad derivada de la evaporación de mares a consecuencia altas temperaturas, puede llevar al límite los mecanismos de vasodilatación y sudoración. Son estos los que, en condiciones normales, nos permiten mantener nuestra imprescindible homotermia, como prueban los llamados «golpes de calor». Se estima que las olas de calor de 2023 en Europa causaron 15.000 muertes. La reacción

automática que nuestro cuerpo experimenta con una excesiva vasodilatación superficial para intentar, sin éxito, refrigerarnos puede llevar a la isquemia en órganos internos como el intestino que, en caso extremo, resulta en daños a la pared intestinal con riesgo de extraversión de bacterias intestinales y sepsis. De forma más inmediata, en la deshidratación se incrementa el esfuerzo cardiaco con serias consecuencias, incluso letales, especialmente en ancianos.

Un medio ambiente adecuado a nuestra fisiología, más allá de la curación de la enfermedad, es imprescindible para la conservación de la salud. El Golfo Pérsico y el Sudeste Asiático alcanzan ya con demasiada frecuencia temperaturas por encima de los 50°C, al límite de la capacidad humana. Otros lugares podrían ser afectados por fenómenos atmosféricos extremos, tifones, huracanes o inundaciones. Algunos registros indican unos 12 eventos por año en zonas habitadas durante la última década, mientras que la media era de 5 en los años 90. Aunque parte de ello se debe a un incremento de población en áreas vulnerables, el resultado serán inevitables migraciones de lo que ya se llama refugiados climáticos. Vince, en tono dramático, ha escrito: «*Serás uno de ellos, o uno de los que los reciba*», aunque quizás pueda darse algún intercambio de poblaciones sin conflicto. Por ejemplo, la isla de Kiribati, en Micronesia, será muy posiblemente anegada, pues su superficie es muy próxima al nivel del mar; sus habitantes, si la abandonan, podrían hallar un buen destino en Australia, necesitada de mayor población, pero no será el caso general. Habrá que rediseñar infraestructuras que fueron construidas para el clima actual, trasladar ciertos asentamientos humanos y abandonar otros. Pero no solo los humanos nos veríamos afectados. Con el aumento de temperatura en latitudes templadas se observa, en animales y vegetales, una tendencia migratoria hacia el norte a mayores latitudes y también altitudes.

Razones, pues, suficientes para que la ciencia haya de investigar el camino hacia la descarbonización y la sociedad sepa cómo aplicarlo.

## 2. ¿CÓMO?

«The real problem of humanity is the following: We have Paleolithic emotions, medieval institutions and god-like technologies»

E.O. Wilson

Si la historia de la Tierra se escribiera en 10 volúmenes de 500 páginas, la vida superior aparecería en el último volumen y el *homo sapiens* solo lo haría durante la última página del último volumen. Incluso todos los homínidos han existido, a lo sumo, durante no más del 0,07% de la vida del planeta (Figura 22). Somos estos recién llegados quienes no queremos que cambien las precisas condiciones actuales, a las que la evolución nos ha adaptado. Otros seres, hoy ya inexistentes como los dinosaurios, también hubiesen deseado que no ocurriesen los cambios que los hicieron desaparecer, con especies nuevas ocupando su lugar. No olvidemos que la duración media de una especie animal en la Tierra parece haber sido de unos pocos millones de años.

¿Cómo preservar estas, para nosotros, ideales condiciones? Acudimos de nuevo al IPCC, que estima en 2°C el incremento máximo asumible para evitar consecuencias irreversibles (Figura 23), lo que exige reducir grandemente el CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero. No pueden negarse los muy profundos cambios que ello requiere, cuya viabilidad técnica, social, económica y política, junto con sus dificultades, ha sido recientemente examinada por Loach.

Estos son los objetivos, pero no estamos haciendo progresos reales para lograrlos. Aunque Estados Unidos y en especial la Unión Europea han reducido algo sus emisiones, en 2023 el mundo ha incrementado la generación de CO<sub>2</sub> hasta los mencionados 36.800 millones de toneladas y la misma España, con todas sus promesas políticas, ha subido casi un 7%, como han hecho China e India. Algunos autores hablan ya del «fracaso moral» ante el clima y la preocupación se ha reflejado también en recientes obras de ficción sobre un futuro distópico, con-

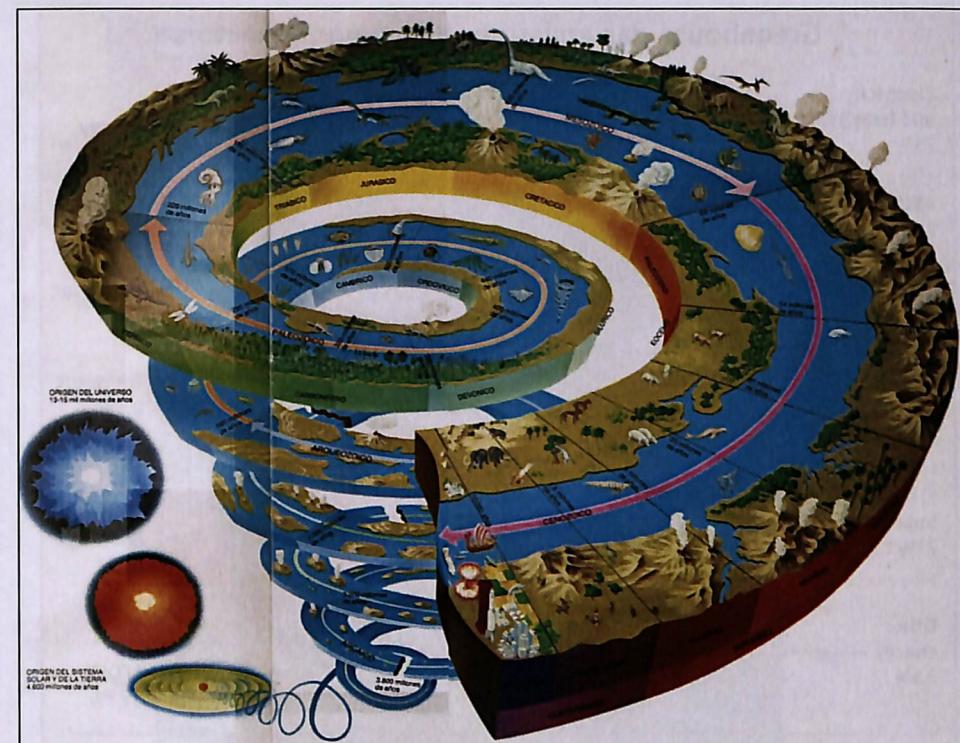


Figura 22. Una larga historia: del origen del universo al ser humano.

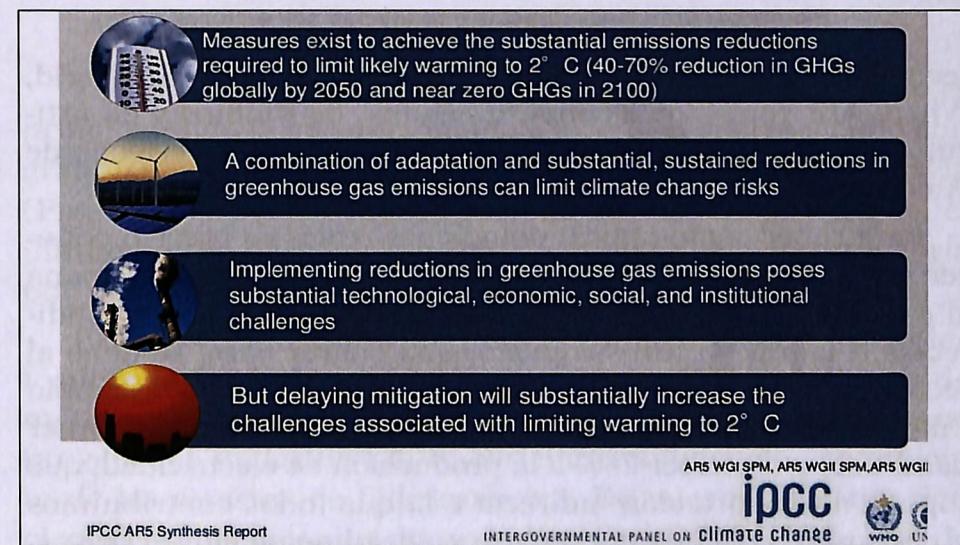


Figura 23. Propuestas del International Panel on Climate Change.

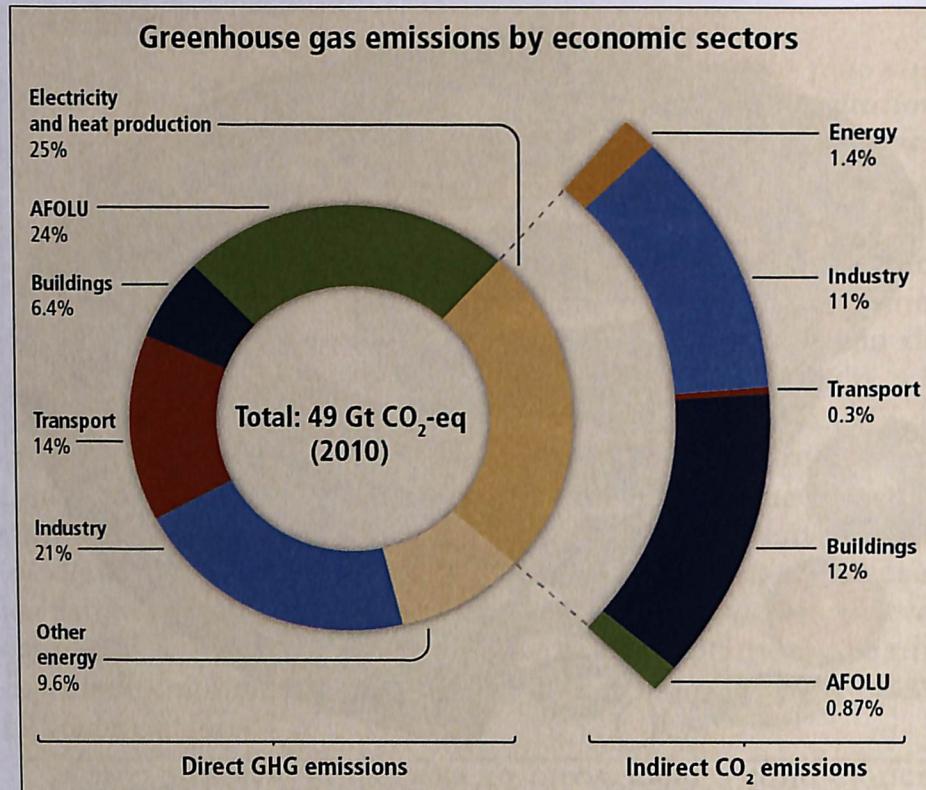


Figura 24. Emisiones directas e indirectas por sectores.

secuencia de desastrosos efectos climáticos: «Beautiful World, Where Are You?», de Rooney, o «Hum», de Phillips y en artículos como «Sea Change», de Jarvis o «Future Imperfect», de Waldman.

Para saber cómo aplicar soluciones reales es preciso conocer por sectores el verdadero origen de la aportación humana al efecto invernadero, tanto en emisiones directas como indirectas (Figura 24). *Grosso modo*, una cuarta parte se debe al sector industrial, otra cuarta parte a lo que el Panel del Cambio Climático denomina AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use) y un tercer 25% a la producción de electricidad, que supone una aportación indirecta a la que todos contribuimos al consumirla. El resto se reparte esencialmente entre el transporte en su conjunto y nuestros edificios.

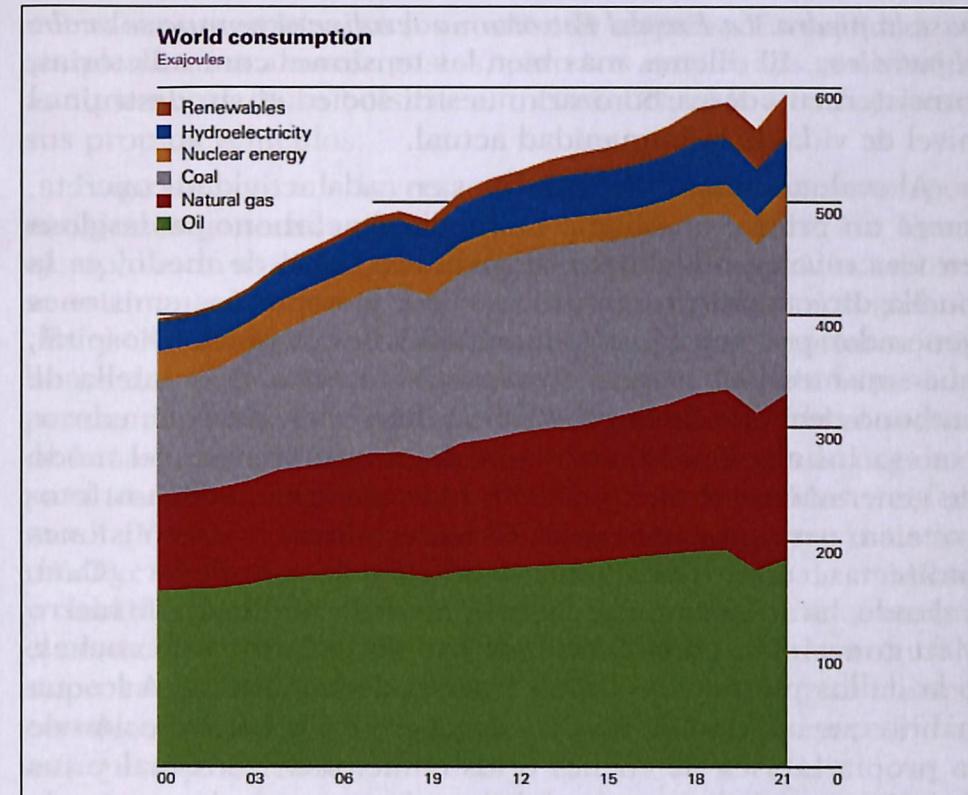


Figura 25. Evolución de las distintas fuentes de energía en el mundo.

Y la realidad es que los combustibles fósiles, responsables principales de la generación antropogénica, siguen siendo con grandísima diferencia nuestra fuente mayoritaria de energía (Figura 25), incluso con un incremento de su consumo en el último par de décadas, tan solo con una reducción transitoria por razones médicas durante la pandemia de COVID.

El aprovechamiento de nuevas fuentes de combustibles fósiles vía *fracking*, los incipientes, pero ubicuos, hidratos de metano submarinos o las ya conocidas arenas bituminosas, proyectan a un lejano futuro el siempre anunciado agotamiento de las reservas de hidrocarburos. De nuestra investigación científica y tecnológica depende hacer realidad la reflexión de la propia OPEP: «*La Edad de Piedra no terminó porque se aca-*

base la piedra. La Era del Petróleo no terminará porque se acabe el petróleo». El dilema, más bien las tensiones contradictorias, consisten en «descarbonizar» nuestra sociedad sin destruir el nivel de vida de la humanidad actual.

Al evaluar cuánto CO<sub>2</sub> emitimos en cada actividad concreta, surge un primer problema. La huella de carbono se desglosa en tres niveles o alcances. El primero, fácil de medir, es la huella directa del propio proceso; por ejemplo, las emisiones generadas por una fábrica de automóviles, o por un hospital, que son medibles *in situ*. El segundo alcance es la huella de carbono derivada de la producción de electricidad que consume esa instalación, lo cual depende, naturalmente, del modo de generación: térmica, nuclear, hidroeléctrica, eólica o fotovoltaica, pero nunca es nula. El tercer alcance, las emisiones indirectas, son extremadamente difíciles de cuantificar: ¿Cuál, y donde, ha sido la huella de carbono de la fundición de hierro y su conversión en el acero que utilizó la fábrica de coches, o la de los plásticos, o la fabricación de la pintura? A lo que habría que añadir cuánto CO<sub>2</sub> se generó en la construcción de la propia fábrica de coches o los edificios del hospital y sus quirófanos, y de las propias fábricas de cemento, de acero y de la infinidad de materiales empleados. Y la huella de carbono de transportar esos materiales a y desde las distintas manufacturas. Y la de las minas de pirita que suministraron la mena de hierro, y el cobre para los cables eléctricos, y el aluminio. Y la planta petroquímica que produjo el monómero para fabricar los plásticos de nuestro coche o la miríada de instrumentos médicos construidos con estos materiales. Y el combustible para el transporte de cada trabajador de toda esa cadena, cada día, a su puesto de trabajo.

Hemos de ser muy escépticos cuando una actividad, una empresa, una institución o un sector económico nos encomienda a bombo y platillo su excelente situación en «huella de carbono». Hay cada vez más ejemplos de lo que podríamos llamar «ecologismo de salón». Una importante empresa internacional acaba de anunciar que va a reducir su huella de carbono supri-

miendo a sus empleados los coches de empresa. En realidad, va simplemente a ahorrar gastos, pero sus empleados generarán, aunque ahora de su bolsillo, el mismo CO<sub>2</sub> al ir a trabajar con sus propios vehículos.

E igualmente a la inversa, cuando se culpa a un sector por emisiones generadas en servicio a otros sectores. Un buen ejemplo es la aviación, cuyas emisiones de dióxido de carbono se estiman en torno al 2,4 % del total antropogénico global. ¿Es el CO<sub>2</sub> generado en todos los vuelos que transportaron millones de mascarillas y millones de vacunas durante la pasada pandemia atribuible a la aviación? ¿o corresponde al sector de la sanidad? ¿Y los vuelos imprescindibles llevando órganos para trasplante, o el rescate en helicóptero de heridos y enfermos? ¿Y el continuo transporte de medicamentos y material médico a lo largo y ancho del planeta, o los viajes de médicos y científicos a los congresos y reuniones que permiten avanzar el conocimiento y la práctica médica? Vemos con desazón falsas e imposibles afirmaciones creadas por meros publicistas, como «este vehículo compensa sus emisiones» o «este edificio es neutro en carbono».

Sea cual sea su origen, por fortuna siempre hemos tenido un excelente aliado en la captación del CO<sub>2</sub> atmosférico: las conchas. Los crustáceos, en especial los billones y billones de organismos marinos, foraminíferos, algas calcáreas y cocolitos forman sus diminutas conchas de carbonato cálcico a partir del dióxido de carbono disuelto en el mar, en intercambio con la atmósfera (Figura 26). A su muerte, todos estos carbonatos se depositan en los fondos marinos como roca caliza, forma sólida de retener el carbono larguísimo tiempo. Se calcula que la cantidad de carbono contenida en estas rocas es unas 20.000 veces superior al que contiene la atmósfera. Eventualmente, estas rocas calizas serán subsumidas en los movimientos tectónicos y acaban alimentando el magma de los volcanes, que lo vomitarán de nuevo a la atmósfera, otra vez como CO<sub>2</sub>. Es un proceso lento, de quizás medio millón de años, que se conoce en Geoquímica como el «ciclo largo del carbono». Son preci-

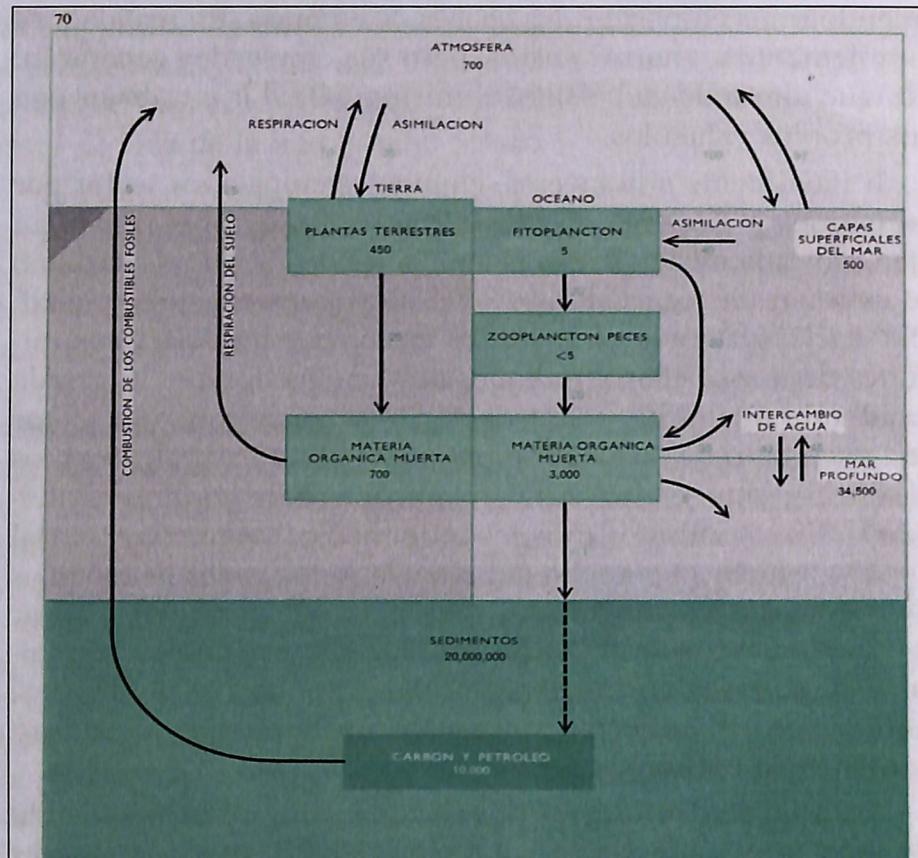


Figura 26. Ciclo del carbono en el intercambio océano-atmósfera.

samente estos procesos y equilibrios los que han permitido a la Tierra recuperarse de los períodos históricos en que la concentración de dióxido de carbono ha sido elevada, con valores incluso muy por encima de los que ahora nos preocupan. Es seguro que la Tierra será capaz de restablecer su equilibrio químico en carbono, a pesar de nuestras fechorías... pero la última vez tardó 60.000 años.

No tenemos tanto tiempo. Frente a nosotros dos alternativas: dejar de emitir CO<sub>2</sub> antropogénico en lo que, como hemos visto, no somos muy buenos, o pedirle a la ciencia que investigue métodos para la captación del dióxido de carbono una

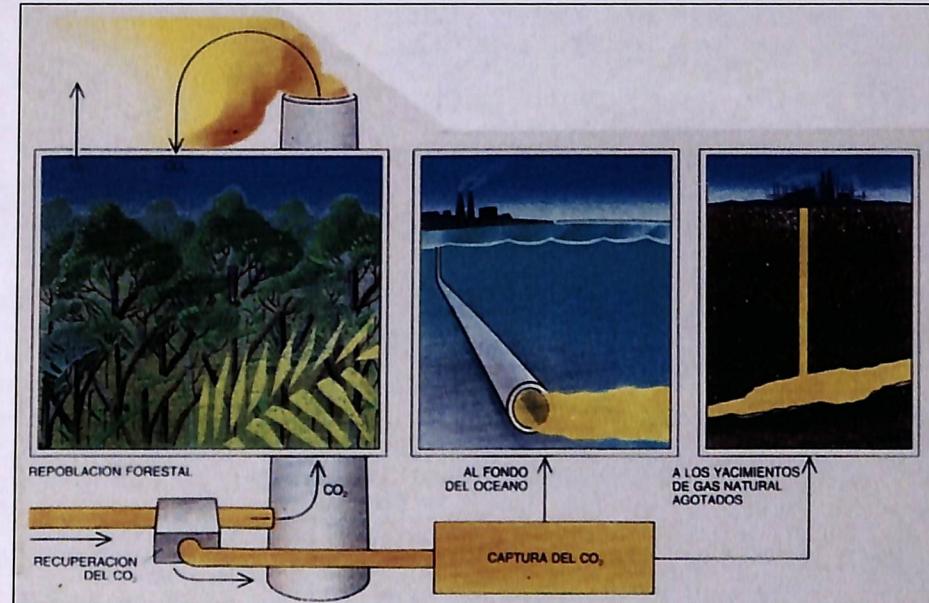


Figura 27. Propuestas para la captación de CO<sub>2</sub> atmosférico.

vez emitido, lo que se ha denominado C.C.S. (Carbon Capture and Storage).

Se han planteado varias opciones (Figura 27). Una primera es la repoblación forestal y también la compra y protección en el tercer mundo de áreas de selva o bosque por países, e incluso individuos, del mundo rico. La fotosíntesis capta CO<sub>2</sub> atmosférico para fijar el carbono como nueva materia vegetal, algo sin duda conveniente, pero de efectos limitados por dos razones: un bosque joven supone una captación neta mientras crece, pero en un bosque maduro la descomposición de la materia vegetal que va muriendo devuelve CO<sub>2</sub> a la atmósfera; por otra parte, la inmensa mayor parte de la fotosíntesis no la realizan las plantas terrestres, sino el fitoplancton marino (Figura 28). Es este quien tiene el mayor control del ciclo biológico del carbono del planeta y cuyo papel dominante en la descarbonización es insoslayable.

La segunda propuesta es llevar directamente el dióxido de carbono generado por nuestras combustiones al fondo oceánico



Figura 28. Concentración fitoplancton fotosintético en la costa californiana.

para que se deposite como caliza. Es, por desgracia, un proceso demasiado lento y con el riesgo de acidificación local del agua.

La tercera, más razonable técnicamente, supone introducirlo en los yacimientos que quedan vacíos precisamente por extracción de los combustibles fósiles, reemplazando así, por ejemplo, el gas natural que vamos consumiendo por el CO<sub>2</sub> generado en su combustión.

Se añaden a estas opciones la mineralización del dióxido por inyección en formaciones basálticas (Figura 29) y otros procedimientos químicos, incluido su creciente uso como materia prima para muchos procesos de síntesis química industrial en la fabricación de diversos productos de gran consumo.

Pero a nadie se le oculta que cualquiera de estas técnicas, aunque posiblemente útiles, tiene una importante limitación, pues exigen captar el CO<sub>2</sub> generado *antes* de que pase a la atmósfera. Ello es posible recogiéndolo directamente de las chimeneas de una planta eléctrica o de una fábrica, pero resulta inviable con el escape, disperso en el espacio y en el tiempo,

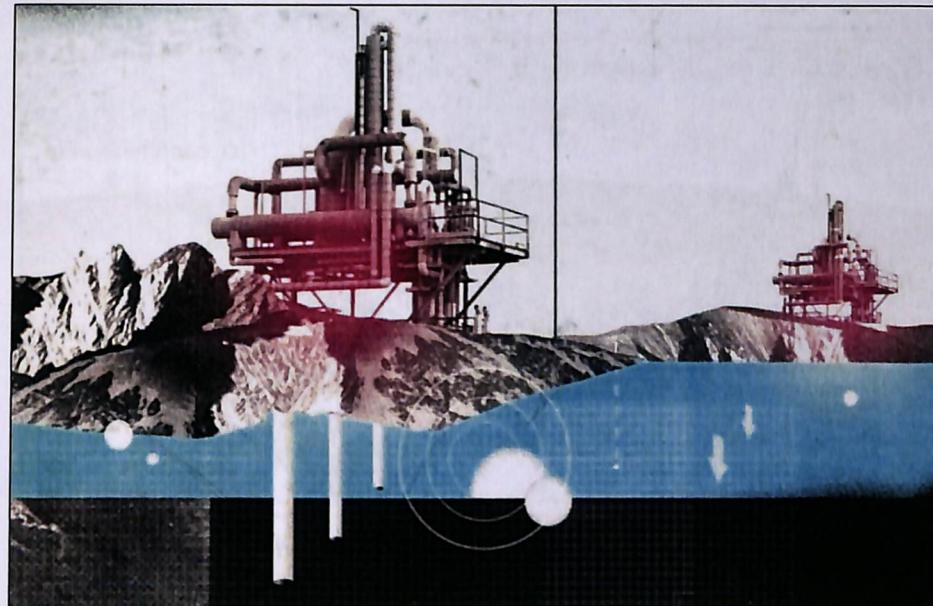


Figura 29. Mineralización del CO<sub>2</sub> por inyección en rocas basálticas.

de cada uno de los millones de coches, aviones y barcos o de las calefacciones de cada una de nuestras viviendas en todo el mundo. Sería necesario actuar sobre toda la atmósfera. Ya ha habido, en este sentido, algunos proyectos con instalaciones que aspiran el aire atmosférico y lo hacen pasar por ciertas sustancias químicas que capturan el CO<sub>2</sub> para devolver aire «descarbonizado» al exterior (Figura 30).

Este proceso es perfectamente posible a escala de laboratorio, pero, tras cientos de millones de dólares ya invertidos en diversos proyectos, parece resultar poco viable a escala planetaria, no solo por razones económicas sino también por el elevado gasto de energía que exige. Un muy reciente artículo de Oreskes, catedrática de Historia de la Ciencia en la Universidad de Harvard, analiza esta situación utilizando el pesimista título «The False Promise of Carbon Capture».

En contraposición, el grupo de científicos del proyecto Exploring Ocean Iron Solutions (ExOIS), con la prestigiosa Woods Hole Oceanographic Institution de Estados Unidos, planteó el

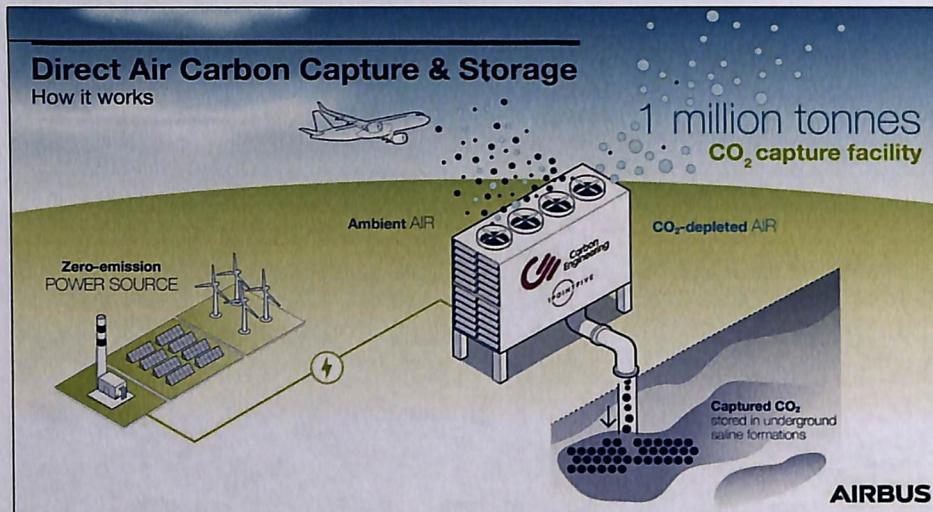


Figura 30. Esquema de un proyecto de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> atmosférico.

pasado septiembre la posibilidad de incrementar en gran medida la capacidad del mar para captar CO<sub>2</sub> mediante el aporte de hierro (como sulfato de hierro) al fitoplancton, pues la escasez de este elemento en el mar limita mucho su crecimiento. El depósito en el fondo marino de los restos del incrementado plancton aumentaría el almacenamiento de carbono fijado en forma sólida como caliza. Se propone realizar un primer ensayo en 10.000 km<sup>2</sup> del océano Pacífico durante 2026. Como el océano, que ya contiene mucho más carbono que la parte sólida de la Tierra, tiene capacidad para almacenar mucho más, este puede ser uno de los caminos para captar los miles de millones de toneladas de carbono que el IPCC estima que hemos de retirar, no solo dejar de emitir, de la atmósfera si queremos limitar la subida térmica a los 1,5-2°C que postula. Naturalmente, no deja de haber oposición por los riesgos de alteraciones sistémicas que una intervención como esta, dentro de la denominada «Geoengineering», pueda causar. Lo mismo ha ocurrido con otras propuestas, tales como llevar a la alta atmósfera partículas de aerosol para filtrar parte de la radiación solar y así reducir el calentamiento. Los proponentes de estos

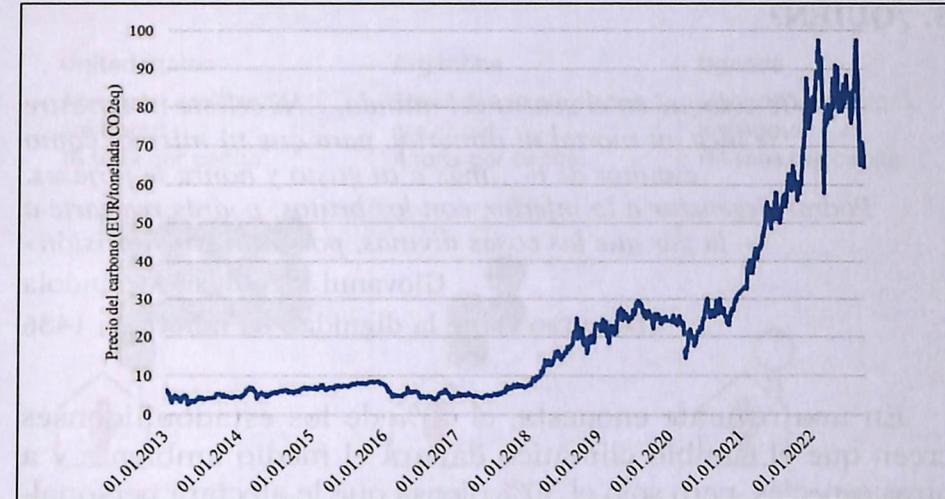


Figura 31. Evolución en los precios de derechos de emisión de CO<sub>2</sub>.

tipos de actuaciones admiten que puede haber riesgos de alteraciones ecológicas, pero «*la alternativa*», nos dicen, «*es dejar que el planeta hierva con nosotros dentro*». Difíciles disyuntivas se plantean ante la humanidad.

Si no es fácil la recaptación del CO<sub>2</sub>, es clara la necesidad de trabajar en origen: emitir menos. Uno de los caminos explorado es la compraventa de derechos de emisión para penalizar económicamente al causante. La idea es inducir al contaminador a reducir sus emisiones, pues en caso contrario tendrá que comprar «derechos de contaminación», cuyo valor cotiza en la «Bolsa del Carbono» y oscila, a veces brutalmente, como en cualquier mercado (Figura 31).

Hasta ahora no parece tener demasiado efecto real, pues se salva pasando el coste del productor al consumidor, en forma de «impuestos ecológicos» o nuevas tasas extra en los billetes aéreos. «*Los hombres y las naciones*», decía Abba Eban, «*se comportan sensatamente cuando han agotado las demás alternativas*». Se logra más recaudación, pero lo cierto es que no dejamos de emitir.

Quienes lo hacemos, todos nosotros, somos también los responsables de corregirlo.

### 3. ¿QUIÉN?

«Te coloqué en el centro del mundo... Ni celeste ni terrestre te hice, ni mortal ni inmortal, para que tú mismo, como escultor de ti ...más a tu gusto y honra te forjases. Podrás degenerar a lo inferior, con los brutos; podrás realzarte a la par que las cosas divinas, por tu misma decisión»

Giovanni Pico della Mirandola  
«Discurso sobre la dignidad de hombre», 1486

En una reciente encuesta, el 60% de los estadounidenses creen que el cambio climático dañará el medio ambiente y a otras especies, pero solo el 30% piensa que le afectará personalmente. Espera continuar su vida como hasta ahora y estima que, en todo caso, su contribución personal al daño es infinitesimal.

¿Qué realidad confronta esta opinión subjetiva? Todos conducimos un coche, viajamos en avión, tren, barco y usamos electricidad, calentamos y refrigeramos nuestras casas, usamos madera, metales y plásticos, consumimos papel y vidrio, nos alimentamos, respiramos... y eventualmente nos incineran, emitiendo nuestro propio carbono como dióxido. Es la suma de esas actividades en todas y cada una de las personas, y la fabricación de cuanto necesitamos para realizarlas, lo que hace que seamos nuestro propio enemigo con nuestra forma y nivel de vida actuales. Nuestra actitud en este sentido ha dejado de regirse por el imperativo categórico kantiano: «Obra de tal modo que las consecuencias de tu acción sean compatibles con la permanencia de la vida auténticamente humana sobre la Tierra (... *der Permanenz echten menslichen Lebens auf Erden*)», que tu actual decisión (*in deine gegenwärtige Wahl...*) contemple la integridad futura del hombre».

¿Qué estamos dispuestos a sacrificar para ello? Oreskes mencionaba también este año en *Scientific American*, en una virulenta respuesta al CEO de Exxon Mobil, que el 70% de los ciudadanos norteamericanos estarían dispuestos a prescindir de «hasta el 1% de su renta en beneficio del medio ambiente».

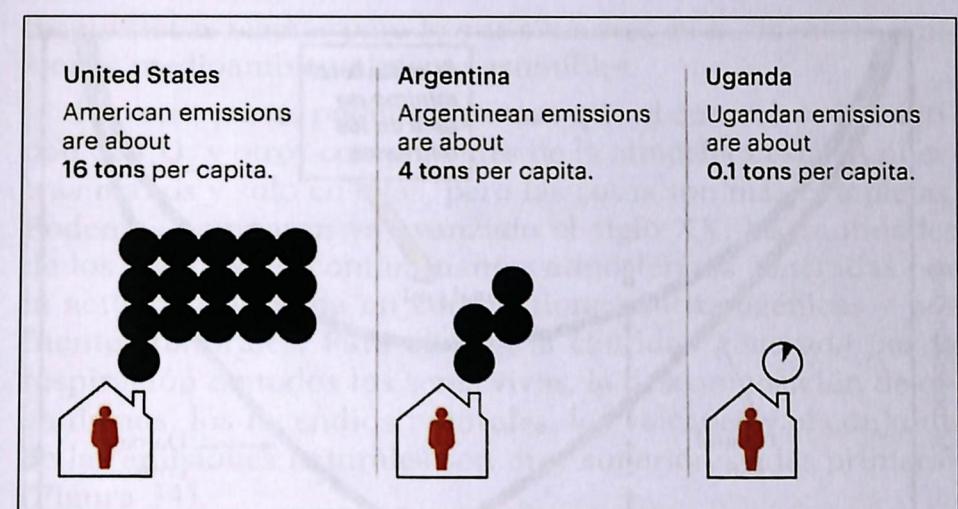


Figura 32. Emisiones de CO<sub>2</sub> per capita.

Ahora bien, la responsabilidad personal no es la misma para todos, ni por países ni por individuos: la generación de CO<sub>2</sub> per capita de un estadounidense es 4 veces mayor que un argentino, y esta, 40 veces mayor que un ugandés (Figura 32).

Y dentro de cada país hay casos extremos. Un reciente estudio sobre el uso y abuso de los jets privados, tan frecuente en millonarios, famosos y políticos, arroja datos alarmantes. A algún conocido personaje internacional, entre enero y julio de 2022, se le ha calculado una emisión de 4269 toneladas de CO<sub>2</sub>, casi 300 veces la cantidad generada de media por un norteamericano. Gabor Levy indicaba que es cierto que la industria ha sido ambiciosa y descuidada, el consumidor también, «pero el verdadero problema del mundo actual es la sobre población, el sobreconsumo y la sobreestupidez».

Son estos algunos de los factores que harán, que está haciendo, difícil la descarbonización. La propia naturaleza humana genera un orden de prioridades muy cortoplacista. En palabras de Ricard, nos encontramos en el dilema de reconciliar tres escalas de tiempo: a corto plazo, la economía, a rango medio el bienestar y la calidad de vida y, solo a largo plazo, el medio ambiente.

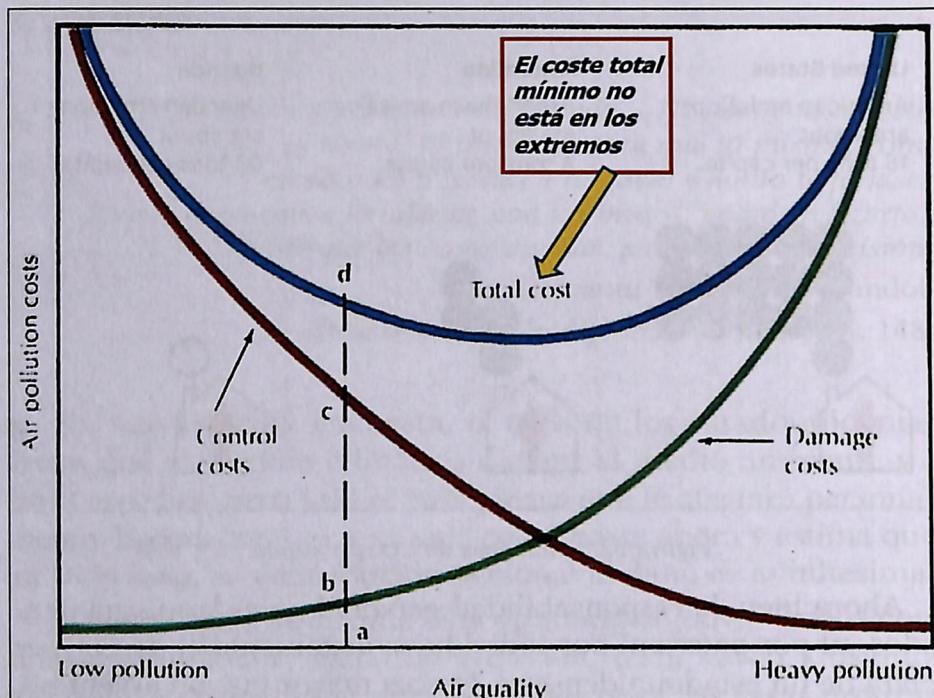


Figura 33. Economía en la protección del medio ambiente.

Tenemos, en efecto, comprensible inclinación a considerar prioritaria la economía, sobre todo la personal. Nuestras decisiones, tanto individuales como sociales y políticas, no tienen, por desgracia, muy largas miras. Es claro ver gráficamente cómo los criterios económicos nos guían (Figura 33). La línea roja del gráfico indica que, permitiendo una alta contaminación, no hay costes para controlar y reducir las emisiones, aunque si gran coste en corregir los daños producidos (línea verde). Lograr una baja contaminación, por el contrario, supone pocos daños a corregir, pero un alto precio, que tiende también a infinito, para minimizar emisiones. El coste total es una combinación de ambos (línea azul) y su mínimo no está en ninguno de los extremos. El coste mínimo corresponde a un cierto valor, no nulo, de emisiones. A la sociedad, a todos nosotros, compete decidir qué esfuerzo económico estamos

dispuestos a aceptar para lograr situarnos en las menores emisiones medioambientalmente asumibles.

Por otra parte, podemos pensar que el control de la cantidad de CO<sub>2</sub> y otros componentes de la atmósfera está en nuestras manos y solo en ellas, pero las cosas son más complejas. Podemos comparar, ya avanzado el siglo XX, las cantidades de los principales contaminantes atmosféricos generadas por la actividad humana en combustiones antropogénicas y por fuentes naturales. Para el CO<sub>2</sub>, la cantidad generada por la respiración de todos los seres vivos, la descomposición de organismos, los incendios naturales, los volcanes y el conjunto de las emisiones naturales son muy superiores a las primeras (Figura 34).

Las erupciones volcánicas liberan cantidades colosales de dióxido de carbono. Por ejemplo, hace solo 74.000 años, una gigantesca erupción del supervolcán Toba, en Sumatra, provocó daños masivos en todo el planeta y la desaparición de muchas especies. La humana pudo haber sido una ellas; los datos paleontológicos indican que tan solo sobrevivieron unos millares de primitivos humanos de los que todos descendemos, lo que explicaría nuestra homogeneidad genética. Hace mucho menos tiempo, en 1815, la erupción del estratovolcán Tambora, en la isla indonesia de Sumbawa, emitió tal cantidad de ceniza a la atmósfera que redujo mucho la radiación solar, causó una disminución global de temperatura e hizo de 1816 «el año sin verano», además de provocar muy pobres cosechas, incapaces de realizar suficiente fotosíntesis con el dióxido de carbono por falta de radiación ultravioleta.

Nos creemos el centro del mundo, pero el 80% de la masa viva en la Tierra son microorganismos. Aunque, en el título de Arsuaga, somos la «especie elegida», el *homo sapiens* representa solo una parte mínima dentro de las especies de mamíferos, relativamente poco, a su vez, dentro del reino animal y casi nada dentro del conjunto de los seres vivos. Irrelevantes somos también en lo cronológico, una especie que lleva un mero instante, a lo sumo unas pocas centenas de miles de años, en la

Table VI.4 Annual worldwide emissions of air pollutants (10 <sup>12</sup> g yr or 10 metric tons yr <sup>-1</sup> )				
Pollutant	Human source	Quantity	Natural source	Quantity
CO <sub>2</sub>	Combustion of wood and fossil fuels	22,000	Biological decay: release from oceans, forest fires, and respiration	1,000,000
CO	Incomplete combustion (especially automotive)	700	Forest fires and photochemical reactions	2100
SO <sub>2</sub>	Combustion of coal and oil; smelting of ores	212	Volcanoes and biological processes	20
CH <sub>4</sub>	Combustion; natural gas leakage	160	Anaerobic biological decay and termites	1050
NO <sub>x</sub>	High-temperature combustion (NO <sub>x</sub> = NO and NO <sub>2</sub> )	75	Lightning; bacterial action in soil	180
NMHC*	Incomplete combustion (especially automotive)	40	Biological processes	20,000
NH <sub>3</sub>	Sewage treatment and fertilizers	6	Anaerobic biological decay	260
H <sub>2</sub> S	Petroleum refining and sewage treatment	3	Volcanoes and anaerobic biological decay in soil and water	84

\*NMHC = Nonmethane hydrocarbons.  
Source: Adapted from Stern et al. *Fundamentals of Air Pollution*, 2nd ed., Academic Press, Inc., Orlando, FL, 1984, pp. 30-31. Table adapted by permission of Elmer Robinson, Mauna Loa Observatory.  
Data based on conditions prior to 1980.

Figura 34. Aporte natural frente a antropogénico de diferentes emisiones.

Tierra. No somos tan importantes: en palabras del paleontólogo Richard Fortey, «*algún día no habrá humanos sobre la Tierra, y eso no significará nada para el planeta*».

La naturaleza emite unos 200.000 millones de toneladas al año por el conjunto de los ciclos químico naturales, varias veces lo que producen nuestra industria, coches, transportes, viviendas y el conjunto de actividades humanas combinadas. Todo ello está integrado, entrando y saliendo, en el ciclo quími-



Figura 35. Las naciones del mundo en tamaño proporcional a sus emisiones.

co planetario del carbono, que se ve así influido por la adición antropogénica.

Por ello, como humanos individuales que queremos sobrevivir aquí y ahora, hemos de considerar nuestro propio papel en las emisiones. Todos queremos y necesitamos electricidad, transporte, calefacción, refrigeración, metales, plásticos, caucho... e infinidad de productos manufacturados, además de alimentos, medicinas, atención sanitaria y a todos nos corresponde una parte alícuota, aunque es distinta según nuestra posición económica, social y geográfica. En efecto, si no todos los países han generado lo mismo, también diferentes deberán ser las aportaciones de cada quien a la solución. Es ilustrativo este mapamundi, donde el tamaño relativo de cada país se hace corresponder con sus emisiones acumuladas durante medio siglo (Figura 35).

¿Sobre qué fuentes de emisión de CO<sub>2</sub> antropogénico podemos actuar cada uno de nosotros? Obvias son el transporte, la industria o las viviendas. Así, la forma de transporte que utilizemos tiene una gran influencia sobre la huella de carbono de cada persona (Figura 36).

No tan conscientes somos de otras causas menos directas pero muy importantes: producir una tonelada de trigo emite

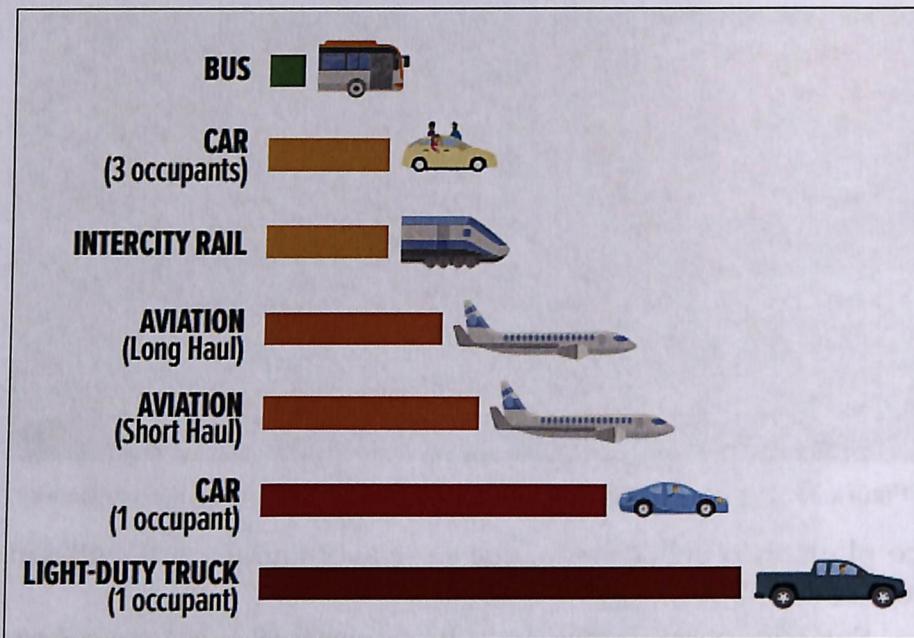
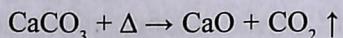


Figura 36. Huella de carbono comparativa según medio de transporte.

500 kg de CO<sub>2</sub>, pero tenemos que alimentarnos y somos muchos los habitantes del mundo. La fabricación del cemento con el que construimos edificios, puentes, túneles... supone una emisión enorme de CO<sub>2</sub>, no solo por la cantidad de calor que requiere el *klinker*, obtenido quemando petróleo y también carbón y materiales de combustión muy sucia, como los neumáticos, ese residuo sólido que no deja de aumentar. Aunque pudiésemos hacer toda la fabricación usando energía no fósil, la propia reacción química de formación del cemento, que necesitamos en muy grandes cantidades, es un proceso de calcinación. La piedra caliza ha de calentarse a alta temperatura para convertir el carbonato de calcio en su óxido, lo que desprende necesariamente CO<sub>2</sub> como producto estequiométricamente inevitable de la misma. Es un proceso contrario al natural, en el que «descarbonizamos» la piedra caliza y «carbonizamos» la atmósfera.



Se fabrican anualmente 34.000 millones de toneladas de cemento, unas 4 *per capita*, en el mundo. Y no se recicla, porque reciclar cemento es más caro que fabricarlo. Es este, pues, un CO<sub>2</sub> no fácil de evitar pues no parece, a plazo previsible, que vayamos a dejar de construir casas, puentes o carreteras. Ni dejar de mantenerlas y cubrirlas de asfalto, un producto, por cierto, que es no es sino el residuo de la destilación del petróleo para obtener gases (propano, butano), combustibles líquidos y lubricantes.

Y nuestro uso de la moderna tecnología por cada quien no es menos culpable por el ingente gasto de energía de las comunicaciones, computación e internet. Se prevé que el consumo de energía eléctrica por el conjunto de las TICs supondrá el 21% del total en 2030, lo que incluye la fabricación y uso de los diferentes dispositivos, ordenadores, tabletas, «smartphones», servidores, terminales, redes y centros de datos. Para entonces, el consumo energético de las TICs alcanzará los 8 petavatios hora, cuadruplicando lo que consumían en 2010. Y en esto no está computado el reciente auge de la Inteligencia Artificial. A Google, que todos usamos, se debe una tonelada de CO<sub>2</sub> cada dos segundos. Con el CHAT GPT-3, solo en su creación y entrenamiento se consumió energía suficiente para emitir 550 toneladas. No olvidemos que una mayor parte de la electricidad que usamos sigue siendo de origen no renovable.

También nos vestimos, consumiendo mucho más de lo razonable en los países considerados ricos. Según estimaciones, cada norteamericano adquiere 68 piezas textiles al año. Como resultado, el sector textil genera del orden del 10% del CO<sub>2</sub> antropogénico, más que la aviación y el transporte marítimo combinados. Se ha propuesto reducir esta emisión para 2030 al 50% de lo generado en 2019, un cambio que requiere grandes y difíciles mejoras en la tecnología, pero también, sobre todo, una reducción drástica del consumismo por parte de todas las personas.

El mundo exige cada vez más energía no solo porque crece en habitantes, sino porque que cada uno de nosotros consu-

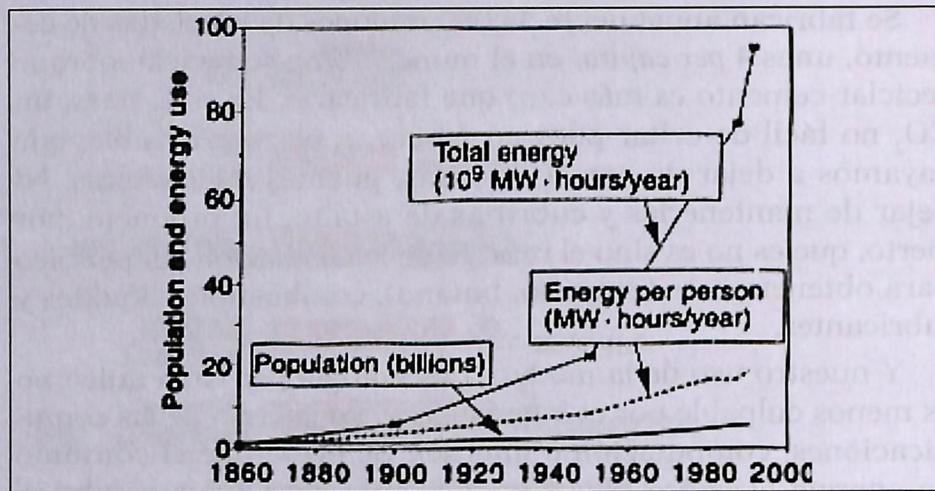


Figura 37. Consumo de energía relativo a la población del mundo.

mimos más cada vez, de modo que el gasto de energía crece mucho más deprisa que la población (Figura 37).

Se corresponde este gran incremento con la evolución del proceso industrializador del mundo, y tras las primeras dos fases de la revolución industrial (Figura 38), marcadas por las formas de energía, estaríamos en una cuarta revolución, la segunda de las motivadas por las tecnologías de la información, la Inteligencia Artificial, «Big Data» en la nube, que han demostrado ser tan grandes peticionarios de energía eléctrica.

Una conocida imagen nocturna de satélite (Figura 39) muestra las grandes diferencias en el consumo de electricidad en las regiones más o menos desarrolladas del mundo.

De nuevo vemos una gran brecha entre quienes son países ricos y quienes son pobres. Por más que se nos anuncien progresos en los países más avanzados, siguen siendo estos, con gran diferencia, los responsables del mayor gasto en energía eléctrica, con consumos *per capita* que van desde los impresionantes 20.000 kW.h/año de Noruega a solo 10 kW.h/año de Sierra Leona (Figura 40).

Un sector especialmente importante, hoy y en esta sala, es el de la medicina y la cirugía; imprescindibles, sin duda, pero no

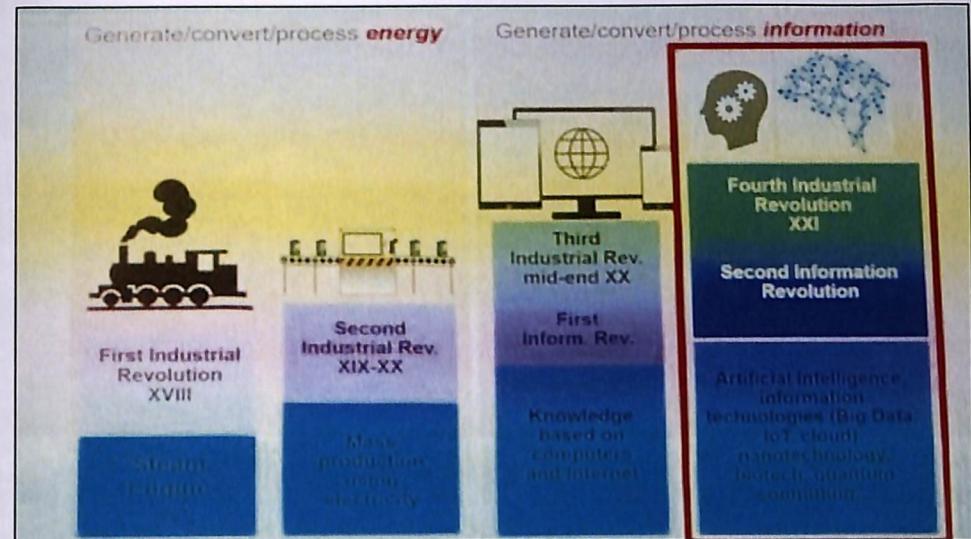


Figura 38. Las cuatro etapas de las revoluciones industriales.

exentas de culpa en lo que a gases invernadero se refiere. Unos apuntes al respecto nos permiten valorar el coste medioambiental de curarnos y mantener la salud. Nada es gratis. La excelente sanidad actual genera en promedio mundial en torno al 5% de los gases invernadero, tanto por los procesos químicos de fabricación de medicamentos como por las instalaciones hospitalarias y la práctica médica en general. Como recuerda Rodríguez Montes, se realizan en el mundo 300 millones de cirugías al año y una operación simple genera, directa e indirectamente, unos 200 kg de CO<sub>2</sub>, y unos 20 kg de desechos. En electrocirugía y cirugía láser, técnicas hoy imprescindibles, se ha calculado que la ablación de cada gramo de tejido equivale al humo de 27 cigarrillos. No se queda atrás la anestesia, de la que nadie, claro, querría prescindir. La liberación de gases anestésicos, como sevoflourano o desflourano entre otros, cuya bioquímica es clínicamente cada vez más segura y efectiva, produce a cambio un potente efecto invernadero que equivale anualmente a la emisión de 3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

Es brillante hacer declaraciones grandiosas, pero lo importante son las realidades prácticas. Decía Andreotti que «*lo*



Figura 39. ¿Quiénes gastamos más energía?

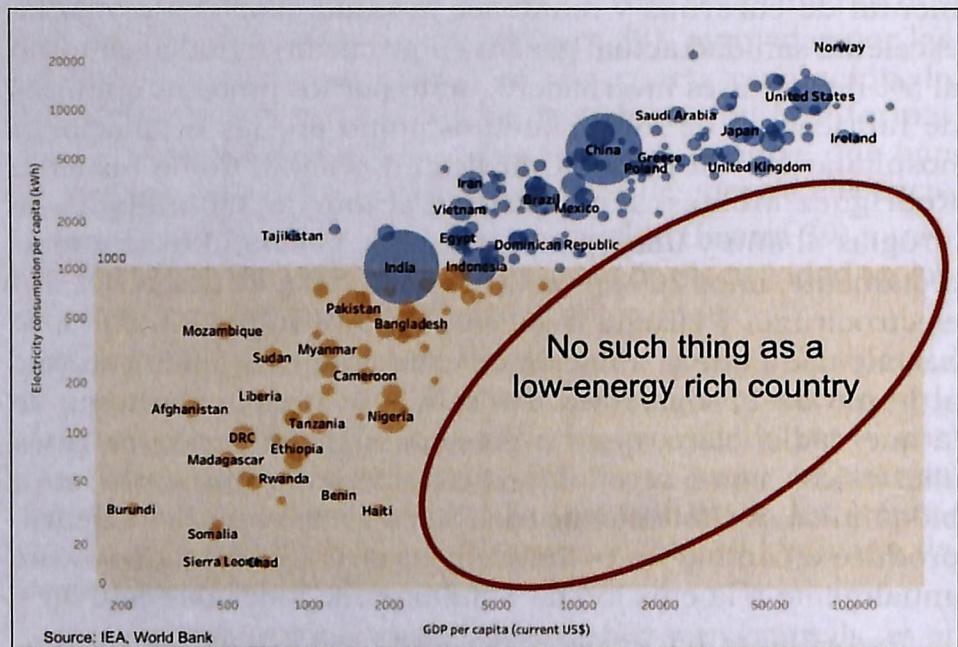


Figura 40. Consumo de electricidad y renta *per capita*.

difícil es pasar de la poesía a las matemáticas». Cuanto hasta aquí hemos dicho nos hace ver con escepticismo las promesas políticas, tan fáciles de hacer como difíciles de cumplir. Estados Unidos, donde solo el 1% de la población dice considerar el cambio climático un problema prioritario, se compromete a lograr en 2050 «la descarbonización total». India establece emisiones cero en 2070, Rusia en 2080. La Unión Europea ha establecido un compromiso formal de descarbonización en 2050. Pero el hecho es que solo el 5% de los 128 países firmantes de los compromisos climáticos ha tomado hasta ahora medidas significativas.

Y entre tanto los países siguen haciendo guerras, otra de las fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub> además de múltiples contaminantes. Entre los muchos «cómo y quién», capítulo especial merece la huella bélica de carbono, tan incontrolable como poco transparente. Un grupo de científicos, agrupados en la «Initiative on GHG Accounting of War» está evaluando, también económicamente, los efectos medioambientales de las Guerras, que son colosales.

En los dos primeros años de la guerra de Ucrania, estiman que se han generado 175 millones de toneladas de dióxido de carbono, equivalentes a 32.000 millones de dólares, solo en daños medioambientales (Figura 41). Se basan para ello en la cifra hoy llamada «coste social del carbono», que valora en unos 190 dólares el daño medioambiental causado por cada tonelada de dióxido de carbono generada. Con la usual incertidumbre de los datos bélicos recientes, las informaciones indican que se han lanzado contra Gaza y el Líbano en un año no menos de 70.000 toneladas de explosivos. Pero tenemos aquí una triste y ya larga tradición. Solo en 1944, durante la gran ofensiva aliada en la Segunda Guerra Mundial, las fuerzas aéreas inglesa y norteamericana lanzaron sobre las ciudades alemanas 16 millones de toneladas de bombas, muchas de ellas incendiarias de fósforo, que provocaron la combustión de ciudades enteras. Aparte del sobrecogedor daño y sufrimiento humano que las guerras provocan, a todo el CO<sub>2</sub> que esto genera ha de añadirse el pro-



Figura 41. Ucrania, 2024. Inicio de la combustión de grandes depósitos de combustible tras un bombardeo.

ducido por el combustible usado en los centenares de miles de vuelos de bombardeo y de caza, en barcos, trenes y aviones, en la fabricación de esos aviones y vehículos, más la fabricación de las bombas y munición... y aún el efecto medioambiental que la sanidad no hubiese producido si la medicina de guerra no hubiese sido necesaria.

Si prescindimos de las fuentes naturales, que emiten la mayor parte del CO<sub>2</sub>, pero están fuera de nuestro control, y de las guerras, que está fuera de la razón, nos queda depositar nuestras esperanzas en las energías renovables. Más allá de las noticias interesadas y las exageraciones en uno u otro sentido, ¿cuál es la verdadera situación actual?

El gráfico (Figura 42) indica que el petróleo, el carbón y el gas siguen proporcionando el 80% de nuestra energía, la nuclear un 5%, y en torno al 10 % restante se clasifican como renovables, si bien el 70% de ellas lo constituyen las clásicas presas hidroeléctricas. Las «modernas» renovables (eólica, fotovoltaica...) solo representan en realidad un 3%.

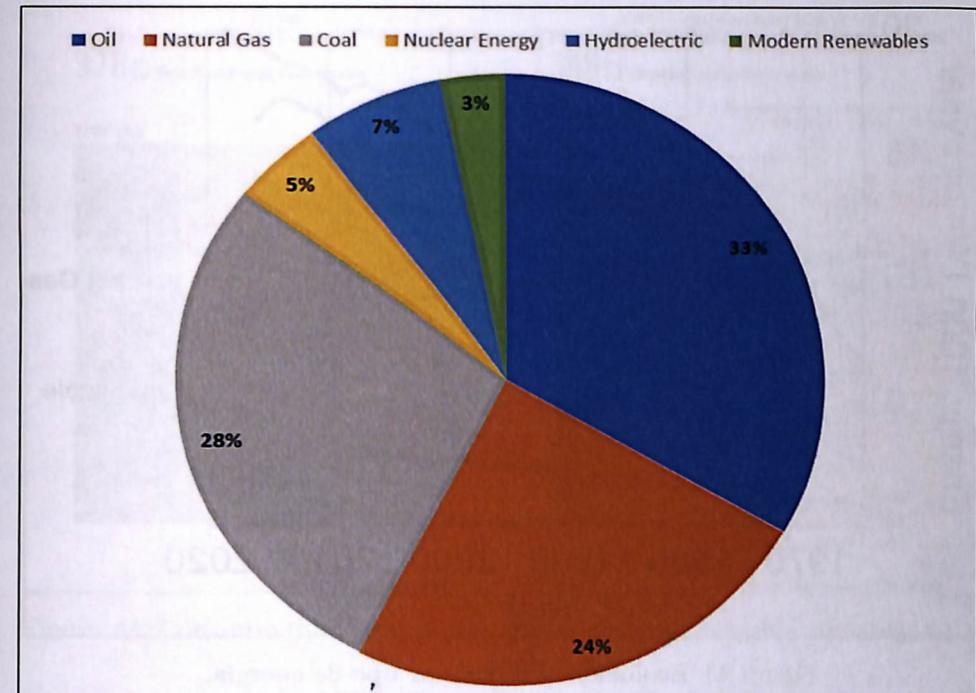


Figura 42. Distribución de las fuentes de energía primaria.

Si en vez de una foto fija observamos la evolución en el último medio siglo (Figura 43), vemos una clara aceleración del ritmo de crecimiento de las renovables con la línea verde.

No crece la energía nuclear, continúa cada vez más lento el de la hidroeléctrica... pero las tres energías fósiles siguen creciendo rápidamente. El carbón, el más contaminante, empezaba a caer con claridad, pero ha tenido recientemente un repunte con las restricciones de petróleo y gas resultantes de la guerra ruso-ucraniana.

Obvias son las virtudes de la energía hidroeléctrica, renovable a través de la lluvia y nieve que alimentan los embalses, imprescindibles además como reserva de agua (Figura 44). Sin embargo, los efectos en la geografía local, estéticos y sociales generan una animadversión que hace casi inviable la construcción de nuevas presas. Poco crecimiento cabe esperar ya en este tipo de energía, al menos en los países desarrollados.

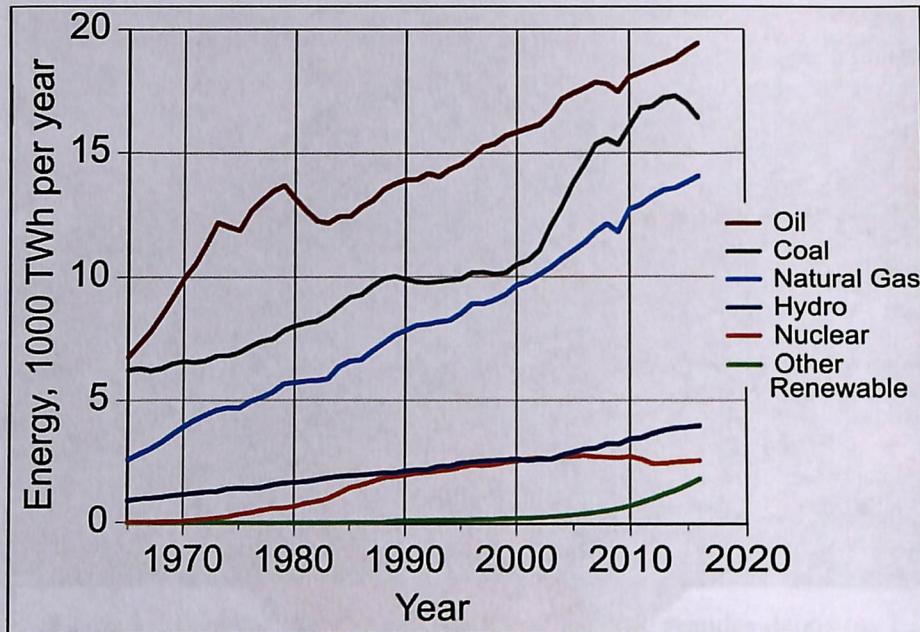


Figura 43. Evolución mundial por tipo de energía.

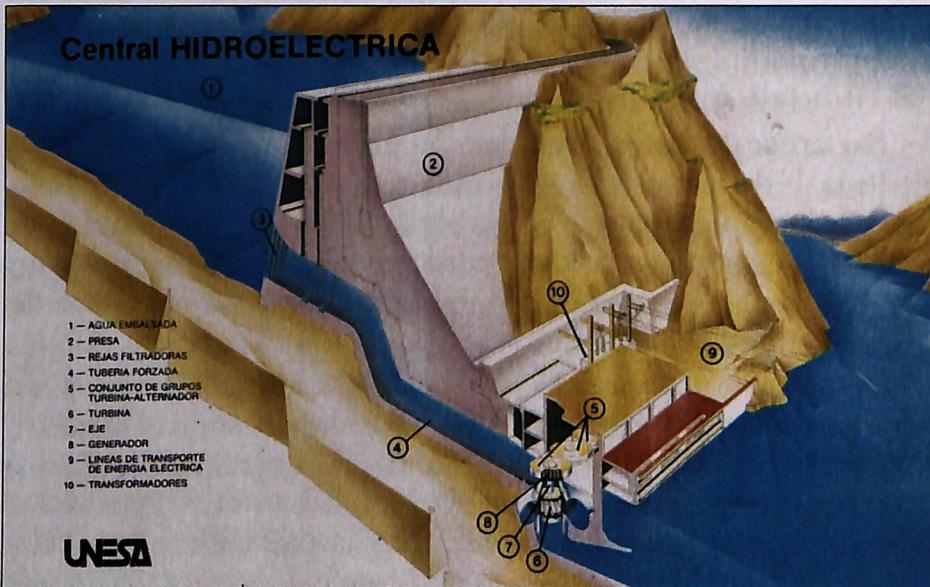


Figura 44. Estructura de una central hidroeléctrica moderna.

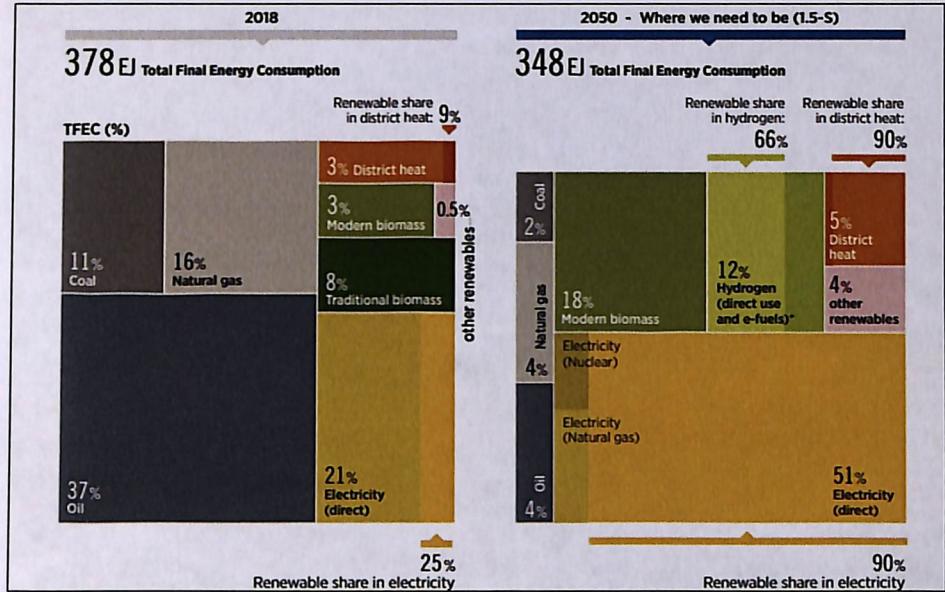


Figura 45. Consumo total y por tipos de energía en su deseable evolución hasta 2050.

Las energías renovables modernas incluyen principalmente la eólica, solar térmica, la solar fotovoltaica, el hidrógeno y la biomasa, generalmente para convertirlas en electricidad. Todas ellas son, como la hidráulica, renovables y, aun con reservas, no directamente contaminantes. Un reciente estudio de la Universidad de Princeton señalaba que el único camino que tendría Estados Unidos para aproximarse al compromiso de emisiones cero en 2050 es la electrificación total de su sistema energético. Sus datos indican la pérdida de medio millón de empleos en energías convencionales a cambio de la creación de unos 700.000 en las nuevas energías. Naturalmente, la conversión conlleva también un precio medioambiental, por la construcción de instalaciones eólicas, placas solares, conducciones eléctricas, cemento y todas las nuevas infraestructuras necesarias. En el conjunto mundial, el documento World Energy Outlook (Figura 45) compara la actual contribución energética de la electricidad directa con la deseable en 2050. Queda mucho, mucho camino por recorrer.

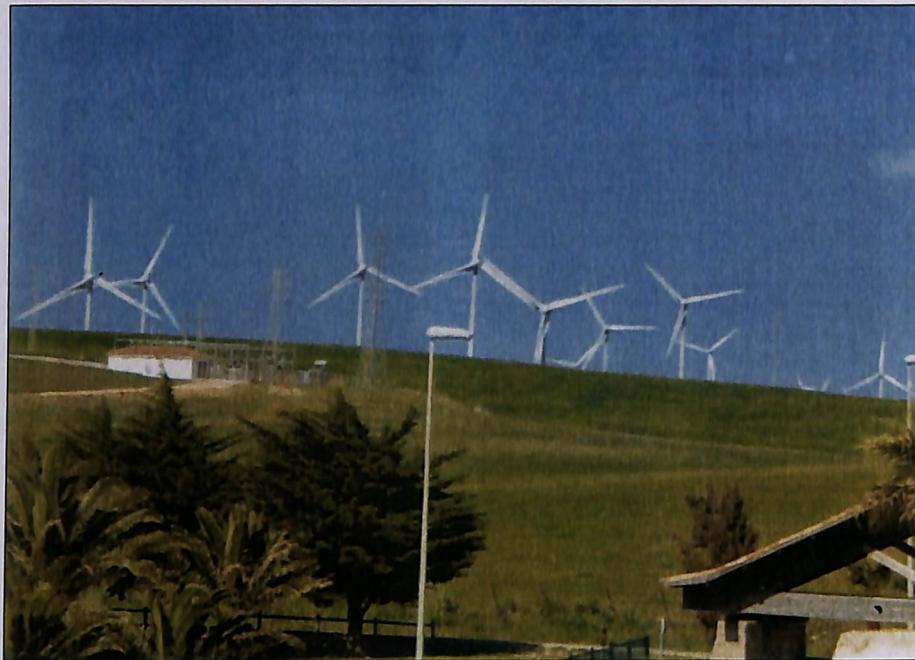


Figura 46. El paisaje en un campo de generadores eólicos.

Quizá la fuente renovable de electricidad más desarrollada es la eólica, en la que nuestro país ocupa un lugar prominente tanto en uso como en fabricación (Figura 46).

Es de interés confrontar ventajas e inconvenientes de esta tecnología (Figura 47). El último punto, menos conocido, merece atención: las palas han alcanzado gran eficiencia aerodinámica con alto rendimiento en la conversión energética. Su construcción en materiales compuestos muy avanzados es excelente, pero la enorme dimensión de las palas (figura 48), la variabilidad del flujo de viento en velocidad y orientación contribuyen con las vibraciones a producir gran fatiga de materiales. El resultado es que las palas tienen una vida limitada y han de ser periódicamente sustituidas. Por desgracia, el reciclado de materiales compuestos no es viable, y las gigantescas palas acaban en no menos gigantescos vertederos (Figura 49). Otro ejemplo de como toda tecnología, por perfecta que parezca, cuando su uso se extiende y se alarga en el tiempo termina

<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Ventajas</b><ul style="list-style-type: none"><li>• No emisiones</li><li>• Conversión directa energía de viento en eléctrica</li><li>• Coste decreciente</li><li>• Uso de colinas altas<ul style="list-style-type: none"><li>• Terrenos poco útiles</li><li>• (contraste con presas en valles)</li></ul></li><li>• Parques marinos</li><li>• Versátil<ul style="list-style-type: none"><li>• Instalaciones adaptables a diferentes potencias</li><li>• Incluso varios <u>Mw</u>/unidad</li></ul></li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Inconvenientes</b><ul style="list-style-type: none"><li>• Inconstancia del viento<ul style="list-style-type: none"><li>• Picos y valles producción</li><li>• No almacena energía</li><li>• (contraste con hidroeléctrica)</li></ul></li><li>• Necesidad de integración con fuentes más constantes</li><li>• Ruido</li><li>• Estética del paisaje</li><li>• Colisiones con aves</li><li>• Palas<ul style="list-style-type: none"><li>• Materiales y aerodinámica</li><li>• Duración y residuos</li></ul></li></ul></li></ul>
---	--

Figura 47. Principales características de la energía eólica.



Figura 48. Dimensiones de las hélices de los generadores eólicos.



Figura 49. Vertedero de palas eólicas desechadas.

mostrando problemas inesperados, ese «lado estúpido» a que alude Margaret Atwood.

El Sol es nuestro gran proveedor de energía y el aprovechamiento directo de la energía solar es el segundo gran capítulo de las energías renovables. En 6 horas, los desiertos del planeta reciben más energía de la que consume la humanidad en un año. Una sencilla imagen da una idea intuitiva de las proporciones de la energía que el Sol nos regala en comparación con las que, trabajosa y no muy limpiamente, venimos usando. Es evidente que debemos aprovecharla (Figura 50).

Dos formas básicas son posibles para su aprovechamiento: las sencillas instalaciones térmicas que recogen la radiación para calentar un circuito cerrado y aprovechar la energía en usos como calefacción y agua caliente (Figura 51) y la fotovoltaica, más compleja, que realiza la conversión directa de energía solar en electricidad.

Su interés es innegable y en Estados Unidos se ha calculado que con placas fotovoltaicas en el 0,4% de su superficie se podría abastecer de electricidad a todo el país. Sus principales limitaciones derivan del bajo rendimiento de la conversión fo-

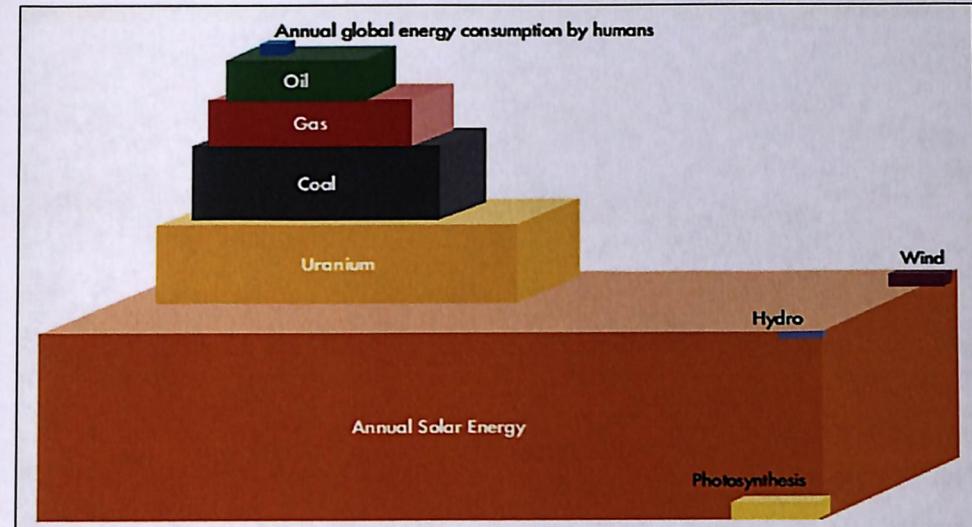


Figura 50. Comparación del consumo humano de energía respecto a la recibida del Sol.

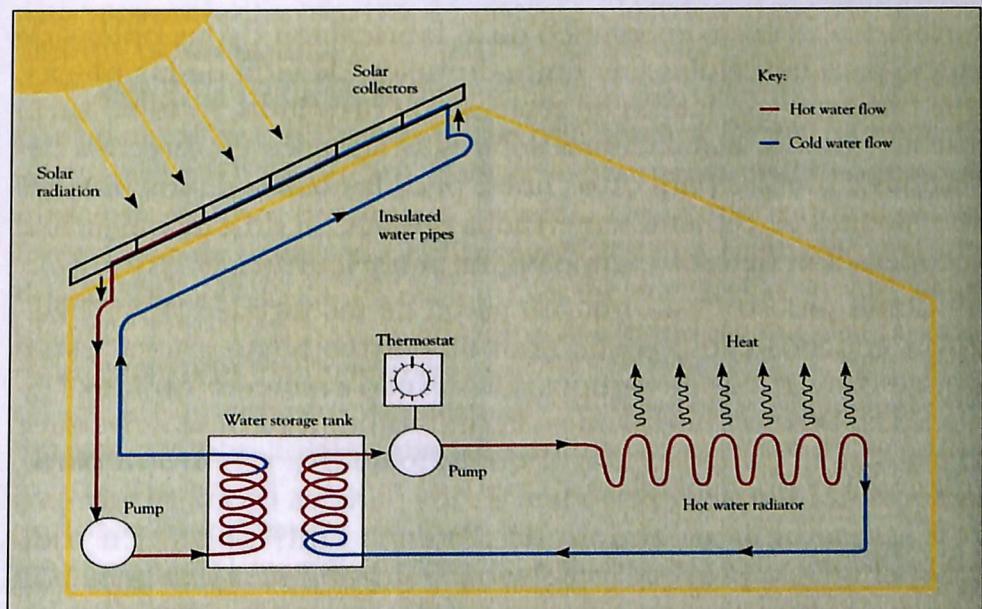


Figura 51. Principio funcional de una instalación solar térmica.



Figura 52. Instalación rural de paneles solares en Andalucía.

toeléctrica, el costo energético de la fabricación de las obleas de silicio para las células y la finita duración de vida de las placas, que tampoco son fáciles de reciclar. De otro lado, lo ideal sería que las grandes instalaciones solares se situasen en terrenos desérticos e inútiles para otros fines, pues las bases de los paneles son bloques de cemento enterrados que hacen difícil la eventual recuperación de esos campos para la agricultura (Figura 52).

Como muestra esta imagen aérea de los alrededores de Segovia, muchos campos que eran de cultivo hasta ahora, están siendo convertidos en campos solares con creciente rapidez (Figura 53). Dos son las razones: la rentabilidad para el agricultor al alquilar su campo es mayor que si lo cultiva y, por otra parte, la necesaria limpieza periódica de los paneles requiere campos con acceso al agua, propio de terrenos cultivables. En todo caso, el propio proceso fotoeléctrico depende de la insolación y es discontinuo en el ciclo día- noche, de modo que, como la eólica, necesita la integración con fuentes continuas, ya que el



Figura 53. Imagen aérea de nuevos campos solares en los alrededores de Segovia.

almacenamiento masivo de energía eléctrica sigue siendo un asunto pendiente.

Dejando a un lado la muy eficiente, pero siempre polémica, energía nuclear, entra en juego una tercera forma de energía en la que se han puesto nuevas esperanzas: el llamado, con otro eufemismo, hidrógeno «verde». Un primer punto crucial es el error de creer que el hidrógeno es una fuente de energía disponible. No lo es. Es solo un vector energético, ya que en el planeta Tierra no hay «yacimientos» de hidrógeno. En la Química y la industria venimos usando hidrógeno desde hace más de un siglo, pero lo obtenemos, precisamente, del petróleo y del gas, fuentes fósiles, pues los hidrocarburos son la segunda forma molecular en que la Tierra ha almacenado el elemento químico hidrógeno.

La primera, naturalmente, es el agua. De esta abundante y asequible fuente queremos obtenerlo como hidrógeno verde, lo que es ciertamente posible por una simple electrolisis, que

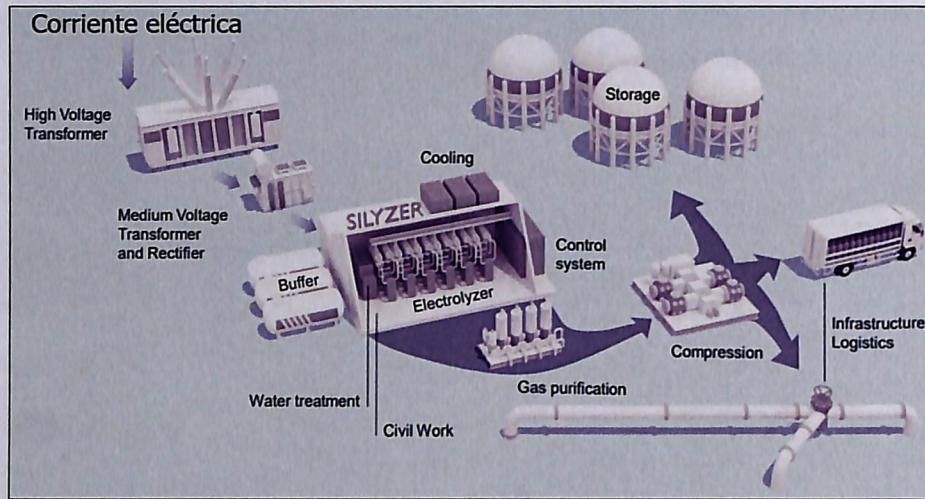


Figura 54. Ciclo completo de generación, distribución y almacenamiento de hidrógeno.

conocemos hace mucho. Pero en la Química, como en las finanzas, uno se tropieza con la contabilidad. Para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno hay que aportar una notable cantidad de energía eléctrica (Figura 54). Cuando luego utilizamos ese hidrógeno como combustible, bien quemándolo o combinándolo con el oxígeno en células de combustible, para generar de nuevo electricidad, emitirá solo agua, un resultado muy limpio.

Ahora bien, esa reconversión en agua nos devuelve, como máximo, la misma energía que nos costó electrolizarla para formar el hidrógeno. Y hay costes energéticos irrecuperables en la transformación y rectificación de la corriente de电解 and in la imprescindible purificación y desionización del agua. No hay, pues, generación neta de energía, sino pérdida, y sería más eficiente usar directamente la electricidad inicial. Por tanto, el interés principal del hidrógeno es que se puede almacenar en tanques en muy grandes cantidades, algo que no puede hacerse con la electricidad misma, y que su transporte por futuros «hidrogenoductos» puede resultar más eficiente que transportar la electricidad a grandes distancias.

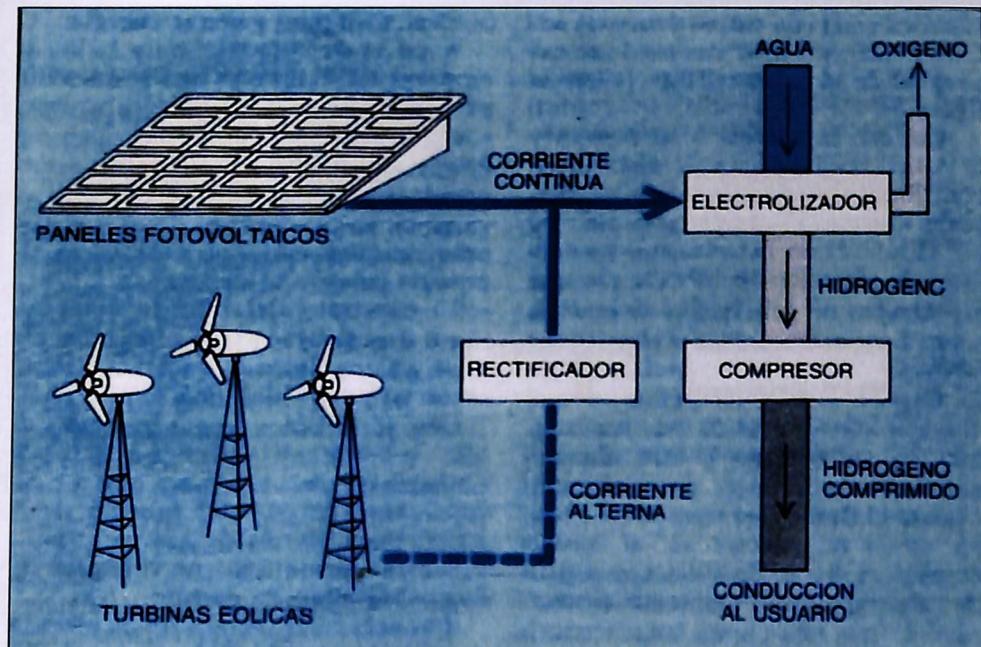


Figura 55. Objetivo ideal: generación de hidrógeno a partir de energías renovables.

El proceso sería energéticamente ventajoso si la corriente para los electrolizadores procediese exclusivamente de energías renovables, como eólica o fotovoltaica (Figura 55). Como beneficio añadido se forma oxígeno puro, necesario para muchos procesos industriales, además de su esencial uso médico.

Incluso se ha establecido un código de colores (Figura 56) de gris a verde, según la procedencia más o menos «limpia» del hidrógeno. Entra aquí la cuestión de la energía nuclear, que sí es realmente una energía primaria, como fuente de tanta energía eléctrica que sería necesaria en lo que ha venido en llamarse, prematuramente, «economía basada en el hidrógeno». Es una opción abanderada por el país con la electricidad más nuclearizada del mundo, Francia, de modo que el hidrógeno «verde» pueda generarse con energía nuclear como fuente principal de electricidad. En Estados Unidos, como consecuencia del extraordinario consumo energético de la informática y la

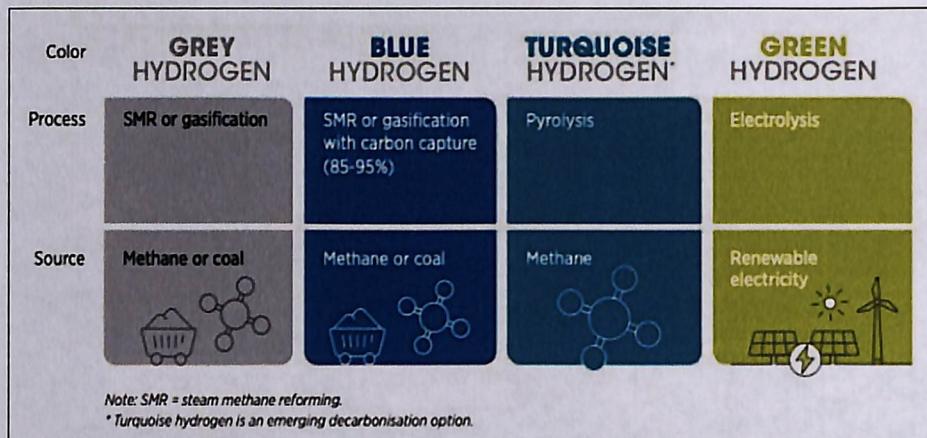


Figura 56. Las distintas opciones para la generación de hidrógeno.

Inteligencia Artificial, Microsoft va a recuperar y volver a poner en funcionamiento la central nuclear de Three Mile Island, hace mucho tiempo clausurada, con un contrato por 20 años. Japón, que había parado sus 48 plantas nucleares tras el accidente de Fukushima, está poniendo varias de nuevo en marcha, pues necesita reducir su dependencia de combustibles fósiles importados.

Una reciente propuesta alternativa para la generación de hidrógeno es el proceso llamado «Flash Joule Heating», pirólisis anaerobia de plásticos a 2700°C, que genera un gas con un 94% de hidrógeno. El producto residual contiene grafeno, de interés creciente en las nuevas tecnologías, y además permite una eliminación de residuos plásticos indeseables en el medio ambiente. De momento, esta tecnología, al igual que el proceso que emplea fotocatalizadores para aprovechar la radiación solar en la descomposición de agua a hidrógeno, se encuentra en fase de laboratorio y el tiempo dirá si, y cuando, será escalable a los volúmenes industriales y con qué balance energético y económico.

Por tanto, el hidrógeno, aun con su muy alta inflamabilidad, dificultades de almacenamiento y transporte y el riesgo de explosión, bien conocidos por quienes hemos trabajado con él, puede ser un útil vector energético. La clave está en disponer,

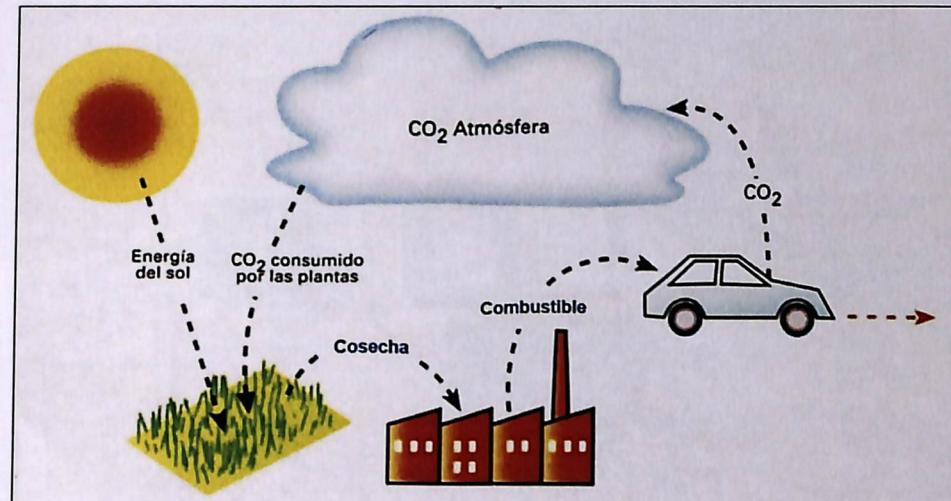


Figura 57. El ciclo teórico de los biocombustibles.

para fabricarlo, de una verdadera fuente de energía primaria renovable y tan limpia como sea posible.

La tercera nueva opción energética deriva de los poco comprendidos biocombustibles. Son, en teoría, una alternativa perfecta, renovable y neutra en CO<sub>2</sub>, que se movería así en un ciclo cerrado entre la atmósfera, las plantas y su combustión en los vehículos, mientras aprovecha la energía solar en la fotosíntesis (Figura 57).

La realidad, por desgracia, es menos halagüeña. La producción de etanol para fabricar las gasolinas E5 y E10 (*gasohol* en Estados Unidos), por ejemplo, es un proceso energéticamente ineficiente y consume tanta o más energía de la que proporciona el etanol obtenido, especialmente por la necesaria destilación para separar el «bio»-etanol de toda el agua que lo acompaña tras la fermentación del grano. Se requiere, además, el uso de fertilizantes y pesticidas y es éticamente discutible el consumo de un alimento tan necesario como el maíz para fabricar combustible de coches (Figura 58).

Respecto al «biodiesel», que se puede obtener fácilmente del aceite de palma, ha llevado a quemar grandes extensiones de bosque con árboles autóctonos para plantar palma, con

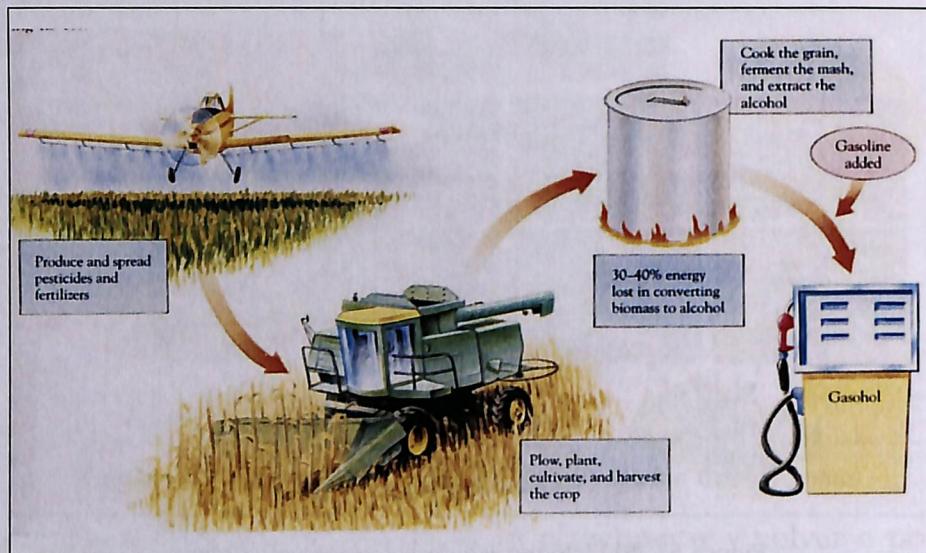


Figura 58. Consecuencias medioambientales de la fabricación de bioetanol.

desafortunadas consecuencias medioambientales. Similar es la situación de los combustibles para las turbinas de los aviones, el generosamente llamado SAF (Sustainable Aviation Fuel) dentro del programa LtP (Liquid to Fuel), promovido por la OACI (International Civil Aviation Organization, ICAO). La experiencia demuestra que pueden funcionar con las turbinas actuales, pero de nuevo se plantea el problema de la fuente vegetal y los costes energéticos de producción.

Algo más realista es la recolección de aceites usados para la fabricación de biodiesel lo que, como tantas mejoras medioambientales, requiere la colaboración activa de los ciudadanos en una sociedad más proclive a protestar y a culpar que a asumir la parte de responsabilidad que a cada uno corresponde. El título del artículo de Biello en *Scientific American* es contundente: «The False Promise of Biofuels».

Aunque el balance energético del proceso puede aún no ser favorable, son de interés ensayos biotecnológicos sobre la utilización de microorganismos en la producción de hidrocarburos para combustible, con la excreción directa de los mismos por

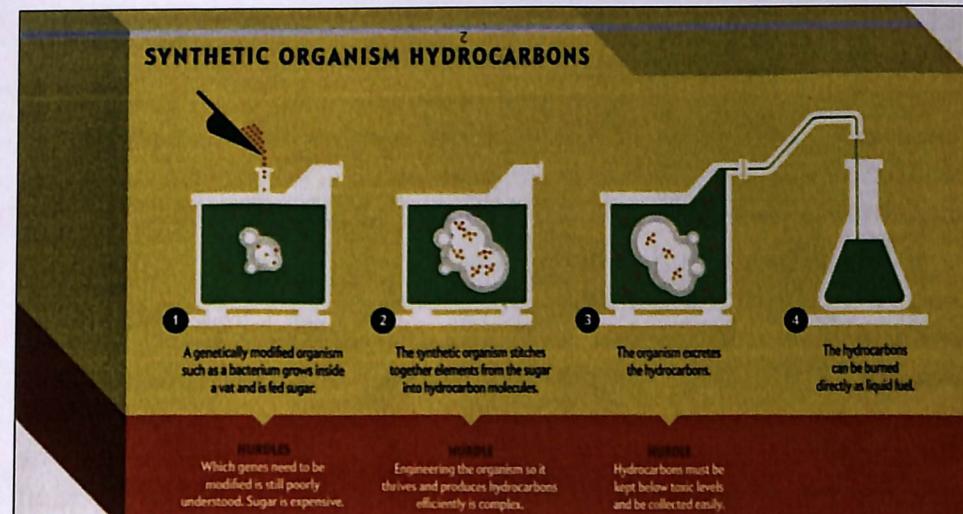


Figura 59. Uso de microorganismos genéticamente modificados para biocombustibles.

los microorganismos, que han de ser para ello genéticamente modificados (Figura 59).

Por otra parte, en la opinión pública están con frecuencia los vehículos eléctricos como una quasi-panacea. Tienen indudables ventajas en cuanto a la significativa reducción de la contaminación local en las ciudades. Los dos factores limitantes son la producción de electricidad para cargarlos y la actual tecnología de las baterías. Respecto al primero, si la electricidad sigue proviniendo en gran porcentaje de fósiles, seguiremos sin descarbonizar, independientemente de que habrá que producir, transportar y distribuir mucha más electricidad. Resulta imprescindible aumentar las plantas de generación con energías no contaminantes, pero también las redes de distribución, mucho más allá de lo que las capacidades actuales son capaces de soportar. El segundo factor limitante es la electroquímica de las baterías, de gran masa y poca capacidad, aunque en los coches ya se alcanzan autonomías prácticas.

Más compleja resulta la propulsión eléctrica en los aviones comerciales. Se ha calculado que un avión medio, con 200 pasajeros y capaz de cruzar Estados Unidos con una carga de

Jet Fuel, en una hipotética versión eléctrica necesitaría para ello 800 toneladas de baterías de Li, calculada con la capacidad de las baterías actuales, del orden de 260 W.h/kg. Con un peso total máximo al despegue para ese tipo de aeronaves de menos de 100 toneladas, la opción eléctrica está fuera de lo actualmente viable.

A los químicos nos queda investigar el gran salto en electroquímica que se requeriría en las baterías. Para el litio existen limitaciones por precio y por las geográficamente monopolísticas reservas de este elemento químico. El litio es un metal ideal, tanto por su baja masa atómica (es el tercer elemento del Sistema Periódico) y densidad, como por su elevado potencial de ionización, pero sería necesario poder construir baterías más ligeras y más capaces con materiales asequibles y más abundantes. El futuro dirá, aunque la OACI ya ha lanzado otro de esos optimistas compromisos cuyo cumplimiento dejamos alegremente en manos de la siguiente generación: lograr que la aviación comercial sea neutra en carbono en 2050.

La principal conclusión es que no resulta posible tener una perfecta y única fuente de energía para las insaciables demandas de la sociedad actual. Necesitamos distintos y complementarios tipos de energía, tratando de reducir, cuanto más y cuanto antes, la dependencia de los combustibles fósiles, e incrementando, cuanto antes y cuanto más, la aún muy pequeña contribución de las nuevas energías lo menos contaminantes y lo más renovables posibles.

Tomando como referencia médica la pandemia de COVID del 2020, se produjo una apreciable reducción en el consumo global de energía, y la proporción que obtenemos de los combustibles fósiles comienza a mostrar recientemente una leve tendencia a la baja, en beneficio de las energías renovables, que han subido en una década del 8,7% al 12,6 %. De ellas, sin embargo, la hidroeléctrica sigue siendo la mayoritaria y es aún muy pequeña la aportación de la eólica y solar, así como en el uso del vector energético hidrógeno (Figura 60).

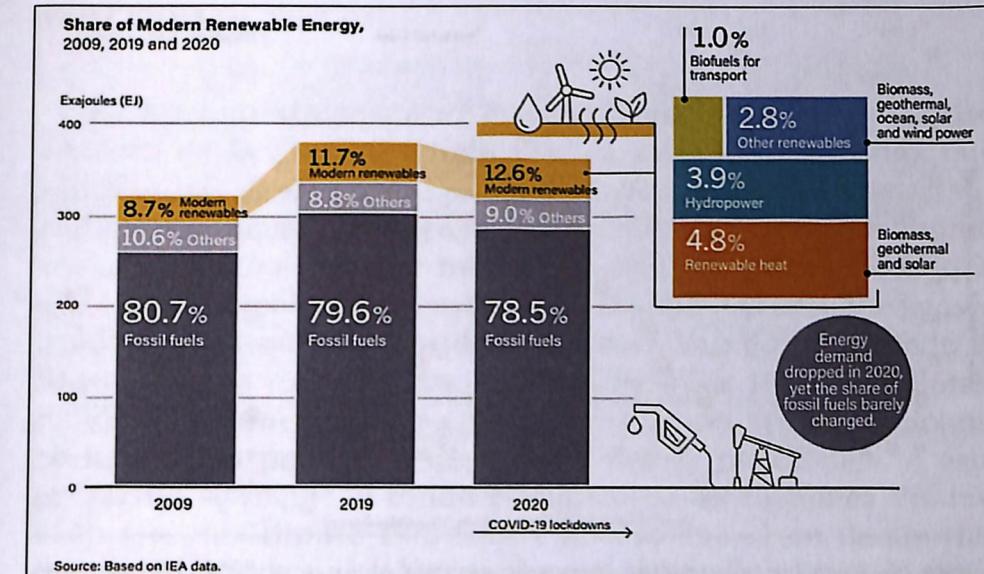


Figura 60. Realidad de la evolución relativa de cada tipo de energía.

No es un ritmo muy ágil para los objetivos de descarbonización. Esperemos que se acelere y mejore las lecciones del pasado, pues el cambio de una fuente de energía a otra nueva ha necesitado históricamente más tiempo de lo deseable. El carbón tardó más de medio siglo, desde 1840, en pasar de constituir el 5% del consumo de energía al 50% y lento ha sido también el avance del petróleo y el gas natural, con 60 años para llegar al 25%. Las modernas renovables, tomando en 2012 la referencia aún por debajo del 5%, crecerán seguramente con mayor y esperanzadora rapidez (Figura 61).

A favor está, sin duda, el muy rápido abaratamiento de las energías renovables en los últimos años (Figura 62) En boca del buen Sancho, «*Sobre un buen cimiento se puede levantar un buen edificio, y el mejor cimiento y zanja del mundo es el dinero*».

Quede, pues, como cierre esta nota tan egoísta como moderadamente optimista.

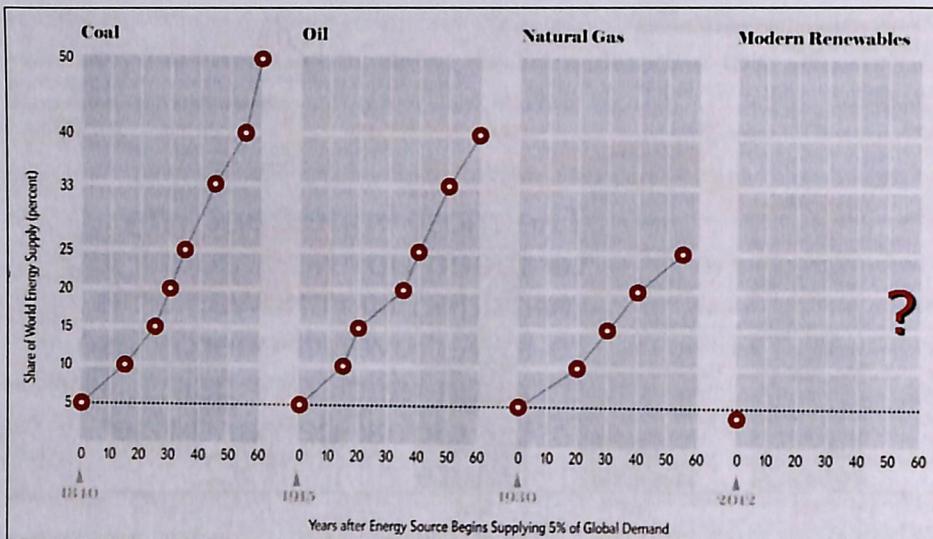


Figura 61. Años hasta que cada forma de energía alcanza el 50% del consumo mundial.

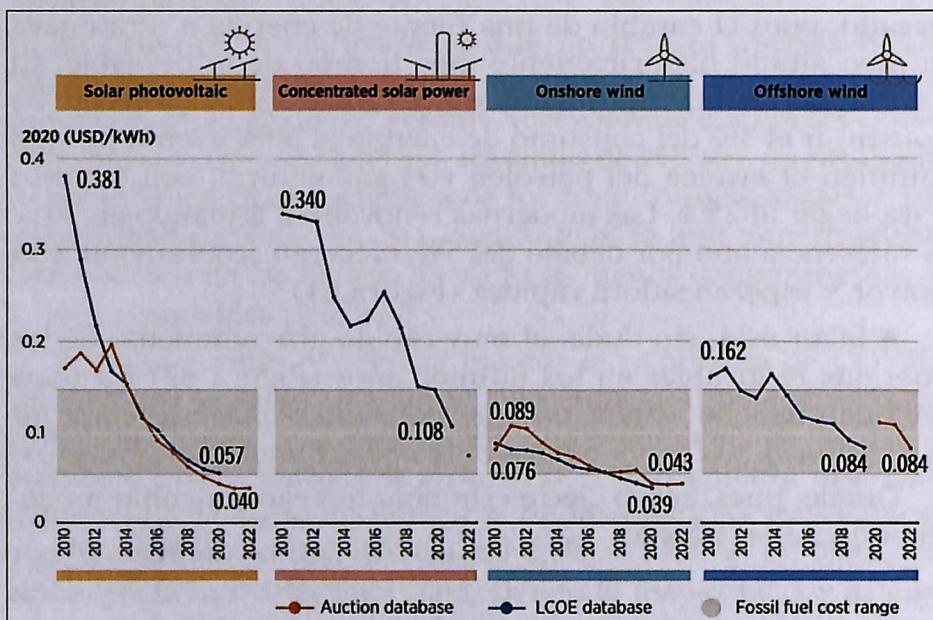


Figura 62. Evolución del coste de diferentes energías renovables.

## EPILOGO

El humanista toscano Poggio Bracciolini en su escrito «*Acerca de la avaricia*» indicaba, ya en el Renacimiento, que «*en tiempos de necesidad pública, la élite próspera ha de actuar como un almacén de dinero*». Puede ello extenderse del ámbito social al geopolítico, de modo que sean los países ricos (que son los principales responsables de la situación actual en gases invernadero) quienes ayuden al Tercer Mundo, el llamado el Sur Global, a mejorar la situación. Pero los 100.000 millones de euros prometidos en Copenhague como ayuda medioambiental a los países en desarrollo siguen pendientes. A este propósito se dirige el fondo climático de las Naciones Unidas, U.N. Green Climate Fund, establecido con el fin de aportar ayuda internacional a los países en desarrollo para mitigar el cambio climático.

La atmósfera no tiene fronteras. Las emisiones de uno afectan a todos. Estados Unidos tiene el 5% de la población mundial, pero genera el 25% de las emisiones globales; Europa, con el 6% de la población, emite el 20%. Alguien ha llamado a esto «imperialismo atmosférico», al que China se añade con rapidez, y es evidente que los países ricos no pueden moralmente exigir a los pobres y aun no desarrollados el mismo esfuerzo y el mismo coste en descarbonización que deben exigirse a sí mismos.

Las decisiones últimas son, por tanto, económicas y políticas, pero si estas siguen despreciando los datos científicos no pasaremos de declaraciones más o menos bienintencionadas, publicitarias... y sistemáticamente incumplidas. Aunque la ciencia y la técnica nos hayan permitido alcanzar el nivel de vida y de salud actuales, también han creado con ello problemas colaterales como los presentados en este discurso. Sin embargo, es también evidente que la sociedad no podrá resolver este, como tantos otros problemas de la civilización, sin apoyarse en datos científicos. Señala Alfred Bader en «*Chemophobia*» que no debemos dejarnos llevar por un odio a la ciencia. Lo que la ciencia y la técnica hacen y producen, para bien y para mal,

deriva de las necesidades, y aún de los deseos y exigencias, de la sociedad. Y, a pesar de sus efectos deletéreos, a la ciencia y a la medicina le debemos una esperanza y una calidad de vida como nunca tuvo la humanidad. Solo en manos de la ciencia, precisamente, están las soluciones al control de la contaminación y la descarbonización.

Sres. Académicos, Sras. y Sres.:

La tarea de «descarbonizar» nuestra cultura, desde las instituciones, pero también por cada uno de nosotros, no será fácil.

Hagamos, pues, bueno el lema de la sociedad literaria de Amsterdam en el siglo XVII:

«*Nil volentibus arduum*». Nada es difícil para quien tiene voluntad.

He dicho.

## BIBLIOGRAFÍA RELEVANTE

La relación alfabética que sigue pretende recoger la bibliografía pertinente al tema del discurso. En cada cita, además de la referencia bibliográfica completa, se indica el título o contenido del artículo, libro o documento, para orientar al lector en su relación con las ideas recogidas en el texto.

- Aguilar, J., «El efecto invernadero, el cambio climático, la crisis medioambiental y el futuro de la Tierra», Discurso de ingreso en la Real Academia Nacional de Medicina (2003).
- Alvar, J., «Pobreza y enfermedad. Debate y embate de las enfermedades tropicales», Discurso de ingreso en la Real Academia Nacional de Medicina de España, 2021.
- Bader, A., «Chemophobia: Fear of the Future». Parson's Award Address, 1995.
- Berners-Lee, M., «There is not Planet B», Cambridge University Press, 2021.
- Biello, D., «The False Promise of Biofuels», Scientific American, (8), 39 (2011).
- Bows, A. *et al.*, «Aviation and Climate Change», Routledge, 2008.
- Brannen, P., «The End of the World», One World Publications, 2018.
- Bhutta, D.B., «Geriatric Medicine in the Era of Climate Change», Age and Ageing, 51 (2022).
- Carreras, J.L., «El cambio climático visto por un médico», Real Academia Nacional de Medicina de España, 2007.
- Castro, O., Martín, E. «La sostenibilidad medioambiental en el sector aeronáutico», COAIE, 2022.
- Comisión Europea, «Informe de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo relativo al funcionamiento del mercado europeo del carbono en 2021 en virtud del artículo 10 y 21 de la Directiva 2003/87/CE de 14 de diciembre de 2022.
- Duato, J., «Inteligencia Artificial: Salud y Sostenibilidad», TETRACA, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Enero 2024.
- Elguero, J., «¿Podemos los científicos mejorar el futuro?», Discurso Inaugural Real Academia de Ciencias, 2019.
- Ellul, J., «Le système technicien», Calman-Lévy, p. 167, 1977.
- Fernández-Rañada, A., «Los científicos y Dios», Nobel, 1994.
- Eurocontrol, «Does Taxing Aviation Really Reduce Emissions?, Aviation Sustainability Unit. Think Paper 7, 2020.
- Eurocontrol, «Objective Skygreen. Think Paper 16. Reducing Aviation Emissions by 55% by 2030. Can it be done and, if so, what are the extra costs of decarbonisation measures?», 2022.
- Fetscher, I., «Condiciones de supervivencia de la humanidad», Alfa, Barcelona, 1988.
- Foote, E.N., «Circumstances Affecting the Heath of Sun's Rays», 8<sup>th</sup> Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science», 1856.
- Fortey, R., «Life: An unauthorized Biography, A Natural History of the first Four thousand million years of Life on Earth», Folio, 2008.
- Franzin, J., «Carbon Capture», The New Yorker, April. 6, p. 56 (2015).

- Galchen, R., «Are we Doomed», *The New Yorker*, June 10, 22 (2024).
- Gilsanz, F., «Anestesia inhalatoria. Del óxido nitroso al xenón», Real Academia Nacional de Medicina, 21 de mayo de 2024.
- González de Posada, F., «El calentamiento global antropogénico: actualidad», Real Academia Nacional de Medicina de España, 2024.
- González de Posada, F., «Leonardo Torres Quevedo», Fundación Banco Exterior, 1992.
- González de Posada, F., «Leonardo Torres Quevedo, el más prodigioso inventor de su tiempo», *Anales de la Real Academia Nacional de Medicina*, CXXIV, 1º, 59 (2007).
- Gossling, S. y Upham, P. Eds., «Climate Change and Aviation», Earthscan, 2009.
- Greshko, M., «Nuclear power for AI: what it will take to reopen Three Mile Island safely», *Nature News*, September, 30 (2024).
- Harvey, C. et al., «The first two years of Russia's war in Ukraine have produced 175 million tons of carbon dioxide», *Scientific American*, June 16 (2024).
- Hern, W.M. «Description and Diagnosis of a Planetary Ecopathological Process», *Population and Environment*, 12, 9 (1990).
- Immerwahr, D., «Como ocultar un imperio», C. Swing Libros, 2023.
- Inglis, G. N., et al., «Descent Toward the Icehouse: Eocene Sea Surface Cooling Inferred from GDGT Distributions.» *Paleoceanography* 30, 1000 (2015).
- IPCC, «Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», 2022.
- Jamieson, D., «Reason in Dark Time. Why the Struggle Against Climate Change Failed, and What it Means for Our Future», Oxford University Press, 2014.
- Jarvis, B., «Sea Change», *The New Yorker*, August 26, 32 (2024).
- Keh, E. et al., en *Creating Chemistry*, varios artículos, 13, 2024.
- Klöwer, M. et al., «Quantifying Aviation's Contribution to Global Warming», *Environ. Res. Lett.*, 16, 104027 (2021).
- Kolbert, E., «Burn Notice. The Control of Nature», *The New Yorker*, Feb. 5, p. 20 (2024).
- Kolbert, E., «Under a White Sky», Viking Books, 2022.
- Levi, P., «Carbonio» en *Il Sistema Periodico*, Enaudi, p. 229, 1975. Edición Española, «El Sistema Periódico», Alianza, 1988.
- Levy, G., «Homo Ecophagus», *International Laboratory*, (11-12), 4 (1991).
- Linden, E., «Fire and Flood», Penguin Books, 2023.
- Loach, M., «Climate Action to Transform our World. It is not that radical», Dorling Kindersley, 2024.
- Luhn, A., «Scientists Will Engineer the Ocean to Absorb More Carbon Dioxide», *Scientific American*, September 12, 2024.
- Maceiras, M., «Identidad y Responsabilidad», Discurso de Apertura de Curso, Universidad Complutense, 1994.
- Manabe, S. y Broccoli, A.J., «Beyond Global Warming», Princeton University Press, 2020.
- Mestres, R., «Química sostenible» en «Biblioteca de Química», Seoane, C. Ed., Síntesis, 2011.
- McKibben, B., «The End of Nature», Penguin Books, 2022.
- Mirandola, G.P. della, «De la dignidad del hombre» p. 103, Ed. Nacional, Madrid, 1984.

- Mukhopadhyaya, J., Rutherford, D. «Performance Analysis of Evolutionary Hydrogen-powered Aircraft», ICCT, 2022.
- Myers, S., Franklin, H., «Planetary Health. Protecting Nature to Protect Ourselves», Island Press, 2020.
- National Academy of Sciences, «Current Methods for Life Cycle Analysis of Low-carbon Aviation Fuels in the United States» The National Academy Press, 2022.
- O'Connor, M.R., «Ignition: Lighting Fires in a Burning World» Public Affairs, 2023.
- Oreskes, N., «The False Promise of Carbon Capture», *Scientific American*, 330(3), 80 (2024).
- Oreskes, N., «Why Trust Science? Princeton University Press, 2021.
- Otto, F., «Angry Weather», Greystone Books, 2023.
- Overy, R., «Strategies in Offensives Against Germany», en Dean, I. Ed., *The Oxford Companion to WWII*, 1066, Oxford University Press, 1995.
- Palma, A.O., «El cambio climático, una amenaza global», Ediciones Alfar, 2021.
- Phillips, H., «Hum», S&S/ Marysue Rucci Books (2024).
- Pyne, S.K., «Life in the Pyrocene», *Scientific American*, 330 (5), 22 (2024).
- Pyne, S.K., «The Pyrocene: How We Created an Age of Fire, and What Happens Next», University of California Press, 2022.
- Ribera, J.M., «Cambio climático, salud y persona mayor», Real Academia Nacional de Medicina, 2022. *Anales de la Real Academia Nacional de Medicina*, CXL (1), 2023.
- Rodríguez Montes, J.A., «Impacto medioambiental de la cirugía», Real Academia de Medicina de España, 2024.
- Romanello, M., et al., «The 2021 Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change: Code Red for a Healthy Future», *Lancet*, 398, 1619 (2021).
- Rooney, S., «Beautiful World, Where Are You» Farrar, Straus and Giroux (2021).
- Seoane, C., «La Química, aliada de la Medicina», Discurso de ingreso en la Real Academia Nacional de Medicina de España, 2004.
- Speth, J.G., «Red Sky at Morning», Yale University Press, 2005.
- Struzik, E., «Dark Days at Noon. The Future of Fire», McGill-Queens University Press, 2022.
- Suels, A. Alfari, O., Munar, F., «Audit of Plastic Waste Generated by Anesthetic Practice in the Operating Room of a Burn Unit», *Euroanesthesia* 2021.
- Thompson, S.L., Schneider, S.H. «Carbon Dioxide and Climate: Ice and Ocean» *Nature*, 290, 9, (1981).
- Varughese, S., Ahmed, R., «Environmental and Occupational considerations of Anesthesia. A Narrative Review and Update» *Anesth. Analg.*, 826 (2021).
- Viñas, J.M., «La huella climática en la pintura» José Miguel Viñas, Entrelíneas (18), 30 (2010).
- Waldman, K., «Future Imperfect», *The New Yorker*, August 26, 73 (2024).
- Welz, A., «The End of Eden», Bloombury Sigma, 2023.
- Westergard, R., «One Planet is Enough», Copernicus, 2017.
- Yard, «Just Plane Wrong: Celebs With the Worst Private Jets CO<sub>2</sub> Emissions», [https://weareyard.com/insights/worst-celebrity-private-jet-CO<sub>2</sub>-emissions-offenders](https://weareyard.com/insights/worst-celebrity-private-jet-CO2-emissions-offenders), July 29 (2022).

ESTE LIBRO SE TERMINÓ DE IMPRIMIR EL DÍA 9 DE ENERO  
DE 2025, FESTIVIDAD DE SAN EULOGIO DE CÓRDOBA,  
EN LOS TALLERES GRÁFICOS DE IMPRENTA  
TARAVILLA, S.L. MESÓN DE PAÑOS, 6  
28013 MADRID