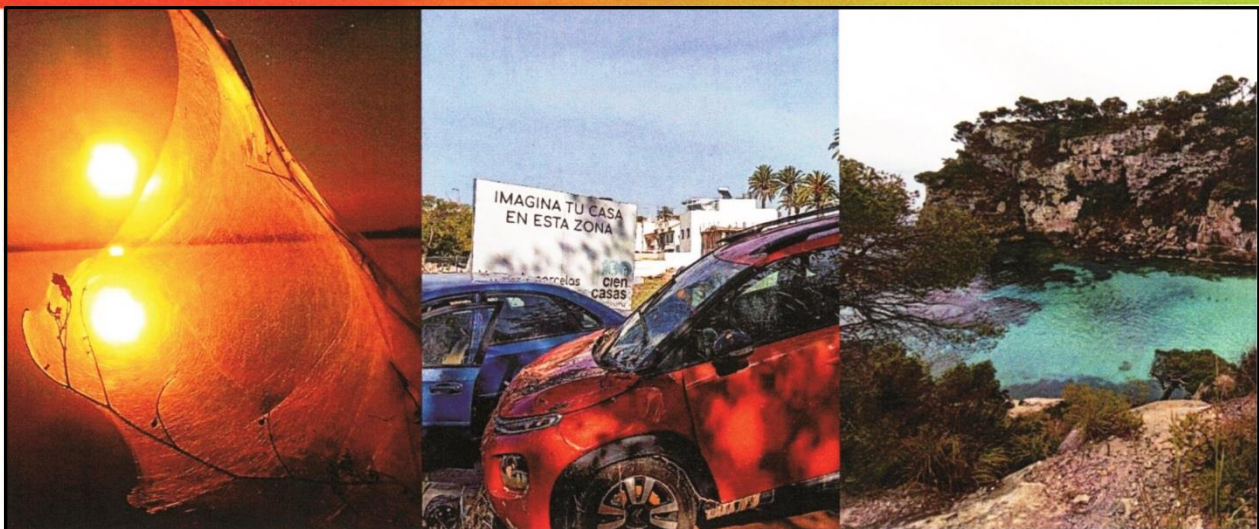
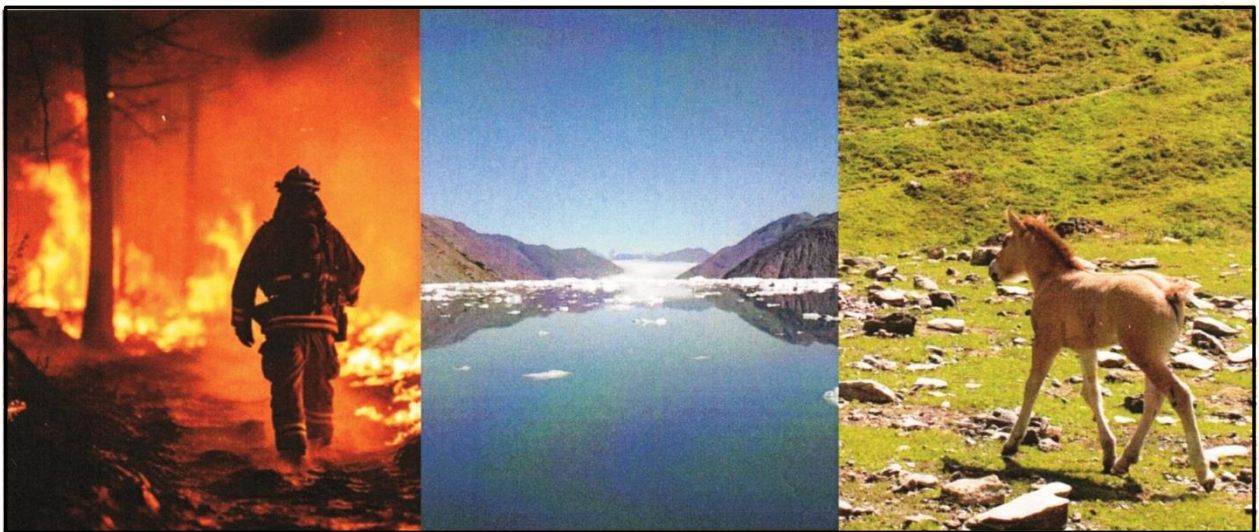


CAMBIO CLIMÁTICO ANTRÓPICO

Del cambio climático hacia la construcción
de un futuro sostenible

UNIDAD DIDÁCTICA



Jaime Carrascosa

Cambio Climático Antrópico
Del cambio climático hacia la
construcción de un futuro sostenible

UNIDAD DIDÁCTICA

© 2026, Jaime Carrascosa Alís

Primera edición digital: 14 de mayo de 2026

Editor: Jaime Carrascosa Alís

Contacto: cajai@alumni.uv.es

Se permite la reproducción total o parcial de esta obra, su incorporación a un sistema informático, su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros), siempre que sea con fines educativos y citando la fuente. Se puede descargar libremente en ResearchGate y también en las web: Divulgameteo.es y didacticafisicaquimica.es



Esta unidad didáctica está conectada con un libro del mismo título y se revisa periódicamente (en general de forma anual), actualizando algunos contenidos e incorporando otros nuevos.

Printed in Spain - Impreso en España

ISBN: 978-84-09-86560-4

DEL CAMBIO CLIMÁTICO HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE UN FUTURO SOSTENIBLE

Jaime Carrascosa Alís. Universitat de València. jaime.carrascosa@uv.es

INTRODUCCIÓN

Actualmente estamos asistiendo a un verdadero cambio climático terrestre. Eso significa que a escala planetaria y para mucho tiempo se modifican condiciones ambientales tales como la temperatura media del aire y su grado de humedad, la circulación del viento, los patrones de las precipitaciones o fenómenos extremos (como huracanes, sequías e inundaciones).

Durante la larga historia de la Tierra ya han ocurrido muchos cambios climáticos y en ocasiones de tal magnitud que se produjeron extinciones masivas de especies. Sin embargo, el actual tiene unas características que lo hacen diferente de todos los anteriores. La principal es su origen **antrópico**, es decir, somos los seres humanos los responsables. Se trata, además, de un gran cambio global ya en marcha y que constituye, muy posiblemente, el mayor problema al que se enfrenta la humanidad, dadas sus graves consecuencias presentes y futuras. Existe un consenso científico elevado acerca de que el cambio climático antrópico (CCA) iniciado durará mucho tiempo, pero, afortunadamente, disponemos ya de una abundante información sobre sus causas y sabemos qué hay que hacer para frenarlo y mitigar sus efectos. Además, tenemos los medios adecuados y todavía estamos a tiempo de hacerlo, aunque lo cierto es que no nos queda mucho y hoy urge, más que nunca, tomar las medidas necesarias para afrontar el problema y evitar que se desarrollen cambios catastróficos e irreversibles, que conduzcan a un planeta en gran parte inhabitable para el ser humano y muchas otras especies..



¿Qué nos interesa conocer respecto del cambio climático?

Para tomar las decisiones más adecuadas con las que enfrentar un problema tan grave y de tal magnitud, es necesario que estas sean demandadas y aceptadas por la mayoría de la población; y para ello resulta esencial la existencia de una ciudadanía bien formada. Este es el principal objetivo de esta unidad didáctica. Para ello, analizaremos en primer lugar en qué consiste el CCA, cuáles son sus principales causas y qué consecuencias tiene. Esto permitirá, después, comprender mejor cuáles son las medidas más eficaces para poder afrontarlo. Terminaremos analizando por qué, a pesar del elevado consenso científico existente en torno a la gravedad del problema, dichas medidas no se están impulsando y desarrollando como sería necesario. Esta unidad didáctica está conectada con un libro del mismo título, aunque aquí los contenidos se enfocan específicamente para ser utilizados con alumnado de distintos niveles educativos (desde Educación Secundaria Obligatoria hasta la Universidad) y se incluye además un apartado de ejercicios y problemas, así como diversos anexos. Para desarrollar todos estos contenidos seguiremos el siguiente índice:

Índice

1. El clima terrestre como sistema autorregulado -----	3
2. Efecto invernadero y aumento del efecto invernadero -----	9
3. Gases de efecto invernadero y sus emisiones -----	15
Dióxido de carbono -----	15
Metano -----	19
Otros gases invernadero -----	21
Gases invernadero y crecimiento urbanístico -----	23
Emisiones de gases invernadero en agricultura y ganadería -----	25
4. Temperatura media global -----	29
5. Consecuencias del calentamiento global -----	33
Fusión del hielo continental y marino -----	33
Acidificación de los océanos -----	41
Aumento de frecuencia e intensidad en fenómenos extremos -----	43
Alteración de ritmos vitales y pérdida de biodiversidad -----	47
Aumento de la probabilidad de cambios catastróficos -----	50
6. ¿Por qué aumentan las emisiones de gases invernadero? -----	57
Modelo económico imperante, basado en el hiperconsumo -----	57
Superpoblación -----	59
Grandes desigualdades entre distintos grupos humanos -----	61
7. Medidas para afrontar el cambio climático -----	63
Científico-tecnológicas -----	63
Educativas -----	66
Políticas -----	71
Utilización de la energía nuclear -----	73
8. ¿Qué hemos aprendido hasta aquí? -----	77
9. ¿Por qué no hacemos más de lo que hacemos? -----	83
Cuestiones, ejercicios y problemas -----	101
Anexos (I, II, III y IV) -----	107
Bibliografía -----	145

Para favorecer un mejor aprovechamiento de los contenidos tratados, se parte de la base de que todo aprendizaje es la respuesta a una cuestión. Por ello, su estructura se ajusta a una secuencia de actividades problematizadas con las que se van desarrollando los contenidos. Las actividades están en *cursiva* y conviene reflexionar primero sobre ellas antes de seguir leyendo, confrontando después lo que se haya pensado con la información que se suministra.

1. EL CLIMA TERRESTRE COMO SISTEMA AUTORREGULADO

El **tiempo** meteorológico viene dado por las propiedades de la troposfera¹ (temperatura, humedad, nubosidad, viento, precipitaciones, etc.) en un lugar y momento dados. Mientras que el **clima** en una zona determinada puede definirse, de forma aproximada, como el promedio del tiempo meteorológico en esa zona a largo plazo (30 años o más), incluyendo las variaciones estacionales y los posibles extremos climáticos (huracanes, sequías, lluvias torrenciales...).



El **sistema climático** está formado por: atmósfera (capa gaseosa que envuelve a toda la superficie del planeta), suelo terrestre (orografía), hielo y nieve, mares y océanos, agua dulce (líquida) y toda la biosfera. Se trata de un sistema complejo y cambiante en el que cada componente (o subsistema) interacciona continuamente con todos los demás, aunque cada uno evoluciona en escalas temporales diferentes².

La atmósfera es el componente que caracteriza el clima, fundamentalmente por la temperatura del aire que contiene y por la cantidad de precipitaciones (con sus variaciones estacionales) y otros fenómenos meteorológicos que ocurren en la troposfera. Los distintos patrones de temperatura y precipitaciones de unas regiones a otras conducen a los diferentes tipos de clima (templado, seco, tropical, polar, etc.). Dichos patrones son producidos, principalmente, por la forma de circular el sobre la superficie del planeta. Cuando se amplía la visión regional y se extiende a todo el globo, se habla de **clima terrestre**.

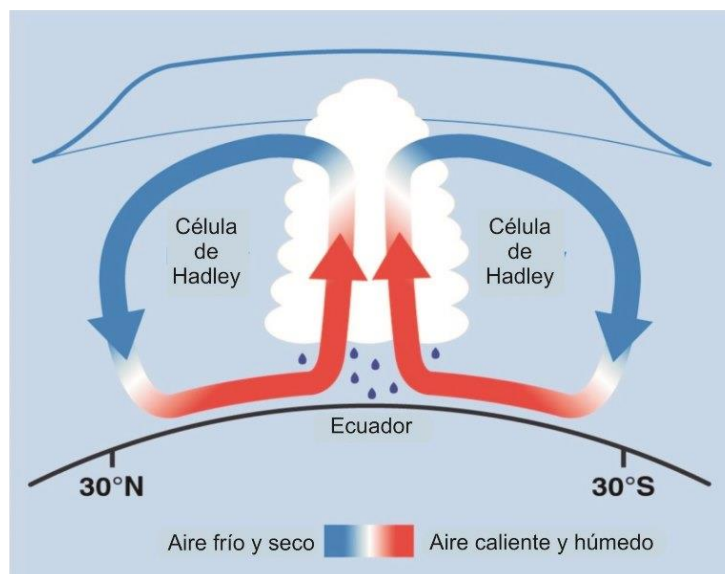
El clima terrestre viene determinado fundamentalmente por los siguientes factores:

Propiedades del aire y del agua: Cuando el agua de los océanos se calienta, parte de ella se evapora y asciende. Esto se da especialmente cerca del ecuador donde la intensa radiación solar calienta mucho las aguas oceánicas y provoca una evaporación masiva. Al ser menos denso, este aire cálido y húmedo asciende, generando **zonas de baja presión** en la superficie. A medida que sube, el aire se expande y se enfría, lo que causa la condensación de vapor de agua en nubes y la consecuente liberación de calor latente (energía), alimentando aún más este ascenso.

¹ Capa más baja de la atmósfera. Aproximadamente 17 km de espesor en el ecuador y unos 7 km en los polos. Es donde tienen lugar los fenómenos meteorológicos y donde se encuentra la mayor parte de la masa de aire (alrededor del 75%) y casi todo el vapor de agua.

² Más información en Viñas (2022), pág. 96 (ved en referencias bibliográficas).

Una vez en las capas altas de la troposfera, el aire ya seco y frío se desplaza hacia latitudes subtropicales. Alrededor de los 30° de latitud, este aire se vuelve tan denso que comienza a descender, creando **zonas de alta presión** (anticiclones). Finalmente, debido a la diferencia (gradiente) de presión, estas masas de aire son succionadas de vuelta hacia el ecuador por la superficie (zona de baja presión), cerrándose así el ciclo. Este proceso de ascenso y descenso de aire no ocurre de forma aislada, sino que forma parte de un sistema global de circulación atmosférica compuesto por tres células de convección en cada hemisferio (distribuidas simétricamente y con los mismos nombres). La que acabamos de describir, conocida como célula de Hadley, es la más potente y está situada entre el ecuador y los 30° de latitud. A continuación está la célula de Ferrel (entre 30° y 60 °) y finalmente la célula Polar. Estas células son componentes esenciales de la circulación atmosférica y transportan aire, calor y humedad, de unas zonas a otras del globo. En la figura siguiente se ha representado de forma esquemática las células de Hadley en los hemisferios norte y sur.

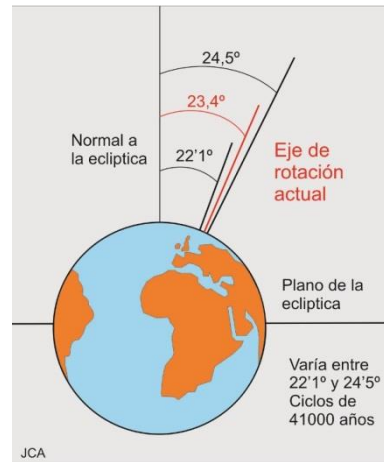


Fuente original: NOAA

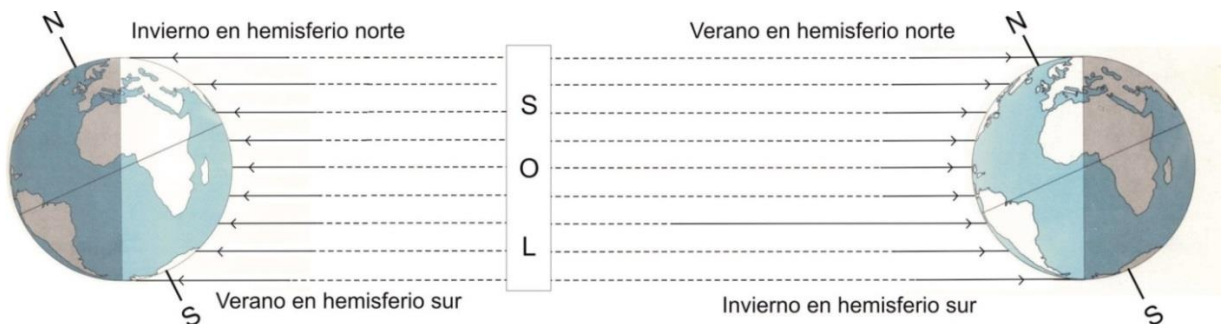
En la frontera entre la célula de Ferrel y la Polar existe un contraste de temperatura brutal en muy poca distancia. El aire de la célula de Ferrel es cálido y expandido, mientras que el de la Polar es frío y comprimido. Esta diferencia de temperatura genera una diferencia de presión radical en las capas altas de la troposfera. Como el gradiente de presión es tan grande, el aire en esa zona se acelera hasta alcanzar velocidades de entre 150 km/h y 300 km/h. Debido a la rotación de la Tierra, ese aire que «intenta» moverse hacia el polo se desvía fuertemente hacia la derecha (en el Hemisferio Norte) y como resultado final se genera un corriente en forma de anillo o cinta con centro en el eje terrestre, de unos centenares de kilómetros de anchura y unos pocos kilómetros de espesor, entre los 9 km y 12 km de altura. Se conoce como Corriente en Chorro Polar y tiene un papel fundamental en el clima terrestre (para más detalles al respecto, ved el anexo 3 al final de esta unidad didáctica).

Radiación solar que llega a la Tierra: El Sol suministra energía al planeta en su conjunto. La cantidad de energía que llega a distintas regiones del globo terrestre, depende de diversos factores astronómicos como, por ejemplo, la mayor o menor inclinación del eje de rotación de la Tierra, la excentricidad de la órbita terrestre y, por supuesto, la cantidad de radiación que sale del Sol hacia la Tierra. Todos estos factores varían periódicamente.

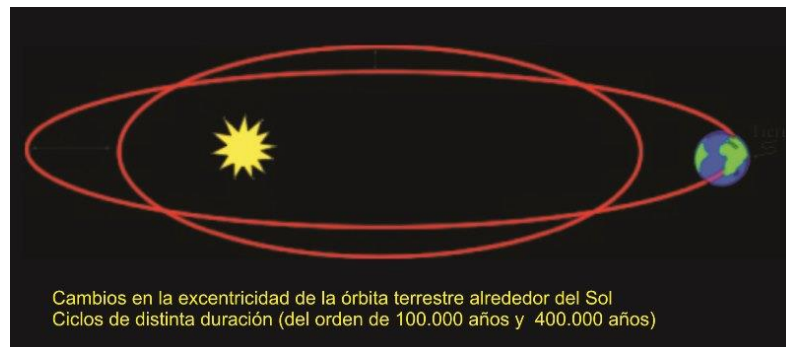
El eje de la Tierra no está recto, sino inclinado. Esta inclinación varía entre $22,1^\circ$ y $24,5^\circ$ cada 41 000 años. Cuanto más inclinado está el eje, más calor reciben los polos en verano y menos en invierno, lo que influye directamente en el crecimiento o retroceso de los glaciares.



Por otra parte, sabemos que la inclinación del eje terrestre crea estaciones de signo opuesto en ambos hemisferios. Actualmente, el eje de rotación de la Tierra está inclinado algo más de 23° respecto del plano de su órbita. Ello hace que en el hemisferio norte sea verano cuando este está inclinado hacia el Sol (ved figura de la derecha), mientras que cuando el hemisferio norte se inclina en dirección opuesta al Sol, en él es invierno (ved figura de la izquierda).



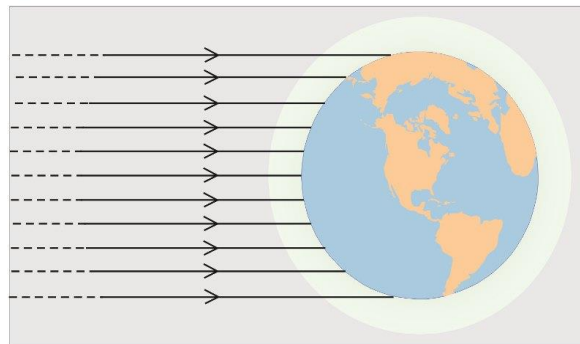
La trayectoria de la Tierra alrededor del Sol no es un círculo perfecto, sino una elipse que se estira y se encoge en ciclos de distinta duración debido a la atracción gravitatoria de otros planetas. Cuando la órbita es más elíptica, la diferencia de distancia al Sol entre el punto más cercano (perihelio) y el más lejano (afelio) aumenta, alterando la duración de las estaciones y la cantidad de radiación recibida en momentos clave del año.



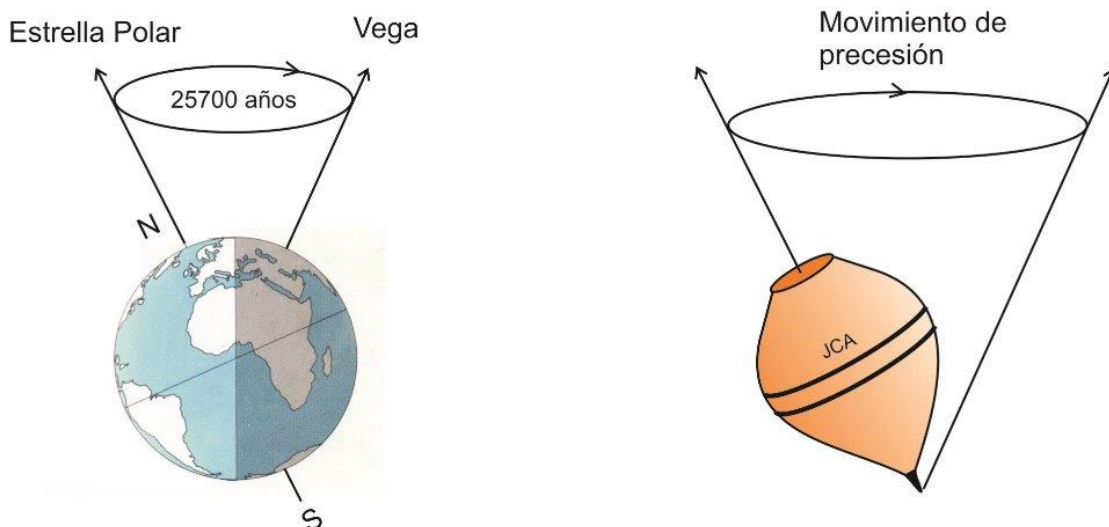
Además de los movimientos de la Tierra, el propio Sol no siempre emite la misma cantidad de energía. Su actividad varía de forma cíclica aproximadamente cada 11 años, un fenómeno que se manifiesta a través de las manchas solares. Durante los periodos de máxima actividad, el Sol presenta más manchas y emite más viento solar y más radiación ultravioleta.

Desigual calentamiento de la superficie terrestre:

Mucho mayor en la zona del ecuador, donde los rayos solares inciden más perpendicularmente que en las zonas polares, a las que estos llegan mucho más inclinados y, por tanto, más debilitados al tener que recorrer mas distancia de atmósfera, tal y como se muestra en el esquema de la derecha (no a escala).



Orientación del eje terrestre: El eje terrestre, además de cambiar periódicamente su inclinación, experimenta un movimiento de precesión (similar al de una peonza) cambiando su orientación, cuyo ciclo dura alrededor de 25 700 años. Actualmente, como se puede apreciar en el esquema siguiente, está orientado hacia la estrella polar, pero aproximadamente dentro de unos 13 000 años apuntará hacia la estrella Vega. Si nos atenemos solo a este factor, ello implicará un cambio en las estaciones, de modo que, al contrario de como ocurre ahora, durante los meses de junio, julio y agosto, será invierno en el hemisferio norte y verano en el hemisferio sur.



Giro de la Tierra sobre su eje de oeste a este: Evita que las corrientes de aire vayan derechas al N y al S desde el ecuador, haciendo que se desvíen principalmente hacia el E en el hemisferio norte y hacia el O en el hemisferio sur.

Por otro lado, la circulación atmosférica influye en la **circulación oceánica**, mediante la acción de los vientos sobre las aguas de la superficie marina y los cambios de temperatura y salinidad de dichas aguas, ocasionados por las precipitaciones y la evaporación. Las **corrientes oceánicas** contribuyen a redistribuir la energía recibida del Sol, influyendo en el clima y

en la vegetación (especialmente cerca de la costa). Así, por ejemplo, sin la corriente del Golfo (que transporta al menos 20 veces más agua que todos los ríos del mundo en su conjunto), el clima de Europa noroccidental sería subártico. Estas corrientes, ayudan también a distribuir nutrientes y oxígeno disuelto, ambos fundamentales para la vida acuática.

También influyen en el clima la **composición de la atmósfera** (porcentaje de los distintos gases que forman el aire, sea cual sea su origen) y la presencia en ella de **nubes** y de **aerosoles**³; así como la existencia y distribución en la superficie terrestre de **cadenas montañosas, ríos y lagos, masas boscosas, selvas, grandes desiertos, hielo y nieve**.

Así pues, el clima depende de factores muy diversos, los cuales cambian a lo largo de periodos más o menos largos de tiempo haciendo que el clima se modifique, como de hecho ha ocurrido ya otras veces durante la larga historia de la Tierra (y seguirá ocurriendo).

Hace algo más de 30 millones de años que se formó el hielo que cubre el continente antártico y menos de 3 millones de años que se formó el casquete de hielo ártico marino en el polo norte. Este último acontecimiento marcó el comienzo de la era cuaternaria que, desde entonces, se caracterizó por una sucesión de periodos glaciales (fríos) de unos 80 000 – 90 000 años de duración aproximadamente, separados por periodos interglaciales (cálidos) de menor duración. No se sabe exactamente cómo comienzan esos periodos glaciales, pero diversos estudios indican que la cantidad de sol durante el verano es crucial para los continentes del hemisferio norte, ya que si desciende por debajo de un valor crítico, la nieve del invierno anterior no se derrite y los mantos de hielo comienzan a crecer en la medida que se acumula cada vez más nieve. El ritmo natural de aparición de los periodos glaciales está vinculado, entre otras posibles causas, a la variación periódica de varios factores astronómicos, tales como la excentricidad de la órbita que describe la Tierra o la oblicuidad y dirección del eje terrestre.

El último periodo glacial comenzó hace aproximadamente 110 000 años y terminó hace unos 12 000. Desde entonces, nuestro planeta disfruta de un clima templado y relativamente estable (con sus diferencias regionales), que sin duda fue determinante en el rápido desarrollo de la civilización hasta la actualidad. De hecho, nuestra especie (*Homo sapiens*) surgió hace unos 300 000 años; por tanto, durante muchos miles de años de glaciación hubo ya seres humanos como los actuales, pero los avances, en ese contexto climático, fueron difíciles y lentos. Cabe pues plantearse:



¿Por qué la temperatura media terrestre se ha mantenido durante mucho tiempo (desde que finalizó la última glaciación, hace unos 12 000 años) constante y en torno (con pequeñas fluctuaciones) a los 14 °C?

La explicación a esta importante cuestión se basa en la existencia de un equilibrio energético. En efecto, las radiaciones solares suministran energía a nuestro planeta continuamente, pero dicha energía no se va acumulando debido a que hay un equilibrio entre la energía absorbida por la Tierra (continentes, mares y atmósfera) y la energía emitida por ella al espa-

³ Partículas muy pequeñas (microscópicas) de líquidos o sólidos que se hallan en suspensión en un medio gaseoso (en este caso el aire). Su origen puede ser natural (cenizas volcánicas, sal marina, polvo, etc.) o artificial (incendios, humos, construcción, etc.).

cio, de forma que la energía absorbida ha de ser igual a la emitida. El clima mundial está determinado por ese equilibrio termodinámico, de manera que:

El valor de la temperatura media de la Tierra es siempre aquel que permite al planeta devolver al espacio la misma energía que recibe; de modo que si, por alguna razón aumentase la energía absorbida, la temperatura media del planeta se elevaría hasta alcanzar el valor adecuado para restablecer el equilibrio (y viceversa).

La conclusión anterior tiene una importancia vital, puesto que eso es precisamente lo que está ocurriendo. Hemos alterado el equilibrio energético de nuestro planeta y, como consecuencia, la temperatura media de la Tierra está aumentando, produciendo un calentamiento global que actúa como un potente motor del cambio climático terrestre. *¿Cómo hemos podido hacerlo en tan poco tiempo?*

2. EFECTO INVERNADERO Y AUMENTO DEL EFECTO INVERNADERO

Cuando se realizan cálculos teóricos sobre cuál debería ser la temperatura media de la Tierra, considerando factores como (entre otros) su distancia media al Sol, pero ignorando el papel de la atmósfera, se obtiene un valor en torno a unos $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obviamente, si esta fuese la temperatura media de nuestro planeta, la vida (tal y como la conocemos hoy) no sería posible.



¿Qué es lo que tiene la atmósfera de particular para que la temperatura media real del planeta tenga un valor por encima de los $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, en lugar de esos $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$?

La atmósfera es casi transparente a la radiación solar que llega a la Tierra (que es lo que aporta energía exterior al planeta), reteniendo menos del 20 % de esta. Aproximadamente el 70 % de la radiación solar entrante es «absorbida» por la Tierra en su conjunto (mares, continentes, troposfera), y solo el 30 % restante se refleja al espacio. Consecuentemente, toda la superficie del planeta se calienta. La Tierra emite energía hacia el espacio, principalmente mediante radiación infrarroja. Ahora bien, formando parte de la atmósfera terrestre, hay vapor de agua y otros gases como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), que tienen la propiedad de absorber una gran parte (alrededor del 90 %) de dicha radiación infrarroja y reenviarla en todas direcciones (incluyendo hacia el suelo de nuevo), haciendo que la temperatura media en la superficie terrestre sea más alta de lo que lo sería en caso de no existir este efecto.

El resultado es similar al que se consigue dentro de los invernaderos y por eso se habla de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Estos gases son los verdaderos responsables de que la Tierra tenga una temperatura que la hace habitable para las personas y muchos otros seres vivos. Actúan como una especie de manto para la radiación que emite la Tierra hacia el espacio, pero dejan pasar fácilmente la mayor parte de la luz solar. Ambas son radiaciones electromagnéticas, pero las infrarrojas tienen una mayor longitud de onda que las restantes radiaciones que integran el espectro de la luz solar (desde la luz roja hasta la ultravioleta). Es esa mayor longitud de onda (o, lo que es equivalente, menor frecuencia) de las radiaciones infrarrojas lo que determina que sean menos energéticas y puedan ser absorbidas y reemitidas por las moléculas de los GEI, sin llegar a romperlas o ionizarlas. En la figura siguiente, se muestra un esquema (muy simplificado) sobre el efecto invernadero:



Fuente original: UNEP-GRID-Arendal

Llegados a este punto surge, inevitablemente, una cuestión:



Si el efecto invernadero es beneficioso, si resulta que sin él la temperatura media terrestre sería inferior a la actual en más de 30 °C... ¿de qué nos preocupamos?

En realidad, el verdadero problema no es el efecto invernadero en sí mismo, sino el **aumento** del efecto invernadero y la rapidez con que se está produciendo. Esto se debe a los gases de efecto invernadero (GEI) que, de forma continuada y en cantidades crecientes, se vienen emitiendo a la atmósfera desde el inicio de la era industrial (a mediados del siglo XVIII). De lo que hay que preocuparse entonces, es del **aumento del efecto invernadero**. Conviene, pues, profundizar un poco más en este aspecto antes de proseguir.



Anteriormente hemos visto que la temperatura media del planeta se mantiene, en principio, constante debido a la existencia de un equilibrio entre la energía que entra y la que sale. ¿Cómo puede verse alterado dicho equilibrio?

Fundamentalmente debido a las siguientes causas o **forzamientos**:

Variaciones periódicas en la radiación solar incidente: Causadas por los factores astronómicos comentados en apartado anterior.

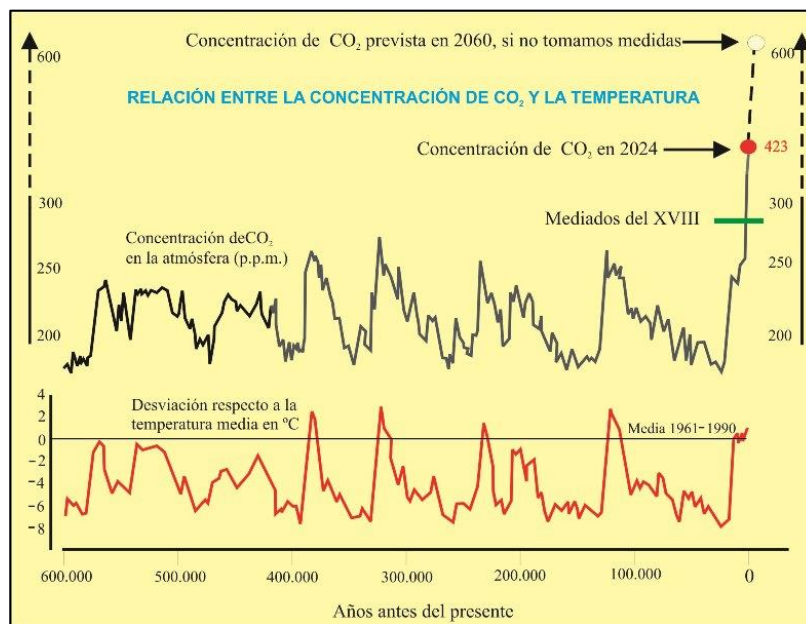
Modificación de la fracción de radiación solar reflejada por la Tierra: El **albedo** es un índice que mide la capacidad de una superficie determinada para reflejar la radiación solar que le llega. La superficie oscura del océano abierto y la superficie terrestre cubierta de espesa vegetación reflejan solo un 10 % de la radiación solar, mientras que este efecto albedo aumenta en superficies claras como son las zonas áridas, los desiertos y las superficies cubiertas de hielo o de nieve (en estas últimas, puede acercarse al 70 % para el caso del hielo y 95 % para la nieve fresca). En el albedo terrestre también influyen los aerosoles o pequeñas partículas en suspensión (como polvo, hollín o sales) presentes en la atmósfera; su impacto depende principalmente del contenido en hollín (si es elevado, predomina la absorción de radiación, favoreciendo el calentamiento de la atmósfera y viceversa). A principios del siglo XXI, el albedo medio del planeta era del orden del 30 %. Su reducción supondría un aumento del *calentamiento global* del planeta; de ahí el papel tan importante que desempeñan las enormes extensiones de hielo y nieve de las dos regiones polares de la Tierra en la refrigeración del planeta.

Cambios en las concentraciones de los gases invernadero: Los GEI actúan, como ya hemos visto, a modo de un manto parcial para las radiaciones de onda larga (infrarrojas) emitidas hacia el espacio, desde toda la superficie del planeta y desde la atmósfera.

Todos los forzamientos anteriores ya han repercutido muchas veces en los distintos cambios climáticos ocurridos anteriormente en la Tierra. Si dichos forzamientos hacen que el planeta absorba más energía o bien emita menos hacia el espacio exterior, el equilibrio energético se ve alterado, y, para restablecerlo, la temperatura media del planeta aumenta (y viceversa); de modo que a cada estado de equilibrio le corresponde un valor dado de la temperatura media global en la superficie terrestre.

Aunque los seres humanos no podemos influir (en principio⁴) en los cambios astronómicos que se producen periódicamente de forma natural ni en otros de naturaleza geológica (que también afectan al clima), como la tectónica de placas o las erupciones volcánicas, y que son capaces de alterar el balance de energía al que nos referimos, sí podemos incidir —y de hecho lo estamos haciendo— en el albedo terrestre y en las concentraciones de GEI. En efecto: el polvo que se produce en canteras, minas y carreteras; contaminantes del aire, cenizas de grandes incendios, humos industriales, deforestación, pérdida de mantos de nieve, fusión del hielo continental y marino, etc., son formas de cambiar el albedo, mientras que el consumo creciente de combustibles fósiles (derivados del petróleo, gas natural y carbón) es la causa principal del aumento continuado en la concentración de CO₂ en la atmósfera (el gas que más contribuye al aumento del efecto invernadero).

Gracias a la extracción de muestras de hielo profundo de la Antártida (analizando las burbujas de aire atrapadas), se dispone de datos científicos precisos sobre la evolución conjunta del clima terrestre y del efecto invernadero, y se sabe que los cambios en la concentración de CO₂ y las variaciones en la temperatura media de la Tierra están estrechamente correlacionados. En la figura siguiente, la gráfica de arriba representa las concentraciones de CO₂ atmosférico medidas en partes por millón (ppm)⁵ desde hace 600000 años hasta el presente (0). La de abajo muestra la desviación de la temperatura media global del planeta de la temperatura media global del periodo 1961-1990 (que se toma como valor 0). Los mínimos corresponden a **glaciaciones** y los máximos a **periodos de calentamiento**.



⁴ De acuerdo con algunos estudios científicos, la redistribución de masas producida por la fusión de enormes cantidades de hielo en los polos (a causa del aumento del efecto invernadero) está contribuyendo a que varíe la posición del centro de gravedad del planeta y, en consecuencia, alterando la inclinación del eje terrestre. (Deng, S., et al., 2021). A dicha redistribución de masas también está contribuyendo el enorme y creciente aumento en la extracción y manipulación de grandes cantidades de agua subterránea por parte de los seres humanos, para diversos usos (Seo, K., et al., 2023).

⁵ En el caso de un gas invernadero (como el CO₂), su concentración en la atmósfera medida en ppm indica los litros que hay de ese gas por cada millón de litros de aire. También se puede interpretar como el número de moléculas de ese gas que hay por cada millón de moléculas de la mezcla de gases que constituyen el aire seco (incluido el propio gas a que nos referimos).



¿Qué conclusiones pueden extraerse del análisis y comparación de ambas gráficas?

Un análisis cuidadoso permite extraer varias conclusiones y también realizar algunas reflexiones de interés al respecto:

- Es evidente que ambas gráficas encajan la una en la otra mostrando que, desde hace más de medio millón de años, los cambios en la temperatura media de la Tierra y en la concentración de CO₂ van emparejados y evolucionan en el mismo sentido.
- La Tierra oscila periódicamente entre dos estados: el *glacial* (con una duración de entre 80 000 y 90 000 años) y el *interglacial* (que oscila entre 10 000 y 20 000 años). El último periodo glacial alcanzó su apogeo —el llamado Último Máximo Glacial— hace aproximadamente 20 000 años y finalizó hace unos 11 700 años, dando inicio a una nueva era geológica (Holoceno). Desde entonces, el planeta ha experimentado un clima relativamente estable y benigno, que ha permitido el rápido desarrollo de la agricultura y de la civilización humana hasta la actualidad.
- Durante los últimos 600 000 años, la concentración de CO₂ en la atmósfera nunca superó el valor de 300 ppm⁶. Esa concentración oscilaba aproximadamente entre las 280 ppm en los periodos interglaciales más cálidos y las 180 ppm en los periodos glaciales más fríos.
- Durante el último periodo interglacial, hace unos 125 000 años, la temperatura no llegó a superar los 4 °C de aumento respecto al nivel 0 (y sin embargo, el nivel medio del mar estaba entre 5 y 10 metros por encima del actual y las capas de hielo de Groenlandia y de la Antártida se hallaban en su mayor parte fundidas).
- También puede verse que, a mediados del siglo XVIII, la concentración de CO₂ era de unas 280 ppm, pero que desde entonces ha experimentado un brusco y considerable aumento, hasta situarse en torno a las 423 ppm (media anual mundial) en 2024, según datos de la NOAA (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos).



¿Qué es lo que ha pasado en los últimos 270 años para que se produzca un aumento tan grande y tan rápido en la concentración de CO₂ en la atmósfera?

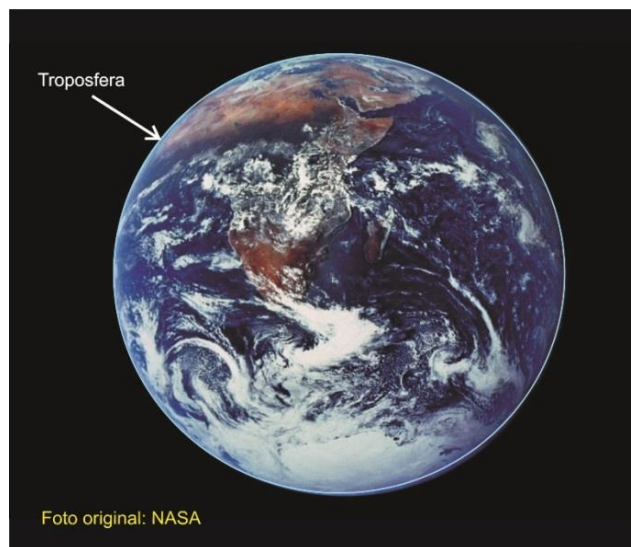
Sin duda, el hecho tiene mucho que ver con la revolución industrial: primero con la máquina de vapor y después con el motor de explosión. El desarrollo de ambos ingenios, con sus aplicaciones tecnológicas correspondientes en el transporte (barco, tren, aviones, etc.) y en la industria, junto con el enorme crecimiento de la población mundial, ha supuesto también la utilización de ingentes cantidades de combustibles fósiles (carbón, derivados del petróleo y gas natural) utilizados como fuentes de energía, con la consiguiente emisión a la atmósfera de miles de millones de toneladas de CO₂.

⁶ Esta conclusión, de acuerdo con el V informe del Grupo Intergubernamental para el Estudio del Cambio Climático (IPCC), publicado en 2014, se extiende ahora hasta 800 000 años antes del presente.



A pesar de toda la evidencia existente, algunas personas afirman que se está sobrevalorando lo que el ser humano es capaz de hacer al planeta y que los cambios observados en el clima ocurren de forma natural. Buscad argumentos científicos que demuestren la falsedad de tales afirmaciones.

Consideremos en primer lugar, la idea de que lo que pueda hacer el ser humano (tan pequeño) a la Tierra (tan grande), no puede afectar al clima terrestre. A este respecto es preciso señalar que, obviamente, comparada con nosotros la Tierra es inmensamente grande, pero hay que tener presente que algo parecido ocurre si comparamos el tamaño del planeta con el de la capa de aire que envuelve su superficie. Para hacernos una idea, podemos pensar que si la Tierra se fuese reduciendo hasta tener el tamaño de una manzana, la atmósfera (en realidad nos referimos a la zona de la atmósfera donde se halla la mayor parte del aire), no sería mucho más gruesa que su piel. A pesar de ello, se trata de un componente fundamental del sistema climático. De hecho, como ya se indicó al comienzo, la atmósfera es lo que caracteriza al clima, fundamentalmente por la temperatura y humedad del aire, los patrones de precipitaciones y las corrientes atmosféricas. Además, la atmósfera hace que pueda existir agua líquida en la superficie del planeta (debido a la presión ejercida por el aire) y mantiene una temperatura aceptable (debido a la presencia en el aire de GEI). Pues bien, el ser humano sí puede cambiar la atmósfera (ya lo hemos hecho y continuamos haciéndolo cada vez en mayor medida). Un cambio de especial importancia es el rápido y continuado aumento en la concentración de GEI, responsable del aumento continuado de temperatura media global en la superficie terrestre (atmósfera y océanos).



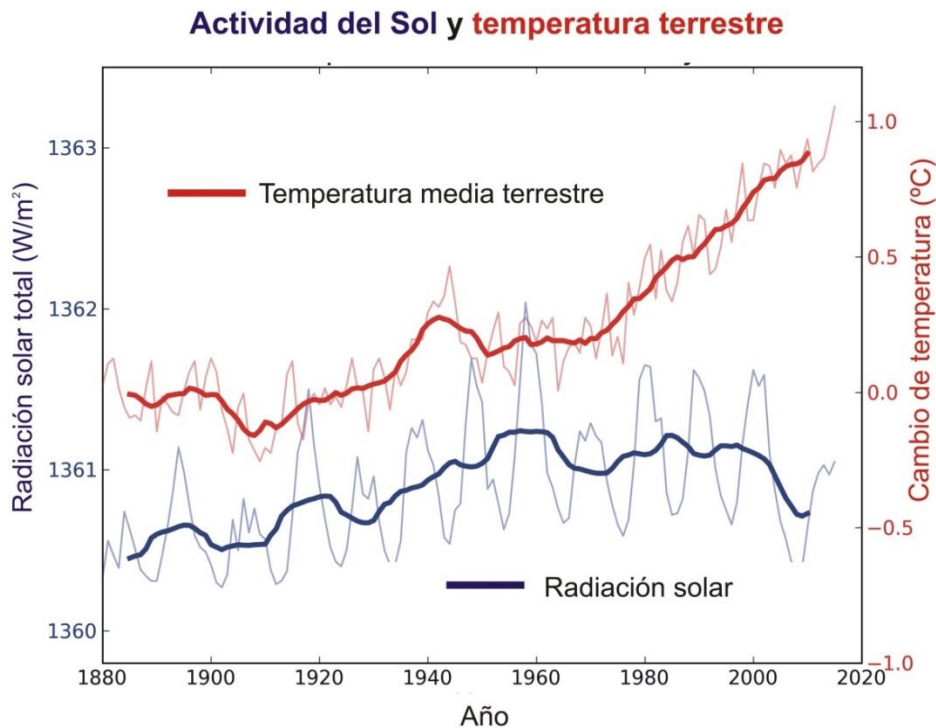
En segundo lugar, la idea de que los cambios que estamos observando actualmente en el clima se deben fundamentalmente a causas naturales y no al calentamiento global provocado por el continuo aumento en las emisiones de GEI, es también errónea. Entre los expertos climáticos no hay ninguna duda de que, desde el comienzo de la era industrial, el efecto de la actividad humana sobre el clima terrestre ha sido provocar un calentamiento neto debido al incremento del efecto invernadero, con un impacto superior al de conocidos procesos naturales como erupciones volcánicas o la actividad solar y otros cambios astronómicos (Moreno, 2025, pág. 70). Este hecho ha contribuido, muy probablemente, a proponer el término *An-*

*tropoceno*⁷ (anthropos es un vocablo griego que significa ser humano), para designar el final del Holoceno y el comienzo de una nueva era geológica, marcada por el impacto global que muchas actividades humanas han tenido y están teniendo sobre el planeta en su conjunto.

A modo de ejemplo, se propone la siguiente actividad:



En la figura siguiente se muestra la evolución de la temperatura media terrestre (en color rojo) y de la radiación solar (en azul) entre los años 1880 y 2020. Analizad las dos gráficas y extraed conclusiones respecto a la influencia de la actividad solar en el calentamiento global observado.



Fuente original: Climate.nasa.gov

A la vista de las gráficas anteriores, no es difícil darse cuenta de que la evolución de la temperatura media terrestre, durante el periodo considerado, ha sido claramente alcista, mientras que no ocurre lo mismo con la radiación solar. Se aprecia que las tendencias de ambas magnitudes son divergentes, de manera que, al contrario de lo que afirman algunas personas, hay que eliminar al Sol de la lista de causantes del actual cambio climático. Si se analiza la contribución del resto de factores naturales que influyen en el clima terrestre, desde los inicios de la era industrial hasta la actualidad, la conclusión es la misma: dicha contribución es insuficiente para explicar el cambio climático observado.

Las consideraciones que acabamos de realizar conducen a preguntarse sobre *cuáles son los principales gases de efecto invernadero, cómo y cuánto contribuye cada uno al efecto invernadero, y cuáles son sus principales fuentes emisoras*. Estas son algunas de las cuestiones que abordaremos y trataremos de responder en el siguiente apartado.

⁷ El término Antropoceno fue acuñado en el año 2000 por el holandés Paul Crutzen (premio nobel de Química), por analogía con la palabra Holoceno.

3. GASES DE EFECTO INVERNADERO Y SUS EMISIONES

El aire es una mezcla de diferentes gases. En la troposfera, la composición media del aire seco es de un 78 % de nitrógeno y un 21 % de oxígeno. El 1 % restante está formado por otros gases (argón, helio, dióxido de carbono, metano, etc.). Además, en la troposfera, existe vapor de agua en proporciones variables, lo que da lugar a aire más o menos húmedo. Entre los gases que hemos mencionado, hay algunos gases de efecto invernadero (GEI).



¿Qué gases de efecto invernadero conocéis? ¿Cuál de todos ellos pensáis que contribuye más al efecto invernadero?

Los principales GEI son: vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), monóxido de dinitrógeno (N_2O) y ciertos derivados halogenados como, clorofluorocarbonos (CFC), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

El vapor de agua es, con gran diferencia, el gas invernadero más importante de todos, y esto se debe, tanto a su mayor abundancia en la atmósfera, como a que su banda de absorción de la radiación infrarroja es especialmente ancha. Aunque la determinación de su contribución exacta al efecto invernadero es compleja —su concentración varía según la ubicación y a lo largo del tiempo—, la mayoría de los estudios científicos coinciden en señalar que el vapor de agua es responsable de más de la mitad del efecto invernadero total. El segundo en importancia es el CO_2 , seguido por el CH_4 . Los tres son componentes naturales de la atmósfera, pero también son producidos (junto con otros, como los derivados halogenados ya mencionados) por diversas actividades humanas. A continuación, nos detendremos en analizar cada caso y comentaremos algunas actividades responsables de sus emisiones.

3.1. Dióxido de carbono

Es el gas que más contribuye al aumento del efecto invernadero. Solamente él, de acuerdo con los datos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), es responsable de aproximadamente el 64 % de dicho aumento desde el inicio de la era industrial hasta la actualidad.

Las emisiones de CO_2 seguirán causando calentamiento a largo plazo debido a su larga vida en la atmósfera: mientras que cerca del 50 % del CO_2 atmosférico desaparece al cabo de un siglo, una parte sustancial (entre un 15 % y un 40 %) permanece en la atmósfera hasta 2 000 años. Esta longevidad, junto con la gran inercia térmica de los océanos —que hace que el calor atrapado por estos sea liberado lentamente durante muchos siglos— explica que, incluso si las emisiones de CO_2 cesaran hoy por completo, serían necesarios más de mil años para que la temperatura media global del planeta disminuyese a un 80 % respecto de la disminución que correspondería a dicho cese total. Por ello, tanto la reducción de emisiones de CO_2 como la captura, en la mayor medida posible, del gas ya emitido son acciones necesarias que, aunque no van a poder parar el calentamiento, sí pueden frenarlo y disminuirlo para evitar efectos catastróficos permanentes.

El océano actúa como un sumidero neto de CO_2 atmosférico, debido a que este gas es altamente soluble en el agua. Al disolverse, la mayor parte del CO_2 reacciona con el agua formando ácido carbónico (H_2CO_3) el cual se disocia rápidamente produciendo iones bicarbonato (HCO_3^-) y protones (H^+). De hecho, casi todo el carbono captado de la atmósfera se

almacena en forma de estos iones. La pequeña fracción de CO₂ gaseoso que permanece como tal disuelta en la superficie marina juega un papel fundamental en el intercambio de este gas con el aire (que depende de la temperatura del agua y la concentración de CO₂).

Según la OMM, aproximadamente el 48 % del CO₂ emitido en la actualidad a raíz de actividades humanas, permanece en la atmósfera, mientras que los océanos y ecosistemas terrestres absorben la otra mitad (se estima que el mar absorbe, aproximadamente, un 31 % del CO₂ emitido a la atmósfera⁸). En términos de temperatura, el paso de la concentración preindustrial (unas 280 ppm) a las 422,7 ppm de 2024 ha supuesto que la temperatura media global en dicho año superase en 1,55 °C la media estimada para dicho periodo.

El *potencial de calentamiento global*⁹ del CO₂, se define como 1 y su *forzamiento radiativo*¹⁰ (a fecha de 2023) es de 2,29 W/m². Su tasa de aumento reciente es drástica y sin precedentes: mientras que en los últimos 600 000 años los incrementos nunca sobrepasaron las 30 ppm en un milenio, en la actualidad su concentración en la atmósfera se ha elevado en más de 100 ppm en tan solo 64 años (entre 1960 y 2024).



¿Mediante qué acciones, directas o indirectas, hacemos aumentar los seres humanos la concentración de CO₂ en la atmósfera?

Una primera fuente de CO₂ es la quema de combustibles fósiles (derivados del petróleo, gas natural y carbón), que causa alrededor del 75 % de las emisiones antrópicas de CO₂. Dichos combustibles siguen suministrando en torno al 80 % de la energía utilizada en todo el planeta en sectores como la construcción, industria, climatización de edificios y transporte (y la demanda sigue aumentando). También se forma CO₂ en la fabricación de cemento. En efecto, cuando la piedra caliza (cuyo componente principal es carbonato de calcio) se calienta para producir cal (óxido de calcio), que es un componente del cemento, se libera CO₂. En este proceso se emite a la atmósfera alrededor del 4 % del CO₂ antrópico. El resto de emisiones antrópicas se debe a cambios en el uso del suelo como, por ejemplo, la destrucción de bosques para urbanizar, para usos agrícolas, de ganadería, etc.

En la tabla siguiente se muestran las emisiones globales de CO₂ (en millones de toneladas), originadas por el uso de energía proveniente de combustibles fósiles, así como las producidas en la fabricación de cemento, correspondientes a varias partes del mundo en distintos años (datos obtenidos en enero de 2025 de Global Carbon Project¹¹).

⁸ <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/los-oceanos-absorben-el-31-del-co2-generado-por-el-hombre>

⁹ Efecto de calentamiento a lo largo de un periodo de tiempo (usualmente 100 años) que produce hoy la liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂.

¹⁰ Cambio neto en el equilibrio energético del sistema Tierra-atmósfera debido a una perturbación impuesta. Se refiere al valor promedio correspondiente a un periodo de tiempo determinado (habitualmente entre el año 1750 y nuestros días). Un valor positivo indica un aumento añadido en la energía de dicho sistema. (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>).

¹¹ <https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/>

Emisiones globales de CO₂ (en millones de toneladas)

Región o país	1990	2000	2010	2015	2020	2024
Unión Europea	3870	3600	3424	3095	2627	2426
Estados Unidos	5121	6010	5680	5377	4715	4904
China	2485	3649	8621	9864	10 906	12 289
África	658	931	1217	1333	1356	1502
MUNDIAL	22 729	25 511	33 356	34 405	35 127	38 599

Como puede verse, la Unión Europea, desde 1990 hasta 2024, ha ido disminuyendo sus emisiones, al contrario que China. A nivel mundial, no obstante, estas emisiones no han cesado de crecer y en 2024 superaron en casi un 70 % a las de 1990. En el año 2024, la suma de emisiones de China y Estados Unidos supuso más del 44 % de las emisiones totales.

Para contemplar las diferencias de población, resulta muy útil analizar las **emisiones de CO₂ anuales por habitante**, en cada uno de los países o regiones. En la tabla de siguiente, se muestran estas emisiones en toneladas, también según datos obtenidos en 2025 de Global Carbon Project.

Emisiones de CO₂ por habitante y año (en toneladas)

Región o país	1990	2000	2010	2015	2020	2024
Unión Europea	9,2	8,4	7,8	7,0	5,9	5,4
Estados Unidos	21,0	21,0	18,0	17,0	14,0	14,0
China	2,2	2,9	6,4	7,1	7,7	8,7
África	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,0
Mundial	4,3	4,1	4,8	4,8	4,5	4,7

Se observa que existen grandes diferencias entre los habitantes de las distintas regiones (por ejemplo, entre africanos y estadounidenses). También destaca cómo, a partir de 2015, China sobrepasó a la Unión Europea en emisiones por persona, mientras que las emisiones mundiales por habitante no disminuyen, sino que aumentaron de 4,3 toneladas en 1990 a 4,7 toneladas en 2024. Esto ocurre a pesar de que la población mundial entre 1990 y 2024 experimentó un incremento cercano a los 2900 millones de personas. Es decir, el consumo de energía asociado a combustibles fósiles crece tanto, que compensa con creces ese gran aumento de población.

La concentración de CO₂ también aumenta debido a la deforestación por talas masivas e incendios. En ambos casos, se impide que toda la cubierta vegetal perdida siga secuestrando CO₂ de la atmósfera mediante la fotosíntesis; pero además, en los incendios se vierte a la atmósfera de forma súbita todo el CO₂ que había sido previamente secuestrado de ella a lo largo de muchos años. Todo ello contribuye notablemente a elevar la concentración atmosférica de este gas. Unos incendios son provocados y otros fortuitos, pero todos se ven favore-

cidos por temperaturas cada vez más altas y periodos prolongados de sequía, que resecan la vegetación. Por ello, los grandes incendios son cada vez más frecuentes y devastadores, como ocurrió en Australia entre 2019 y 2020, con 120 000 km² de superficie quemada (equivalente a más de 30 veces la de la isla de Mallorca) y cerca de un millón de toneladas de humo vertidas a la atmósfera.



En España, la tendencia es igualmente preocupante. Si en 2022 ya se registraron 54 grandes incendios que arrasaron más de 2 500 km², los datos de 2025 dibujan un escenario todavía más crítico: más de 50 grandes incendios forestales —localizados principalmente en León, Extremadura y Galicia— afectaron a una superficie aproximada de 3 500 km².

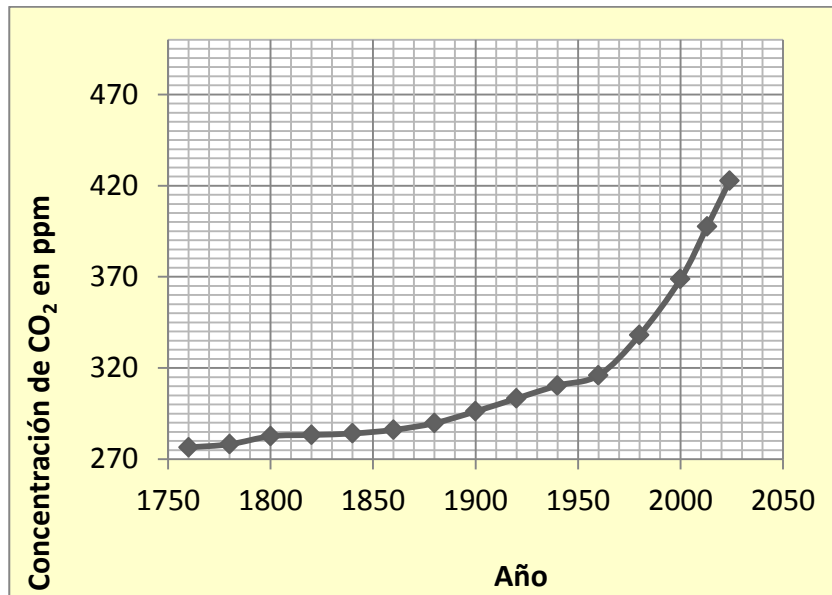
Estos siniestros no solo incrementan de forma notable la concentración de CO₂ atmosférico, sino que provocan daños severos en la biodiversidad y la estructura del suelo, además de generar cuantiosas pérdidas económicas y, en el peor de los escenarios, víctimas mortales. A mediados de la tercera década del siglo XXI, aproximadamente el 60 % de la selva amazónica es demasiado húmeda para que se puedan propagar incendios; sin embargo, el cambio climático está reduciendo esa área húmeda, facilitando que el fuego pueda penetrar en el corazón de la Amazonia.

También deben contabilizarse las talas para obtener maderas valiosas que, desde la colonización europea, han ido soportando los bosques de Centroamérica, el Caribe, la Amazonia, África y el Sudeste Asiático. Sin olvidar que en muchos países pobres, la madera sigue siendo el principal combustible de uso doméstico, lo que contribuye a la desaparición de arbolado en extensas zonas del mundo. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)¹², dos terceras partes de los hogares africanos utilizan la madera como combustible principal para cocinar, calentarse y hervir agua (algo fundamental para garantizar su potabilidad). Por otra parte, es preciso tener en cuenta que en los incendios se emiten también otros gases invernadero (como el N₂O) y aerosoles (como el hollín), que además son contaminantes atmosféricos peligrosos para la salud.

La emisión de manera continuada y creciente del CO₂ producido por todas las causas que se acaban de enumerar explica que su concentración en la atmósfera no haya cesado de aumentar, tal y como se muestra en la gráfica siguiente, en la que se puede observar la evolución de

¹² <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/wood-energy/basic-knowledge/en/?type=111>.

la misma (medida en ppm) en función del tiempo. A partir de los datos que se presentan es fácil constatar que el aumento continuado en la concentración de CO₂ en la atmósfera, desde los inicios de la era industrial (1760) hasta 2024, ha sido del orden del 52 %.



Cuando se analiza la concentración de CO₂ en la atmósfera, los datos muestran que esta siempre es menor durante el verano que en el invierno. ¿A qué puede ser debido?

Durante la primavera y verano la vegetación crece, genera hojas y absorbe más CO₂ del aire (mediante la fotosíntesis) haciendo que su concentración atmosférica baje. En invierno el crecimiento vegetativo se paraliza y las hojas se caen, por lo que disminuye la fotosíntesis y se absorbe menos CO₂ por las plantas. La cantidad de vegetación (biomasa) del hemisferio norte terrestre es, globalmente, mayor que la del hemisferio sur y por eso su influencia es dominante en el conjunto de la atmósfera.

3.2. Metano

El metano (CH₄) es un gas de efecto invernadero altamente eficiente, cuya concentración, según datos de la NASA (Climate Change), se ha más que duplicado en los últimos 200 años, alcanzando las 1,922 ppm en 2023¹³. Su forzamiento radiativo (a fecha de 2023) era del orden de 0,56 W/m² (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>) y su vida media en la atmósfera se sitúa entre los 10 y 12 años. Aunque su permanencia en ella es breve comparada con el CO₂, su capacidad de atrapar calor es muy superior: su Potencial de Calentamiento Global (PCG) a 100 años es de al menos 28, pero en un horizonte de solo 20 años su impacto es unas 80 veces mayor que el del CO₂. Actualmente, el metano es responsable de casi el 20 % del calentamiento global antropogénico.

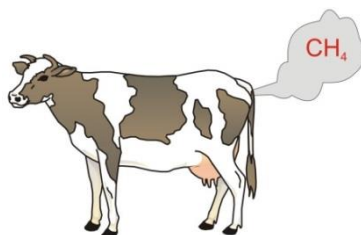


¿Cuáles son las principales fuentes emisoras de este potente gas invernadero?

¹³ <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/metano/?intent=111>

Algunos investigadores sostienen que el aumento de metano en la atmósfera se remonta a los inicios de la agricultura y, en especial, al cultivo del arroz hace unos 5000 años. Actualmente, las principales fuentes de emisión antrópicas de este gas se centran en la producción de energía a partir de carbón y gas natural, la eliminación de desperdicios, la crianza de animales rumiantes, la agricultura del arroz, la quema de biomasa y las fugas de conducciones de petróleo y gas. Dichas fuentes son responsables de entre el 50 % y el 65 % del total de metano emitido a la atmósfera en el presente.

Cada año, más de 500 millones de toneladas de metano son producidas por bacterias que viven en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno), degradando la materia orgánica. Los medios en los que actúan son muy variados: el tracto intestinal de los rumiantes, el interior de estercoleros, los campos inundados para el cultivo de arroz o el fondo de zonas pantanosas. Se estima que entre el 5 % y el 10 % del alimento que ingiere una vaca se transforma en metano.



En Nueva Zelanda, donde hay aproximadamente siete veces más cabezas de ganado que personas, el metano producido por vacas y ovejas supone un 40 % de su emisión total de GEI. Por otra parte, el cultivo intensivo de arroz (que se lleva a cabo principalmente en Asia), favorece la metanogénesis en los lodos de las tierras inundadas.

Otro factor relevante es la quema de vegetación, especialmente la quema de maleza en las sabanas tropicales, como práctica agrícola. En ocasiones, el metano emana del propio suelo durante los incendios, especialmente en las regiones boreales debido a la degradación del *permafrost*¹⁴. Asimismo, se ha observado la liberación de este gas en zonas poco profundas del lecho marino, particularmente en el océano Ártico, que podrían aumentar si sigue subiendo la temperatura media del planeta.

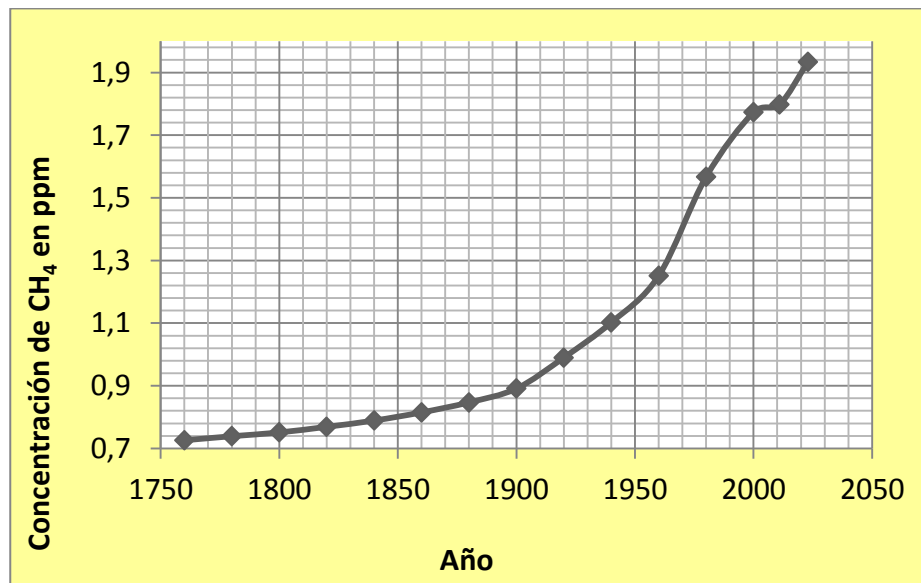
En los vertederos, una gran parte de la materia orgánica allí almacenada se degrada en condiciones anaeróbicas convirtiéndose en metano que pasa a la atmósfera. La mejora de las prácticas de almacenaje de la basura con un buen sellado de las instalaciones y la recuperación del metano creado, para su uso como fuente de energía, pueden reducir notablemente las emisiones de este gas



¹⁴ Capa de suelo o sustrato que permanece congelada en las latitudes altas (del inglés *perma-*, permanente, y *frost*, helado). Estos suelos almacenan vastas cantidades de restos de materia orgánica que, al descongelarse, se descompone liberando CO₂ y CH₄. Además, este proceso conlleva riesgos biológicos adicionales, como la posible reactivación de virus y bacterias que han permanecido latentes y aislados durante milenios.

Otra fuente antrópica de metano han sido las fugas de este gas, tanto en las minas de carbón (el peligroso gas grisú está compuesto principalmente por metano), como en las instalaciones defectuosas de extracción de gas natural (el 90 % del cual es metano) y en los cientos de miles de kilómetros de gasoductos construidos para su transporte. El auge de la utilización energética del metano hará necesaria la construcción de más pozos de extracción y de más gasoductos, pero es de esperar que las mejoras técnicas hagan disminuir el despilfarro y las fugas a la atmósfera.

Como resultado de todas estas fuentes de emisión de metano, la concentración de este gas invernadero en la atmósfera está aumentando. En la gráfica siguiente se puede observar cómo dicha concentración ha ido cambiando a lo largo del tiempo. Analizando los datos de la misma, se puede determinar que el incremento en la concentración de CH₄ en la atmósfera, desde los inicios de la era industrial hasta el 2023, ha sido del 166 %.



2.3. Otros gases invernadero

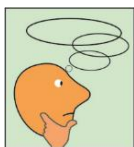
En cuanto al N₂O, sus fuentes antrópicas más comunes son el uso de fertilizantes de nitrógeno en la agricultura, la quema de combustibles fósiles (particularmente en motores diésel), la quema de biomasa y ciertos procesos industriales (como la fabricación de nailon y de ácido nítrico). El 17 % de este gas presente en la atmósfera lo hemos añadido nosotros desde la era industrial.

Una vez emitido, permanece en la atmósfera durante más de 100 años. Su PCG (a 100 años), según el VI informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), es aproximadamente 273 (corrigiendo informes antiguos donde se usaron valores menores). Las emisiones antropogénicas globales de este gas se incrementaron un 40 % de 1980 a 2020. En 2023, su concentración media era de 0,337 ppm frente, frente a las 0,274 ppm del inicio de la era industrial (un aumento del 23 %). Su forzamiento radiativo, era de 0,22 W/m² (también en 2023)¹⁵.

¹⁵ <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>

Entre los gases halocarbonados¹⁶ que presentan efecto invernadero, los CFC se hallaban presentes en gases utilizados como refrigerantes (frigoríficos y aparatos de aire acondicionado) y propelentes (espráis). Su concentración no aumenta actualmente debido a los acuerdos internacionales para evitar la destrucción del ozono (O₃) estratosférico, ya que estos compuestos, además de su efecto invernadero, destruyen la capa de ozono que nos protege de las radiaciones ultravioleta. Sin embargo, las concentraciones de otros gases halocarbonados (HCFC, HFC, PFC) y también de SF₆, están aumentando en la actualidad¹⁷. Los HFC se utilizan como sustitutos de los CFC, mientras que los PFC y el SF₆ se liberan a la atmósfera en procesos industriales como la soldadura de aluminio y la fabricación de semiconductores. El potencial de calentamiento global de estos gases es altísimo y varía ampliamente, así, por ejemplo, entre 5700 y 11 000 para los CFC y 23 500 para el SF₆. El periodo de vida atmosférico de estos gases varía también mucho: entre 45 y 100 años para los CFC, entre 1 y 18 años para los HCFC, de 1 a 270 años para los HFC y miles de años para los PFC.

¿Y qué pasa con el vapor de agua? Como ya se ha dicho, el vapor de agua es el mayor contribuyente al efecto invernadero. Sin embargo, no contribuye directamente a su aumento de la misma forma que el CO₂.



¿Por qué si el vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante, no contribuye especialmente al aumento de dicho efecto? (Tened en cuenta que al quemar cualquier combustible derivado del petróleo, o gas natural, además de CO₂ se produce también vapor de agua).

Aparentemente, esto puede resultar contradictorio; y más si se tiene en cuenta que, al quemar cualquier combustible derivado del petróleo o gas natural, además de CO₂, se produce siempre vapor de agua. ¿Por qué uno sí y el otro no? La explicación hay que buscarla en que, a diferencia del CO₂ (y del resto de gases invernadero), el vapor de agua en la atmósfera experimenta fácilmente efectos de saturación. Esto significa que, una vez que se supera una determinada concentración, este se condensa y cae, principalmente, en forma de lluvia o nieve. Su concentración en la atmósfera varía entre el 0,01 % en las zonas muy frías y secas (como la Antártida) y un valor en torno al 4 % en las zonas muy húmedas y cálidas (como las selvas tropicales)¹⁸.

No obstante, conviene tener en cuenta que la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire depende significativamente de la temperatura. Concretamente, por cada grado Celsius de aumento, se estima que la capacidad del aire para retener vapor de agua sin que este condense, aumenta en torno a un 7 %. Por tanto, el calentamiento global está provocando un aumento de vapor de agua en el aire, lo cual sí que incide en el aumento del efecto invernadero y, consecuentemente, en más vapor de agua en la atmósfera, lo que convierte a este proceso en un potente mecanismo de retroalimentación.

¹⁶ El término «halocarbonado» hace referencia a la existencia en las moléculas del compuesto, de carbono y de algún elemento del grupo de los halógenos (normalmente flúor y cloro). Se utilizan iniciales de estos elementos (C, F, C).

¹⁷ Afortunadamente, en octubre de 2016 casi 200 países firmaron en Kigali (Ruanda) un acuerdo por el cual el empleo de los HFC en refrigeración, se habrá reducido entre un 80 % y un 85 % a mediados del presente siglo.

¹⁸ Estas concentraciones representan qué parte del volumen total de la mezcla de aire y vapor de agua, es vapor de agua. Así, por ejemplo, una concentración del 4 % indica que en 100 litros de dicha mezcla, habría 4 litros de vapor de agua.

Para comprender mejor estas dinámicas, es fundamental diferenciar entre la *humedad absoluta* (o concentración de vapor) y la *humedad relativa*. La humedad absoluta mide la masa real de vapor de agua presente en la atmósfera por unidad de volumen y se expresa habitualmente en gramos por cada metro cúbico de aire (g/m^3). Por ejemplo, si un metro cúbico de aire contiene 18 gramos de vapor, esa es su humedad absoluta ($18 \text{ g}/\text{m}^3$).

Por otro lado, la humedad relativa indica el grado de saturación del aire en relación con la cantidad¹⁹ máxima de vapor de agua que podría contener a una temperatura y presión específicas. Se expresa en tantos por cien (%). Por ejemplo, si a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ el aire tiene una capacidad máxima de unos $23 \text{ g}/\text{m}^3$ pero solo contiene $11,5 \text{ g}/\text{m}^3$, decimos que la humedad relativa es del 50 %. Si la temperatura aumenta, la capacidad del aire para retener vapor aumenta también; por ello, aunque la masa de agua sea la misma, la humedad relativa bajará al alejarse del punto de saturación. Siguiendo con el ejemplo propuesto, eso significa que si la temperatura aumentase a $26 \text{ }^\circ\text{C}$, la capacidad del aire para retener vapor aumentaría, como ya sabemos, en un 7 % y en consecuencia, la humedad relativa descendería al 43 %.

Las nubes juegan un papel complejo en el balance energético de la Tierra. Contienen vapor de agua que absorbe y reemite radiación infrarroja, contribuyendo al calentamiento. No obstante, al mismo tiempo, reflejan parte de la radiación solar de vuelta al espacio (albedo de las nubes), lo que produce un efecto de enfriamiento. La predominancia de un efecto sobre el otro depende de varios factores, pero es importante destacar que, a nivel global y en la actualidad, el efecto neto de las nubes es de enfriamiento.



Para finalizar este apartado, comentaremos la contribución a la emisión de gases invernadero de dos sectores muy importantes: el urbanístico y el agrícola-ganadero.

3.4. Gases invernadero y crecimiento urbanístico

Todos los expertos en cambio climático están de acuerdo en el importante protagonismo que tienen las grandes ciudades en la emisión a la atmósfera de GEI, y el consiguiente calentamiento global que esto provoca. En efecto, según datos de Naciones Unidas (Acción por el Clima) y del Banco Mundial, las ciudades en todo el mundo consumen más del 70 % de la

¹⁹ Aunque solemos visualizar la humedad relativa comparando masas o volúmenes, técnicamente mide la presión que ejercen las moléculas de agua en el aire frente a la presión máxima que podrían ejercer justo antes de condensar el vapor de agua.

energía que se genera en el planeta (principalmente mediante el uso de combustibles fósiles) y son responsables, también, de más del 70 % de las emisiones mundiales de GEI.

Hay que tener en cuenta el hecho de que, a comienzos del siglo pasado menos del 5 % de la población mundial habitaba en grandes ciudades, mientras que, tan solo un siglo después (concretamente en el año 2007), el número de habitantes urbanos sobrepasó al número de habitantes rurales. A fecha de 2025, de acuerdo con los datos de las Naciones Unidas, el mundo cuenta ya con más de 600 ciudades que superan el millón de habitantes. De ellas, 82 ciudades albergan a más de 5 millones de personas y, entre estas últimas, 34 se clasifican como megaciudades al superar los 10 millones de habitantes. Este crecimiento urbano es reflejo de una transformación histórica: actualmente, más del 56 % de la población mundial vive en ciudades. Este porcentaje va en aumento y se espera que sobrepase el 70 % para mediados de siglo, marcando el mayor desplazamiento demográfico hacia entornos urbanos de la historia de la humanidad.

Por otro lado, aunque el territorio que ocupan todas estas ciudades se sitúa solo en torno al 3 % de la superficie terrestre, su impacto se extiende mucho más allá de sus límites. Entre otros efectos, se sustituyen las tierras agrícolas cercanas por determinadas infraestructuras, tales como carreteras de circunvalación o polígonos industriales; de modo que una gran cantidad de alimentos que se consumen diariamente por sus habitantes han de ser transportados desde distancias cada vez mayores.

Además, una gran cantidad de hogares se hallan muy alejados del lugar de trabajo o de estudio, dispersos en suburbios o en zonas que no disponen de un buen transporte público. Por ello, muchos de sus habitantes utilizan diariamente medios de transporte motorizado privados para ir y volver del trabajo o del centro escolar, lo que produce un aumento notable de vehículos a motor en las carreteras (no podemos olvidar que, por ejemplo, en la Unión Europea, el transporte por carretera es responsable de la quinta parte de las emisiones totales de CO₂)²⁰. Esta situación se potencia, todavía más, cuando los precios de compra o alquiler en las ciudades son muy altos y muchas personas no pueden permitirse vivir en ellas, por lo que se ven obligadas a hacerlo en zonas bastante alejadas del centro urbano (por ejemplo, en pueblos de la región).

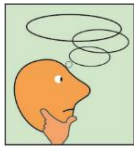
Por otra parte, son también muchos los hogares en los que para cocinar, tener agua caliente, o controlar la temperatura, se dispone de sistemas y aparatos (cocina, baños, calderas, refrigeradores...), que funcionan con energía proveniente, en su mayor parte, de combustibles fósiles.

Un fenómeno crítico es el efecto *isla de calor* que se da en muchas grandes urbes, producido cuando la estructura urbana impide la adecuada circulación del aire de las típicas brisas nocturnas. A este también contribuyen otros factores como, un denso y continuo tráfico de vehículos a motor, la falta de zonas verdes y la existencia de grandes superficies de asfalto. Además, la escasez de vegetación y suelos de tierra impide que se produzca el enfriamiento por evaporación y transpiración que se da en zonas en las que abunda la vegetación. Todo ello hace que se destine mucha energía para la refrigeración, haciendo funcionar continuamente una ingente cantidad de ventiladores eléctricos y aparatos de aire acondicionado, alimentando un círculo vicioso de mayor consumo energético y mayores emisiones.

²⁰ <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

El metabolismo urbano creciente de las grandes ciudades (flujo de energía y materiales necesario para su funcionamiento diario), no solo emite cada vez más CO₂. En efecto, el manejo de una ingente cantidad de residuos sólidos urbanos en ciudades superpobladas, también es una poderosa fuente de metano.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se comprende que todos esos factores que acabamos de enumerar, asociados a la urbanización creciente y la despoblación del medio rural, sean elementos muy influyentes en el aumento de emisiones de GEI, además de ocasionar otros graves problemas relacionados con este, como la alta contaminación ambiental que afecta los habitantes de las ciudades superpobladas y el efecto isla de calor que acabamos de explicar. Esto es así, fundamentalmente, por la gran cantidad de energía asociada a la construcción, mantenimiento y funcionamiento de todas las infraestructuras (transporte, comunicaciones, climatización, limpieza, tratamiento de residuos generados, turismo masivo, etc.), energía que, insistimos, en su mayor parte proviene de combustibles fósiles, lo que, entre otras cosas, genera emisiones de CO₂, el principal agente causante del aumento del efecto invernadero.



Esa enorme concentración de emisiones de gases invernadero en las ciudades, ofrece también la posibilidad de actuar de forma localizada sobre el problema, mediante medidas de “ecología urbana”. Proponed y comentad algunas de dichas medidas.

Afortunadamente, en muchas ciudades, se están implementando medidas muy eficaces para disminuir las emisiones de gases invernadero asociadas a las mismas. A continuación (y en orden aleatorio), se enumeran algunas de ellas:

- Rediseñar las urbes para que los servicios básicos (trabajo, salud, educación) sean más accesibles a pie, en bicicleta y en transporte público.
- Electrificación masiva del transporte público, mediante la sustitución de flotas de autobuses diésel por eléctricos o de hidrógeno verde.
- Restricción de la circulación de vehículos contaminantes en núcleos urbanos densos, incentivando la movilidad sostenible (bicicleta, patinete, caminar...).
- Mejora del aislamiento térmico de todos los edificios (antiguos y de nueva construcción).
- Sustitución de calderas de gas natural por bombas de calor de alta eficiencia.
- Instalación de paneles fotovoltaicos en tejados urbanos y comunidades energéticas para reducir la dependencia de la electricidad generada mediante el uso de combustibles fósiles.
- Implementación de “techos verdes” y “fachadas vegetales”. Estos sistemas no solo aíslan térmicamente los edificios, sino que mediante la evapotranspiración reducen la temperatura ambiental de las calles.
- Uso de materiales con alto grado de albedo (capacidad de reflejar la radiación solar) en calles y aceras para evitar que el asfalto retenga calor.
- Creación de “bosques urbanos” que actúen como sumideros locales de carbono, mejoren la calidad del aire y refresquen el ambiente.
- Tratamiento sostenible de los residuos urbanos, potenciando incentivos fiscales para reducir su generación; captura de biogás en vertederos, transformando el metano en energía eléctrica o térmica, etc.

-Gestión de la demanda energética en tiempo real para evitar picos de consumo que obliguen a usar centrales de respaldo contaminantes, mediante el uso de redes eléctricas inteligentes.

-Optimización de semáforos y flotas de transporte mediante inteligencia artificial.

...

Las medidas que se acaban de enumerar han sido recogidas en informes de diversos organismos como el IPCC y la Agencia Internacional de la Energía (AIE). No cabe duda de que si se impulsaran y desarrollaran en la mayoría de las grandes ciudades del planeta, supondrían una enorme disminución de emisiones de GEI.

3.5. Emisiones de gases invernadero asociadas a la agricultura y la ganadería

Según estudios publicados en *Science* y *Nature Food*, el sistema alimentario global (agricultura y ganadería combinadas) es responsable de aproximadamente un tercio (entre el 26 % y el 34 %) de las emisiones totales de GEI. De esta fracción, la ganadería destaca significativamente: cerca del 60 % de las emisiones del sector alimentario provienen exclusivamente de productos cárnicos.

En un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación²¹ (FAO) de 2023 se detalla que en el 2015, los sistemas agroalimentarios ganaderos — que incluyen las actividades de producción en las explotaciones y algunos procesos fundamentales de la cadena de suministro, como el transporte, la fabricación de insumos y el cambio en el uso de la tierra relacionado con los piensos— representaron unos 6 200 millones de toneladas de CO₂ equivalente²². Esto supone alrededor del 12 % de todas las emisiones de GEI antropogénicas y cerca del 40 % de las emisiones totales de los sistemas agroalimentarios, que, según estimaciones de la [FAO](#), ascienden a unas 16 000 millones de toneladas de CO₂eq. En ese mismo informe, se señalaba que, sin intervenciones y sin aumentos de la productividad, es probable que, para satisfacer el aumento de la demanda, las emisiones mundiales del sector ganadero sobrepasen los 9 000 millones de toneladas de CO₂ eq para 2050.

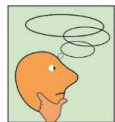
Estas cifras tan altas se explican porque los alimentos, bien sean de origen animal o vegetal, antes de llegar a la mesa han tenido que ser producidos, elaborados, envasados, transportados, preparados, etc. Cada uno de estos procesos requiere usar energía. Pensemos en la ingente cantidad de animales destinados a suministrar carne para nuestro consumo (vacas, cerdos, corderos, etc.). Solo en ganado vacuno, se estima que en el mundo hay actualmente²³ unos 1 500 millones de cabezas. Cada uno de esos animales requiere de una cierta cantidad de agua, pastos, piensos y energía para su crianza y para su comercialización final. Si multiplicamos ese gasto de recursos por 1 500 millones, el resultado supone una emisión de gases de efecto invernadero sumamente importante.

²¹ [Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems](#)

²² Cantidad de CO₂ que causarían el mismo forzamiento radiativo (o el mismo cambio de temperatura) que una cantidad dada de otro u otros gases invernadero durante un horizonte temporal dado (generalmente 100 años). Se designa abreviadamente como CO₂eq.

²³ Cuando en esta unidad didáctica se utiliza el término «actualmente», debe tenerse en cuenta que su redacción terminó en el año 2026

Además, hay que contabilizar las contribuciones indirectas masivas a la emisión de GEI. Estas incluyen, por ejemplo, el cultivo de soja o de maíz destinado a la fabricación de piensos, así como su transporte desde zonas tan alejadas como Sudamérica para alimentar al ganado en Europa, el traslado de los animales hacia los mataderos o la distribución internacional de carne por barco y avión. Finalmente, no se pueden olvidar las emisiones directas de metano por la digestión de los rumiantes y la gestión del estiércol de todo el ganado, así como el óxido de dinitrógeno (N₂O) derivado del uso de fertilizantes nitrogenados.



Pensad en posibles medidas para reducir las emisiones de GEI asociadas a la agricultura y la ganadería, sin comprometer con ello la seguridad alimentaria de la población en general.

Es evidente que esa disminución de emisiones podría favorecerse si se bajase el consumo de alimentos por parte de todas aquellas personas que lo hacen en exceso. Sin embargo, el objetivo no es solo que algunos coman un poco menos. Esto ha de ir acompañado de una producción y gestión de alimentos más inteligente y una mayor diversificación de nutrientes. Para ello, cabe pensar en medidas como las siguientes:

-Implementar sistemas en los que se trabaje con los ecosistemas y no contra ellos. Uno de dichos sistemas es la denominada ganadería regenerativa o rotacional, en la que se intenta imitar el comportamiento de las grandes manadas de herbívoros que convivieron con los pastizales. Esencialmente consiste dividir el terreno en múltiples parcelas y concentrar a los animales en una de ellas para que durante un breve periodo pasten libremente; una vez que han consumido el pasto hasta cierta altura, se trasladan a la siguiente parcela y así sucesivamente. La clave es que el ganado **no regresa** a la primera parcela hasta que las raíces y las hojas de las plantas se han recuperado por completo. Este sistema trae como consecuencia un suelo más blando, esponjoso y abonado, debido al pisoteo concentrado del ganado y al estiércol incorporado. Con ello, el pasto crece vigorosamente tras el periodo de descanso, bombeando carbono de la atmósfera hacia sus raíces profundas. Este carbono queda almacenado en el suelo. Diversos estudios señalan que un suelo así gestionado compensa gran parte del metano que emite el ganado.

-Favorecer la ganadería extensiva frente a la intensiva. La ganadería extensiva es aquella que se desarrolla en grandes extensiones de terreno, aprovechando los recursos naturales del territorio (pastos, dehesas, montes) con una baja densidad de animales. Entre sus numerosas ventajas cabe destacar que los animales actúan como "bomberos naturales", consumiendo la biomasa seca (el combustible) en zonas donde la maquinaria humana no puede llegar. Esto evita incendios masivos que liberarían grandes cantidades de CO₂.

-Fomentar el consumo de legumbres, frutos secos y otras fuentes de proteínas, que tienen una densidad nutricional altísima con una pequeña fracción de coste ambiental.

-Eliminar el sobreconsumo de carnes rojas en países desarrollados. La ciencia sugiere que un consumo moderado (según las guías de salud) de estas carnes ya supone una mejora climática masiva sin caer en déficits nutricionales.

-Reducción radical del desperdicio alimentario. Casi un tercio de todos los alimentos producidos nunca se consume. Si el desperdicio alimentario fuera un país, sería el tercer mayor emisor de GEI del mundo. Para ello resultan esenciales las técnicas de conservación (una buena cadena de frío) y las de transformación (en la que productos que hoy se desechan se convierten en nuevos alimentos o en piensos para animales).

...

4. TEMPERATURA MEDIA GLOBAL

La emisión continuada de gases invernadero es el principal factor responsable del aumento del efecto invernadero. Este, como ya se ha visto, se traduce en un calentamiento global, el cual se puede cuantificar mediante el valor de la **temperatura media global**.



¿Cómo se obtiene el valor de la temperatura media global del planeta? ¿Qué sentido y qué utilidad puede tener conocer su valor?

En la Tierra existe una gran variedad de climas regionales. Podemos hablar así de una temperatura media de -20 °C en Groenlandia o de $+25\text{ °C}$ en el Sáhara, etc. Cuando se promedian todos esos valores locales de temperatura abarcando todo el planeta, se obtiene la temperatura media global. Por tanto, esta no es una cifra que se pueda medir directamente con un único termómetro, sino que se trata de una magnitud estadística cuyo valor es el resultado de millones de mediciones diferentes.

Desde un punto de vista científico, la temperatura global de la Tierra es la temperatura de equilibrio radiativo. Según este, la temperatura media del planeta viene determinada por un principio fundamental:

La cantidad de energía que entra desde el exterior debe ser igual a la que sale del planeta.

Como ya hemos indicado, si ese balance se ve alterado por alguna perturbación —por ejemplo, si se emite al espacio menos energía de la que entra—, la temperatura media global comienza a aumentar. Este incremento provoca que el planeta emita más energía al exterior hasta que se alcanza un nuevo equilibrio en el que la energía de salida se iguala con la de entrada; en ese punto, la temperatura se estabiliza de nuevo, pero con un valor más alto que el original.

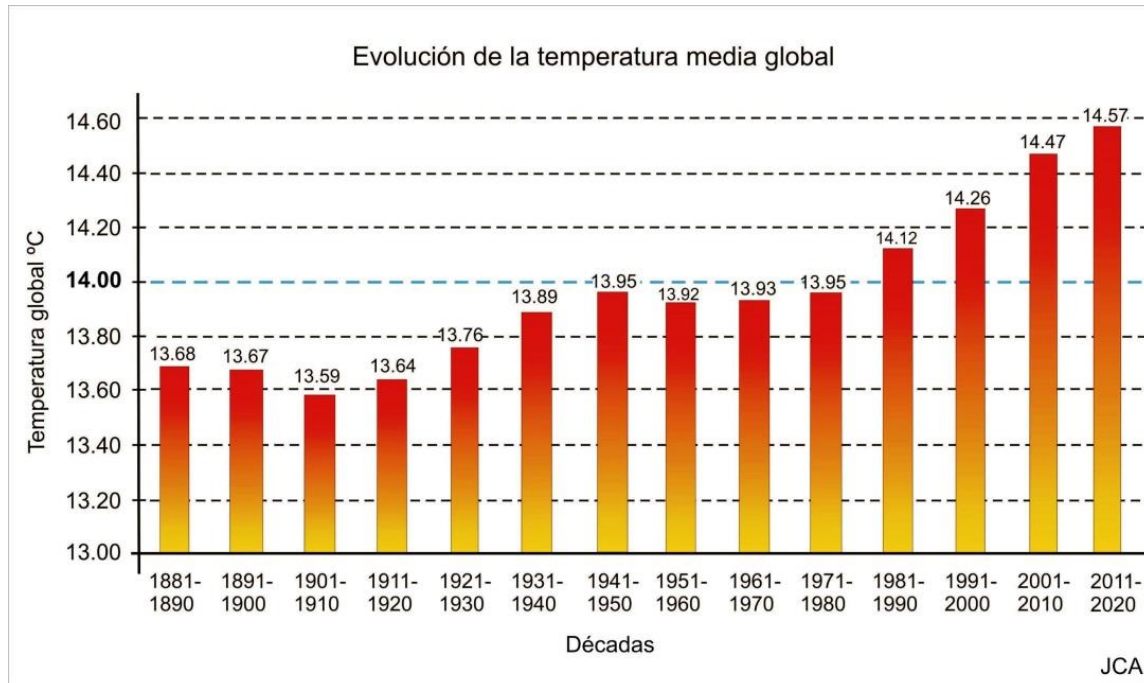
La determinación del valor de la temperatura media global de la Tierra correspondiente a cada año no es algo sencillo, pero de hecho se puede calcular con una fiabilidad aceptable. Las lecturas, que se deben tratar estadísticamente, provienen de millones de estaciones meteorológicas repartidas por todos los continentes, así como de instrumentos ubicados en boyas marinas y barcos científicos. También, desde los años 80 del siglo pasado, se utilizan datos proporcionados por satélites meteorológicos. Normalmente, miden temperaturas del aire próximo a la superficie (continental y marina). El tratamiento estadístico de esa ingente cantidad de datos ha permitido determinar, por ejemplo, que el valor de la temperatura media global correspondiente al periodo 1961-1990 (habitualmente utilizado como referencia), fue de 14 °C , con un margen de error de $\pm 0,5\text{ °C}$.

En la gráfica siguiente se puede ver claramente la evolución de las temperaturas medias globales de la Tierra correspondientes a las décadas que van desde 1880 hasta 2020 inclusive. La línea horizontal punteada que parte de 14 °C corresponde a la temperatura media global del periodo 1961-1990 tomado como referencia.



Analizad los datos que se suministran en la gráfica siguiente. ¿Cuándo el valor de la temperatura media global superó al valor de referencia? ¿Qué ha ocurrido desde entonces?

Como puede constatar, es en la década de los años 80 del siglo pasado cuando se superó dicho valor de referencia y, desde entonces, la temperatura no ha cesado de aumentar. Estos aumentos se designan como **anomalías** o desvíos de la temperatura media respecto a la del periodo de referencia (en este caso, 14 °C). La simple observación de la gráfica permite comprobar cómo las anomalías de temperatura, a partir de la década de los 80 del siglo pasado, han sido siempre positivas y han ido en aumento, pasando de un valor de +0,12 °C en dicha década a +0,57 °C en la de 2011 a 2020.



(Gráfica elaborada por el autor, a partir del original de calentamiento global de OMM y temperaturas medias del decenio 2011-2020).

En el momento de escribir este texto nos encontramos a mitad de la década 2021-2030 y, por tanto, no podemos saber la temperatura media global correspondiente a la misma, pero sí la de los años ya transcurridos. De acuerdo con datos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el valor de la temperatura media global correspondiente a los cuatro primeros años (desde 2021 hasta 2024) es, aproximadamente, de 15,24 °C. Ello supone un aumento de 1,24 °C con respecto al periodo de referencia considerado, evidenciando una clara tendencia al alza a lo largo de esas cinco décadas y media.

Otro periodo de referencia que suele utilizarse habitualmente para medir las anomalías de temperatura media global es el comprendido entre 1850 y 1900. En este caso, es importante tener en cuenta que es en ese periodo cuando, comienzan a registrarse de manera fiable y por todo el globo terrestre, las temperaturas cerca de su superficie. Algo que llama la atención es que se tome dicho periodo como referencia de la temperatura media global en los inicios de la era industrial, que tuvo lugar en Inglaterra hacia 1760 (casi un siglo antes). Ello se debe a que, en esa fecha, los registros de temperatura no eran demasiado precisos ni extensos y también al hecho de que, desde 1760 hasta 1850, el calentamiento global producido fue mínimo, de manera que los datos de temperatura obtenidos en el periodo 1850-1900 se consideran científicamente como una buena estimación de los valores preindustriales. Dicho periodo

es el más utilizado por el IPCC²⁴ para medir el cambio climático a largo plazo y evaluar los progresos hacia la consecución de objetivos concretos adoptados en acuerdos internacionales, con el fin de afrontar el problema del CCA (Cambio Climático Antrópico) y/o mitigar sus consecuencias.

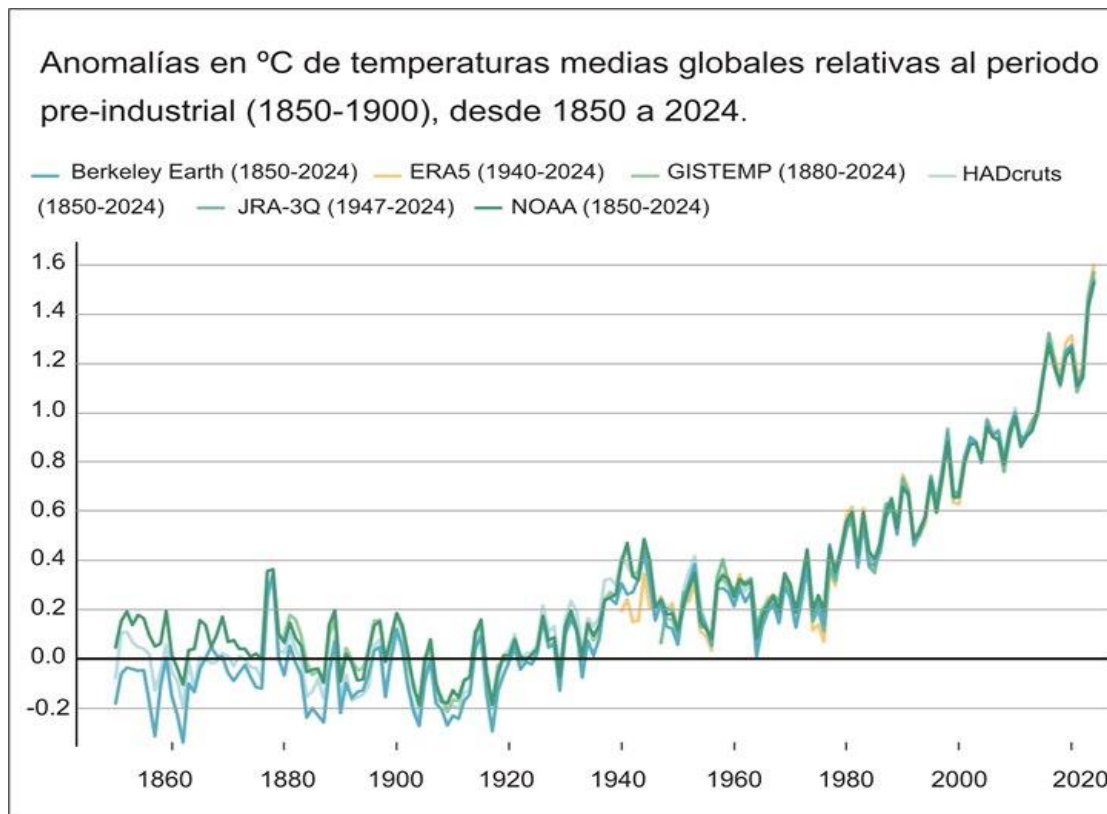
El hecho de utilizar en la gráfica anterior como línea base el periodo de referencia 1961-1990, es porque ese periodo de 30 años es más reciente que el de 1850-1900 y, por tanto, con mejores datos de observación, lo que lo hace más útil para el seguimiento del clima actual y sus anomalías con respecto a un clima reciente al que se define como «normal».

En cualquier caso, conviene tener en cuenta que, independientemente del periodo que se tome como referencia, los científicos, más que trabajar con valores de temperatura media global, lo que hacen es hablar de las anomalías de temperatura detectadas. Esto se debe fundamentalmente a que las pequeñas discrepancias entre las anomalías de temperatura global obtenidas por diferentes organismos como la NOAA, WMO o la NASA son, generalmente, menores que las discrepancias entre los valores absolutos de la temperatura. La razón principal de esta diferencia radica en cómo se obtienen y utilizan estos valores. En efecto, los valores absolutos de temperatura media global (por ejemplo, 14,7 °C para un año determinado) pueden variar ligeramente dependiendo de diversos factores, tales como los instrumentos de medición utilizados, los métodos de tratamiento matemático de numerosos datos, las correcciones aplicadas, etc., los cuales pueden diferir de unos organismos a otros y dar como resultado valores absolutos de temperatura media global algo distintos. En cambio, las anomalías de temperatura entre un periodo específico (por ejemplo, año 2024) y un periodo de referencia (por ejemplo, 1850-1900) no tienen este inconveniente, porque al hallar la diferencia entre ambos valores, aunque estos discrepen ligeramente según qué organismo los haya obtenido, se eliminan posibles sesgos y errores sistemáticos que, para cada organismo, son comunes a ambos conjuntos de datos (los utilizados para obtener la temperatura media actual y los utilizados para medir la temperatura media del periodo escogido como referencia). En resumen:

Aunque los valores de referencia absolutos y los valores actuales de temperatura media global, pueden diferir ligeramente entre los distintos organismos científicos, las anomalías o diferencias entre dichos valores, muestran una coincidencia mucho mayor y, por eso son la herramienta principal utilizada para evaluar la evolución del calentamiento global.

El gráfico siguiente, publicado por la OMM (WMO en inglés), utiliza seis conjuntos de datos procedentes de otras tantas organizaciones. Es importante darse cuenta de que los seis conjuntos de datos coinciden en señalar el año 2024 como aquél en que la temperatura media global superó en más de 1,5 °C la media del periodo 1850 -1900 tomado como referencia (0.0 en la gráfica).

²⁴ Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), es una entidad científica creada en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Se constituyó para proporcionar información objetiva y clara sobre el cambio climático.



Fuente original: <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>



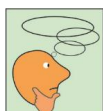
Revisad los contenidos tratados hasta aquí realizando una breve síntesis o resumen de lo más importante y señalando qué es lo que nos queda para seguir avanzando en nuestro conocimiento del cambio climático antrópico.

Hemos visto que es el clima terrestre y los factores que pueden cambiarlo, para después abordar el cambio climático actual como un grave problema global causado principalmente por actividades humanas como, la quema de combustibles fósiles, la deforestación, y las prácticas agrícolas y ganaderas intensivas. Ha quedado establecido que este cambio climático se caracteriza por un aumento acelerado de la temperatura media global, impulsado por el aumento del efecto invernadero debido a las continuas y crecientes emisiones de GEI asociadas a las actividades anteriores. Hemos analizado cuales son dichos gases, la importancia de cada uno y el origen de sus emisiones. Se han clarificado aspectos claves como la diferencia entre efecto invernadero y aumento del efecto invernadero; o por qué el vapor de agua siendo el gas de efecto invernadero más importante, contribuye a su aumento mucho menos que el CO₂. También hemos visto qué es la temperatura media global, cómo se obtiene y su evolución desde los inicios de la era industrial, así como su interés para el estudio de la evolución del clima terrestre.

Nos quedan ahora por tratar otros temas de suma importancia como las consecuencias más importantes del cambio climático antrópico y las medidas más adecuadas para afrontarlo y mitigar esas consecuencias. Esto será lo que vamos a ver a continuación.

5. CONSECUENCIAS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

Si las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) continúan al ritmo actual, la temperatura media en la Tierra seguirá aumentando rápidamente, siguiendo la tendencia mostrada en la gráfica anterior. A largo plazo los modelos utilizados por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático), predicen para el año 2100 una subida media de la temperatura entre 1,5 °C y 4,0 °C respecto al periodo preindustrial. En términos de concentración de CO₂ en la atmósfera, un valor medio del orden de 550 ppm que se mantuviese en el tiempo, supondría un aumento de temperatura del orden de 3 °C.



¿Qué importancia puede tener el hecho de que la temperatura media de la Tierra aumente unos pocos grados?

Son muchas las personas que no comprenden la gravedad de que la temperatura pueda elevarse unos pocos grados. A este respecto, hay que resaltar que se está hablando de un valor promedio global obtenido midiendo temperaturas en miles de lugares diferentes, repartidos por todo el planeta y durante mucho tiempo (lo que incluye variaciones estacionales y fenómenos meteorológicos extremos). Un aumento de, por ejemplo, 1 °C en la temperatura media terrestre, puede suponer un aumento tres veces mayor en el polo norte, lo cual tendría consecuencias muy graves para todos los seres vivos. De hecho, los científicos expertos en el Clima consideran que un aumento de la temperatura media de la Tierra de más de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales es un límite que en ningún caso debería sobrepasarse, porque eso conduciría a perturbaciones climáticas catastróficas, no solo para los ecosistemas, sino también para la economía y la salud de las sociedades humanas. Sin embargo, no es necesario esperar a superar ese límite para poder darse cuenta de toda una serie de consecuencias que ya han comenzado a producirse y que afectan a todos los componentes del sistema climático.



Enumerad consecuencias del aumento del efecto invernadero (y el consiguiente aumento de la temperatura media global), que ya se estén produciendo.

Entre las más importantes están: fusión de hielo continental y marino; acidificación de los océanos; aumento en la intensidad, frecuencia y duración de eventos climáticos extremos; cambios en los ritmos vitales de numerosas especies y disminución de la biodiversidad; y un aumento de la probabilidad de que ocurran cambios catastróficos, abruptos e irreversibles a escala planetaria. A continuación analizaremos cada una de esas consecuencias

5.1. Fusión de hielo continental y marino

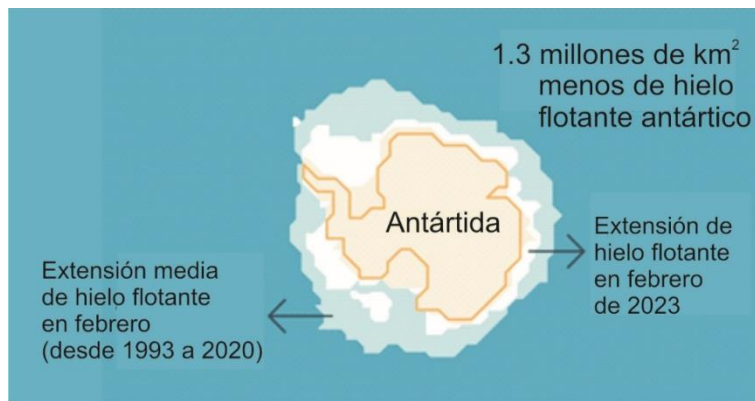
Más de un 85 % del área terrestre ocupada por hielos permanentes se encuentra en la **Antártida**, un continente con una superficie de unos 14 000 000 km² (equivalente a unas 28 veces la superficie de España). Un 10 % corresponde al hielo de Groenlandia, y en el 5 % restante se incluye el conjunto de todos los glaciares alpinos. Todos estos hielos constituyen la mayor reserva de agua dulce (en torno al 70 % del total) del planeta.

El espesor medio del hielo continental en la Antártida es de algo más de 2 km y en algunos lugares se acerca a los 5 km. La mayor parte de esta masa de hielo (casi el 90 %) se encuentra, como se puede observar en la figura siguiente, en la Antártida oriental.



La descongelación de grandes masas de hielo flotante unidas a tierra, llamadas *plataformas*, que actúan como barrera de algunos glaciares antárticos, haría que estos acelerasen su movimiento hacia el mar, lo que se traduciría en un aumento en el nivel de este. Esto es lo que ocurrió hace años con las plataformas Larsen A y Larsen B situadas al norte de la Antártida oriental. Durante 2017 se produjo la ruptura de la plataforma Larsen C, generando un iceberg gigantesco, con una superficie mucho mayor que la de la isla de Mallorca. Por otra parte, la *banquisa*²⁵ de hielo marino que rodea el continente antártico (no representada en la figura), experimenta una gran variabilidad estacional; desde los 2-3 millones de km² en verano (entre noviembre y marzo), a los 15-16 millones de km² en invierno (lo que supone una superficie algo mayor que la del continente).

El problema es que, durante los últimos años, se está observando una clara disminución de la extensión de hielo marino antártico durante el verano. Concretamente, en febrero de 2023, se registró la extensión más baja de hielo marino antártico en los últimos 44 años (tan solo 2,06 millones de km²), lo que supone una pérdida de aproximadamente 1,3 millones de km² respecto a la extensión media correspondiente a los meses de febrero desde 1993 a 2020, tal y como, se puede observar en la figura siguiente:



<https://marine.copernicus.eu/es/ocean-climate-portal/antarctic-sea-ice-extent>

²⁵ Capa de hielo marino flotante, de unos pocos metros de espesor, que se forma en las regiones polares por congelación del agua marina. No debe confundirse con las plataformas o barreras de hielo, que tienen centenares de metros de espesor y que, aunque también son de hielo flotante, provienen de glaciares terrestres adjuntos a ellas.

No podemos ignorar que la Antártida tiene una importancia fundamental en el sistema climático y en la biosfera en general. El debilitamiento o fractura de las plataformas de hielo, no solo favorece el aporte al mar del hielo continental, sino que también tiene otras consecuencias. Entre ellas, el aporte de ingentes cantidades de agua dulce al mar, provocando cambios en la densidad del agua, lo cual afecta (como veremos) a las corrientes oceánicas. Además, la pérdida de superficie de hielo disminuye el albedo terrestre y favorece el calentamiento en la zona. Todos estos cambios afectan negativamente a la cadena trófica y a la biodiversidad.

De acuerdo con datos extraídos del V informe del IPCC, la Antártida pasó de perder una media de 30 Gt/año (1 Gt = mil millones de toneladas) de hielo continental en la última década del siglo XX a perder una media de unas 147 Gt/año (es decir, casi cinco veces más) en la primera década del siglo XXI. La fusión de todo el hielo continental de la Antártida elevaría el nivel del mar en torno a unos 60 m.

Groenlandia es la mayor isla del mundo (unas cuatro veces mayor que España) y en la actualidad tiene, aproximadamente, el 80 % de su superficie cubierta de hielo. Sin embargo, esa masa de hielo se está fundiendo de forma acelerada. De acuerdo con datos extraídos del V informe del IPCC, Groenlandia pasó de perder una media de 34 Gt/año de hielo continental en la última década del siglo XX a perder una media de unas 215 Gt/año (es decir, seis veces más) en la primera década del siglo XXI. La fusión de todo el hielo de Groenlandia haría subir en más de 6 m el nivel del mar.

Según datos más recientes, desde mayo del año 2002 hasta agosto de 2024, la Antártida ha venido perdiendo una media de 150 Gt/año, mientras que en Groenlandia ha sido de 270 Gt/año (NASA- Global Climate Change)²⁶.



Además del aporte de agua debido a la fusión del hielo continental, ¿qué otro fenómeno influye en el aumento del nivel del mar?

La fusión de parte del hielo terrestre —tanto el del continente antártico como el de los glaciares del hemisferio norte en zonas como Alaska, Islandia y Groenlandia— está contribuyendo, sin duda, al aumento del nivel del mar. Por otra parte, las mediciones realizadas desde 1961 muestran que la temperatura media de los océanos ha aumentado hasta profundidades en torno a los 3000 m. Estos han absorbido alrededor del 91 % de la energía térmica excedente del sistema climático; como consecuencia, el agua se expande por dilatación térmica, lo que se traduce en una elevación adicional del nivel del mar. La contribución exacta de cada factor por separado es compleja de precisar, pero actualmente se estima que la expansión térmica es responsable del 50 % del ascenso, mientras que la fusión de hielo continental supone el 42 %; el 8 % restante se debe a cambios en el almacenamiento de agua terrestre (VI Informe del IPCC).

El mar tiene unas 800 veces más capacidad de retener energía térmica que todos los continentes juntos (algo más del 90 % del exceso de energía almacenada por la Tierra durante los últimos 50 años se encuentra en los océanos). Es un termómetro mucho más fiable que la temperatura del aire (sujeta a mucha mayor variabilidad). Su aumento de nivel, lento pero

²⁶ Datos extraídos de: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/?intent=111>

constante, es un indicador similar a la dilatación del líquido de un termómetro y nos está diciendo claramente que la temperatura del planeta sube.

Es necesario tener presente la gran inercia térmica de los océanos, que hace que, ante un determinado forzamiento (positivo o negativo), puedan transcurrir decenas o centenares de años hasta alcanzarse un nuevo equilibrio. En la atmósfera, la inercia térmica es menor. Por eso hay que ser conscientes de que, aún en el supuesto de que dejase de aumentar ahora mismo la temperatura del aire, el mar seguiría expandiéndose durante bastantes años. Por todo ello, la subida del nivel del mar, es algo que podemos limitar pero no parar.

El nivel de los mares del mundo aumentó alrededor de 20 cm entre 1901 y 2018. Según el informe especial del IPCC (2019) sobre el océano y la criosfera²⁷, el nivel medio del mar pasó de una subida de 1,6 mm/año durante el periodo 1902-2015, a 3,6 mm/año entre 2006 y 2015 y las previsiones más fiables indican que, debido a la expansión térmica, dicho nivel seguirá subiendo durante muchos siglos, dependiendo, el que lo haga más o menos, de las futuras emisiones de gases invernadero. Los modelos manejados por el IPCC indican, para el año 2300, un aumento de entre 1 m y 3 m, si la concentración de gases invernadero en la atmósfera rebasa las 700 ppm de CO₂eq (en 2024 dicha concentración era ya de 539 ppm).



¿Qué efectos tiene la subida del nivel del mar?



Entre otros, producirá la intensificación de los temporales; la destrucción de ecosistemas esenciales como humedales, manglares y amplias zonas costeras habitadas; así como la salinización de acuíferos. Aproximadamente, según estimaciones de la ONU, unos 250 millones de personas en el mundo viven a menos de 5 m de altura sobre el nivel del mar y unos 150 millones, a menos de 1 m. Muchas tierras cultivables y también muchas grandes ciudades se hallan en zonas litorales. Una elevación de 1 m en el nivel del mar inundaría, aproximadamente, 16 000 km² en Bangla Desh, más de 20 000 km² en Vietnam y 30 000 km² en Indonesia, obligando a millones de personas a desplazarse a otros lugares.

²⁷ Accesible en 2025 en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2020/07/SROCC_SPM_es.pdf

El calentamiento global también está contribuyendo a la fusión del hielo en muchos **glaciares continentales de montaña** y a una disminución de las nevadas en general, lo que explica el retroceso experimentado por dichos glaciares y las superficies cubiertas de nieve. La desaparición de glaciares afecta a muchas regiones del planeta (Canadá, Andes, Patagonia, Alpes suizos, África, etc.). Existen 50 lugares, calificados como Patrimonio Mundial de la Humanidad, que albergan todavía más de 18 000 glaciares, entre ellos algunos tan emblemáticos como el más alto (junto al Monte Everest), el más largo (en Alaska) y los últimos glaciares que quedan en África. Sin embargo, en un estudio realizado por la UNESCO en colaboración con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, publicado en 2022, se muestra que un tercio de dichos glaciares están condenados a desaparecer de aquí a 2050, independientemente de los esfuerzos que se hagan para limitar el aumento de la temperatura. Lo que pase con los dos tercios restantes dependerá de si conseguimos o no limitar el aumento en la temperatura media global del planeta.

El mayor glaciar que existe en España en la actualidad está situado en el Aneto (la segunda montaña más alta de la península). Se trata de una especie de lengua blanca de unos 2 km de longitud. En la figura siguiente se puede apreciar la progresiva disminución de la extensión de hielo de este glaciar. En efecto, la línea más baja muestra el borde de la lengua de hielo en el año 1985; la de en medio, en 2011 y la de más arriba, en 2020.



En la figura siguiente se puede ver una comparativa entre el glaciar de la Maladeta (muy cercano al del Aneto) en el año 1992 y el mismo glaciar en el 2015, en la que se aprecia perfectamente la gran disminución de hielo experimentada.



Foto: Jordi Camins.

Si ampliamos el análisis a toda la cordillera pirenaica (que abarca España y Francia), el impacto es visible y cercano. En efecto: en 1850 se contabilizaban en ella un total de 52 glaciares, mientras que en 2023 solo quedaban 15 y todos ellos se hallaban agonizando o bien ya estaban muertos (han dejado de moverse y se han convertido en heleros). En la tabla siguiente se muestra el número de glaciares existentes, junto con la extensión total de hielo que suponen, en distintos años, desde 1850 hasta 2023.

Año	1850	1984	2008	2016	2023
Total de glaciares en Pirineos	52	39	22	19	15
Extensión total de hielo (km ²)	20,60	8,10	3,07	2,42	1,40

Analizando los datos de la tabla anterior, se puede comprobar que desde 1850 a 1984 (es decir, en 134 años), desaparecieron 13 glaciares y la superficie total de hielo se redujo en 12,5 km² (es decir, algo más del 60 %), lo que equivale a una pérdida media de unos 0,1 km² de superficie de hielo cada año, durante ese periodo. De 1984 hasta 2023 (es decir en los 39 años posteriores), desaparecieron 24 glaciares y la superficie total de hielo se redujo en 6,70 km² (más del 80 %), lo que equivale a una pérdida de 0,17 km² de superficie de hielo cada año. De acuerdo con estos datos²⁸, parece claro que el retroceso y la desaparición final de los glaciares pirenaicos es un proceso acelerado e irreversible. De hecho, algunos expertos estiman que hacia 2050, lamentablemente, los glaciares pirenaicos habrán desaparecido prácticamente en su totalidad.



¿Qué efectos tiene la desaparición de glaciares de montaña?

La disminución y desaparición de glaciares de montaña en general, hará (entre otras cosas) que también disminuya la cantidad de agua subterránea y del agua contenida en muchos lagos, así como el caudal de los ríos conectados con esos glaciares. Pensemos en los impactos negativos que tiene la disminución de este recurso básico en sectores como la agricultura o la ganadería y, en particular, en todas las personas de las zonas afectadas.

Otro recurso muy importante y que también está disminuyendo, es el **hielo flotante**, como ocurre con la banquisa ártica y antártica. En la figura siguiente se muestra la disminución media de la extensión de hielo ártico en septiembre en las últimas cuatro décadas. Como

²⁸ Datos (excepto los del año 2023), extraídos de Rico et al., (2017). Ver referencia completa en la bibliografía.

puede verse, en las tres últimas, la disminución se ha situado en torno a 1 000 000 km², de una a otra.

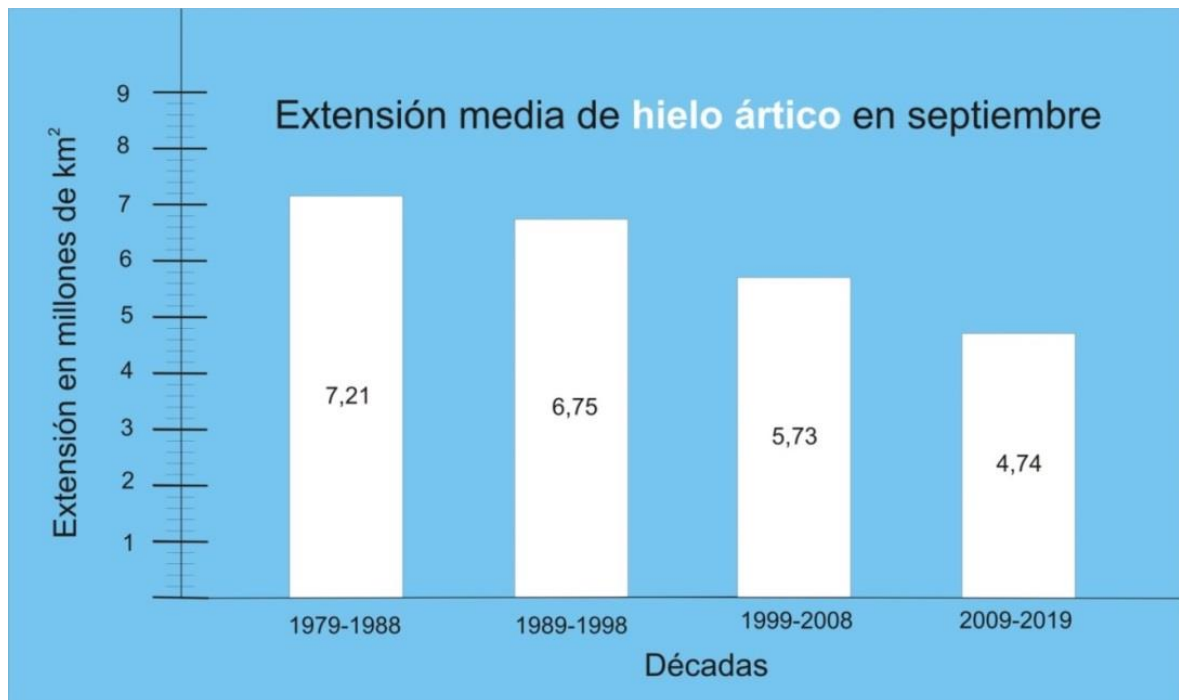


Gráfico elaborado por el autor utilizando datos del National Snow and Ice Data Center

La extensión media de la banquisa ártica en septiembre se ha mantenido siempre por debajo de los 5 millones de km² durante la última década. En septiembre de 2020 alcanzó una extensión de tan solo 3,82 millones, pasando a 4,77 en septiembre de 2021, 4,70 en septiembre de 2022, 4,23 en septiembre de 2023 y 4,28 en septiembre de 2024. Esta tendencia general de disminución de la extensión de hielo ártico es sistemática, y en los 18 años que van de 2007 a 2024 inclusive, se han registrado (medidas realizadas por satélites) las 18 extensiones mínimas más bajas en los últimos 44 años.

(<https://climate.nasa.gov/vital-signs/arctic-sea-ice/>).

Si consideramos la extensión media en septiembre de hielo marino ártico en el periodo de 30 años comprendido entre 1981 y 2010 como referencia (6,41 millones de km²), se puede comprobar que es mucho mayor (del orden de 2 millones de km² mayor) que cualquier otro año entre 2015 y 2024. También ha disminuido el volumen de hielo ártico, de modo que cada m² de hielo ártico es ahora menos grueso que antes. Investigaciones llevadas a cabo por científicos de la NASA muestran que, desde 1958, la cubierta de hielo del Ártico (medida a final de verano) ha perdido 2/3 de su espesor. En un interesante estudio publicado en 2023 en la revista *Nature* (Yeon-Hee et al., 2023), sus autores pronostican que entre 2030 y 2050 llegará el primer septiembre sin hielo. Además, advierten de que si no se reducen las emisiones de GEI, para el año 2100 la región ártica quedará libre de hielo casi medio año. Llegados a este punto, cabe plantearse:



¿Cómo afectaría al mundo el cumplimiento de tal pronóstico?

Posiblemente haya grandes compañías mineras, petroleras y turísticas soñando ya con ese escenario; sin embargo, tal fenómeno acarrearía consecuencias críticas para todo el mundo. En primer lugar, la pérdida de biodiversidad convertiría la región en una zona sin osos polares ni focas. Además, sin ese enorme escudo protector (que refleja gran parte de la radiación solar), el planeta se calentaría aún más. Asimismo, las corrientes de agua y de aire se debilitarían al disminuir la diferencia de temperaturas entre el Ártico y los trópicos. Por último, la degradación del permafrost en las regiones circumpolares liberaría cantidades masivas de CO₂ y metano, acelerando todavía más el calentamiento global. Todos estos efectos ya han empezado a ocurrir.



Los daños, de todo tipo, ocasionados por esos cambios serán incalculables y, si no lo evitamos, conducirán a un mundo mucho peor. Además, debe considerarse que la región es muy rica en recursos naturales como petróleo, gas natural y minerales estratégicos²⁹. La desaparición del hielo ártico haría que dichos recursos, especialmente en lugares como Groenlandia, fueran mucho más accesibles, lo que aumenta la probabilidad de graves conflictos por su control. En definitiva: el Ártico es una zona especialmente sensible al cambio climático, pero todo el planeta es sensible a lo que ocurre en el Ártico, pues estos cambios pueden convertir a la región en un potente motor que acelere el calentamiento global.



¿Y qué cabe esperar que ocurra con el nivel del mar si se funde todo el hielo flotante que existe en el Ártico y el que rodea a la Antártida?

Algunas personas piensan que la fusión de toda la enorme extensión de hielo flotante del océano Ártico y de la banquisa Antártica, tendría como consecuencia directa un gran aumen-

²⁹ De acuerdo con la EIA, el Ártico alberga cerca del 22 % de las reservas mundiales de hidrocarburos (el 78 % de las cuales es gas natural, mayoritariamente en el sector ruso). A esto se suma que Groenlandia posee algunos de los mayores depósitos del mundo de tierras raras (necesarias para la tecnología móvil y de defensa), además de oro, platino y diamantes, cuyo acceso se facilita a medida que la capa de hielo (inlandsis) retrocede.

to del nivel del mar. *¿Hasta qué punto es esto cierto?* La realidad es que, si eso ocurriese, el nivel del mar apenas aumentaría por esta causa. En efecto, si 100 m^3 de hielo continental se funden totalmente y el agua líquida resultante va íntegramente al mar (como ocurre en los glaciares costeros), ello supone un aporte neto de algo más de 91 m^3 de agua al mar (el agua líquida es más densa y, por tanto, ocupa menos volumen que el hielo que la originó, aunque su masa sea la misma). En cambio, si esos mismos 100 m^3 de hielo estuviesen flotando en un gran lago de agua dulce, la mayor parte del bloque estaría sumergida y solo sobresaldría, aproximadamente, su novena parte. Mediante unos sencillos cálculos, se puede comprobar que el volumen de agua líquida producido por la fusión total del bloque coincide con el volumen que el hielo ocupaba bajo el agua (algo más de 91 m^3); de modo que, el nivel del lago no variaría.

Sin embargo, esa coincidencia deja de cumplirse si el bloque flota en el mar. Podemos comprenderlo si tenemos en cuenta que ahora, al tratarse de agua salada (más densa que el agua dulce), el hielo flotaría más y, por tanto, la parte sumergida sería menor. No obstante, como es lógico, su fusión total seguiría produciendo el mismo volumen de agua líquida (algo más de 91 m^3), el cual es ligeramente superior al volumen de hielo sumergido bajo la superficie del mar. Concretamente, la fusión total de 100 m^3 de hielo flotante marino, produce un volumen de agua líquida resultante tan solo unos $2,4 \text{ m}^3$ mayor que el volumen de hielo sumergido inicialmente. Esos $2,4 \text{ m}^3$ sí afectan al nivel del mar contribuyendo directamente a su aumento (aunque muchísimo menos que los algo más de 91 m^3 si se tratase de hielo continental). Además, hay que añadir que la cantidad de hielo flotante multianual es mucho menor que la de hielo continental existente sobre tierra³⁰.

5.2. Acidificación de los océanos

El mar actúa como un inmenso sumidero de CO_2 (efecto neto actual), ya que este gas se disuelve bien en el agua. Su concentración en el agua superficial es un factor determinante (junto con otros como la temperatura) en el intercambio de CO_2 entre la atmósfera y el mar. La incorporación de CO_2 antrópico desde el inicio de la era industrial ha acidificado el agua marina³¹, cuyo pH ha disminuido en 0,1 unidades en promedio (a menor valor de pH, mayor grado de acidez), lo que representa un aumento aproximado de un 30 % de la acidez. Una mayor concentración de CO_2 en la atmósfera aceleraría ese proceso. Las previsiones muestran una reducción del valor promedio del pH en la superficie marina de entre 0,14 y 0,35 unidades durante el siglo XXI. Desde hace al menos 500 000 años, el agua marina no presenta un grado de acidez tan alto como el actual.

Por otra parte, el CO_2 se disuelve mucho mejor en agua fría. Eso explica que tanto las aguas del océano Antártico como las del océano Ártico actúen como enormes sumideros de gran parte del CO_2 emitido a la atmósfera. Después, debido a las corrientes marinas, este CO_2 se redistribuye por todos los mares del planeta. Cuanto más CO_2 hay en la atmósfera, tanto más capturan los océanos, hasta que llegue un momento en que se alcance el punto de saturación y no puedan absorber más. Dicho punto todavía no se ha alcanzado; pero, si los océanos Ártico y Antártico siguen calentándose, absorberán cada vez menos CO_2 . Este efecto se traducirá en unos mares cuya acidez aumentará más lentamente pero que, al capturar menos CO_2 ,

³⁰ Para una explicación más detallada ver Anexo II, al final de esta unidad.

³¹ La reacción se puede representar como: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$ (ácido carbónico).

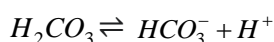
harán que la concentración de este gas en la atmósfera suba, acelerando así el aumento del efecto invernadero.



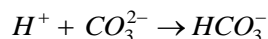
¿A qué tipo de organismos marinos cabe esperar que afecte, en principio, el aumento de acidez del agua?

Muchas personas saben que, al dejar un limón partido sobre un banco de mármol se produce una mancha sobre la zona mojada por su jugo. Esto ocurre porque los ácidos atacan al carbonato de calcio, y resulta que el zumo de limones o naranjas es un poco ácido y el mármol está formado, principalmente, por carbonato de calcio. Algo similar puede ocurrir si se acidifica el agua de los océanos. Aunque los efectos de dicha acidificación sobre la biosfera marina no están todavía bien documentados, parece claro que tendrá efectos negativos sobre todos los organismos que poseen carbonatos en su estructura, tales como los corales y otros animales con concha o caparazón (cangrejos, erizos, la mayoría de los moluscos, etc.) y también, obviamente, sobre todas las especies que dependen de ellos.

El problema no es solo que el ácido «disuelva» las conchas (como el limón al mármol), sino que la acidificación reduce la cantidad de iones carbonato (CO_3^{2-}) disponibles en el agua. En efecto: el ácido carbónico se disocia en el agua según la ecuación química:



Los iones bicarbonato (HCO_3^-) aumentan, pero estos, al contrario que los iones carbonato, no sirven para la fabricación de conchas o caparazones. No obstante, los iones H^+ que han quedado libres son muy reactivos y «atacan» a los iones carbonato que ya había antes en el agua para unirse a ellos formando más bicarbonato:



Esto reduce su disponibilidad para todos los organismos marinos que necesitan de los iones CO_3^{2-} como «ladrillos» fundamentales para construir sus esqueletos y caparazones.

En el caso concreto de los corales, sabemos que el calentamiento del agua marina, por sí solo, ya está provocando su desaparición³². Si a este aumento de la temperatura se une un aumento de la acidez y con ello varía la composición química del agua, tal y como acabamos de mostrar, las consecuencias pueden ser catastróficas. En efecto, cuando un arrecife de coral desaparece, lo hacen también muchos peces y otros seres que viven en él; además, deja de haber una barrera natural protectora para la zona costera. Una pérdida masiva de estos arrecifes supondría la pérdida de miles de millones de euros en la industria pesquera y en el sector turístico, además de importantes daños en las costas que actualmente se hallan protegidas por ellos.

³² El calentamiento del agua marina es la causa principal de que los corales expulsan unas microalgas (zooxantelas) con las que mantienen una relación simbiótica, lo que hace que se vuelvan blanquecinos y al final acaben muriendo.

5.3. Aumento de frecuencia e intensidad en fenómenos extremos

El aire cálido puede contener más vapor de agua que el aire frío. El contenido de vapor de agua del aire ha estado subiendo en los últimos años, tanto sobre los continentes como sobre los océanos, y también en la troposfera superior. Todo ello, como es lógico, aumenta el riesgo de episodios extremos, tales como lluvias torrenciales e inundaciones.

Las lluvias torrenciales y las grandes inundaciones, junto con las graves y cada vez más duraderas sequías, potentes huracanes y prolongadas olas de calor, son ejemplos de fenómenos meteorológicos extremos (o, más propiamente, **extremos climáticos**). Aunque resulta difícil asegurar si uno de ellos en particular está causado o no por el aumento del efecto invernadero, lo cierto es que los estudios científicos realizados muestran muy claramente que, tanto la frecuencia como la intensidad y duración de tales sucesos extremos están aumentando debido a un calentamiento global en aumento, el cual proporciona cada vez más energía al sistema climático.

En la fotografía siguiente se muestra una zona afectada por la potente **DANA** (depresión aislada en niveles altos, o «gota fría») que el 29 de octubre de 2024, asoló a más de 70 municipios de la provincia de Valencia (España), y cuyos efectos catastróficos se sintieron especialmente en polígonos industriales y en las numerosas construcciones situadas en zonas calificadas como inundables, con decenas de miles de coches arrastrados, viviendas y garajes anegados, puentes rotos, carreteras inundadas y, al menos, 230 fallecidos. Resulta muy ilustrativo (y bastante irónico) el cartel que, previamente a la DANA, fue colocado por una empresa inmobiliaria promocionando unas viviendas en una zona inundable, convertida poco después en un barrizal con un montón de coches arrastrados hasta allí por la fuerza del agua. El texto y el contexto invitan a una seria reflexión respecto a la deficiente prevención de riesgos ante estos eventos extremos.



Algo a tener en cuenta en este tipo de fenómenos es el papel que desempeña un mar cada vez más caliente. Concretamente, en el año 2024 en el Mediterráneo se batieron records históricos de temperatura del agua, con picos cercanos a los 32 °C (en Baleares) y una media estival de algo más de 28 °C. Esta anomalía térmica sin duda actuó como «combustible» para la DANA ya que un mar más caliente, aporta más vapor al aire, liberando más energía a la tormenta cuando este condensa.

Por otra parte, si retrocedemos unos años, se puede constatar cómo desde 1950 las olas de calor han aumentado. Desde la década de 1980, cada década sucesiva ha sido más cálida que cualquier década anterior. Si nos situamos en 2025, podemos afirmar que el año 2024 ha sido el más cálido de todos desde que comenzaron a registrarse estos datos en 1880.

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el grado de calentamiento en los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 y 2025 ha sido excepcional (los once años más cálidos registrados). En todos ellos, la temperatura media mundial superó en más de 1 °C los niveles preindustriales (1850-1900) y, en 2024, ese aumento, por primera vez en la historia, sobrepasó el umbral de 1,5 °C. La evaporación, debido a esas condiciones ambientales más cálidas, se ha incrementado notablemente. Asimismo, las precipitaciones de lluvia o de nieve en general han disminuido a pesar de que esporádicamente se producen episodios de precipitaciones muy intensas, que provocan graves inundaciones en determinadas zonas. Todo ello ha hecho que aumenten las regiones del planeta afectadas por **sequías** de larga duración.

Si los largos periodos de sequía van acompañados por olas de calor extremo, la probabilidad de grandes incendios crece drásticamente. En general, debido al aumento del efecto invernadero, un clima más cálido incrementa los riesgos de sequía donde no llueve y de inundaciones donde sí lo hace. De igual modo, la probabilidad de precipitaciones en forma de lluvia, en vez de nieve, aumenta (sobre todo en latitudes medias y altas del hemisferio norte), lo que reduce la cantidad de recursos hídricos en verano, que es cuando más se necesitan.

En el caso de España, cabe señalar que, según datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), el verano se ha alargado unas cinco semanas en los últimos 40 años. Al empezar antes y terminar más tarde, el sobrecalentamiento provoca una mayor evaporación; como consecuencia, España cuenta con unos 30 000 km² más de **territorio árido o semiárido** que hace medio siglo, lo que acelera la pérdida de tierras fértiles y la desertificación.



El calentamiento global provoca también más noches «ecuatoriales», en las que la temperatura mínima no baja en ningún momento de los 25 °C. Estas noches de calor extremo se dan, sobre todo, en ciudades de la costa mediterránea y durante el verano, ya que el fenómeno se ve favorecido por la elevada temperatura que este mar alcanza en esa época, lo cual influye

en la temperatura del aire de las localidades costeras. A estas elevadas temperaturas nocturnas, también contribuye el efecto **isla de calor**, el cual, como ya se ha indicado anteriormente, se produce en las áreas urbanas en las que la concentración de grandes edificios, el suelo de asfalto, el aire caliente que expulsan los aparatos de aire acondicionado y el tráfico, contribuyen a una acumulación de calor durante el día y, sobre todo, a que dicho calor (a diferencia de las zonas rurales que rodean a la urbe) sea más difícil de disipar durante las cortas noches de estío.

Una zona especialmente afectada por olas de calor extremo es la Comunidad Valenciana (situada al este de España). Las noches de calor extremo en la ciudad de Valencia han aumentado sensiblemente desde 1980 hasta la actualidad. En efecto, antes de los años 80 apenas se daban noches con temperaturas mínimas tan altas, pero a partir de entonces, su número ha ido aumentando progresivamente, de forma que en la década de 2010 a 2019 hubo 128 noches con mínima superior a 24 °C (casi 13 noches al año) y 40 noches «ecuatoriales» con mínima superior a 25 °C (un promedio de 4 noches al año). En la tabla que se da a continuación, se muestra la evolución detallada de estos umbrales de temperaturas mínimas nocturnas desde 1940 a 2019.



Analizad cuidadosamente los datos incluidos en las dos tablas siguientes. ¿Qué es lo que muestran? ¿Qué consecuencias tiene la tendencia observada?

Observatorio de la ciudad de Valencia (España)		
Número de noches cuya temperatura mínima no bajó de 24 °C o de 25 °C		
Década	No bajó de 24 °C	No bajó de 25 °C
1940-1949	3	1
1950-1959	0	0
1960-1969	5	0
1970-1979	13	1
1980-1989	28	4
1990-1999	59	12
2000-2009	102	21
2010-2019	128	40

Fuente: Núñez Mora, J.A. (2020).

En la siguiente tabla, se muestran los datos disponibles correspondientes a la tercera década del siglo XXI:

Observatorio de Valencia		
Número de noches cuya temperatura mínima no bajó de 24 °C o de 25 °C		
Años	No bajó de 24 °C	No bajó de 25 °C
2020-2024	127	52

Fuente: Agencia Estatal de meteorología AEMET. España

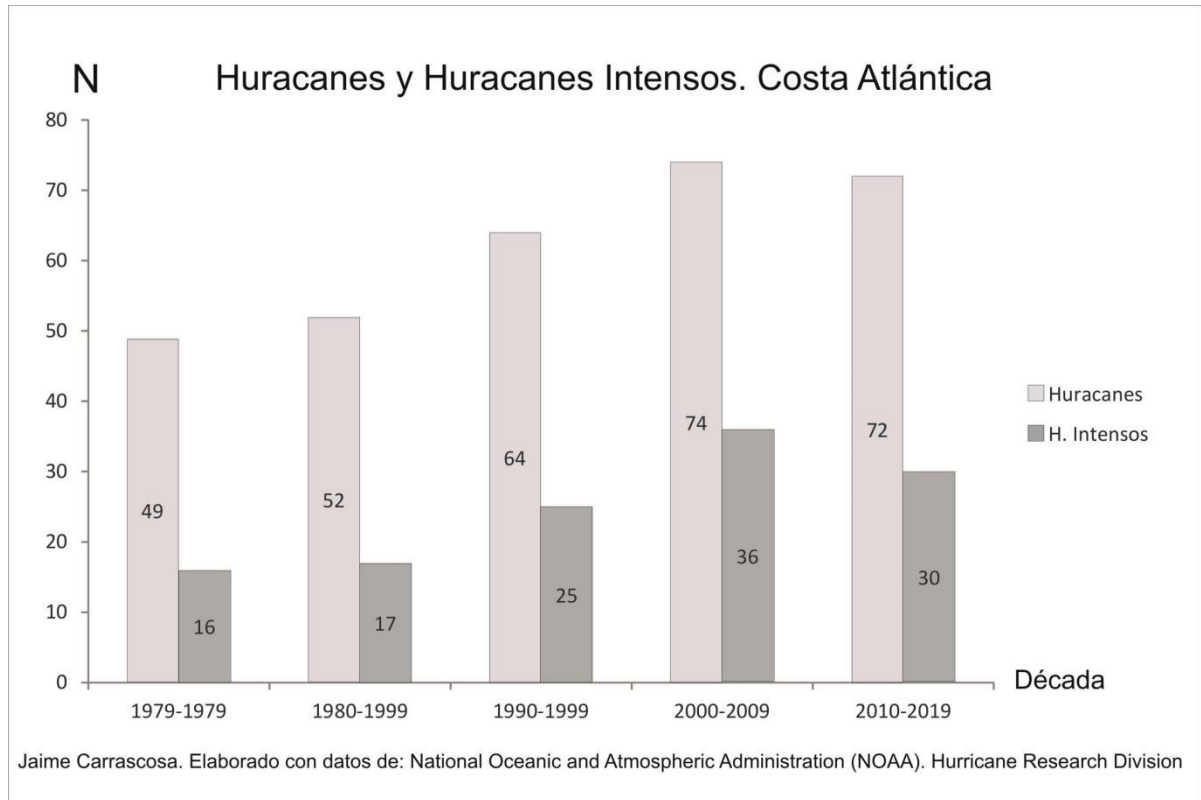
Como puede observarse en la tabla anterior, solo en esos cinco primeros años de la década 2020-2029, el número de noches en las que la temperatura mínima en la ciudad de Valencia no bajó de los 24 °C es prácticamente el mismo que el correspondiente a toda la década anterior (127 frente a 128), y el de noches ecuatoriales, en las que no se bajó de los 25 °C, es ya sensiblemente mayor que en toda la década anterior (52 frente a 40). A ello hay que añadir que, debido a la elevada humedad relativa, la sensación térmica o temperatura que realmente siente el cuerpo humano es varios grados mayor de lo que marca el termómetro. Esto se debe a que el alto grado de humedad impide la evaporación del sudor, que es nuestro mecanismo natural de refrigeración. La interpretación de esos datos es clara: debido principalmente al aumento del efecto invernadero, la tendencia es marcadamente alcista, y el número de noches con temperaturas mínimas tan extremadamente altas crece exponencialmente. Esta situación de estrés térmico afecta de forma grave—y cada vez más frecuente— a la salud de muchas personas (en particular, ancianos y niños).

Algunos eventos extremos, como los **huracanes**, extraen su energía del agua del mar y se frenan cuando chocan contra barreras costeras (arrecifes de coral, manglares, bosques y montañas). *¿Qué cabe esperar que ocurra con dichos eventos? ¿Cómo van a evolucionar?* Con el aumento en la temperatura del agua marina y la degradación de las costas (desaparición de arrecifes de coral y de vegetación) se potencian estos extremos climáticos y sus efectos. En general, el número de huracanes intensos en todo el mundo se duplicó entre principios de los 70 del siglo pasado y principios del siglo XXI, y la velocidad máxima de los vientos de los ciclones tropicales ha crecido aproximadamente en un 50 % en los últimos 50 años (Fuente: National Geographic).



Huracán Katrina. Fuente original: <http://www.nnvl.noaa.gov>

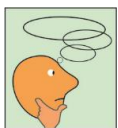
En la figura siguiente, se aprecia una tendencia claramente alcista en el número de huracanes registrados en el océano Atlántico durante las 5 décadas que van entre 1969 y 2019.



Solo en los cinco años que van de 2020 a 2024, el número total de huracanes registrados en el Atlántico según la misma fuente (NOAA), ha sido de 46, de los cuales 21 han sido intensos (categoría 3 o superior); lo que muestra claramente que la tendencia alcista continúa.

El aumento en intensidad, frecuencia y duración de todo tipo de extremos climáticos (huracanes, inundaciones, olas de calor, etc.), no solo supone cuantiosas pérdidas económicas (daños en cultivos, viviendas, infraestructuras, industrias, patrimonio artístico, industria turística, etc.), sino que también causan la muerte de miles de seres humanos. Así, por ejemplo, las muertes de personas (sobre todo ancianos) durante el verano por las altas temperaturas, han aumentado notablemente durante los últimos años, especialmente en algunos países de Europa donde los veranos solían ser más suaves. En la ola de calor extremo del verano de 2003 se llegaron a producir unas 15 000 muertes en Francia y unas 70 000 en toda Europa (Viñas, 2022). Más recientemente, en los tres veranos que van desde 2022 a 2024, el exceso de mortalidad estimado por altas temperaturas en Europa, superó las 180 000 muertes (Janoš, T., Quijal-Zamorano, M., Shartova, N. *et al.*, 2025).

5.4. Alteración de ritmos vitales y pérdida de biodiversidad



Hemos visto cómo el aumento del efecto invernadero potencia diversos extremos climáticos y hace que en algunas zonas del planeta, los inviernos sean cada vez más suaves y cortos mientras que los veranos son más calurosos y largos. ¿Qué impacto tener todo esto en la flora y la fauna.

Algunos ejemplos de dicho impacto son: Las hojas de las higueras brotan antes y se caen después, y otro tanto ocurre con muchas flores y frutos. En general, los árboles caducifolios tardan más tiempo del acostumbrado en perder las hojas.

El adelanto en la floración conlleva una presencia más prolongada de polen en la atmósfera, lo cual repercute en las alergias. Además, si no hay coordinación temporal entre la floración y los insectos polinizadores, la producción de miel y de frutas puede verse gravemente alterada. Esta descoordinación (conocida como **desajuste fenológico**) afecta también a otras especies; por ejemplo, si las orugas se adelantan de junio a mayo, es posible que los polluelos de las aves insectívoras, que nacen a primeros de junio, se queden sin su alimento y mueran. Esto potencia la proliferación de insectos, al disminuir la población de sus depredadores naturales.

Algunas especies de plantas como enebros, hayas y robles, se pueden encontrar cada vez a mayor altitud, desplazando a otras especies alpinas como el abeto. Por otra parte, especies de animales que antes emigraban (como las cigüeñas) ahora no lo hacen y pasan aquí (España) el invierno, debido no solo a que encuentran abundante comida en los grandes vertederos de basura, sino también a que los inviernos son cada vez más suaves. Otras aves, características de climas más cálidos (como algunas cotorras), se han instalado definitivamente en ciertas zonas de España. Esta situación no solo se da en plantas y aves sino que afecta también a otros seres vivos como, por ejemplo, a algunas especies de mosquitos característicos de zonas tropicales, que son transmisores de graves enfermedades como la malaria, el dengue o la fiebre del Nilo, los cuales se detectan en latitudes cada vez más altas. Así, por ejemplo, en lo que respecta a España, los 158 casos autóctonos notificados de fiebre del Nilo correspondientes al año 2024 superan ampliamente los 20 de 2023 y los 4 de 2022, mostrando una clara tendencia al alza.

El aumento en la temperatura de los océanos también propicia en ellos este tipo de cambios (mucho más rápidos que en el medio terrestre, debido a ser un medio abierto y a la gran movilidad de las especies marinas). Solo en el Mediterráneo se ha contabilizado una entrada de varios centenares de especies exóticas (en su mayor parte de origen tropical). El aumento en la temperatura del agua del mar favorece también otros fenómenos, como la proliferación de algas o las invasiones de medusas (lo que puede afectar al turismo de muchas zonas costeras). El calentamiento y la reducción del hielo marino (junto con la acidificación del agua líquida) afecta también a la reproducción del krill³³ antártico, el animal más abundante del planeta y un eslabón fundamental de la cadena trófica, del cual se alimentan ballenas, focas, pingüinos, peces, etc. Además, el krill juega un papel muy importante en la regulación del efecto invernadero, puesto que se alimenta de fitoplancton (el cual captura CO₂ mediante la fotosíntesis) y luego, a través de sus heces, deposita el carbono ingerido en las profundidades del océano, donde queda bloqueado. De este modo el krill antártico secuestra millones de toneladas de carbono³⁴ al año (Cavan, et al., 2019).

³³ Como krill se designa un pequeño crustáceo marino parecido a las gambas o camarones. La mayoría son bioluminiscentes (emiten luz) y en su etapa adulta pueden llegar a medir hasta unos 6 cm.

³⁴ Se utiliza el término **secuestro de carbono** para diferenciar el elemento almacenado físicamente en el fondo oceánico, del gas CO₂ presente en la atmósfera. Una tonelada de carbono secuestrada equivale aproximadamente a 3,67 toneladas CO₂ atmosférico retirado.



¿Cómo puede contribuir el cambio climático a la pérdida de biodiversidad?

Los desajustes que hemos mencionado son ejemplos de cambios que trastornan las cadenas reproductivas y alimentarias de muchas especies de plantas y de animales. Apenas han comenzado, y sus efectos pueden ser catastróficos. Uno de dichos efectos es su contribución a la pérdida de biodiversidad.

En la actualidad se conocen al menos 1,5 millones de especies animales, de las que más de la mitad son insectos, unas 70 000, son vertebrados, y cerca de 17 000, corresponden a aves y mamíferos. No obstante, se desconoce cuántas quedan aún por descubrir. A causa del cambio climático, la temperatura media global asciende, los patrones de precipitación se alteran y el nivel del mar sube a la vez que se acidifica. Estos cambios, especialmente el aumento térmico, impactan directamente en los ciclos reproductivos, las migraciones y la distribución de las especies. En este contexto, destaca el declive de las poblaciones autóctonas, que en muchos casos se ven desplazadas por especies invasoras con mayor capacidad de adaptación.. Asimismo, se observa una mayor frecuencia de plagas que, en general, se activan más con las altas temperaturas; por ejemplo, algunas especies como el escarabajo del pino, proliferan y son capaces de colonizar y devastar grandes extensiones de bosque. Todo ello debilita la salud de la flora y la fauna, haciéndolas más vulnerables frente a enfermedades y patógenos.

Actualmente, diversas especies de todo el mundo están amenazadas de extinción (osos polares, corales, algunos peces y anfibios...) y, de hecho, algunos factores relacionados con el aumento del efecto invernadero también contribuyen a dicha extinción (por ejemplo, la destrucción de la selva amazónica y bosques en Indonesia, los grandes incendios forestales, el aumento de la temperatura y del grado de acidez del agua marina, la fusión del hielo ártico, etc.). El calentamiento global cambiará el aspecto y la localización de muchos bosques del mundo. Los bosques de zonas hasta ahora templadas tenderán a desplazarse hacia mayores altitudes. Sin embargo, algunas especies como las hayas podrían ser incapaces de migrar con la rapidez necesaria y acabarían extinguiéndose. Esta desaparición de masas forestales completas provocaría una hecatombe que aceleraría, a su vez, la **pérdida de biodiversidad** y el calentamiento global. Aunque no se conoce exactamente el número de especies que debido al cambio climático y a otras causas (relacionadas o no con el mismo) están desapareciendo cada año, sí sabemos que la tasa de extinción detectada es entre 100 y 1000 veces superior a la esperada por causas naturales. Estamos perdiendo biodiversidad a tal velocidad, que se habla ya de una sexta extinción masiva y de que, esta vez, a diferencia de la anterior (desaparición de los dinosaurios), el meteorito somos nosotros mismos.



¿Qué relación existe entre la pérdida de biodiversidad y la salud humana?

La pérdida de biodiversidad afecta también a la salud de las personas. La organización Mundial de la Salud (OMS) estima que más del 70 % de las enfermedades humanas en los últimos 40 años (incluyendo la COVID-19), han sido transmitidas por animales silvestres (proceso conocido como «**zoonosis**»). Para el Fondo Mundial para la Naturaleza, la proliferación de este tipo de enfermedades (sida, ébola, gripe aviar, coronavirus, hantavirus, etc.), guarda una relación indudable con la destrucción de ecosistemas naturales, la pérdida acelerada de biodiversidad, el tráfico de especies y el consumo de carne de algunos animales salvajes.

También influye, sin duda, la relación que tenemos los humanos con el medio ambiente, con incursiones cada vez más frecuentes y numerosas en territorios deshabitados. En este mismo sentido se manifiesta el investigador Fernando Valladares, apuntando que la aparición de dichas enfermedades puede aumentar hasta tres veces en las próximas décadas y calificando la producción industrial de carne como una verdadera bomba de relojería ya que el hacinamiento animal que se produce en las instalaciones de ganadería intensiva hace más probable que de ellas salten variantes de virus o bacterias peligrosas para los seres humanos (Valladares, 2023). Por el contrario, en un medio natural bien conservado, con gran biodiversidad, los virus y otros patógenos se distribuyen entre distintas especies, antes de poder afectar al ser humano (**Efecto de dilución**). Cuando esto no es así, esta protección natural se debilita, favoreciendo la transmisión a las personas.

5.5. Aumento de la probabilidad de cambios catastróficos e irreversibles

En el informe elaborado en 2007 por el IPCC no se consideraba probable que durante el siglo XXI se produjeran de forma abrupta (perceptible en escalas de tiempo comparables a la vida humana) cambios catastróficos e irreversibles tales como la pérdida de una gran parte de los mantos de hielo que cubren la Antártida Occidental o Groenlandia, cambios a gran escala en la circulación oceánica, descongelación acelerada del permafrost y la degradación de ecosistemas claves (como la selva amazónica o los corales), todos ellos de gravísimas consecuencias planetarias. No obstante, también se afirmaba allí que la ocurrencia de dichos cambios se torna cada vez más probable a medida que avanzan las perturbaciones del sistema climático. Lo que preocupa actualmente es que el aumento de la temperatura media global pueda conducir a unas perturbaciones lo bastante fuertes como para desencadenarlos antes de lo que se imaginaba. A este respecto, es necesario considerar el importante papel que desempeñan los denominados **ciclos de autorreforzamiento** en la aceleración del incremento del efecto invernadero y, en consecuencia, del aumento de temperatura media del planeta asociado al mismo. Aquí nos limitaremos a considerar aquellos ciclos equivalentes a procesos de retroalimentación positiva; es decir, aquellos en los que la causa inicial que los desencadena produce una secuencia de cambios o efectos, cuyo resultado final alimenta y amplifica a la causa original, cerrando así el ciclo.



Proposed posibles ciclos de autorreforzamiento que partan y terminen en el aumento de la temperatura media global del planeta.

A título de ejemplo, se enumeran a continuación algunos de ellos. El punto de partida para cada uno es siempre el mismo:

Si continúa aumentando la temperatura media del planeta...

- aumentará la evaporación y la retención de vapor de agua en la atmósfera (como ya se ha señalado anteriormente, por cada aumento de 1 °C la capacidad de retención de vapor de agua por la atmósfera aumenta alrededor de un 7%), lo cual hará aumentar el efecto invernadero (recordemos que el vapor de agua es el gas que más contribuye al efecto invernadero) y, consecuentemente, la temperatura.
- los grandes incendios forestales se multiplicarán (se reseca más el suelo y las hojas, se producen más rayos...); al arder la vegetación, se emite CO₂ a la atmósfera y, simultáneamente,

neamente, se reduce la cantidad de plantas que pueden absorberlo mediante la fotosíntesis, lo que hará aumentar el efecto invernadero y, por tanto, la temperatura.

- aumentará la cantidad de hielo marino fundido, con lo que disminuirá el efecto aislante de la capa de hielo, favoreciendo una mayor emisión de calor al aire desde el mar, aumentando la temperatura del aire próximo a la superficie.
- aumentará la temperatura de los océanos y, con ello, la posibilidad de que se libere metano procedente de algunos lodos del fondo marino poco profundo, lo que hará que aumente el efecto invernadero y con él la temperatura.
- aumentará la descongelación de suelos de la tundra siberiana, Canadá y Groenlandia, ricos en materia orgánica que, al descongelarse, se descompone liberando CO₂ y CH₄, gases que aumentarán el efecto invernadero y, consecuentemente, la temperatura.
- aumentará la fusión de grandes masas de hielo (continentales y marinas) que cubren extensas superficies, con lo que disminuirá el efecto albedo y se reflejará menos radiación solar al espacio, calentándose más las zonas próximas (más oscuras) de agua o de suelo, lo que acelerará el proceso, haciendo que se funda más hielo y aumente más la temperatura.
- habrá bosques enteros —como los hayedos— incapaces de adaptarse al rápido aumento de la temperatura. Al no disponer de tiempo suficiente para desplazarse a latitudes más altas, terminarán desapareciendo. Esta pérdida de masa forestal reducirá la absorción de CO₂ atmosférico mediante la fotosíntesis, lo que intensificará el efecto invernadero y, por consiguiente, provocará un mayor incremento de la temperatura global.
- se disolverá menos CO₂ en el agua marina (el CO₂ se disuelve mejor en agua fría) y el mar podría pasar de ser un sumidero neto de CO₂ a emisor neto de dicho gas, aumentando el efecto invernadero y, por tanto, la temperatura.

Los ciclos de autorreforzamiento anteriores (y otros similares) pueden hacer que el sistema climático evolucione de manera imprevisible, favoreciendo que se crucen determinados umbrales o puntos críticos antes de lo que se piensa, y se produzcan, en cortos lapsos de tiempo, cambios catastróficos e irreversibles a escala planetaria. A continuación, analizaremos un par de ellos.

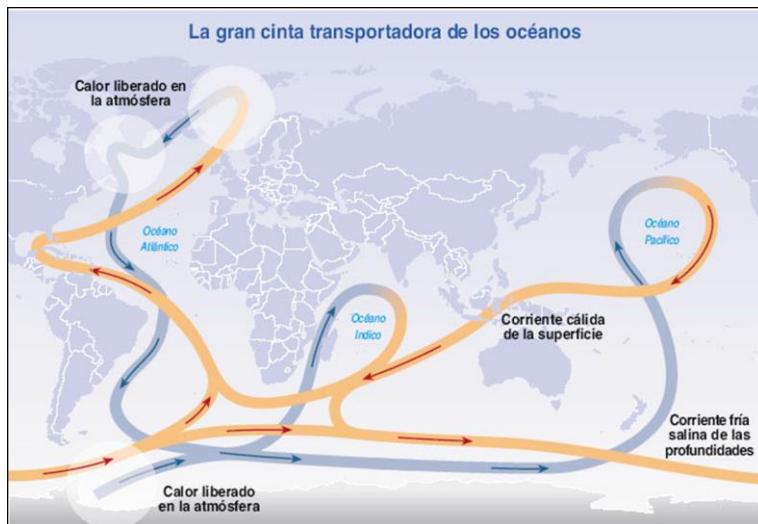
Un ejemplo de gran cambio climático es el **posible colapso de la Corriente del Golfo**, que proporciona cantidades notables de energía mediante calor a los mares y tierras cercanas de Noruega, Groenlandia e Islandia.



¿Qué tendría que ocurrir para que se frenase o se parase la corriente del Golfo?

Esta corriente de aguas más cálidas, contribuye a que ciudades como París o Madrid, tengan temperaturas medias más elevadas que, por ejemplo, Montreal o Nueva York respectivamente, aunque se hallen en latitudes parecidas.

Esta corriente de aguas más cálidas contribuye a que ciudades como París o Madrid tengan temperaturas medias más elevadas que, por ejemplo, Montreal o Nueva York respectivamente, aunque se hallen en latitudes parecidas. En la figura siguiente se ha representado de forma esquemática dicha corriente (Fuente original: www.oceanservice.noaa.gov).

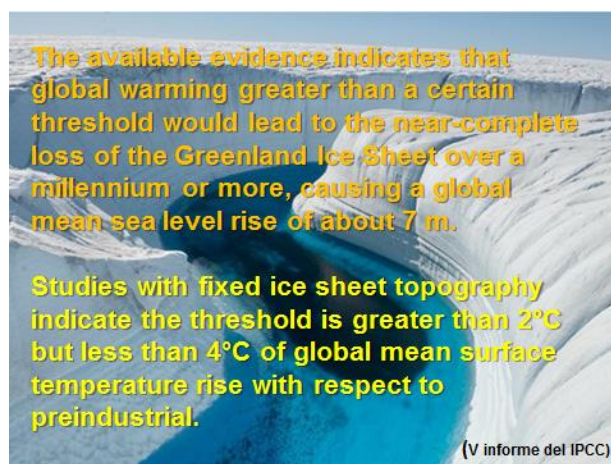


Una observación cuidadosa de este esquema, permite comprender como funciona. En efecto, en el Atlántico norte, al chocar las aguas cálidas con los vientos fríos que provienen del Ártico, se origina vapor, que es llevado hacia el este por los vientos dominantes del oeste que circulan hacia el continente europeo. Después de la evaporación, el agua es más fría y más salada, lo que hace que su densidad sea mayor y se hunda en grandes cantidades y a gran velocidad hacia el fondo del océano, alimentando así la corriente transportadora de agua fría hacia el sur. Se piensa que si la densidad de las aguas superficiales del Atlántico norte disminuyese debido al calentamiento, el agua dejaría de hundirse, con lo que esa cinta transportadora de energía podría pararse, cesando la entrega de calor a amplias zonas del norte de Europa. Conviene saber, que la densidad del agua disminuye si lo hace la concentración de sales disueltas en ella, lo cual ocurre cuando aumenta la cantidad de agua dulce presente, bien sea proveniente de la fusión del hielo o de la intensificación del ciclo hidrológico. También disminuye (a partir de 4 °C) con el aumento de temperatura.

En realidad, la determinación de en qué medida la corriente del Golfo contribuye a que los inviernos en Europa del Norte sean más benignos que en las mismas latitudes de Estados Unidos o de Canadá, así como el grado de influencia que tiene la fusión del hielo ártico en frenar esta corriente, son cuestiones muy complejas, que dependen también de más factores de los que se han considerado aquí, sin que en la actualidad se sepa muy bien cuánto influye cada uno. Sin embargo, lo que parece claro, según el informe especial sobre océanos y criosfera (IPCC, 2019), es que esta corriente, y otras que circulan por el Atlántico formando un entramado conocido por la siglas **AMOC** se están debilitando y ralentizando durante las últimas décadas, afectando gravemente no solo al clima, sino también al fondo oceánico profundo, así como a la distribución de oxígeno y nutrientes marinos en el océano Atlántico y, consecuentemente, a la biodiversidad marina³⁵. Además, se prevén efectos como la disminución de la productividad marina en el Atlántico Norte, un aumento de las tormentas en el norte de Europa y el ascenso del nivel del mar en la costa este de Norteamérica. Estos impactos se agravarán conforme la corriente se debilite; de hecho, se estima que para finales del siglo XXI este debilitamiento podría ser entre un 35 % y un 40 % superior a la situación actual (Viñas, 2022).

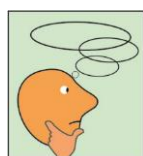
³⁵ Estudios recientes indican que la AMOC se ha ralentizado o debilitado ya un 15 % desde la década de 1950. <https://www.fisheries.noaa.gov/feature-story/reconstruction-major-north-atlantic-circulation-system-shows-weakening>

Otro ejemplo de posible cambio catastrófico e irreversible es la **rápida desintegración del manto de hielo que cubre Groenlandia o la Antártida occidental**. Los datos al respecto indican que hay un umbral de temperatura crítica más allá del cual el manto de hielo de Groenlandia estaría condenado a desaparecer completamente. Ese umbral se sitúa entre 2 °C y 4 °C por encima del valor medio de la temperatura correspondiente al periodo de referencia 1850-1900 y, desgraciadamente, podría cruzarse en el transcurso del siglo XXI. Aunque la fusión de dicho manto de hielo sería un proceso que, en principio, tardaría un milenio o más en completarse, lo cierto es que también puede verse muy acelerado por ciclos de autorreforzamiento como los ya comentados. Conviene saber que la fusión de la mitad de la capa de hielo de Groenlandia y la mitad de la de la Antártida occidental ocasionaría tales inundaciones que habría que volver a dibujar los mapas del mundo.



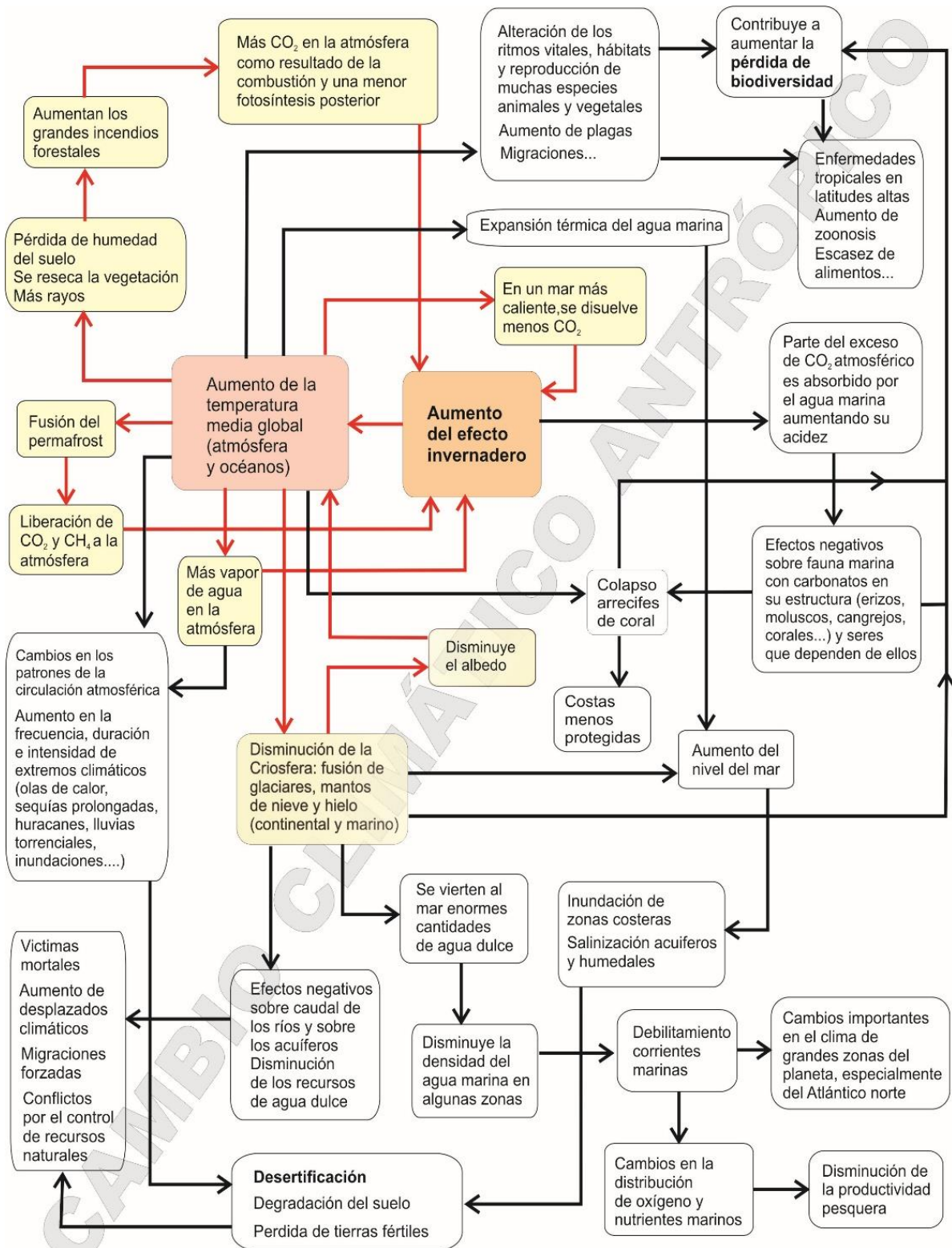
En este quinto apartado, hemos examinado cómo el aumento del efecto invernadero eleva la temperatura media global y algunos de los grandes cambios que se están produciendo debido, fundamentalmente, a ese calentamiento. También hemos analizado cómo dichos cambios y sus efectos asociados se ven impulsados y acelerados por determinados ciclos de autorreforzamiento, que pueden dar lugar a que se superen ciertos puntos de inflexión (*tipping points*), lo cual provocaría una reorganización abrupta e irreversible del sistema climático (Lenton, 2021).

Concretamente, se ha detallado cómo el retroceso de hielo marino y el calentamiento global asociado están acelerando la fusión del manto de hielo que cubre la mayor parte de Groenlandia; y cómo este vertido masivo de agua dulce al Atlántico Norte está debilitando la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico (AMOC). Su potencial desestabilización desencadenaría efectos en cascada de extrema gravedad, tales como la alteración del régimen térmico y de precipitaciones en Europa, el desplazamiento de los cinturones de lluvia tropicales y cambios en la distribución de nutrientes marinos. Estos impactos provocarían una disminución drástica de las capturas pesqueras, lo que afectaría gravemente a la biodiversidad y a la seguridad alimentaria global.



A modo de síntesis, elaborad un mapa conceptual que muestre las consecuencias del aumento del efecto invernadero y del consiguiente aumento en la temperatura media global. Contemplad también algunos de los ciclos de retroalimentación analizados. Después, proceded a compararlo con el que se expone a continuación introduciendo los cambios que se consideren oportunos para su mejora.

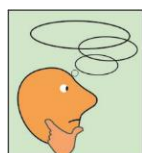
CAMBIOS QUE CONFORMAN EL CAMBIO CLIMÁTICO ANTROPICO



Autores: Jaime Carrascosa Alís, Daniel Gil Pérez

Los cambios representados en el esquema o mapa conceptual anterior afectan a todos los componentes del sistema climático terrestre y constituyen una breve síntesis de todo lo expuesto en este quinto apartado. Se trata de cambios estrechamente vinculados, de forma que cada uno puede ser a la vez consecuencia y causa de otros. En algunos casos, estas vinculaciones producen ciclos de autorreforzamiento que, como se ha visto, desempeñan un papel fundamental favoreciendo que se sobrepasen determinados puntos críticos, lo que daría lugar a que se desencadenasen cambios abruptos y, a veces, irreversibles. Para resaltar estas retroalimentaciones se han sombreado los recuadros correspondientes y se han conectado entre sí mediante flechas de color rojo, que indican cada ciclo. También se pueden observar efectos en cascada cuando, a partir de un cambio determinado, como es el vertido de grandes cantidades de agua dulce al mar, se produce toda una secuencia de importantes cambios. Cruzando toda una diagonal se observa en segundo plano un texto sombreado en el que se lee: CAMBIO CLIMÁTICO ANTRÓPICO; con ello se quiere resaltar que todos los cambios representados en los recuadros del esquema, junto a las interconexiones que indican sus vinculaciones, conforman el cambio climático terrestre actual en el que estamos inmersos.

El CCA es considerado como un límite fundamental que forma parte de los nueve límites planetarios (Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. *et al.*, 2009). Estos límites no deben sobrepasarse para así poder mantener la estabilidad y resiliencia del sistema terrestre en su conjunto. En este caso, una de las variables utilizadas para medir su evolución, es la concentración de CO₂ en la atmósfera. El esquema permite observar la estrecha vinculación que existe también entre dicha variable (integrada en el aumento del efecto invernadero que figura en el recuadro central) con otros límites planetarios como la integridad de la biosfera, la acidificación de los océanos o los cambios en el agua dulce y el suelo. También permite darse cuenta de la complejidad del CCA, en el que todos los componentes o subsistemas del sistema climático terrestre se ven afectados (y en donde el tiempo de respuesta de cada uno a los cambios que en él se producen es diferente).



Ciertamente, el actual cambio climático no es el primero que ocurre. En efecto, la Tierra, durante su larga historia, ya ha sufrido muchos otros. Sin embargo, este tiene unas características propias que lo hacen muy distinto a todos los anteriores. ¿Cuáles son esas características diferenciadoras?

Entre otras, cabe pensar en las siguientes:

- Estar causado por la humanidad que, en este caso, actúa como una nueva y poderosa fuerza capaz de alterar el equilibrio energético que gobierna el sistema climático y las interacciones entre sus componentes.
- La rapidez con que está ocurriendo: en efecto, desde 1850 (justo al comienzo de la gran aceleración industrial), la concentración de CO₂ atmosférico no ha cesado de crecer hasta sobrepasar en 2024 las 422 ppm, lo que supone un aumento del orden de 140 ppm en tan solo 174 años, mucho mayor que el ocurrido desde que acabó la última glaciación hasta 1850 (unas 80 ppm en unos 10 000 años). Dicha rapidez incidirá negativamente en las posibilidades de adaptación de muchas especies.
- Forma parte de un cambio global más amplio, caracterizado por toda una serie de graves problemas interconectados que afectan a toda la Humanidad y resto de seres vivos.

- Conocemos sus causas. Sabemos cómo frenarlo y mitigar sus efectos. Tenemos los medios necesarios para hacerlo. Y, sobre todo, aún estamos a tiempo de evitar que se produzcan cambios catastróficos e irreversibles.

¿Cómo hacer frente a este grave problema? La respuesta a esta pregunta, aparentemente, es obvia: Si el desarreglo climático tiene su origen en el ascenso de la temperatura media global, inducido por el aumento del efecto invernadero, es imperativo evitar que dicha temperatura siga elevándose. Esto exige reducir drásticamente las emisiones de los gases invernadero en general y del CO₂ en particular (como ya se ha señalado anteriormente, el CO₂ es el principal agente causante del aumento del efecto invernadero).

En el [Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1,5 grados](#) (IPCC. 2018), se muestran los efectos que tendría superar en más de 1,5 °C la temperatura media terrestre (respecto de los niveles preindustriales). Para evitar consecuencias catastróficas e irreversibles, debemos conseguir que las emisiones globales de CO₂ en 2030 disminuyan aproximadamente en un 45 % con respecto a las emisiones de 2010, y que continúen disminuyendo hasta alcanzar la neutralidad³⁶ en 2050. Sin embargo, los datos más recientes indican que las emisiones globales aún no han alcanzado su pico máximo, lo que estrecha peligrosamente nuestro «presupuesto de carbono»: la cantidad total de gases invernadero que la atmósfera puede absorber antes de que el umbral de los 1,5 °C sea una realidad permanente y no un evento transitorio.

Para lograr este ambicioso objetivo, algunos expertos advierten que no bastará con la reducción en origen. Además, será necesario implementar tecnologías de captura directa de CO₂ atmosférico, y mejorar la gestión de los sumideros biológicos de carbono. No obstante, la tecnología es solo una herramienta. Para que las medidas sean realmente efectivas, es preciso reflexionar en profundidad sobre *cuáles son las causas últimas que explican por qué, desde los inicios de la era industrial, emitimos de forma continuada y en cantidades crecientes más CO₂ (y resto de gases invernadero) a la atmósfera*. Este es el problema estructural que abordaremos en el próximo apartado.

³⁶ La neutralidad de carbono (o emisiones netas cero) implica un equilibrio físico: que cada tonelada de CO₂ emitida sea compensada por la captura de una cantidad equivalente mediante reservorios naturales (bosques, turberas, océanos) o métodos tecnológicos. Conviene tener en cuenta que, cuanto más tardemos en reducir las emisiones, más dependeremos de tecnologías de eliminación de carbono, cuya viabilidad a gran escala es aún incierta, costosa y requiere de un alto consumo de energía.

6. ¿POR QUÉ AUMENTAN LAS EMISIONES DE GASES INVERNADERO?

Sabemos ya que el aumento del efecto invernadero está haciendo (entre otras cosas) que el valor de la temperatura media del planeta se eleve, lo cual tiene graves consecuencias en el clima terrestre. Está claro que para afrontar el problema es necesario reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en particular de CO₂. No obstante, difícilmente podremos avanzar en este objetivo si antes no nos detenemos en analizar las causas profundas del problema.



¿Por qué, desde los inicios de la revolución industrial, estamos emitiendo CO₂ y otros GEI a la atmósfera de forma creciente y continuada?

El modo de crecimiento económico vigente necesita para mantenerse, un consumo creciente de bienes tangibles (viviendas, vehículos, electrodomésticos, teléfonos, ordenadores, muebles, ropa, alimentos...) y servicios (acceso al agua potable, electricidad, internet, viajes, inteligencia artificial, criptomonedas...). Esto hace que la energía que se precisa, tanto para la fabricación y comercialización de todos esos bienes como para poder ofertar y hacer funcionar esos servicios, sea también cada vez mayor. Dicha energía se obtiene principalmente quemando combustibles fósiles y, en consecuencia³⁷, emitiendo CO₂. El problema se agrava si tenemos en cuenta que la población mundial en 2025 superaba ya los 8200 millones de habitantes y que, mientras una quinta parte de toda esa población apenas tiene para poder subsistir, otra quinta parte consume muy por encima de lo que se necesita para vivir dignamente. Así pues, el aumento del efecto invernadero está muy relacionado con otros graves problemas, tales como el hiperconsumo, la superpoblación y las grandes desigualdades sociales. A continuación, analizaremos brevemente cómo influye cada uno de ellos.

6.1. Hiperconsumo

El modo de crecimiento económico actual es un crecimiento insostenible guiado por intereses particulares a corto plazo, que actúa como si el planeta dispusiera de recursos naturales ilimitados. Un crecimiento especialmente acelerado desde la segunda mitad del siglo XX y que se traduce en un hiperconsumo creciente y continuado de bienes y servicios. Se trata de un crecimiento explosivo, que algunos defienden como algo deseable por haber hecho posible indudables avances sociales (para una parte de la humanidad), pero que también tiene repercusiones muy negativas para la naturaleza y, en consecuencia, para el futuro de todos los seres vivos. Para que este modo de crecimiento económico pueda continuar, es necesario un consumo cada vez mayor e ininterrumpido de muchos recursos naturales.



Enumerad aspectos importantes que caractericen el hiperconsumo

Se trata de un hiperconsumo sobre el que tenemos mucha mayor responsabilidad las sociedades «desarrolladas», el cual se caracteriza principalmente por estar estimulado por una publicidad agresiva, creadora de falsas necesidades, y por modas efímeras que impulsan la cultura del «usar y tirar», ignorando la necesidad de reducir, reutilizar y reciclar. Asimismo,

³⁷ La quema de cualquier combustible fósil (carbón, petróleo y sus derivados, gas natural) y de madera, siempre produce (entre otras sustancias) CO₂.

el hiperconsumo fomenta el uso de productos con alto impacto ecológico (envases y bolsas de plástico, cosméticos y alimentos con aceite de palma, etc.), y desincentiva la reparación. A menudo, cuando una pieza se avería, se sustituye el bloque completo o se desecha el aparato en su totalidad. Todo ello se ve agravado por prácticas como la «obsolescencia programada», diseñada deliberadamente para reducir la durabilidad de los productos y forzar así un ciclo de consumo ininterrumpido.



Algunos indicadores de hiperconsumo son: uso de vehículos particulares a motor para desplazarse escasos metros, acumulación en los hogares de numerosos objetos y productos innecesarios, renovación sistemática de aparatos y máquinas todavía útiles o de ropa y calzado en buen estado, desperdiciar grandes cantidades de alimentos, etc.

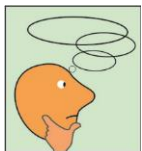
No se trata, claro está, de condenar todo consumo sin matizaciones. Es preciso reducir, sobre todo, el consumo innecesario y evitar el de productos que tienen un gran impacto negativo sobre el medio natural, pero sin olvidar que el consumo contribuye al desarrollo humano cuando mejora la calidad de vida de unas personas, sin menoscabo de la vida de las demás. Así, mientras que la mayoría de habitantes de Estados Unidos, Europa o Canadá, debería consumir menos y eliminar un derroche que no contribuye en nada a la calidad de vida, para más de 700 millones de las personas más pobres del mundo, aumentar su consumo es una cuestión de supervivencia³⁸ y un derecho básico.

El hiperconsumo afecta solo a una quinta parte de la humanidad, pero esto no significa que el consumo mucho más moderado —y, a menudo insuficiente para unas condiciones de vida dignas— del resto, no repercuta también sobre el medio ambiente. Ello nos lleva a la consideración del crecimiento demográfico como otro factor importante a tener en cuenta.

³⁸ Según el informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) de 2024, entre 713 y 757 millones de personas en el mundo podrían haber padecido hambre en 2023.

- **Consumo creciente de recursos:** Los seres humanos consumimos cada vez más recursos (como territorio, pesca, minerales, agua potable, algunas fuentes de energía, etc.), a la vez que generamos más residuos. Además, dicho consumo de recursos avanza en la actualidad a un ritmo mucho mayor que el del crecimiento de la población mundial, lo que, de seguir así, supone que la *capacidad de carga* (número máximo de personas que la Tierra puede soportar teniendo en cuenta los recursos existentes) se reducirá sensiblemente.
- **Existen grandes diferencias:** Por ejemplo, la *huella ecológica*³⁹ sobre el planeta de un norteamericano medio es unas 18 veces mayor que la de un ciudadano medio de Haití o de República del Congo. En cuanto a las emisiones globales de CO₂, una pequeña minoría, en torno al 10 % de la población mundial, está produciendo entre el 34 % y el 45 % de toda la emisión global de CO₂ (Fuente: VI informe IPCC, parte III).

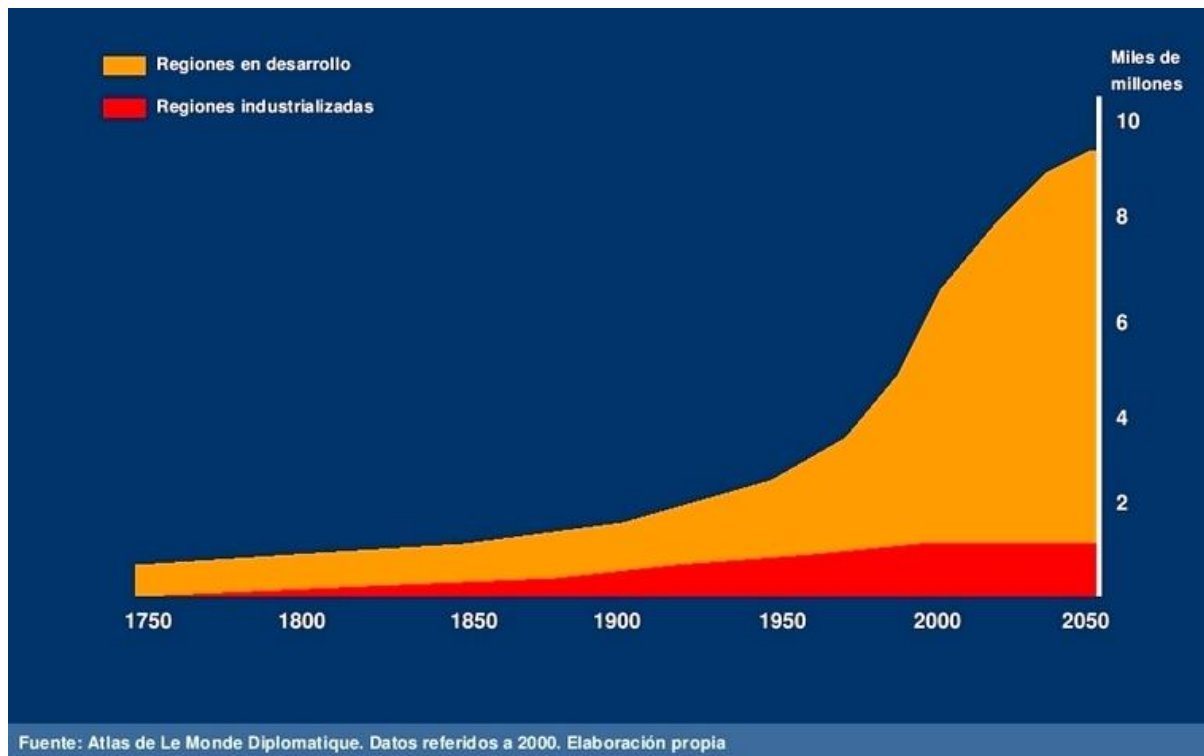
La superpoblación constituye, pues, un factor destacado que potencia muchos otros problemas, ya que las personas de los países en desarrollo aspiran, legítimamente, a alcanzar el mismo nivel de vida que las de los más desarrollados, lo que se traduce en cosas tan concretas como tener electrodomésticos, vehículo a motor, utensilios, vestidos y demás bienes de consumo, así como acceso a una buena alimentación, educación, sanidad, capacidad para viajar, etc. Todo ello, cuando se multiplica por los millones de personas que lo demandan, supone utilizar cantidades ingentes de recursos naturales y de energía, así como la generación de un gran número de residuos de todo tipo, incrementando problemas como el agotamiento de combustibles fósiles, la deforestación, la disminución de las pesquerías, el aumento del efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad, la disminución de agua potable, la contaminación pluriforme, etc. Pensemos en los últimos datos que tenemos sobre países como China o India. China, por ejemplo, ya emite globalmente más CO₂ que Estados Unidos y si ambos (China e India), alcanzasen un nivel de vida similar al de Estados Unidos o Europa, el consumo mundial de recursos se triplicaría.



La gráfica siguiente representa el crecimiento de la población mundial y su previsión, entre 1750 y 2050, distinguiendo entre zonas más desarrolladas (industrializadas) y zonas más pobres. Utilízadla para responder las tres cuestiones que se plantean a continuación:

- Aproximadamente, ¿qué población había en 1970?
- ¿Cuánto tardó en duplicarse?
- A la vista de las diferencias que se aprecian en la gráfica (regiones en desarrollo e industrializadas), ¿cuál es el modo más efectivo de enfrentarnos a la superpoblación del planeta?

³⁹ Índice de impacto ambiental que mide el área de territorio ecológicamente productivo, necesaria para producir los recursos consumidos y para absorber los residuos de una población dada. Se expresa habitualmente en hectáreas globales por habitante y año.



Analizando la gráfica, podemos ver que la población mundial en 1970 era del orden de 3500 millones de habitantes y que se duplicó aproximadamente en 40 años. Las previsiones indican que para 2050 se superarán los 9000 millones de habitantes. También podemos ver que el aumento de población es mucho mayor en las regiones en desarrollo que en las industrializadas (o más desarrolladas) mostrando claramente que el mejor método anticonceptivo es la incorporación de la mujer al trabajo (junto con el acceso a la cultura, sanidad, educación, una jubilación digna, etc.).

De los más de 8200 millones de habitantes que pueblan la Tierra, tan solo una quinta parte consume en exceso (y la mayoría quiere consumir más aún y/o no está predispuesta a hacer ninguna «rebaja»), mientras que los 4/5 restantes aspiran a imitar a ese grupo «privilegiado» (y la mayoría se pone manos a la obra en cuanto puede). Dentro de este gran grupo hay muchos (aproximadamente la quinta parte de la población mundial), que apenas tienen para vivir. Esta situación, da lugar a la existencia de desigualdades extremas, lo que lleva a preguntarse sobre la posible incidencia de las mismas en las crecientes emisiones de GEI.

6.3. Existencia de grandes desigualdades



¿Qué relación puede haber entre el cambio climático y la existencia de grandes desigualdades y conflictos entre distintas poblaciones humanas?

Entre las grandes (y graves) desigualdades que afectan a distintos grupos humanos, es posible referirse a las diferencias en la esperanza de vida (en algunos países africanos, por ejemplo, la esperanza de vida no llega a los sesenta años), las condiciones de trabajo, el acceso a la educación o la sanidad, disponer de una vivienda digna, etc., pero también, a la existencia de grandes diferencias en la calidad del medio ambiente, así como en la disponibilidad de

agua potable y el acceso a otros recursos. Todas esas desigualdades están siendo (cada vez más) una fuente de conflictos.

El cambio climático acelera el agotamiento de recursos naturales básicos (como el agua potable, las tierras fértiles, los bosques o las pesquerías) y potencia las luchas por su control. Esto provoca migraciones masivas de un gran número de personas a otros lugares buscando mejorar sus condiciones de vida (desplazados climáticos). Sin embargo, este movimiento agrava el problema global ya que, al trasladarse a entornos urbanos, el consumo de recursos y energía de estos desplazados aumenta, lo que acaba potenciando, paradójicamente, el mismo fenómeno que forzó su partida.

Además, la pobreza extrema obliga también a la sobreexplotación de ecosistemas, contribuyendo a la disminución de recursos naturales, algunos de ellos muy importantes para frenar el cambio climático (como sucede con los bosques). Los efectos negativos del cambio climático son más devastadores en las mujeres que en los hombres, y van, desde una carga más pesada en el hogar, a una mayor mortalidad por unos desastres naturales cada vez más intensos y frecuentes.

En este apartado hemos reflexionado acerca de tres problemas estructurales muy importantes, estrechamente relacionados con las crecientes y continuadas emisiones de GEI. En nuestra opinión, el conocimiento de tales problemas y de sus vinculaciones, permite fundamentar y comprender mejor las medidas necesarias para poder reducir dichas emisiones de una forma realmente efectiva. Esto es lo que trataremos en el siguiente apartado.

7. MEDIDAS PARA AFRONTAR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Hemos visto que el cambio climático es un problema extraordinariamente grave, al que se enfrenta la humanidad en su conjunto; pero no es el único, ya que a su vez está relacionado con otros como el hiperconsumo, la superpoblación y la existencia de grandes desigualdades entre diferentes grupos humanos. Las estrechas relaciones existentes entre todos ellos permiten comprender la necesidad prioritaria de un desarrollo sostenible⁴⁰ mundial, como marco global en el que hacerles frente de forma conjunta y simultánea, y la poca efectividad que tendría tratarlos de forma aislada.

Sabemos cuáles son los problemas y sus causas. Además, disponemos de los conocimientos y medios necesarios para poder enfrentarnos a ellos. Falta, sin embargo, tomar las decisiones adecuadas para poner en marcha, de una forma realmente efectiva, las medidas que permitan una transición justa⁴¹ del actual cambio climático antrópico (CCA) hacia un futuro sostenible. Todavía es posible hacerlo, pero cada vez disponemos de menos tiempo y es necesario actuar ya, antes de que se desencadenen cambios catastróficos e irreversibles como los que hemos comentado anteriormente.



Teniendo en cuenta todo lo visto hasta aquí, ¿qué tipos de medidas concretas conviene impulsar y desarrollar?

7.1. Medidas científico-tecnológicas



¿Qué medidas de tipo científico-tecnológico conviene impulsar para favorecer un desarrollo sostenible y poder hacer frente así al cambio climático y al resto de graves problemas que suponen una seria amenaza para la vida en el planeta?

Es necesario dirigir los esfuerzos de investigación e innovación hacia el logro de tecnologías favorecedoras de un desarrollo sostenible incluyendo, entre otras:

- ✓ Mayor utilización de fuentes de energías limpias y renovables.
- ✓ Incremento de la eficiencia energética (que posibilite el necesario ahorro de energía). Ello puede hacerse mediante mejoras tecnológicas en muchos campos (por, ejemplo, en la construcción, iluminación, electrodomésticos, automoción...) y dando prioridad a sectores como el ferrocarril y el transporte marítimo.
- ✓ Reducción de la contaminación, con la disminución y tratamiento de residuos.
- ✓ Gestión sostenible del agua y otros recursos esenciales.
- ✓ Desarrollo de tecnologías agrarias y forestales sostenibles.
- ✓ Prevención y tratamiento de enfermedades (en particular las que azotan a los países menos desarrollados).

⁴⁰ El desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas. No hay que confundir ni tergiversar este concepto asociándolo erróneamente a crecimiento físico cuantitativo. (Gil y Vilches, 2019).

⁴¹ Leyes y actuaciones destinadas a garantizar que la lucha contra el cambio climático se realice de forma equitativa e inclusiva, minimizando impactos negativos en las personas (por ejemplo, asegurando empleos alternativos a los trabajadores de sectores que desaparezcan, como el carbón o la energía nuclear) y maximizando los beneficios sociales.

- ✓ Logro de una paternidad y maternidad responsables, evitando los embarazos indeseados y fomentando tasas de natalidad adecuadas a los recursos disponibles.
- ✓ Regeneración de entornos dañados.
- ✓ Fabricación de objetos con materiales biodegradables.
- ✓ Uso de tecnologías sostenibles para la captura y almacenamiento del CO₂.
- ✓ ...

No obstante, es preciso también analizar previamente y con cuidado las nuevas medidas científico-tecnológicas que se pretendan llevar a cabo, para que las aparentes soluciones no generen problemas más graves como, de hecho, ha sucedido ya otras veces. Pensemos, por ejemplo, en la revolución agrícola que, tras la Segunda Guerra Mundial, incrementó notablemente la producción de las cosechas, gracias a los fertilizantes y a pesticidas químicos como el DDT, satisfaciendo así la necesidad de alimentos de una población mundial que experimentaba un rápido crecimiento. No obstante, sus efectos perniciosos (cáncer, malformaciones congénitas...) fueron denunciados, y el DDT, y otros «Contaminantes Orgánicos Persistentes», fueron prohibidos en muchos países. Recordemos también lo ocurrido, durante la década de los 80 del siglo pasado, al pretender resolver el problema de los despojos animales reutilizándolos en forma de piensos (harinas cárnicas), lo que generó el problema, mucho más grave, de las llamadas «vacas locas», obligando a sacrificar millones de cabezas de ganado. Recientemente, se han sugerido para luchar contra el cambio climático soluciones muy discutibles, tales como echar hierro a los océanos (para estimular el crecimiento de algas marinas que eliminen más CO₂ a través de la fotosíntesis), inyectar sulfatos en la estratosfera (que reflejen la luz solar) o impulsar el uso de la energía nuclear (que produce solo la sexta parte de CO₂ que el carbón, por cada kWh de energía eléctrica producido).



Además de no generar problemas más graves que los que pretenden solucionar ¿qué otros criterios convendría tener presentes para hacer que las nuevas soluciones científico-tecnológicas puedan contribuir realmente a un desarrollo sostenible?

Entre otros, podemos pensar en los siguientes:

- Las tasas de explotación de los recursos naturales renovables no deben superar a las de su regeneración (o, para los no renovables, a las de creación de sustitutos renovables).
- Las tasas de emisión de residuos deberían ser inferiores a las capacidades de asimilación de los ecosistemas a los cuales se emiten esos residuos.
- Dar prioridad a tecnologías que aumenten la productividad de los recursos, más que incrementar la cantidad de recursos extraídos. Esto significa, por ejemplo, formas de iluminación más eficiente frente a más centrales eléctricas.
- Favorecer aquellas tecnologías orientadas a la satisfacción de necesidades básicas y que contribuyan a reducir las desigualdades entre los distintos grupos humanos (por ejemplo, más placas solares en viviendas y menos centrales nucleares).

Cabe señalar que la aplicación adecuada de nuevas tecnologías se enfrenta, a menudo, con intereses particulares a corto plazo y también, a veces, con impedimentos de tipo ético y político. Ello viene a cuestionar la idea simplista de que la solución a los problemas con los que se enfrenta hoy la humanidad, depende únicamente de la disposición de tecnologías más avanzadas.

Entre las nuevas tecnologías, tienen un papel esencial las que permiten ahorrar energía y las energías renovables. Por energía renovable se entiende aquella que se obtiene de una fuente prácticamente inagotable y que se encuentra en la naturaleza. Su carácter inagotable hace referencia a su cantidad y duración (por ejemplo, el Sol va a durar bastante más que la Tierra), o bien a que se puede reponer de forma natural y volver a ser usada (por ejemplo, la madera o el agua). Entre las energías renovables se encuentran la solar, eólica, hidráulica, geotérmica, y la procedente de la biomasa. Esta última tiene graves inconvenientes cuando, en lugar de utilizar únicamente residuos orgánicos de origen vegetal o animal, se obtiene también de cereales u otras plantas comestibles que podrían dedicarse a la alimentación en lugar de quemarlas.

El agotamiento de fuentes de energía como el petróleo o el uranio, junto con los graves problemas medioambientales que ocasiona el creciente consumo de dichas fuentes, ha abierto un gran debate en torno a la necesidad de potenciar el uso de las fuentes de energía renovables.



En España, en el año 2010, las energías renovables en su conjunto supusieron algo más del 9 % del total de energías primarias utilizadas, y el 35 % de la generación de electricidad, siendo la energía eólica el sector de mayor crecimiento. Sin embargo, entre los años 2011 y 2016 el apoyo al desarrollo de las renovables se vio drásticamente reducido (algo verdaderamente incomprensible en un país tan rico en sol y tan pobre en petróleo). Afortunadamente, el sector de las renovables ha recuperado su impulso. Según datos de Red Eléctrica, durante el año 2024 el 56,8 % de la electricidad generada en España procedió de fuentes naturales como el viento, el sol o el agua. Este auge se extiende a muchos otros países; sin embargo, a pesar del avance, el consumo global de combustibles fósiles todavía es unas 14 veces mayor que el de energía fotovoltaica y eólica combinadas (Ripple et al., 2024).

Una medida también de gran interés es la investigación, desarrollo y puesta en práctica, de tecnologías eficaces para secuestrar y almacenar CO₂ de la atmósfera. Su importancia se hace evidente si recordamos que, aunque dejásemos de emitir CO₂, los efectos del ya emitido sobre el calentamiento global, seguirán notándose (debido a su larga vida en la atmósfera) durante centenares de años. Una forma de paliar esto, sería capturar todo ese exceso de CO₂. Algunos autores proyectan un futuro basado en las energías renovables, su almacenamiento, distribución y aprovechamiento, usando nuevas tecnologías. Ya en 2011, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) publicó un sólido informe que demostraba la viabilidad de satisfacer la demanda energética mundial contando únicamente con energías renovables (IPCC, 2011). Dicho informe subrayaba, además, la importancia de

acometer las inversiones pertinentes antes de 2050 para evitar que la concentración de gases de efecto invernadero alcance niveles que desencadenen cambios incontrolables.



Para el economista Jeremy Rifkin, (Rifkin, 2010), estamos ante una «tercera revolución industrial». Si la primera estuvo asociada al uso del vapor (locomotoras) y construcción de vías de ferrocarril, la segunda, al petróleo (motor de explosión) y la construcción de carreteras, esta tercera se asocia a la expansión de las energías renovables. Según este autor, en los próximos años se renovarían o construirían millones de hogares que funcionarían como plantas energéticas, además de cómo hábitats. Estos edificios, acumularán y generarán energía local a partir de fuentes como el Sol o el viento para cubrir sus propias necesidades, así como para generar un excedente que pueda compartirse. Estos millones de productores locales, con acceso a redes eléctricas inteligentes, podrían producir y compartir una cantidad de energía muy superior a la de las viejas formas centralizadas de las que actualmente dependemos. Actualmente existen ya numerosos ejemplos a nivel mundial que muestran un alto grado de autosuficiencia energética (Isla Samsø, en Dinamarca; Archipiélago de Tokelau, en el Pacífico; Isla de El Hierro, Aras de los Olmos, Gotarrendura y Ballesteros de Calatrava, en España; Babcock Ranch, en Estados Unidos...).

Muchas de las medidas tecnocientíficas expuestas están ya disponibles, pero para su implantación efectiva y generalizada se precisa de una serie de condiciones que no se proporcionan, quizás porque afectan a determinados planteamientos ideológicos e intereses económicos. Todo ello, hace ver la importancia de las medidas educativas y políticas que deben acompañarlas.

7.2. Medidas educativas

No se puede pensar en llevar a cabo los cambios necesarios en el modo de crecimiento económico y en el modelo energético, ni tampoco en que los políticos los impulsen, si no existen ciudadanos bien informados que los demanden y un consenso social que favorezca su aceptación y desarrollo. Por ello, la educación ambiental debe tener un papel fundamental en todos los centros escolares y niveles educativos, en la formación del profesorado, en los medios de comunicación (redes sociales, museos, TV, prensa, etc.) y también en las familias.



La educación ambiental también ha de servir para aclarar algunas concepciones erróneas ampliamente extendidas, como la confusión entre los conceptos de tiempo (meteorología) y clima, pensar que el adelgazamiento de la capa de ozono guarda una relación directa de causa-efecto con el cambio climático, creer que no sabemos todavía bastante sobre el cambio climático y que debemos esperar a saber más para tomar decisiones y actuar, etc.

En concreto, necesitamos una educación que nos ayude a comprender los problemas ambientales y de desarrollo de forma global. Para ello, es fundamental considerar su interconexión y sus repercusiones a corto, medio y largo plazo, tanto para las comunidades locales como para el conjunto de la humanidad y el planeta. Por eso, la sostenibilidad debe impregnar los currículos escolares. Pero no se trata solo de conocer y comprender. También es necesario que toda esa educación ambiental se traduzca en ciudadanos críticos frente a bulos y campañas de desinformación, capaces de llevar a cabo acciones con las que poner en práctica lo que cada persona puede hacer.



¿Qué podemos hacer tanto de forma individual como colectiva? Elaborad una lista con vuestras propuestas concretas y argumentadlas posteriormente.

A continuación, y a título de ejemplo, se detallan algunas propuestas

Reducir el consumo

- Agua: utilizar dispositivos de ahorro en casa, duchas rápidas, control de fugas de agua, riego por goteo, no dejar grifos abiertos...
- Energía en climatización: aislar térmicamente la vivienda; no programar temperaturas ni muy altas ni muy bajas; priorizar otros métodos como la ventilación natural, el uso de toldos, ponerse más o menos ropa...
- Energía en iluminación: utilizar luces de bajo consumo, como las de tecnología LED, y aprovechar al máximo la luz natural. Es fundamental apagar siempre las luces innecesarias y ajustar la potencia eléctrica contratada a las necesidades reales del hogar, rebajándola si fuera excesiva.

- Energía en transporte: desplazarse a pie o en bicicleta, usar transporte público como tren o autobús, organizar desplazamientos de varias personas en un mismo vehículo, conducir a velocidad reducida utilizando marchas largas y sin aceleraciones bruscas, subir y bajar por escaleras en vez de usar ascensores, evitar viajes en avión siempre que sea posible, bajar límites de velocidad...
- Energía en electrodomésticos: comprar aparatos de bajo consumo; cargar al máximo el lavavajillas o la lavadora; mantener aparatos en buen estado para evitar sobreconsumos; no dejar televisor, ordenador o equipos de música en modo stand-by; utilizar pilas recargables...
- Energía en la alimentación: priorizar alimentos de temporada y de proximidad para evitar productos exóticos que exigen transportes largos; mejorar la dieta incluyendo más frutas y verduras sin excederse en el consumo de carnes; optar por alimentos con baja huella ecológica; mantener una alimentación lo más variada posible...
- Papel: evitar imprimir documentos que se puedan leer en pantalla; escribir, fotocopiar e imprimir a doble cara, sin utilizar márgenes excesivos...
- Compras: rechazar productos innecesarios, ir a la compra con una lista previa de lo que nos hace falta, no dejarse arrastrar por campañas publicitarias («Black Friday», «Cyber Monday», etc.).

Colaborar en el reciclaje

- Separar restos para su recogida selectiva (vidrio, papel, plásticos, orgánicos...).
- Llevar a ecoparques u otros puntos de recogida selectiva todo tipo de productos contaminantes que haya que desechar (pilas usadas, aceite, móviles, ordenadores, productos tóxicos, baterías, lámparas...)
- Usar productos reciclados (papel, cartuchos de tinta...)

Utilizar

- Productos respetuosos con el medio ambiente, materiales reciclables, no tóxicos y biodegradables, que presenten una baja huella de carbono⁴²...
- Energías renovables: instalar paneles solares y optar por proveedores que garanticen energía obtenida exclusivamente de fuentes renovables...
- Sistemas inteligentes: emplear programadores y sensores de movimiento para que la iluminación se active solo cuando sea necesario...
- Materiales naturales: elegir prendas fabricadas con fibras como algodón, lino o seda para evitar la liberación de microplásticos al entorno...

Reutilizar

- El papel ya escrito por una cara.
- Agua de lluvia para regar.

⁴² Indicador ambiental que cuantifica la totalidad de los gases de efecto invernadero emitidos por causa directa o indirecta de un producto. Se mide en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂eq) y abarca todo su ciclo de vida: desde la extracción de materias primas, fabricación, transporte y comercialización, hasta el tratamiento final de sus residuos.

- Ropa y otros complementos usados.
- Aceite usado para hacer jabón.
- Llevar a farmacias medicamentos sobrantes, para que otras personas los utilicen.
- Donar ropa, juguetes, calzado... a organizaciones que gestionen su reparto a otras personas
- Tratar de conseguir lo que necesitemos adquiriéndolo en mercados de segunda mano, como: mercadillos, plataformas online o mercados de intercambio (donde se intercambian objetos en vez de comprarlos).
- Dar nuevos usos a diversos objetos antes de desecharlos. Por ejemplo, utilizar botes vacíos o tazas antiguas como organizadores para lápices y bolígrafos, bidones como compostadoras para obtener abono, camisetas viejas como trapos de limpieza o frascos de cristal como recipientes herméticos para alimentos...

Rechazar el usar y tirar

- Sustituir las bolsas de un solo uso (en particular en las compras), por bolsas de uso continuado.
- Reparar antes que desechar y cambiar (suelas de zapatos, ropa, electrodomésticos y otros aparatos...).

Muchas de las acciones anteriores forman parte de la *economía circular*, un modelo en el que se busca explícitamente que los productos no se conviertan nunca en basura, sino que vuelvan a entrar en el ciclo productivo.

Participar en la educación ciudadana y en las decisiones políticas

- Colaborar con organizaciones ecologistas, votar a partidos políticos que en sus programas incluyan medidas para la sostenibilidad, realizar tareas de divulgación (amigos, familia, etc.), cuestionar bulos y campañas de desinformación en redes sociales...
- Pedir a las autoridades que promuevan nuevas medidas para mitigar efectos del cambio climático y, en general, para impulsar la sostenibilidad, apoyándolas cuando se pongan en práctica.



En la foto superior izquierda, la joven sueca Greta Thunberg durante su discurso en 2019 ante el Parlamento Europeo. A la derecha, protesta estudiantil por la falta de medidas contra la crisis climática. Ambas obtenidas de internet.



Una reflexión esencial, que no puede faltar aquí, es qué es lo que puede hacer el profesorado para contribuir desde la educación a la transición hacia la sostenibilidad. Debatid la cuestión y sugerid propuestas concretas.

Sin duda este colectivo, dada la naturaleza de su trabajo, ha de tener un papel fundamental. Entre otras, cabe pensar en acciones como las siguientes:

- Dar testimonio de actitudes y comportamiento personal sostenibles que tomen en consideración las medidas recopiladas anteriormente: apostar por tecnologías respetuosas con el medio y las personas, participar en acciones ciudadanas para la sostenibilidad, evaluar (y compensar) la propia huella ecológica, etc.
- Incorporar la sostenibilidad en la propia enseñanza: impregnar los currículos de las materias impartidas (en todos los niveles y para todas las áreas) de la problemática de la sostenibilidad; proceder sistemáticamente a la evaluación (entendida como seguimiento y apoyo) de los cambios de actitud y comportamiento logrados por su alumnado en este campo.
- Hacer uso de la educación no reglada: utilizar la prensa y otros medios de comunicación, los documentales de divulgación, los museos de ciencias y etnológicos, etc., aprovechando tanto sus aportaciones como sus carencias (estimulando el análisis crítico).
- Prestar una atención particular al desarrollo del pensamiento crítico de su alumnado: analizar los numerosos bulos y mentiras que se propagan en relación con el cambio climático (Moreno, 2025), aportando datos científicos y argumentos con los que rebatir toda esa desinformación difundida principalmente a través de las redes sociales...
- Impulsar medidas de sostenibilidad dentro del propio centro educativo: contribuir a crear y participar en comisiones de centro para establecer compromisos de consumo responsable (luz, agua, papel...), separación y reciclado de residuos, etc., y realizar su seguimiento; promover la incorporación de la sostenibilidad en los currículos de todas las materias; implicar al conjunto de la comunidad educativa en acciones proambientales; organizar actos con motivo de fechas señaladas, como el 5 de junio (Día Mundial del Medio Ambiente), 10 de diciembre (Día de los Derechos Humanos)...
- Contribuir a la formación ciudadana fuera de la escuela: elaborar materiales para la formación ciudadana; organizar conferencias, debates, talleres, cursos, seminarios, campañas de divulgación, etc., colaborando con instituciones cívicas y académicas; instar a las autoridades educativas y políticas para que se incorpore la educación para la sostenibilidad en todas las áreas y niveles, incluida la educación no formal (TV, radio, prensa, museos...).
- Participar en tareas de investigación e innovación en el campo de la sostenibilidad: implicarse en proyectos de investigación e innovación para impulsar actitudes y comportamientos sostenibles; salir al paso de obstáculos como, por ejemplo, algunas concepciones contrarias a la sostenibilidad, tanto de los estudiantes como de la ciudadanía en general y el propio profesorado; analizar el tratamiento dado a la sostenibilidad en los libros de texto y otros materiales y recursos escolares, así como en los media, museos, etc.; elaborar materiales educativos y para la formación del profesorado; promover la incorporación de esta problemática en congresos, seminarios, jornadas y en las revistas educativas...
- Atención a los llamamientos de la ONU sobre los 17 objetivos para lograr un desarrollo sostenible (ODS), impulsando al alumnado a participar para contribuir a su consecución (Agenda 2030). www.un.org/sustainabledevelopment/es/

...

7.3. Medidas políticas

La incidencia del CCA podría limitarse si se emprendiera una acción conjunta mundial que facilite el paso de una economía marrón (basada en el uso de combustibles fósiles), a una economía verde (basada en el uso de energías más limpias y el desarrollo de tecnologías que permitan su implantación), a la vez que se impulsan otras medidas políticas para favorecer una transición justa. Para entender la relevancia de la política, conviene recordar en primer lugar algunos hitos que constituyen auténticos logros para la sostenibilidad. *(Esto mismo, puede ser planteado al alumnado como una actividad de búsqueda bibliográfica sobre el tema).*

Protocolo de Montreal (1989): Tratado internacional para evitar el adelgazamiento y destrucción de la capa de ozono estratosférico que nos protege de las radiaciones ultravioleta, mediante el control de los compuestos CFC responsables de dicha destrucción. Posiblemente el tratado ambiental más exitoso de la historia.

Corte Penal Internacional (2002): Con sede en La Haya, juzga crímenes de genocidio, de guerra y de lesa humanidad. Actualmente, existe un creciente consenso político para incluir los delitos graves contra el medio ambiente (ecocidio) bajo su jurisdicción.

Protocolo de Kioto (1997-2020): Primer gran acuerdo vinculante para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Aunque Estados Unidos nunca llegó a ratificarlo, este acuerdo sentó las bases de los mercados de carbono y de la cooperación climática internacional.

Cumbres sobre el Clima: Encuentros internacionales organizados por la ONU bajo las siglas COP (Conference of the Parties). Su periodicidad es anual y su objetivo fundamental es adoptar acuerdos para reducir las emisiones de GEI. En 2015 se celebró la histórica COP21 de París, ratificada por 195 países, cuyo objetivo principal es evitar que el aumento de la temperatura media global supere los 2 °C respecto a los niveles preindustriales, redoblando esfuerzos para que dicho incremento no rebase los 1,5 °C. Posteriormente, la COP26 en Glasgow (2021) produjo un documento firmado por casi 200 países; aunque no es legalmente vinculante, señaló por primera vez al carbón como causa principal del calentamiento y estableció el compromiso de reducir su uso. En la COP28 en Dubái (2023), se concluyó que para no superar el límite de 1,5 °C, las emisiones mundiales de GEI deben reducirse un 43 % para 2030 y un 60 % para 2035 (respecto a 2019), alcanzando las emisiones netas nulas para 2050. Más recientemente, en la COP29 en Bakú (2024), el acuerdo más destacado fue triplicar la financiación para los países en desarrollo, elevando el objetivo de 100 000 a 300 000 millones de dólares anuales para 2035. Finalmente, en la COP30 de Belém (2025), se lograron avances en financiación para la adaptación y un nuevo mecanismo de transición justa, aunque, lamentablemente, no se alcanzó un consenso para mencionar explícitamente la eliminación gradual de los combustibles fósiles.

Otras medidas positivas en marcha

Con posterioridad a los acuerdos de París, se han producido avances, esperanzadores, que muestran un compromiso creciente a nivel global, tales como:

- Liderazgo urbano y protección del Ártico: En la última década, cientos de metrópolis de todos los continentes han formado coaliciones de gran peso, como el *C40 Cities* o el *Pacto Global de los Alcaldes*, firmando acuerdos vinculantes para alcanzar la neutralidad de carbono. Por otro lado, destaca la iniciativa de 2016 liderada por Canadá y EE.

UU. para prohibir la prospección de hidrocarburos en gran parte del Ártico (aunque estas protecciones enfrentan actualmente desafíos legales en territorio estadounidense).

- Enmienda de Kigali (2016): Compromiso vinculante, firmado por casi 200 países, para reducir el uso de los gases HFC utilizados en los aparatos de refrigeración y aire acondicionado. Estas sustancias son GEI miles de veces más potentes que el CO₂. Se estima que esta medida puede suponer, por sí sola, una disminución de 0,5 °C en el aumento de temperatura media global previsto para el año 2100.
- Reincorporación de los Estados Unidos, en enero de 2021, al Acuerdo del Clima de París. Lamentablemente en 2025, bajo el segundo mandato del presidente Donald Trump, volvió a retirarse. A comienzos de 2026 se consolidó esta retirada, con gestiones para abandonar también la Convención Marco de la ONU sobre el Clima.
- Ley de la Restauración de la Naturaleza (2024): Aprobada por el Parlamento Europeo, esta ley pionera busca rehabilitar al menos el 30 % de las zonas terrestres y marinas de la Unión Europea para 2030, extendiéndose a todos los ecosistemas degradados para 2050.
- Acuerdo mundial sobre biodiversidad (2025): En el marco del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), los gobiernos alcanzaron un acuerdo sobre una estrategia de recaudación de 200 000 millones de dólares adicionales cada año con el fin de proteger mejor la flora y la fauna del planeta de aquí a 2030. El marco global también contiene acuerdos concretos para detener y revertir la pérdida de naturaleza, incluyendo medidas de protección que cubran el 30 % del planeta y el 30 % de los ecosistemas degradados para 2030.
- Tratado de Alta Mar (2026): Tras un histórico acuerdo en 2023, el tratado entró oficialmente en vigor en enero de 2026. Actualmente ya son más de 80 los países (incluyendo la Unión Europea, China y Brasil) que lo han ratificado. Se trata del primer marco jurídico para crear santuarios marinos en aguas internacionales, algo vital para preservar la biodiversidad oceánica.

Finalmente, queremos señalar la existencia de leyes y proyectos de protección del medio ambiente para reducir emisiones de gases invernadero y que también conviene conocer. Un ejemplo es la obligatoriedad de instalar paneles fotovoltaicos en nuevos edificios, como viene ocurriendo en el estado de California desde 2020. En la Unión Europea, se aprobó que a partir de 2030 todos los edificios de nueva construcción funcionen al 100 % con energía limpia. Iniciativas similares se aplican en Australia e Israel, y en ciudades como Tokio y Kioto.

Asimismo, se han implementado otro tipo de medidas de gran impacto, tales como: la sustitución masiva de las antiguas bombillas incandescentes por otras de muy bajo consumo, las normas para disminuir la contaminación del aire en las ciudades o la inclusión de la huella de carbono correspondiente en las etiquetas de productos agroalimentarios. En España, en 2021 se aprobó la Ley de Cambio Climático y Transición Energética. Entre sus objetivos más importantes, merecen destacarse el de *neutralidad climática*, según el cual España debe alcanzar las emisiones netas cero no más tarde de 2050; aumentar las *zonas de bajas emisiones*, con la obligatoriedad de que las ciudades de más de 50 000 habitantes establezcan áreas restringidas al tráfico contaminante; y el compromiso de una *transición justa*, para que las comarcas y trabajadores afectados por el cierre de una mina de carbón, central térmica, central nuclear, etc., reciban inversiones y nuevos empleos en sectores renovables para que la lucha contra el cambio climático no genere desigualdad social.

Por otro lado, en el año 2022, la Comisión Europea reconocía la energía nuclear como una energía limpia, al menos hasta 2045. Se trata de una medida política de gran importancia; por eso, vamos a detenernos en analizarla y en considerar la conveniencia o no de dicha medida en concreto.

7.4. Utilización de la energía nuclear

Llegados hasta aquí, algo que debe haber quedado claro es que el aumento de la temperatura media terrestre (calentamiento global) es el principal motor que alimenta el CCA y sus efectos. Dicho aumento, se debe fundamentalmente a las crecientes y continuas emisiones de gases invernadero y, en particular, del CO₂ generado por la combustión de carbón, gas y derivados del petróleo, para obtener energía. Consecuentemente, la reducción del uso de combustibles fósiles como fuentes de energía es una prioridad absoluta para poder hacer frente al cambio climático. La cuestión es:



¿Debemos potenciar para ello la energía nuclear? Reflexionad sobre esta cuestión, enumerando y analizando sus posibles ventajas e inconvenientes.

La industria nuclear, desde hace años, sostiene que la energía nuclear no emite GEI en el proceso de su generación, y la reivindica como una herramienta fundamental para hacer frente al CCA. En febrero de 2022, la Comisión Europea catalogó el gas natural y la fisión nuclear como fuentes de energía sostenibles para la transición ecológica. La reglamentación al respecto comenzó a aplicarse un año después. Esto supone un reconocimiento institucional muy importante a la energía nuclear, lo que puede traducirse en una mayor financiación de la industria nuclear, por su papel en la mitigación del cambio climático. Por otra parte, en 2025 se firmó en Houston (Estados Unidos) un compromiso intersectorial liderado por las empresas Google, Amazon y Meta, junto con la Asociación Nuclear Mundial, para apoyar el objetivo de triplicar la capacidad mundial de energía nuclear de aquí a 2050, con el fin de poder satisfacer la creciente demanda de energía de sus centros de datos, producida particularmente por el rápido y extraordinario auge de la inteligencia artificial. En su respaldo a la expansión de la energía nuclear, argumentan que se trata de una fuente de energía limpia, estable y confiable, que puede asegurar un suministro continuo. Sin embargo, apoyar el crecimiento de esta fuente de energía supone, para muchas personas, más inconvenientes que ventajas. *¿A qué inconvenientes concretos nos referimos?*

La energía nuclear no está exenta de emisiones de CO₂

En efecto, cualquier reactor nuclear precisa de uranio 235 para su funcionamiento. La obtención de este isótopo a partir del mineral de uranio, abarca diferentes fases y en todas ellas se emiten GEI. Por otra parte, hay que contabilizar también las emisiones que suponen la construcción de una central nuclear, su mantenimiento, el tratamiento y almacenamiento del combustible gastado y, finalmente, su clausura y desmantelamiento de la misma de forma segura. Se han realizado muchos estudios para evaluar la emisión de CO₂ por una central nuclear contabilizando todo su ciclo de vida. En general, se estima que la energía nuclear emite 66 gramos de CO₂ por cada kWh producido; una cantidad sensiblemente menor que los 440 g CO₂/kWh correspondiente al gas natural, pero mayor que las que se producen con el uso de cualquier energía renovable como, por ejemplo, los 30 g CO₂/kWh de la fotovoltaica y los 9 g CO₂/kW de la eólica (Bohigas, 2017).

La energía nuclear es muy cara

El precio de cualquier fuente de energía debería incluir todos los costes reales que conlleva su generación desde el inicio mismo del proceso hasta su finalización. Eso incluye también sus repercusiones ambientales y para la salud humana, no solo a corto sino también a medio y largo plazo. Actualmente, según datos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), existen alrededor de 440 reactores nucleares en funcionamiento en todo el mundo, cuya contribución a la generación de electricidad global no supera el 10 %. Ello implica que, si se pretende sustituir la electricidad generada por combustibles fósiles por electricidad generada mediante la fisión del U-235, se deberían construir cientos de centrales nucleares. Sin embargo, los costes financieros para construir una central nuclear son muy altos y, frecuentemente, las obras sufren sobrecostes tan elevados que son solo asumibles con capital público. Este ha sido el caso, por ejemplo, de Olkiluoto-3 (Finlandia), Flamanville-3 (Francia) o Hinkley Point (Reino Unido). Apostar por la energía nuclear supone, pues, una mayor centralización y unos costes desorbitados que la hacen inviable en muchas regiones empobrecidas del mundo, que no disponen de los recursos económicos ni de la sofisticada tecnología que se precisa. Todo lo contrario que las energías renovables, las cuales permiten un modelo energético descentralizado, con la posibilidad de producir electricidad localmente y de forma mucho más simple y económica. En efecto, existen estudios en los que se muestra que el precio por MWh producido, es mucho más alto en cualquier central nuclear que en una central solar fotovoltaica. No obstante, incluso aunque no fuese tan caro, la creación de nuevas centrales o de minireactores nucleares, similares a los que está considerando el ejército estadounidense para proveer de energía barata a sus bases militares (Jiménez y Moreno, 2021), implica unos riesgos muy serios para la mayoría de la población.

Aumentar el número de reactores nucleares supone riesgos inasumibles

En general, cuando se habla de un reactor nuclear de fisión, existen riesgos que conviene tener muy presentes. En primer lugar, los accidentes, algo que lamentablemente ya ha sucedido muchas veces y, en ocasiones, produciendo grandes daños al ser humano y al medio ambiente. Baste recordar al respecto los dos sucesos más graves hasta la fecha: el ocurrido en la central nuclear de Chernóbil (Ucrania) en 1986 y el de la central de Fukushima (Japón) en 2011. Estos accidentes, debidos a la naturaleza o a fallos humanos, suponen, entre otros efectos, la contaminación del suelo cercano durante mucho tiempo, así como la difusión por la atmósfera o el agua, de material radiactivo que se extiende a lugares muy alejados de la central. Tampoco se pueden descartar los accidentes producidos en el transporte y la manipulación de los materiales radiactivos empleados, ni la posibilidad de otro tipo de eventos como ataques terroristas, o los daños (colaterales o deliberados) resultantes de conflictos bélicos en zonas con instalaciones nucleares o centros de almacenamiento de residuos radiactivos. Y no se trata de posibilidades remotas: la central nuclear de Zaporíyia en Ucrania (la más grande de Europa) ha sufrido ya daños significativos en su infraestructura externa y auxiliar a causa de los continuos combates y ataques con drones y artillería en sus inmediaciones, por lo que no es de extrañar que la Organización Internacional de Energía Atómica haya calificado esta situación como extremadamente peligrosa. La construcción y funcionamiento de más reactores (convencionales o modulares) aumenta, como es lógico, la probabilidad de que se produzca cualquier tipo de accidente o de daños con consecuencias catastróficas.

Por otra parte, es un hecho que la construcción de nuevos reactores nucleares es un proceso largo, muy caro y difícil de financiar; por ello, la mayoría de las compañías propietarias de centrales nucleares presionan para extender la vida de sus reactores el mayor tiempo posible.

Esto supone, también, un mayor riesgo de accidentes producidos, en este caso, por fallos técnicos en sistemas demasiado antiguos.

Otro riesgo inasumible es la inevitable generación de residuos radiactivos. La energía de fisión, generada en centrales o minirreactores, produce residuos radiactivos de media y alta actividad con vidas medias de cientos o miles de años (Vilches y Gil Pérez, 2012). La gestión y cuidado de tales residuos durante tanto tiempo supone un coste económico inmenso y una hipoteca —económica y de seguridad— para las generaciones futuras. Obviamente, el aumento de reactores nucleares también haría aumentar la cantidad de residuos generada.

Los inconvenientes señalados, permiten concluir que la energía nuclear de fisión no puede ser considerada una fuente de energía limpia ni sostenible, y no debería contemplarse como una fuente de energía que haya que fomentar construyendo más centrales, sino como un problema que requiere solución.

Para hacer frente al calentamiento global, y con él al cambio climático, es necesario un cambio real de modelo energético que lleve, mediante una transición justa, a abandonar progresivamente los combustibles fósiles y los reactores nucleares para producir energía, sustituyéndolos por energías limpias y renovables. Existen, no obstante, autores que ponen en duda la posibilidad de conseguir este objetivo en un plazo de tiempo razonable, argumentando, por ejemplo, que ni el sol brilla siempre ni el viento sopla constantemente. Otros acompañan sus opiniones a favor del uso creciente de la energía nuclear con cálculos según los cuales sería necesario cubrir la mitad de la superficie terrestre de paneles solares para que la energía generada por ellos pudiera cubrir la demanda mundial actual (Jiménez y Moreno, 2021). Incluso el profesor James Lovelock (conocido por su teoría de Gaia, en la que considera la Tierra como un organismo vivo) se refiere a las energías renovables como «visionary energy sources» y considera a la energía nuclear como «the only green solution» (Vilches y Gil Pérez, 2008). Frente a estas críticas conviene tener presente que:

- Si bien es cierto que la energía solar y la eólica son intermitentes, este problema se reduce considerablemente al integrar fuentes renovables no variables —como la geotermia— y, especialmente, al emplear tecnologías de almacenamiento, entre las que destaca el bombeo hidráulico. Asimismo, tal y como sostiene Rifkin (2010), la interconectividad de millones de placas fotovoltaicas y aerogeneradores mediante redes eléctricas inteligentes permite que, gracias a una dispersión geográfica suficiente y a una sólida interconexión transfronteriza, estas fuentes dejen de percibirse como intermitentes. Al operar bajo una arquitectura similar a la de internet, es posible distribuir excedentes hacia donde se precise, aprovechando que siempre hay algún punto del continente donde brilla el sol o sopla el viento.
- Existen estudios que cuestionan la idea de que habría que cubrir hasta la mitad del suelo terrestre con placas solares para disponer de energía suficiente. Estos demuestran que con un cuadrado de 380 km de lado sería suficiente para abastecer las necesidades eléctricas actuales (Mártel, 2020). Si tenemos en cuenta que la electricidad representa alrededor del 20 % del consumo total, para satisfacer las necesidades energéticas mundiales sería suficiente con una superficie cinco veces mayor que la citada.
- Las energías renovables hace ya tiempo que son una realidad en pleno proceso de expansión. Son muchos los estudios en los que se muestra que es posible satisfacer las necesidades de energía del planeta antes de 2050, contando únicamente energías limpias y

renovables. Un ejemplo destacado es el Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático del IPCC, accesible en:
<https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>

Todo ello recomienda que no se construyan más reactores nucleares y se clausuren los ya existentes, conforme se vaya disponiendo de más recursos renovables, hasta la desaparición completa de la energía nuclear del mix energético a medio plazo. En España existe un acuerdo para no construir más centrales nucleares y proceder al cierre escalonado de las existentes entre 2027 y 2035.

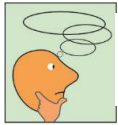
Terminaremos señalando que quienes afirman que, solo con el cambio de modelo energético no será posible evitar que la temperatura media global siga aumentando, tienen razón; pero no porque las fuentes renovables no puedan suministrar la energía necesaria para vivir dignamente, sino porque el CCA está ligado a otros problemas y no es posible actuar de manera eficaz si no los tratamos conjuntamente (Vilches y Gil Pérez, 2015). Por eso, resulta imprescindible impulsar el desarrollo y el uso mundial de las energías renovables pero, al mismo tiempo, acompañar esto de otras medidas tendentes a disminuir el consumo de energía, la tasa de aumento de población mundial, las migraciones desde el medio rural a las grandes ciudades, el urbanismo descontrolado, las grandes desigualdades entre la población, la proliferación de la ganadería intensiva, etc.; pasando también por el desarrollo de la investigación y de la innovación en tecnologías que permitan aumentar el ahorro y la eficiencia energética (como suele decirse, la energía más limpia es la que no se usa). Se puede decir, pues, que nuestro planeta necesita realizar una transición energética, acompañada de toda una serie de medidas, para así poder evitar así que siga aumentando la temperatura media del mismo.

El cambio de modelo energético precisa de tiempo y de recursos, y la energía nuclear no debería formar parte de ese futuro. La humanidad no puede permitirse los riesgos que supondría aumentar los reactores nucleares ya existentes, aunque tampoco podamos cerrarlos de golpe. La energía nuclear generada por las centrales actuales seguirá jugando un papel, pero este ha de ser cada vez menor, acompañando la transición mientras se despliegan las renovables, y no liderando el futuro energético.

Llegados a este punto, conviene detenernos y revisar brevemente todo lo que hemos aprendido hasta aquí, realizando un esfuerzo de síntesis en el que se resalten los aspectos más importantes.

8. ¿QUÉ HEMOS APRENDIDO HASTA AQUÍ?

Se ha dicho, acertadamente, que una característica fundamental de los gobernantes competentes, es (o debería ser) tener la suficiente capacidad anticipativa para comprender los escenarios de futuro y ordenar el marco jurídico pertinente, tomando las decisiones adecuadas para hacer que aquello que convenga impulsar encuentre facilidades, y aquello que convenga frenar encuentre dificultades. La necesidad de llevar esto a cabo en todos los aspectos (económicos, legales, sociales, educativos, etc.) de la vida cotidiana para el bien general, se hace aún más patente, si cabe, en lo que se refiere al problema del cambio climático antrópico (CCA), dadas sus gravísimas consecuencias que para las generaciones actuales y futuras tiene el no afrontar correctamente este problema. Para que eso pueda producirse es fundamental, insistimos, una ciudadanía bien formada, que conozca la gravedad del problema, sus causas y las medidas más adecuadas para afrontarlo de forma eficaz.



Revisad todo lo visto hasta aquí y elaborad un breve informe a modo de síntesis en el que se incluyan, al menos, las preguntas más importantes planteadas y sus respuestas.

Con esta actividad se pretende que los estudiantes procedan a realizar una revisión de los contenidos tratados que consideren más importantes. Después se les propondrá plasmar todo ello en un mapa conceptual que facilite una visión global y rápida del problema. En un contexto de enseñanza (secundaria o universitaria), conviene que todo esto se realice por pequeños grupos de estudiantes y que luego se comparen las síntesis y los mapas elaborados por cada grupo y, también, con los que, a modo de ejemplo, se exponen a continuación:

8.1. ¿Cuáles son las causas fundamentales del Cambio Climático Antrópico?

El valor de la temperatura media terrestre está determinado por un equilibrio energético, según el cual, la energía que entra al planeta (toda la superficie y la capa de aire que la envuelve), ha de ser igual a la energía que desde el planeta se emite al espacio exterior. Este equilibrio es lo que ha hecho que la temperatura media de la Tierra, durante los últimos miles de años, se haya mantenido (con ligeras fluctuaciones) en torno a unos 14 °C.

Todo ese flujo de energía entrante y saliente va asociado a radiaciones electromagnéticas. Por una parte, la radiación solar entrante y reflejada (básicamente luz visible y algo de infrarrojo y ultravioleta) y por otra, la radiación terrestre emitida (básicamente en el llamado infrarrojo térmico).

Desde hace unos cientos de años, los seres humanos estamos modificando notablemente ese balance energético, debido por una parte a los gases de efecto invernadero (GEI) que de forma creciente y continuada estamos emitiendo a la atmósfera (principalmente, por la utilización que hacemos de los combustibles fósiles para obtener energía) y, por otra, a la deforestación (bien sea por talas masivas de bosques o por grandes incendios provocados). Ambos factores (junto con otros, como la fabricación de grandes cantidades de cemento o la potenciación de la ganadería intensiva), están produciendo un aumento del efecto invernadero lo que conlleva una alteración del citado equilibrio energético haciendo que salga menos energía de la que entra, lo que provoca un proceso de aumento de la temperatura media del planeta hasta que se alcance un nuevo estado de equilibrio. Concretamente, existe un acuerdo

general en señalar el año 2024 como aquél en que la temperatura media global superó en más de 1,5 °C la media del periodo 1850 -1900 tomado como referencia.

Entre los expertos en el clima, existe un consenso científico prácticamente total, en cuanto a que ese aumento de temperatura media no puede explicarse considerando únicamente los factores naturales ocurridos (variaciones de la radiación solar, erupciones volcánicas, etc.). También existe un consenso muy elevado en cuanto a que dicho aumento no debería sobrepasar de forma continuada los 1,5 °C, para evitar que se produzcan cambios catastróficos e irreversibles a escala planetaria (como, por ejemplo, una ralentización creciente de corrientes oceánicas o la fusión total del manto de hielo de Groenlandia).

8.2. ¿Qué consecuencias tiene el calentamiento global?

El aumento de la temperatura media terrestre está afectando seriamente a la **hidrosfera**, ya que es responsable tanto de la fusión de una enorme cantidad de hielo (continental y marino), como la expansión térmica del agua marina, lo que, entre otros efectos, está produciendo la desaparición de numerosos glaciares de montaña, la reducción de los casquetes polares (con la consiguiente disminución del albedo), y un aumento continuado del nivel del mar. Por otra parte, una **atmósfera** y unos mares más calientes, favorecen una mayor frecuencia, duración e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos (huracanes, sequías, inundaciones, etc.). Estos y otros efectos, inciden en cambios en la **criosfera** y la **litosfera** (menos hielo, menos nieve, menos permafrost, más costas cubiertas por las aguas, etc.) y en la **biosfera** debido fundamentalmente a que unos mares y una atmósfera más calientes producen desajustes que alteran los ciclos vitales de muchas especies (marinas y terrestres), afectando a su reproducción, su alimentación, y su resistencia a plagas y enfermedades, contribuyendo así a la pérdida de biodiversidad.

El calentamiento global en el que estamos inmersos tiene, pues, graves consecuencias que afectan a **todos los componentes del sistema climático terrestre**. Por esta razón, se habla del cambio climático terrestre. Este se caracteriza (entre otras cosas), por la rapidez con que está ocurriendo y por la existencia de ciclos de reforzamiento (o retroalimentación positiva). Así, por ejemplo, si sigue aumentando la temperatura, aumentará la descongelación del permafrost o suelo helado, rico en materia orgánica que al descongelarse se descompone liberando CO₂ y CH₄, lo que aumentará el efecto invernadero y consecuentemente la temperatura. Este ciclo de reforzamiento (que ya se está produciendo) junto con otros, van a acelerar y potenciar aún más el cambio climático, dificultando la adaptación de muchos seres vivos (incluyendo el ser humano), a unos efectos que, si no afrontamos correctamente el problema, se producirán de forma cada vez más rápida y caótica.

Aunque el cambio climático actual es uno de los problemas más graves a los que se enfrenta toda la humanidad, afortunadamente, conocemos sus causas, sabemos qué hay que hacer para frenarlo, mitigar sus efectos y adaptarnos, y tenemos los medios necesarios para hacerlo. Lamentablemente, el tiempo de que disponemos no es mucho y si no tomamos medidas más efectivas y a tiempo, vamos a sobrepasar definitivamente ese límite de aumento de temperatura de 1,5 °C. Cabe plantearse, pues, qué es lo que hemos de hacer para evitar dicho aumento.

8.3. ¿Qué hacer para evitar que siga aumentando la temperatura media terrestre?

De acuerdo con lo que hemos comentado hasta aquí, resulta obvio concluir que la mayor prioridad es dejar de emitir gases invernadero (particularmente CO₂ que es quien más contribuye al aumento del efecto invernadero) a la atmósfera en las cantidades en que lo hacemos y evitar la deforestación. Pero, si queremos profundizar un poco más, es importante que primero reflexionemos sobre otra pregunta *¿Por qué emitimos cada vez más gases de efecto invernadero y deforestamos más?*

La respuesta hay que buscarla fundamentalmente en el modelo económico imperante, basado en el hiperconsumo, que actúa como si los recursos del planeta fueran infinitos. Para que ese hiperconsumo pueda continuar, se necesita energía con la que extraer materias primas, convertirlas en bienes y distribuirlos (electrodomésticos, ropa, materiales de construcción, vehículos, etc.). El problema es que más del 80 % de esa energía se obtiene de combustibles fósiles (derivados del petróleo, gas y carbón).

Es necesario tener en cuenta que ya vivimos en un planeta superpoblado. De los más de 8200 millones de habitantes que pueblan la Tierra, tan solo una quinta parte consume recursos naturales en exceso. Dentro de este gran grupo, hay muchas personas (aproximadamente la quinta parte de la población mundial) que apenas pueden subsistir, para las cuales, el consumir más no solo es un derecho, sino una cuestión de supervivencia. La superpoblación potencia muchos otros problemas, entre ellos la emisión creciente de gases invernadero, la contaminación, el agotamiento de recursos naturales, la deforestación, la degradación de los ecosistemas, el crecimiento urbanístico desordenado, etc. Esta situación, da lugar a la existencia de graves desigualdades.

Entre las grandes (y graves) desigualdades que afectan a distintos grupos humanos, es posible referirse a las diferencias en la esperanza de vida (en algunos países africanos, por ejemplo, la esperanza de vida no llega a los sesenta años); las condiciones de trabajo; el acceso a la educación o la sanidad, etc., pero también, a la existencia de grandes diferencias en la calidad del medio ambiente y en la disponibilidad de agua potable y otros recursos básicos. Todas esas desigualdades son (cada vez más) una fuente de conflictos y favorecen los desplazamientos masivos de miles de personas buscando mejores condiciones de vida. Muchos de esos desplazados climáticos se van a las grandes ciudades, aumentando las emisiones de gases invernadero (mayor movilidad para ir al trabajo, p.e.). De hecho, más del 70% de las emisiones de CO₂ proceden de usos urbanos. Además, la pobreza extrema obliga también (a quienes se quedan) a la sobreexplotación de los ecosistemas contribuyendo a la disminución de recursos naturales, algunos de ellos muy importantes para frenar el cambio climático (como sucede con los bosques).

Finalmente, no podemos olvidar que todos los conflictos bélicos que ocurren, además del coste en vidas humanas, suponen también la liberación a la atmósfera de millones de toneladas de CO₂ (desplazamientos de armamento y de tropas, utilización de aviones y vehículos pesados) y otros numerosos problemas (contaminación, destrucción de recursos, etc.).

Así pues, las causas profundas de por qué está aumentando la temperatura media terrestre y con ella el caos climático global, hay que buscarlas en la existencia de otros graves problemas, como los que acabamos de comentar. Se trata de problemas que se potencian mutuamente y que si no actuamos correctamente conducen a sobrepasar los llamados **límites pla-**

netarios (como los que se refieren a la concentración de CO₂ en la atmósfera, la biodiversidad o la acidez del agua marina). Si cruzamos dichos límites, la habitabilidad de la Tierra resultará seriamente comprometida. Por tanto, afrontar el cambio climático terrestre de forma efectiva, exige un tratamiento conjunto y simultáneo de todos los problemas con él relacionados, poniendo fin a la existencia de graves desigualdades y conflictos entre distintos grupos humanos y a un crecimiento (económico y demográfico) que resulta enormemente agresivo con el medio físico y nocivo para muchos seres vivos.

Lograr el objetivo anterior implica tener claro cuáles son las verdaderas prioridades y desarrollar toda una serie de medidas concretas, poniéndolas en práctica teniendo en cuenta el consenso científico sobre la urgencia de hacerlo. Estas medidas ya han sido enunciadas y explicadas claramente por diversos expertos y organismos internacionales, tales como los sucesivos informes publicados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), los acuerdos internacionales alcanzados en las distintas cumbres sobre el Clima realizadas hasta la fecha, y los Objetivos de Desarrollo Sostenible impulsados por Naciones Unidas. A toda esta información se puede acceder libremente en internet. Entre ellas y, a título de ejemplo, podemos destacar:

a) Medidas científico-tecnológicas, con investigaciones y proyectos que favorezcan la sostenibilidad (ahorro y eficiencia energética, cambio de modelo energético basado en combustibles fósiles a otro basado en energías limpias y renovables, regeneración de entornos, gestión sostenible de recursos, capturar y fijar CO₂...).

b) Medidas sociales y educativas, impulsando una educación ciudadana en todos los ámbitos, que se traduzcan en un gran consenso social para demandar (y aceptar) medidas efectivas con las que afrontar eficazmente el cambio climático y los problemas con él relacionados, así como en comportamientos y acciones a nivel individual y colectivo con los que favorecer la sostenibilidad...

c) Medidas políticas, con leyes y acuerdos en los que se impliquen activamente los gobiernos a todos los niveles (desde el local al internacional), para adaptarnos y para evitar que se sigan sobrepasando los límites planetarios y que se produzcan cambios catastróficos e irreversibles a escala planetaria, para que se realice una transición justa en el cambio de modelo energético...

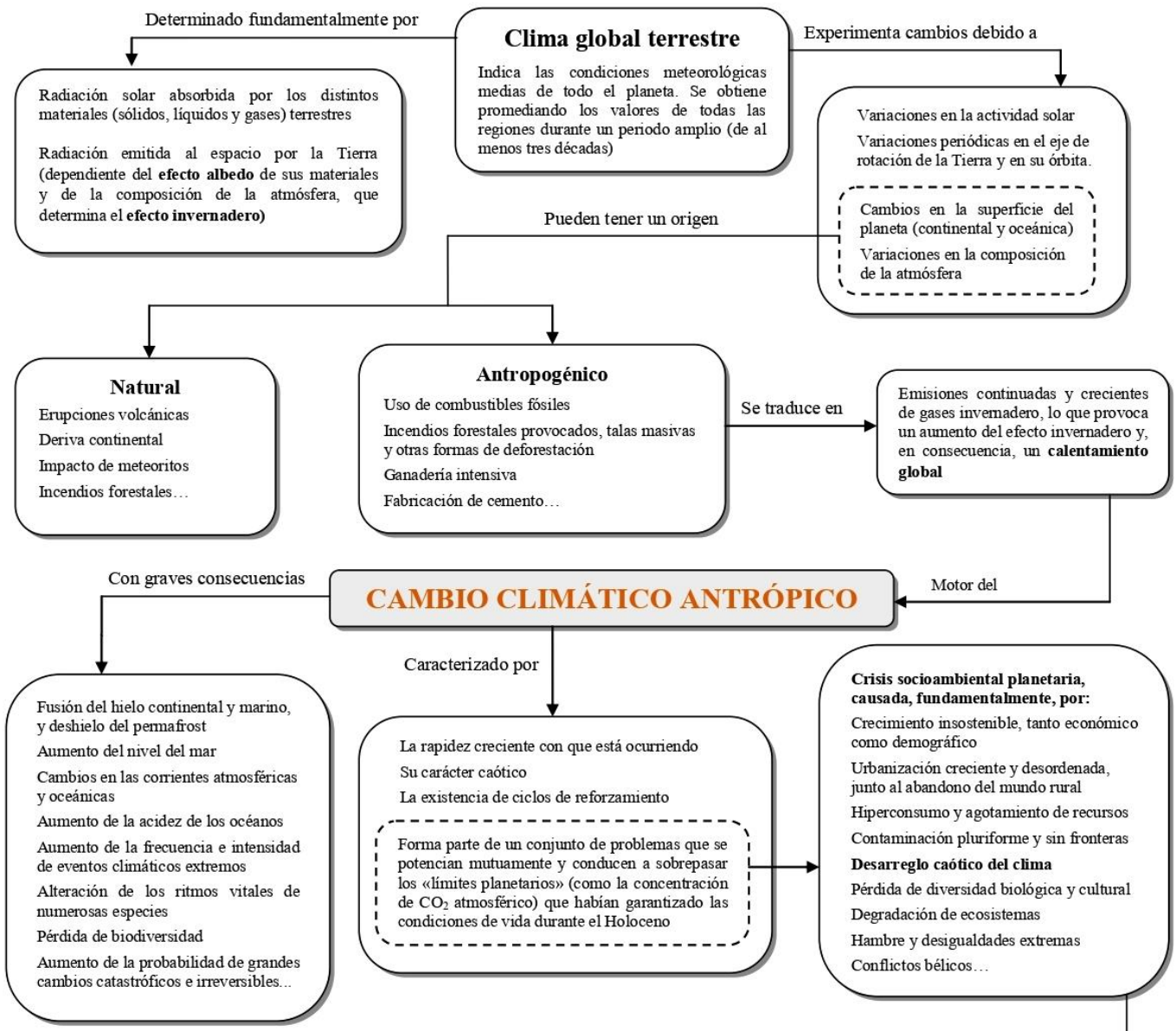
Después de esta breve revisión, conviene plantearse la elaboración de un mapa conceptual en el que se recojan los contenidos más importantes que se han tratado y se pueda obtener rápidamente una visión global de los mismos y sus relaciones.



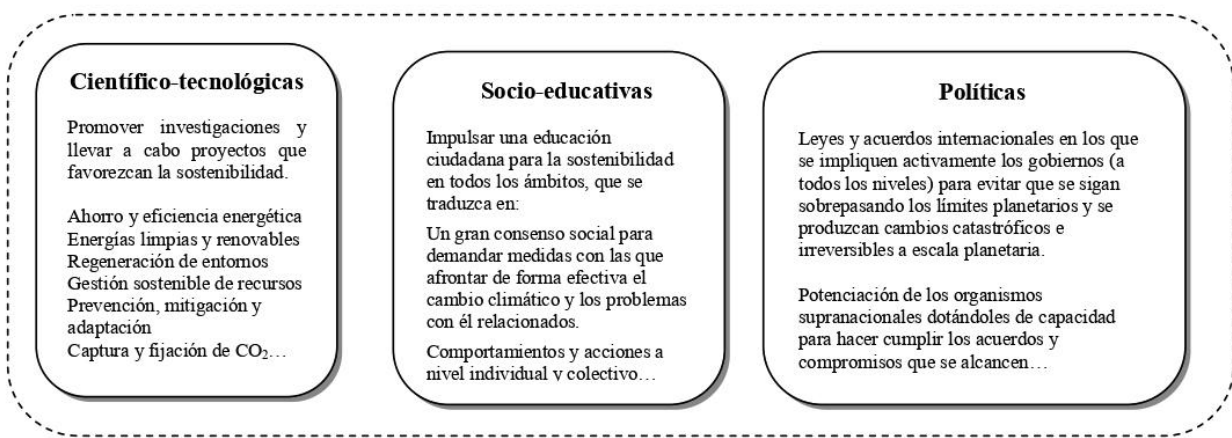
Elaborad un esquema o mapa conceptual que proporcione una visión global de los contenidos tratados desde el principio en esta unidad didáctica.

Se trata de que el alumnado, en pequeños grupos, proceda a la elaboración del mapa que se solicita. Después de ello, se pueden comparar las propuestas de los distintos grupos entre ellas y con la que, a modo de ejemplo, se reproduce a continuación, introduciendo las mejoras que se consideren oportunas.

MAPA CONCEPTUAL SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO ANTRÓPICO



Frenar y mitigar el Cambio Climático Antrópico, exige el tratamiento simultáneo de todos los graves problemas con él relacionados, atendiendo a la evidencia científica disponible y a las recomendaciones de expertos, mediante el impulso y desarrollo efectivo de medidas:



Parte de las medidas propuestas para afrontar el cambio climático y los graves problemas con él relacionados ya están, afortunadamente, en marcha. Sin embargo, es imperativo impulsarlas y desarrollarlas todas y a tiempo. Ello implica unos costes y unos riesgos que hay que asumir, pero si no lo hacemos, o si lo hacemos tarde, no cabe ninguna duda de que los costes serán mucho más elevados, existiendo el riesgo real de que se produzcan cambios catastróficos e irreversibles en la escala de tiempo humana. En definitiva, como señala el profesor Fernando Valladares:

«Es evidente que el calentamiento global sería mayor si no se hubiese hecho todo lo que ya se ha hecho; pero también es evidente que es necesario hacer más, teniendo en cuenta la interconexión y la complejidad de todos los problemas y sus efectos».

La cuestión clave es: *¿Por qué no lo hacemos?* Esto es lo que trataremos de responder en el siguiente apartado de esta unidad.

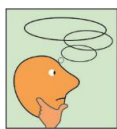
9. ¿POR QUÉ NO ESTAMOS HACIENDO MÁS DE LO QUE HACEMOS?

A mitad de camino de la Agenda 2030, la ciencia es clara: El planeta está muy lejos de cumplir sus objetivos climáticos (OMM. Unidos en la Ciencia, 2023). En la actualidad, una gran parte de la población entre la que se incluyen gobernantes, grandes empresas y medios de comunicación de todo el mundo, es consciente del problema que supone el cambio climático antrópico (CCA). En una reciente e histórica encuesta mundial¹ elaborada para Naciones Unidas, con la colaboración de la Universidad de Oxford y GeoPoll, en la que participaron ciudadanos de 77 países, se muestra, entre otros resultados muy relevantes, que:

- Un 80 % de la población mundial quiere que sus gobiernos tomen medidas más contundentes para hacer frente a la crisis climática.
- Un 86 % desea que los distintos países aparquen sus diferencias geopolíticas y colaboren en la lucha contra el cambio climático.
- Un 72 % está a favor de una rápida transición para abandonar los combustibles fósiles. Este resultado, se señala, es válido también para los países que figuran como grandes productores de petróleo, carbón o gas, con mayorías que van desde el 89 % en Nigeria al 54 % en los Estados Unidos.

Los resultados anteriores (publicados en junio de 2024) muestran un elevado consenso en la población mundial, una demanda clara para que se reconozca el CCA como una prioridad y, en consecuencia, los líderes políticos dejen de lado sus diferencias y se centren en hacer frente común, de la forma más justa y eficaz posible, a este grave problema global. Por otra parte, los sucesivos y detallados informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 1988-2023), junto con miles de documentos científicos adicionales, coinciden en señalar al cambio climático como uno de los problemas más graves que enfrenta la humanidad (Ripple et al., 2024). Para dimensionar su magnitud, basta reflexionar sobre los efectos globales de procesos tales como la elevación del nivel del mar; el aumento en la frecuencia e intensidad de extremos climáticos (sequías, inundaciones u olas de calor); el incremento de los megaincendios; la fusión del hielo continental y marino, y la pérdida acelerada de biodiversidad. Afortunadamente, en esos informes también se apunta que se conocen las principales causas del CCA, se sabe qué hay que hacer para frenarlo y mitigar sus efectos, se dispone de los medios necesarios para ello y aún se está a tiempo de hacerlo. No obstante, existe evidencia científica más que suficiente para saber que no queda mucho tiempo y que es urgente actuar de forma eficaz, antes de que se hagan inevitables, a escala planetaria, cambios catastróficos e irreversibles para toda la humanidad y la biosfera en general.

Ante la situación que acabamos de exponer, resulta del todo pertinente preguntarse:

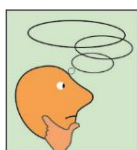


¿Por qué no estamos haciendo más de lo que hacemos (y mejor) para afrontar el cambio climático, antes de que sea demasiado tarde para evitar que se produzcan dichos efectos? Reflexionad sobre esta cuestión y elaborad una lista con las posibles explicaciones.

¹ Para acceder a estos datos: <https://news.un.org/es/story/2024/06/1530696>

Existen diversas explicaciones (que no justificaciones) a esta cuestión. Se trata de respuestas que conviene conocer bien para así poder actuar mejor frente al cambio climático y también para convencer a quienes, por unos u otros motivos, no están dispuestos a implicarse en medidas para frenarlo y mitigar sus efectos, evitando así que puedan alcanzarse puntos de no retorno. En este último apartado, hemos recogido algunas de dichas explicaciones. En concreto son las siguientes:

- No valoramos correctamente los riesgos a largo plazo
- Se reclaman certezas, no probabilidades
- Enormes intereses económicos en juego
- Negacionismo climático
- Falta de formación en gran parte de la ciudadanía
- Actitudes pesimistas y autoexculpatorias
- Las acciones individuales son irrelevantes
- Individualismo
- Disminuir la emisión de gases invernadero exige muchos cambios
- Los efectos de la acción van a notarse a corto plazo
- Los gobernantes no ponen en marcha las medidas necesarias
- Auge de populismos y nacionalismos
- El miedo y la desesperanza
- Afrontar el cambio climático es demasiado caro
- Ecoimpostura y Conspiración verde
- Proliferación de bulos climáticos
- Declive del multilateralismo y retorno a la política de fuerza



Integrad vuestra lista de posibles explicaciones en la lista anterior y después, en pequeños grupos de trabajo, buscad información fiable sobre cada una de ellas en particular, con el fin de fundamentarlas y analizar su alcance e importancia

Nota al profesorado:

La realización de las dos actividades anteriores (si el profesor lo estima conveniente) supone un serio trabajo, al cual hay que dedicarle bastante tiempo. Fundamentalmente se trata de que, en primer lugar, los estudiantes elaboren su propio listado de posibles explicaciones (a modo de hipótesis, sin detenerse en analizarlas) y luego cotejen su propia lista con la que se les suministra en esta unidad, con el fin de elaborar una lista única en la que se plasmen todas las aportaciones.

Conviene dividir la clase en pequeños grupos de trabajo de entre tres y cinco estudiantes y, tras comentar brevemente el significado de cada explicación propuesta, repartir la tarea de modo que cada uno de ellos se encargue de realizar una búsqueda bibliográfica de información que permita comprender y profundizar en la importancia y alcance de cada posible explicación. Después, cada grupo puede exponer en clase su trabajo y debatirlo con el resto. Los contenidos que siguen a continuación pretenden ayudar y orientar dicho proceso. Naturalmente, el profesor también puede decidir no realizar las actividades y pasar directamente a tratar dichos contenidos.

1. No valoramos correctamente los riesgos a largo plazo

Algunos efectos del aumento de la temperatura media global del planeta (como, por ejemplo, la fusión de los glaciares, la desertificación o la elevación del nivel del mar), aunque en escalas geológicas de tiempo están ocurriendo rapidísimamente, a escala de la duración de la vida humana parece que suceden muy lentamente, lo que contribuye sin duda a que, por una parte de la población, no se perciban como indicadores de una situación de verdadera emergencia planetaria, en la que la humanidad se juega su futuro. La investigadora del CSIC (Centro Superior de Investigaciones Científicas) Encarni Montoya explica esta percepción, argumentando que el ser humano está evolutivamente adaptado para comprender mejor el *presente* y el *aquí*², mientras que las predicciones científicas sobre algunas de las consecuencias más importantes del cambio climático, como el aumento del nivel del mar o la fusión de glaciares, a menudo se remiten a finales de siglo y lugares lejanos. Este mismo razonamiento se puede encontrar en diversos trabajos publicados al respecto como, por ejemplo, en Pérez-Torres (2024), donde se afirma que, a pesar de los avances, aún hay bastantes personas que perciben el CCA como una amenaza lejana o como un proceso lineal en el que la temperatura media del planeta va aumentando continuamente pero con lentitud y que, por tanto, las consecuencias de ese calentamiento global también serán graduales, de manera que habrá tiempo suficiente para adaptarse o bien para que los científicos encuentren nuevas soluciones. Sin embargo, como ya se ha señalado, un aumento de solo 2 °C en la temperatura media terrestre nos llevará a superar determinados puntos de inflexión, lo que hará que se desencadenen de forma abrupta cambios catastróficos e irreversibles a escala planetaria. Además, es preciso tener en cuenta los diversos mecanismos de retroalimentación o ciclos de autorreforzamiento, capaces de acelerar el proceso (Carrascosa, 2024, pp 27; Viñas 2022, pp 114; Oyarzún 2014, pp 14; Ripple et al., 2024). Por ello, algunos expertos medioambientales señalan que cabe temer que haga falta un enorme y repentino desastre ambiental para que se produzca una verdadera toma de conciencia generalizada que obligue a desarrollar y aplicar las medidas políticas, científico-tecnológicas y educativas necesarias. El problema es que, para entonces, sea ya demasiado tarde y no pueda impedirse que los cambios producidos sean irreversibles, convirtiendo extensas zonas del planeta en lugares prácticamente inhabitables.

Por otra parte, el desarrollo científico-tecnológico no puede ofrecer solución a todos los problemas, y necesita su tiempo para producirse y para implementarse adecuadamente; un tiempo que puede alargarse mucho (como ocurre, por ejemplo, con la posible aplicación de la fusión nuclear para generar energía utilizable). Además, antes de proceder a su aplicación generalizada, es preciso aplicar el **principio de precaución** y tener la seguridad de que, con las nuevas medidas o herramientas disponibles, no se van a generar problemas más graves que aquellos sobre los que se pretende incidir; lo cual, obviamente, también exige un tiempo.

2. Se reclaman certezas, no probabilidades

Existen muchos satélites orbitando alrededor de la Tierra y también miles de observatorios meteorológicos, sondas, boyas, etc., distribuidos por todo el planeta. Todos ellos cuentan con sofisticados instrumentos de gran precisión que continuamente están tomando datos de múltiples variables climáticas (desde temperaturas y grado de humedad, a espesor y volumen del hielo ártico). Esos datos, como ocurre con todos los resultados científicos, vienen afectados siempre de una cierta imprecisión y ello hace inevitable que, en los informes científicos donde se manejan, se

² <https://www.youtube.com/watch?v=w1GxcmGXmA>

hable siempre en términos de probabilidades y no de certezas absolutas. No obstante, su interpretación es muy clara: la Tierra se está calentando rápidamente y es necesario tomar, cuanto antes, las decisiones pertinentes para afrontar ese problema de forma eficaz. Hemos visto que esas decisiones afectan profundamente al modelo económico, al modelo energético y a toda la sociedad, que deberán experimentar cambios importantes.

Lamentablemente, el hecho de no tener certezas absolutas, sino altas probabilidades, es utilizado frecuentemente, de forma interesada, para sembrar dudas con el fin de evitar o frenar la toma de las decisiones pertinentes. Sin embargo, debemos ser conscientes de que, si no se actúa inmediatamente y, por el contrario, se espera a disponer de más información, el grado de certeza, las pruebas y el conocimiento científico disponible sobre el CCA aumentarán; pero también lo harán (y mucho) los costes necesarios —y no solo económicos— para afrontarlo y poder mitigar sus gravísimas consecuencias. Los datos disponibles actualmente y el grado de certeza son, insistimos, más que suficientes.

3. Enormes intereses económicos en juego

Existe un conflicto de intereses entre quienes pretenden proteger a toda la población mundial de los graves y crecientes problemas asociados al CCA y una minoría que defiende unos beneficios multimillonarios basados en el uso de combustibles fósiles, como modelo energético, y en el hiperconsumo continuo y creciente, como modelo económico. No podemos olvidar a este respecto que algunos gobernantes junto con poderosas empresas multinacionales, fueron capaces de comenzar una guerra en Irak basada en una información (existencia de armas de destrucción masiva) que luego resultó ser falsa, pero que para ellos era absolutamente fiable (porque la veían buena para sus intereses). Actualmente, hay gobernantes y grandes grupos económicos (entre otros, los relacionados con la industria de los combustibles fósiles), a los que la inacción frente al CCA también favorece sus intereses y, por eso, no tienen tampoco ningún reparo en oponerse al desarrollo y puesta en marcha de las medidas necesarias para afrontarlo, aduciendo, en este caso, que falta disponer de más información y de unas pruebas científicas más fiables. Se trata, sin duda, de una estrategia para favorecer a corto plazo los beneficios multimillonarios de unos pocos, aunque eso vaya en detrimento de toda la población (incluidos ellos mismos y sus descendientes).

En resumen: Una «falsa certeza» se utilizó hace años como coartada para desencadenar una guerra desastrosa cuyos efectos aún perduran. Es necesario evitar ahora que una «falsa incerteza» pueda utilizarse ahora como coartada para justificar la inacción o el retraso en la puesta en marcha de medidas eficaces para luchar contra el CCA. En ambas situaciones, la base es la misma: Enormes intereses económicos en juego. Por otra parte, como veremos a continuación, aducir falta de fiabilidad y de información no es la única estrategia utilizada para defender tales intereses.

4. Negacionismo climático

La negación frente al CCA se expresa en distintos ámbitos, desde el ideológico al político y el económico (Abellán, 2021), pudiendo adoptar diversas formas, tales como cuestionar la propia existencia del problema («no está ocurriendo»), rechazar la responsabilidad humana («es un fenómeno natural»), desestimar los riesgos que conlleva («no es peligroso») o postergar la necesidad de actuar, con el argumento de que existen otros problemas más urgentes de los que ocuparse. También hay que tener en cuenta el denominado «negacionismo organizado» (Heras, 2017),

desde el cual, de forma interesada y planificada, se promueven dudas sobre determinados aspectos del conocimiento científico disponible sobre el CCA, sus causas y sus consecuencias.

En muchos casos se recurre a utilizar las redes sociales para difundir bulos y medias verdades. Un ejemplo claro es la defensa del rol vital del CO₂, afirmando que es un gas necesario para la fotosíntesis y que sin él la vida en el planeta no sería posible. Se denuncia que se penaliza a este gas cuando, en realidad, el principal causante del problema es el vapor de agua (del que apenas se habla) puesto que este gas, por sí solo, es responsable de la mitad del efecto invernadero. Todo esto es cierto, pero lo verdaderamente importante es que se está haciendo trampa confundiendo «efecto invernadero» con «aumento del efecto invernadero». Ya se ha visto que el vapor de agua es el principal gas responsable del efecto invernadero, pero el problema, como sabemos, no es este efecto en sí mismo sino su rápido aumento desde los inicios de la era industrial y, en este caso, el principal responsable es, sin lugar a dudas, el CO₂ producido principalmente por la creciente utilización de combustibles fósiles. Este gas contribuye a dicho aumento más que todos los restantes gases invernadero (incluido el vapor de agua) en su conjunto. Se dice (y también es cierto) que en toda combustión de hidrocarburos se produce siempre CO₂ y vapor de agua, pero se ignora (o no se añade) que ese vapor de agua (a diferencia del CO₂) no tarda en condensar convirtiéndose en agua líquida.

Otro ejemplo de negacionismo organizado son las referencias a científicos que cuestionan el cambio climático³. Con ello se trata de sembrar dudas en cuanto al amplísimo consenso existente entre la comunidad científica internacional en torno a este tema. A este respecto conviene recordar el trabajo de la profesora de la Universidad de Harvard, Naomi Oreskes, especialista en Historia de la Ciencia, que analizó en torno a un millar de artículos sobre Cambio Climático (Oreskes, 2004) publicados en revistas científicas entre 1993 y 2003. Una de sus conclusiones fue que existía un consenso prácticamente universal acerca de su existencia real y de su origen antrópico. Desde entonces, se han realizado muchos estudios similares a este y todos con el mismo resultado (Lynas, Houlton y Perry, 2021). Resulta curioso que, a pesar de este elevadísimo consenso, todavía haya políticos, economistas y ciudadanos en general, que piensen que el tema no está del todo claro y que existen discrepancias importantes entre la comunidad científica. Esa falsa impresión está muy bien alimentada por los beneficios económicos colosales que algunos pueden obtener gracias a la explotación de esa mentira. Muchas iniciativas de negacionistas en los Estados Unidos fueron financiadas por industrias relacionadas con los combustibles fósiles (por ejemplo, la campaña publicitaria de «CO₂ is Green» durante el verano de 2010).

Como muestran Naomi Oreskes y Erik Cornway en su libro *Mercaderes de la duda* (editado en España en 2018), la estrategia más efectiva no es negar la realidad, sino fingir que «el debate sigue abierto». Al sembrar la duda sobre la fiabilidad de los datos, logran que la sociedad y los políticos posterguen las decisiones difíciles. Es una táctica heredada de la industria del tabaco: no hace falta demostrar que el tabaco es sano, basta con decir que 'no es seguro' que cause cáncer, para evitar regulaciones durante décadas. Actualmente, esta estrategia se ve potenciada por el funcionamiento de las redes sociales ya que sus algoritmos están diseñados para ofrecernos contenido que refuerce nuestras creencias previas o que genere mucha interacción (habitualmente a través de la polémica). Esto crea las llamadas «cámaras de eco», donde un usuario puede recibir continuamente muchas opiniones negacionistas que, aunque minoritarias en la ciencia, le hacen creer que existe un debate real al mismo nivel que el consenso del IPCC. Así, la tecnología que debería informarnos acaba, en ocasiones, validando la estrategia de la duda

³ <https://climatica.coop/nobel-fisica-negacionista-climatico/ed>

5. Falta de formación en gran parte de la ciudadanía

La formación en relación al problema del CCA es, en general, bastante escasa. Una buena muestra de ello es la existencia de ciertas ideas alternativas relacionadas con el mismo. Se trata de ideas asociadas a una particular interpretación de un concepto o fenómeno dado, muy diferente a la interpretación científica. Dichas ideas se caracterizan, fundamentalmente, por su amplia extensión (afectan a estudiantes de distintos niveles educativos y a gran parte de la población en general) y por que quienes las detentan suelen estar seguros acerca de su validez. A modo de ejemplo, cabe citar la confusión entre los conceptos de «tiempo» (meteorología) y «clima», consistente en considerar ambos como sinónimos de la misma cosa. Esta identificación ha sido utilizada, unas veces por ignorancia y otras de forma interesada, para poner públicamente en duda la existencia del calentamiento global antropogénico aprovechando la ocurrencia, en una región y momento dados, de grandes nevadas o episodios de frío extremo. A título de ejemplo, se reproduce un mensaje del entonces presidente de Estados Unidos Donald Trump, en la red social Twitter (ahora X), el 29 de enero de 2019, durante la ola de frío que padeció el país por esas fechas:



“In the beautiful Midwest, windchill temperatures are reaching minus 60 degrees, the coldest ever recorded. In coming days, expected to get even colder. People can’t last outside even for minutes. What the hell is going on with Global Warming? Please come back fast, we need you!”

Además, en el ámbito educativo este problema no siempre se trata con la importancia que merece, tanto en la formación del alumnado como en la del propio profesorado. Incluso hay docentes que lo ven como un tema que les quita tiempo para impartir los contenidos «propios» de su materia. Algo parecido ocurre con el tratamiento que se ha venido dando al problema del CCA en los medios de comunicación (prensa, radio, televisión); en general escaso y superficial, donde apenas se analizan las causas del problema.

En Carrascosa et al., (2022), se analiza la elevada incidencia, entre alumnos de enseñanza secundaria y profesores en formación, de varias concepciones erróneas relacionadas con el CCA, tales como: identificar el adelgazamiento de la capa de ozono como un poderoso agente causante del cambio climático; asociar el cambio climático actual a causas exclusivamente naturales (durante la larga historia de la Tierra, se dice, ha habido ya muchos cambios climáticos, sin que ni siquiera existiese la especie humana); no distinguir entre efecto invernadero y aumento del efecto invernadero, o creer que la fusión de todo el hielo flotante que hay en los polos ocasionaría de forma directa un gran aumento del nivel del mar.

Es preciso insistir en que no es posible pensar en cambios en el modo de crecimiento económico y en el modelo energético, ni tampoco en que los gobernantes los impulsen, si no existen ciudadanos bien formados que los demanden y un consenso social que favorezca la aceptación e implementación de dichos cambios, y para ello la simple difusión de la información no es suficiente. Por eso, la educación ambiental debe tener un papel fundamental en todos los centros escolares, en la formación del profesorado, en las familias y también en los medios de comunicación (museos, TV, prensa y redes sociales). En particular, el tema del cambio climático debería estar presente en los currículos de todos los niveles educativos, como forma de aumentar la conciencia sobre la gravedad del problema, mejorar la alfabetización climática, formar ciudadanos con capacidad crítica frente a los bulos climáticos y, sobre todo, empoderar a los estudiantes para la acción (Ripple et al., 2024).

6. Actitudes pesimistas y autoexculpatorias

Cuando se habla sobre el problema del CCA, con frecuencia se insiste demasiado en sus graves consecuencias y poco en las medidas a desarrollar para afrontarlo, frenarlo y mitigar sus consecuencias. Esto no es conveniente, puesto que si se insiste en señalar los problemas y se ignora la posibilidad de hacerles frente de forma efectiva, se favorece la ansiedad, el desánimo y la frustración entre la población. Por tanto, es necesario hacer énfasis, desde el primer momento, en que el estudio de los problemas está al servicio de la búsqueda de soluciones (Vilches et al., 2008).

Ciertamente, se haga lo que se haga, no va a ser posible parar un cambio climático que ya ha comenzado. Ya es tarde para eso. No se va a poder evitar que, por ejemplo, el nivel del mar continúe ascendiendo de forma imparable durante muchos años, pero sí se puede lograr que ese ascenso sea el menor posible, mediante una reducción apropiada en la emisión de gases de efecto invernadero; reducción que deberá ir acompañada también de medidas adecuadas de mitigación y adaptación a los efectos de la subida del nivel del mar entre las poblaciones costeras. En general, se trata de aplicar a tiempo las medidas necesarias para evitar que se crucen determinados umbrales críticos y se produzcan grandes cambios catastróficos e irreversibles a escala planetaria (por ejemplo, extinción masiva de especies, fusión del hielo que cubre Groenlandia o un notable debilitamiento de las corrientes oceánicas). Para ello, no basta con el conocimiento técnico; es necesaria una masa crítica de ciudadanos que se impliquen activamente con pasión, entusiasmo, y de forma colectiva, en un proyecto ilusionante centrado en el impulso y desarrollo efectivo de esas medidas. Debemos alejarnos, pues, de las actitudes pesimistas de quienes piensan que ya no se puede hacer nada (y que, por tanto, no vale la pena intentarlo), o de las autoexculpatorias de quienes piensan que la culpa es exclusivamente de las grandes industrias y de los políticos (por lo que poco o nada se puede hacer individualmente). Por eso es preciso insistir en la idea de que aún estamos a tiempo e implicar a la gran mayoría de la población en la toma de decisiones y en acciones para afrontar este desafío, mitigando así sus efectos sobre las personas y la biosfera en general.

7. Las acciones individuales son irrelevantes

Muchas personas dudan acerca de la efectividad que puedan tener las acciones individuales para afrontar el cambio climático y otros problemas con él relacionados, pensando que lo que pueda hacer cada individuo al respecto, introduciendo determinados cambios en sus costumbres o estilo de vida, es insignificante, frente a lo que pueden y deben hacer las grandes empresas y los gobiernos. Este es uno de los obstáculos que se mencionan en un interesante trabajo (Vilches et al., 2008), en el que sus autores analizan algunos de los obstáculos que impiden una mayor implicación de la ciudadanía en la construcción de un futuro sostenible. En ese mismo trabajo, se apunta que se trata de una idea incorrecta, tal y como se puede demostrar con algunos cálculos bien sencillos. En efecto, mediante una pequeña reducción en el consumo de energía per cápita, al multiplicarlo por los muchos millones de personas que pueden hacerlo, se obtiene un ahorro de energía enorme y, consecuentemente, una disminución significativa de emisiones de CO₂. No es difícil acompañar este razonamiento de cálculos que muestren de forma cuantitativa la falsedad de que las pequeñas acciones personales sean irrelevantes. Así, por ejemplo, según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) los aparatos en *standby* suponen entre el 10 % y el 11 % del consumo energético de un hogar medio. Si todas las familias españolas se pusieran de acuerdo en eliminar este consumo, se ahorraría una energía equivalente a la producción anual de una central nuclear. Ello supone evitar la emisión de más de un millón de toneladas de CO₂ cada año, además de un ahorro de dinero muy significativo en la factura de la luz, simplemente por apretar un botón. En el apartado 10, de esta misma unidad, se incluyen más ejemplos.

Así pues, el futuro va a depender también, en gran parte, de las acciones individuales llevadas a cabo por la ciudadanía en general, y en ello, una vez más, tiene una importancia fundamental la educación para la sostenibilidad impulsada en todos los sistemas y niveles educativos, de manera que sus resultados no se limiten a una mayor comprensión del CCA (y del resto de problemas vinculados con el mismo), sino que incluyan también una transformación real en los hábitos cotidianos de cada persona, orientándolos hacia una sociedad más sostenible. Avanzar en este objetivo es algo fundamental, puesto que un ciudadano que recicla y que ahorra energía, lo más probable es que vote y exija leyes, en las que se impulse el desarrollo de medidas efectivas con las que afrontar el cambio climático.

8. Individualismo

Una de las conclusiones más claras relativas al CCA es que los cambios que lo conforman tienen gravísimas consecuencias, las cuales se van a notar en todo el planeta y que, por tanto, las actitudes individualistas (o egoístas), tanto a nivel personal como de grupos (naciones), carecen de sentido. En el ámbito personal, un factor a tener en cuenta es lo que el investigador del CSIC, Santiago Giralt, denomina como **propiedad difusa**⁴. Para ilustrar su significado, el profesor Giralt, se refiere al hecho de que para muchas personas, su casa se limita a lo que hay una vez se cruza la puerta de entrada a su hogar. La escalera y otros elementos comunes que pueda haber en el edificio son de todos y no son de nadie. Algo similar ocurre con determinadas consecuencias del CCA. Hay personas que admiten su existencia, pero no se sienten demasiado preocupadas por cosas tan lejanas a su entorno inmediato como, por ejemplo, la disminución de la extensión y grosor de la banquisa de hielo ártico. No perciben ese lugar como realmente suyo, ni tampoco los problemas medioambientales que ocurren en aquella zona. Es posible que, debido al cambio climático, algunas zonas hasta ahora frías (Noruega, Canadá, Suecia...) se transformen en zonas más cálidas y que en ellas puedan crecer cultivos impensables hace años. Sin embargo, el balance global a escala planetaria, si no hacemos mejor las cosas, será desastroso, incluyendo migraciones masivas e incontroladas hacia las zonas más ricas y/o menos afectadas, generándose graves conflictos por el control de recursos naturales (como el acceso al agua potable) y ninguna nación, esté donde esté, se librará de ello. España, por ejemplo, actualmente recibe una gran cantidad de migrantes africanos, muchos de los cuales se pueden considerar como desplazados climáticos; pero si no somos capaces de frenar el cambio climático y mitigar sus efectos de forma eficaz, los españoles y otros muchos habitantes del sur de Europa, inevitablemente, se verán también obligados a desplazarse hacia latitudes más altas.

Así pues, parece razonable superar todo tipo de individualismos e impulsar organizaciones supranacionales dotándolas de capacidad efectiva para hacer cumplir los acuerdos y compromisos firmados. Eso permitiría abordar este problema global de una forma más adecuada para todos los habitantes del planeta, superando así las actitudes egoístas y cortoplacistas de algunos gobernantes que, por unas u otras razones, se niegan a actuar solidariamente con el resto en la puesta en marcha real de soluciones justas y efectivas para todos.

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=w1GxcmGXmA>

9. Disminuir la emisión de gases invernadero exige muchos cambios

Uno de los ejemplos que suelen utilizarse para poner de manifiesto la posibilidad real de combatir graves problemas medioambientales tomando las decisiones adecuadas es el éxito obtenido en parar y revertir el adelgazamiento de la capa de ozono. Este problema se produjo el siglo pasado durante la década de los años 70, cuando comenzó a observarse que algunos gases utilizados de forma generalizada en sistemas de refrigeración y como propelentes —principalmente compuestos de cloro, flúor y carbono (los CFC)— producían procesos en la atmósfera en los que se destruían las moléculas de ozono. En 1987 se firmó un gran acuerdo internacional conocido como el «Protocolo de Montreal» para proteger la capa de ozono (en el que los CFC fueron sustituidos por otros compuestos), y con su cumplimiento comenzó a solucionarse este grave problema.

La rápida reducción mundial de las sustancias que destruían la capa de ozono muestra, sin ninguna duda, que se pueden resolver grandes problemas cuando se actúa de manera solidaria y decidida. Sin embargo, el problema del CCA es más complejo, porque la disminución necesaria en las emisiones de gases invernadero exige importantes cambios sociales y económicos. Sustituir un modelo energético basado en el consumo de combustibles fósiles por otro basado en el ahorro y en fuentes renovables tiene repercusiones importantes en nuestro estilo de vida y en la economía. En el caso del ozono, no fue difícil para los fabricantes de gases CFC cambiar dichos gases por otros; esto no les supuso grandes pérdidas económicas. Tampoco para los ciudadanos, que no vieron afectados sus hábitos de consumo ni su forma de desplazarse. Sin embargo, la renuncia al petróleo supone renunciar a unos beneficios colosales para algunos (que no están dispuestos a perderlos) y a una forma de vida basada en el hiperconsumo por parte de, al menos, una quinta parte de la población mundial.

Además de las consideraciones anteriores es necesario tener muy en cuenta que el CCA no es un problema aislado, sino que forma parte de un conjunto de graves problemas estrechamente vinculados, que se potencian mutuamente, y que han dado ya lugar a una crisis socioambiental mundial sin precedentes, sobrepasando varios de los límites planetarios (como el de la concentración de CO₂ en la atmósfera o el de pérdida de biodiversidad) que, al ser superados, ponen en serio peligro la habitabilidad en la Tierra (Diamond, 2006., Ripple et al., 2024). Estos problemas se refieren fundamentalmente a un crecimiento insostenible, tanto económico como demográfico; una urbanización creciente, especulativa y desordenada, junto al abandono del mundo rural; un hiperconsumo creciente y continuado; una contaminación pluriforme y sin fronteras; la pérdida de biodiversidad; la degradación de ecosistemas; inaceptables desigualdades extremas, en las que coexisten el hambre con el desperdicio de alimentos; así como los conflictos bélicos (la actividad humana más contaminante y destructora de recursos). Lamentablemente, la vinculación existente entre estos problemas y el CCA en particular, es algo que no siempre se tiene presente. En efecto, ya en la primera década del siglo XXI, algunos autores (Vilches et al., 2008) denunciaban que la forma de abordar estos problemas en los medios de comunicación es demasiado puntual y reduccionista y que, dependiendo de la urgencia y los titulares del momento, las noticias pasan de las migraciones a las pandemias, al cambio climático, a los megaincendios, olas de calor, escasez de agua, grandes inundaciones, etc., con lo que cada problema es desplazado rápidamente por otro; lo que equivale, de facto, a su desvinculación y neutralización. En la actualidad, este tratamiento inconexo de los problemas se sigue produciendo y muy en particular en las redes sociales, cuya influencia (especialmente entre la población joven) es cada vez mayor. La estrecha conexión existente entre todos estos problemas y el cambio climático (Carrascosa, Gil y Vilches, 2024) permite comprender que afrontar correctamente el problema del CCA exige no limitarse a un cambio en el modelo energético (ahorro, eficiencia y energías renovables, sustituyendo a los

combustibles fósiles). Por el contrario, la manera más efectiva de afrontarlo es luchar de forma conjunta y simultánea contra él y resto de problemas vinculados al mismo. En otras palabras: la lucha contra el CCA requiere un cambio sistémico; es decir, no podemos limitarnos a un cambio de modelo energético y seguir despilfarrando recursos, contaminando, consumiendo... y reproduciéndonos como lo hemos venido haciendo hasta ahora. Por ello, la Asamblea General de Naciones Unidas aprobó en septiembre de 2012, el establecimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), mediante un proceso abierto a todas las partes interesadas. Durante cerca de tres años, equipos de científicos, organizaciones no gubernamentales, representantes sindicales y empresariales, etc., trabajaron para establecer dichos objetivos, los cuales fueron aprobados en la Asamblea General de 2015, con pleno consenso sobre la necesidad de avanzar con urgencia en su logro. Constituyen 17 grandes ODS con 169 metas concretas, concebidos para superar el conjunto de graves problemas que afectan a la humanidad. El ODS 13 está dedicado específicamente a «Acción por el Clima», pero queda claro que no se puede avanzar en el mismo sin hacerlo también en la mayoría de los restantes como, por ejemplo, el 7 (Energía asequible y no contaminante), el 10 (Reducción de las desigualdades) o el 11 (Ciudades y comunidades sostenibles). Para más detalles:

(<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>)

En resumen: mientras que la solución al problema del ozono fue un cambio fundamentalmente tecnológico (sustituir unos gases por otros), afrontar eficazmente el problema del CCA requiere un cambio sistémico, una realidad que no siempre se tiene en cuenta.

10. Los efectos de la acción van a notarse a corto plazo

Los efectos la sustitución de los CFC, que destruían la capa de ozono, por otros gases comenzaron a notarse en un corto espacio de tiempo y se espera que a lo largo de este siglo, si no surgen contratiempos⁵, la capa de ozono se recupere totalmente. Sin embargo, en el caso de los gases de efecto invernadero (GEI) —al contrario de lo que puedan pensar muchas personas—, no va a ser así. De hecho, aunque dejásemos de emitir GEI de forma total e inmediata, los efectos de tal medida tardarían muchos años en percibirse. Esto se debe, fundamentalmente, a dos razones. En primer lugar, a la larga vida en la atmósfera del CO₂ y de otros GEI, lo que hace que estos gases tarden centenares de años en desaparecer. En segundo lugar, a la gran inercia térmica de los océanos⁶. Como ya hemos señalado, la mayor parte (más del 90 %) del exceso de energía acumulada en el planeta desde los inicios de la era industrial, se encuentra en los mares y océanos que cubren las tres cuartas partes del globo; por lo que, aunque de repente cesara la emisión de gases invernadero a la atmósfera, el mar todavía tardaría muchos años en enfriarse y volver a su situación previa al calentamiento global.

⁵ En un reciente estudio científico (Solomon, S., Stone, K., Yu, P., et al., 2023), se demuestra que el humo en la estratosfera procedente de los grandes incendios, junto con moléculas de HCl y O₂ también allí presentes, desencadena una serie de reacciones que activan especies reactivas de cloro, como el radical ClO*, cuyo efecto es aumentar las tasas de pérdida de ozono (O₃). Esto ya ha sido observado. Si el efecto invernadero sigue aumentando y con él aumentan también los megaincendios, emitiendo miles de toneladas de humo a la atmósfera, cabe temer que se produzca un retroceso en la recuperación de la capa de ozono que protege de la radiación ultravioleta y que esta vuelva a adelgazar, no solo en las regiones polares sino también en latitudes medias, afectando a numerosos países (entre ellos España).

⁶ Gran inercia térmica significa que el agua tarda mucho en calentarse y también mucho en enfriarse.

Naturalmente, a pesar de los inconvenientes señalados, es preciso tomar medidas urgentes de mitigación y adaptación. Al mismo tiempo, resulta imperativo reducir drásticamente las emisiones de CO₂ y proceder a secuestrar de la atmósfera parte del que ya se ha emitido, siempre que la tecnología permita hacerlo de forma respetuosa con el medio ambiente (Kivi, I.R. et al., 2022). Todo ello —reducción de emisiones, mitigación y adaptación— resulta absolutamente necesario, puesto que si bien estas medidas no evitarán que determinados parámetros como la temperatura media global o el nivel del mar sigan aumentando durante un tiempo, sí permitirán que lo hagan sin sobrepasar límites insostenibles.

11. Los gobernantes no ponen en marcha las medidas necesarias

Formar ciudadanos bien informados, responsables y con capacidad crítica es algo que requiere muchos años de instrucción escolar. Sin embargo, en las democracias los gobernantes pueden cambiar cada cuatro o cinco años. En consecuencia, muchos de ellos, a fin de conservar el poder, no se atreven a elaborar las leyes adecuadas ni a aplicar de forma generalizada determinadas medidas que contribuyan a evitar el aumento del efecto invernadero, tales como frenar el hiperconsumo, disuadir del uso del coche particular, o facilitar y promover el uso de energías renovables. Medidas que pueden contrariar a sus votantes, así como a los poderosos mercados y a los grupos de comunicación que les sirven. Recientemente, en un interesante artículo de opinión⁷, el profesor Joan Romero se refería a este problema afirmando que el «tiempo político», que en democracia suele ser de unos cuarenta y ocho meses, prevalece sobre un «tiempo ecológico», que se mide en décadas e incluso siglos. Esto condiciona las agendas ambientales y menoscaba el derecho de las generaciones que todavía no tienen derecho al voto, a un planeta habitable. Por eso, precisamente, es absolutamente necesaria una educación ciudadana que permita no solo aceptar esas medidas, sino reclamar colectivamente su aplicación a tiempo.

Por otra parte, no se puede ignorar el importante papel que tienen los conflictos bélicos, los cuales obligan a los gobernantes de los países implicados a ignorar o posponer la puesta en marcha de medidas con las que afrontar eficazmente el CCA; ni tampoco el hecho de que, por desgracia, existan gobernantes de países muy poderosos que directamente niegan el problema y promueven incluso medidas y leyes que directamente lo agravan, mostrando una clara vinculación con la industria de los combustibles fósiles, cuyas empresas suelen realizar importantes donaciones para favorecer sus campañas electorales. Otro dato importante es que muchos gobiernos siguen subvencionando los combustibles fósiles con billones de dólares anuales, lo cual es una clara contradicción con los acuerdos de París, ya comentados.

12. Auge de populismos y nacionalismos

El éxito de los populismos y nacionalismos que, desde la segunda década del siglo XXI, se extienden por diversos países de Europa y del resto del mundo, está favoreciendo el desarrollo de posturas individualistas que chocan con los acuerdos multilaterales para frenar el cambio climático. La Agenda 2030, por ejemplo, suele ser denostada y repudiada sin titubeos por parte de todos los grupos conservadores nacional-populistas de la Unión Europea; los cuales generan discursos negacionistas sobre el CCA basados en perspectivas acientíficas y teorías conspirativas, cuestionando los compromisos internacionales para afrontar el problema y acusando a sus promotores de querer transformar los modos de vida tradicionales. Algunos de estos colectivos hablan, incluso,

⁷<https://www.levante-emv.com/opinion/2024/09/01/cambio-climatico-en-valencia-puertas-infierno-107593880.html>

de «camelo» climático y de imposiciones ideológicas en nombre de la «religión» climática (Bosch, J. 2024). La voluntad manifestada y llevada a la práctica por Donald Trump, en sus dos mandatos como presidente, de retirar a los Estados Unidos de los Acuerdos de París, es un ejemplo paradigmático de estas políticas ultraconservadoras, en las que se priman los intereses particulares cortoplacistas sobre los intereses comunes. Además, este tipo de propuestas nacionalistas, impulsadas por potencias de tanto peso, anima a otros países a ser menos colaborativos en la lucha contra el CCA; un asunto, sin embargo, en el que la colaboración y los consensos amplios son absolutamente necesarios. A este respecto, es obligado considerar que los países con menor nivel de desarrollo, son precisamente quienes más sufren las consecuencias del CCA, pese a que históricamente son los que menos gases de efecto invernadero han emitido a la atmósfera. Por eso es necesario que desde las naciones más ricas, se les brinde apoyo suficiente para que puedan cumplir las medidas que de forma colectiva se acuerden, sin que ello suponga una renuncia a mejorar las condiciones de vida de su población.

13. El miedo y la desesperanza

La comunicación sobre el cambio climático, tal y como se señala en Heras (2018), contiene unos elementos emocionales que no pueden ser ignorados, ya que estos afectan notablemente a las reacciones personales y colectivas. Entre dichos elementos, destacan el miedo y la desesperanza. Durante los últimos años, en los medios de comunicación se ha multiplicado la difusión de imágenes catastrofistas (sequías, grandes incendios, inundaciones, deforestación, etc.) asociadas al cambio climático, mientras que se incide menos en las medidas y acciones que necesariamente hay que llevar a cabo para afrontar el problema de una forma efectiva. La reiteración de tales imágenes hace que éstas causen menos impacto emocional y que el miedo a las graves consecuencias del cambio climático sea cada vez menos eficaz como estrategia de concienciación. No cabe duda de que una cierta dosis de temor es inevitable, pero ese temor debe ser consecuencia del conocimiento del problema y actuar como un resorte que potencie los comportamientos (individuales y colectivos) más positivos. Por ello, con vistas a la lucha contra el CCA y sus consecuencias, sería más efectivo descartar la estrategia del miedo, haciendo más hincapié en las medidas para afrontarlo, y presentar estas como un reto colectivo en el que todos hemos de involucrarnos, mostrando los beneficios de todo tipo (económicos, sociales, ambientales, de salud, de bienestar, etc.) que ello conlleva para toda la población y la biosfera en general.

Por otro lado, aumenta el número de personas (incluyendo políticos y veteranos activistas medioambientales) que, por distintas razones, piensan que ya es demasiado tarde para evitar que se produzcan efectos catastróficos e irreversibles. Esta idea es igual de engañosa que el negacionismo extremo (en claro retroceso) o que el negacionismo disfrazado en forma de siembra de dudas e incertidumbres (mucho más presente). En primer lugar, porque aún no es demasiado tarde (Escrivá, 2021) y, en segundo lugar, porque la extensión de la desesperanza y del pesimismo conduce, en demasiadas ocasiones, al mismo resultado que las actitudes negacionistas; es decir, a la inacción; y eso es algo que la humanidad no puede permitirse. Los mensajes son, sin duda, diferentes: unos niegan o cuestionan la existencia del problema, los otros niegan la existencia de soluciones; pero ambas posturas son igualmente perjudiciales en lo que se refiere a la lucha contra el CCA.

14. Afrontar el cambio climático es demasiado caro

Otra idea que también conduce a la inacción frente al cambio climático es pensar que el coste económico necesario, para impulsar y desarrollar las medidas más adecuadas con las que enfrentarse eficazmente a este problema, es tan grande que resulta inasumible. Sin embargo, de acuerdo con el historiador Yuval Noah Harari⁸, existen muchos estudios en los que se demuestra que esto no es así. En efecto, ya en 2018, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su histórico informe (IPCC, 2018), afirmaba que para limitar el calentamiento a 1,5 °C (y evitar así efectos medioambientales catastróficos a escala planetaria), las inversiones anuales en energía limpia debían aumentar hasta aproximadamente el 3 % del PIB mundial. Otros organismos y grupos de trabajo han llegado a conclusiones similares. Así, la Agencia Internacional de la Energía señala que, para lograr una economía con cero emisiones netas de carbono, bastaría con invertir un 2 % del PIB mundial anual más de lo que ya gastamos en nuestro sistema energético. Para tener una idea clara de lo que suponen estas cifras, conviene tener presentes algunos datos como, por ejemplo, que en 1945 Estados Unidos dedicó casi el 36 % del PIB a ganar la Segunda Guerra Mundial, o que durante la crisis financiera de 2008-2009 gastó alrededor del 3,5 % del PIB en el rescate de las instituciones financieras consideradas «demasiado grandes para quebrar». En resumen, el precio de hacer lo correcto para frenar de forma eficaz el CCA supone invertir un mínimo porcentaje del PIB mundial anual.

En un reciente estudio del Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático (PIK), publicado en la revista *Nature*, se afirma que la economía mundial, debido fundamentalmente al calentamiento global, se ve abocada a una reducción de ingresos del 19 % en los próximos 26 años y que esos daños ya superan en seis veces los costes de mitigación necesarios para limitar el aumento de temperatura media global a 2 °C (Kotz, Levermann y Wenz, 2024). Finalmente, conviene subrayar que la idea de que desarrollar las medidas necesarias para frenar el CCA y mitigar sus graves consecuencias es económicamente inabordable, no solo es errónea, sino que también se utiliza interesadamente como estrategia para justificar no hacer más cosas (y mejor) para afrontar el problema.

15. Ecoimpostura y Conspiración verde

La ecoimpostura, lavado verde o *greenwashing* son términos que se utilizan para designar aquellas acciones que llevan a cabo grandes empresas u otras entidades con el propósito de convencer de que sus medidas para disminuir el impacto medioambiental que genera su actividad principal son mucho más efectivas de lo que resultan ser en realidad. Esta ecoimpostura utiliza técnicas de marketing, a través de las redes sociales y medios de comunicación en general, mediante las cuales muchas empresas y grandes corporaciones internacionales, conscientes de la creciente preocupación que por el medio ambiente tiene una gran parte de la población mundial, intentan lavar su imagen o, mejor dicho, darle un tono más «verde» presentándose como entidades respetuosas con la naturaleza, con el fin de ocultar o restar importancia a las prácticas insostenibles que desarrollan como actividad principal. De esta forma, se aseguran de no disminuir sus ventas y de sortear posibles trabas y mecanismos de control por parte de diversos organismos reguladores que puedan limitar seriamente su actividad y recortar sus enormes beneficios. El hecho de que dos de las últimas cumbres sobre el cambio climático, se hayan celebrado en países productores de tanto petróleo como Dubái (COP28) y Azerbaiyán (COP29) puede percibirse también como una gran ecoimpostura.

⁸ Ved artículo original (La solución del 2 % para frenar la crisis climática), en *El País*, 23 de enero de 2022

Sabemos que para evitar un aumento de la temperatura media global que produzca efectos climáticos irreversibles y catastróficos para toda la biosfera, las emisiones de GEI deben reducirse drásticamente. La extensión de la ecoimpostura a través de redes sociales y medios de comunicación engaña a consumidores y a la opinión pública en general, debilitando una mayor implicación para que esa necesaria reducción de emisiones (que afecta a sectores como la alimentación, la industria, el transporte, etc.) se produzca a tiempo.

Son muchas las empresas que han sido denunciadas por ecoimpostura en sus campañas de marketing. A modo de ejemplo, se pueden citar gigantes de la industria de la moda (como la española Inditex o la sueca H&M) y petroleras (como la española Repsol o la francesa TotalEnergies). De acuerdo con la investigación de la Universidad de Harvard encargada por Greenpeace (*Three shades of greenwashing*), empresas como estas destinan miles de millones a su lavado verde en redes sociales como X (antigua Twitter), Instagram, TikTok o YouTube, convertidas en el nuevo escenario de la desinformación y el engaño sobre la crisis climática (Supran y Hickey, 2022). Los resultados de dicha investigación muestran que las empresas más responsables del calentamiento global utilizan imágenes y mensajes publicitarios diseñados *ex profeso* para posicionarse estratégicamente como marcas verdes, innovadoras y socialmente responsables. De hecho, el órgano autorregulador de la industria de la publicidad en el Reino Unido (*Advertising Standards Authority*) prohibió a Repsol un anuncio en el que se generaba la falsa impresión de que esta empresa está dando prioridad a la producción de energía de bajas emisiones cuando, en realidad, su actividad principal y absolutamente mayoritaria sigue siendo la producción de combustibles fósiles.

Por el contrario, la conspiración verde (o *greenblaming*) es una parte esencial del discurso de los movimientos de ultraderecha, mediante la que se atribuye la culpa de toda una serie de problemas de nuestra sociedad a determinadas leyes y regulaciones medioambientales. Para ilustrar qué implicaciones tiene este discurso en la lucha contra el cambio climático, se puede tomar como ejemplo algunos hechos ocurridos durante las protestas agrarias que se desarrollaron al comienzo del año 2024 en varios países europeos (entre ellos España). En palabras del eurodiputado Javi López (miembro de la Comisión de Medio Ambiente, Salud Pública y Seguridad Alimentaria, del parlamento europeo), en un artículo de opinión publicado en el diario El País⁹, en dichas protestas se mezclaban reivindicaciones legítimas con otras que solo pueden calificarse de «greenblaming paranoico». De acuerdo con el profesor López, las primeras son de obligada defensa y deberían suscitar un elevado consenso. Entre ellas, se pueden citar: el garantizar unos precios justos en todos los eslabones de la cadena alimentaria y en particular en el sector primario, evitar la competencia desleal y trabajar para que todos los tratados comerciales contemplen unas buenas condiciones de producción, revisar la Política Agrícola Común para que las ayudas lleguen con facilidad a los pequeños productores que más las necesitan, y dejen de ser una suculenta subvención a grandes terratenientes y poderosos grupos empresariales, etc. Pues bien, el hecho es que, a través de redes sociales y algunos importantes medios de comunicación, lo que más se visibilizó no fueron precisamente esas legítimas reivindicaciones, sino mensajes y proclamas culpando de los problemas agrarios al Pacto Verde Europeo, a la ley del cambio climático y transición energética, a las limitaciones a cultivar en zonas declaradas como protegidas, etc. En España, se pudo ver, incluso, alguna pancarta culpando a la Agenda 2030.

⁹ <https://elpais.com/opinion/2024-02-28/la-culpa-la-tiene-la-conspiracion-verde.html>

16. Proliferación de bulos climáticos

La lucha contra el cambio climático suele ser cuestionada y denostada principalmente a través de las redes sociales. En estos espacios, donde a menudo no existen verificadores, los bulos de todo tipo se expanden con extraordinaria rapidez. En cambio, desmontar estas ideas falsas, lamentablemente, requiere mucha más energía y mucho más tiempo que lanzarlas y propagarlas. De hecho, se pueden utilizar las mismas redes sociales para rebatirlas, pero el combate está amañado de antemano, puesto que los algoritmos que determinan el funcionamiento de dichas redes han sido expresamente diseñados para priorizar y favorecer temáticas que generan polarización y que encajan en marcos ultraconservadores (Bosch, 2024). A lo largo de este apartado, se ha hecho ya referencia al papel de las redes sociales como altavoces con los que difundir noticias falsas, mentiras y medias verdades, para potenciar el negacionismo, la duda y la desinformación en torno al cambio climático y sus efectos.

Un bulo, ya clásico, es creer que las estelas de condensación dejadas por aviones contienen productos químicos dispersados por los gobiernos (u otras entidades) con propósitos oscuros, como el *control del clima* o la manipulación de la población. Se trata de una más de las denominadas «teorías conspiranoicas» que, a pesar de lo absurda que resulta, se halla ampliamente difundida. Como es lógico, no hay ninguna evidencia que la respalde. Dichas estelas se deben principalmente a la condensación y sublimación del vapor de agua del aire y al que se genera como resultado de la combustión de los hidrocarburos presentes en el combustible de dichos aviones. Para más detalle acerca de este bulo en concreto (y varios más), recomendamos el video del físico y divulgador científico José Miguel Viñas¹⁰, en el que explica cómo estas estelas son consideradas actualmente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), como un tipo de nubes (*Cirrus homogenitus*). También es muy recomendable la lectura del libro de Isabel Moreno «Atmósfera de bulos» (Moreno, 2025).

Este tipo de desinformación se potencia en situaciones de crisis. Tras la reciente DANA que asoló la provincia de Valencia en octubre de 2024, entre los bulos que circularon por las redes sociales, destacaba uno en el que se afirmaba, que ese inmenso desastre climático se debió a un ataque de ingeniería climática efectuado por Marruecos con el fin de perjudicar al sector agrícola español.

Existe preocupación generalizada por toda la desinformación que circula por las redes sociales. Como ya hemos comentado, la efectividad con que se difunden falsedades por estos medios se debe principalmente al hecho de que sus algoritmos priorizan este tipo de mensajes. A esto hay que añadir que el contexto de las redes sociales y el hecho de compartir de forma inmediata noticias falsas e impactantes por millones de personas predisponen a creer en su veracidad, por muy absurdas que sean (Epstein et al., 2023). Ante esta situación es muy conveniente, ante cualquier duda o sospecha, recurrir a plataformas de *fact-checking* climático como *Climate Feedback*, la red europea *Climate Facts* o la sección de ciencia de la fundación *Maldita.es*.

Los avances en el conocimiento científico del CCA exigen la elaboración de modelos y la realización de cálculos de una complejidad tal que solo los grandes ordenadores pueden realizar. Sus resultados nos alertan de una catástrofe sin precedentes. Paradójicamente, al mismo tiempo, en millones de otros dispositivos —fundamentalmente teléfonos móviles—, las redes sociales y los algoritmos que las gobiernan potencian vídeos y mensajes que niegan o plantean dudas acerca de esa alerta. Toda esta desinformación acerca del cambio climático hace crecer la incertidumbre y

¹⁰ Se puede acceder en: <https://www.youtube.com/watch?v=old2HFDOwtA>

su rápida expansión hace temer que pronto se convierta en el mayor obstáculo para la acción climática. Esta preocupante situación contribuyó, sin duda, a que en la COP30 se incluyese, por primera vez en la historia de estas cumbres climáticas, un acuerdo que marca la **integridad de la información** como una prioridad. Esto supone fortalecer la protección a investigadores y periodistas, apoyar un ecosistema mediático diverso y asegurar el acceso equitativo a información precisa y basada en evidencias.

En nuestra opinión, para poder garantizar la integridad de la información climática (y de la información en general), es necesario cambiar esos algoritmos que priorizan la difusión de bulos y falsedades por otros en los que se priorice la verdad, al mismo tiempo que se impulsa la educación ambiental en todos los niveles educativos y se promulgan leyes específicamente diseñadas para evitar esta situación.

17. Declive del multilateralismo y retorno a la política de fuerza

El panorama internacional actual nos sitúa ante un reto de dimensiones sistémicas. No es exagerado afirmar que el mundo ha entrado en un periodo de extrema gravedad. El inicio de 2026 ha quedado marcado por un debilitamiento crítico del multilateralismo, el cual está siendo desplazado por un preocupante auge del uso de la fuerza y la coacción en las relaciones internacionales. Eventos recientes, como la intervención militar en Venezuela, las tensiones territoriales sin precedentes —incluyendo amenazas de anexión sobre Groenlandia—, y la reactivación de conflictos en el corazón de Europa y en Oriente Medio, dibujan un inquietante mapa de inestabilidad global. A esto se suma la retirada de Estados Unidos de organismos internacionales y tratados climáticos fundamentales, como el Acuerdo de París.

Ante esta situación, conviene recordar que en ausencia de autoridades y normas supranacionales respetadas por todos, los Estados tienden a operar en lo que Thomas Hobbes denominaba el «estado de naturaleza»: un escenario de desconfianza sistémica donde la competencia y la guerra de «todos contra todos» prevalecen. En efecto, si el multilateralismo es la herramienta que permite a las naciones abordar problemas comunes mediante leyes vinculantes y soluciones pacíficas, su colapso nos devuelve a la anarquía internacional. En este escenario, la supervivencia inmediata y la seguridad nacional (el «yo» estatal) aplastan cualquier consideración sobre el bienestar global a más largo plazo (el «nosotros» planetario).

Ante un retroceso como el que acabamos de describir, es imperativo preguntarse de qué forma afectará este al desarrollo de medidas efectivas para afrontar el CCA. El impacto es, a nuestro juicio, profundo y se manifiesta en varias vertientes críticas, tales como:

- Desvío de recursos y el retroceso energético: la paz es el principal activo para avanzar en la sostenibilidad. En una dinámica belicista, los presupuestos sufren una mutación regresiva que provoca que los recursos financieros, tecnológicos y humanos se trasvasen con urgencia hacia sectores relacionados con la defensa militar. Pero el daño no es solo presupuestario. En efecto, la inflación y la escasez de materias primas derivadas de los conflictos están empujando a los Estados a priorizar la autarquía energética sobre la descarbonización. Lo vimos tras la invasión de Ucrania, cuando las tensiones en el suministro de gas ruso forzaron a países como Alemania o el Reino Unido a reactivar centrales térmicas de carbón o a conceder nuevas licencias de prospección petrolífera en el mar del Norte, sacrificando temporalmente las metas de emisiones de GEI en favor de la seguridad energética inmediata.

- Apagón Científico: la retirada de Estados Unidos de 66 organizaciones internacionales (31 de ellas vinculadas a la ONU) trasciende lo meramente político; supone un golpe demolidor a la infraestructura global de datos científicos. Organizaciones como la OMM (Organización Meteorológica Mundial), el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), o los programas de vigilancia satelital de la NASA y la NOAA (Oficina Nacional de Administración atmosférica y Oceánica), son vitales para monitorizar la evolución del sistema climático. Este desmantelamiento institucional conlleva recortes presupuestarios y despidos masivos de investigadores, provocando lo que algunos denominan un «apagón científico»; ya que, sin el flujo constante de datos compartidos, la comunidad internacional pierde sus «ojos» sobre el calentamiento global, dificultando la cooperación, la toma de decisiones conjuntas y la verificación de acuerdos entre las partes.
- Ruptura de la confianza: el cambio climático es un problema global que requiere de una acción colectiva y sin fisuras. Si un Estado percibe que sus intereses nacionales pueden verse amenazados por el uso de la fuerza, la imposición de aranceles unilaterales o sanciones económicas arbitrarias que vulneren la legalidad internacional —incluso por parte de supuestos aliados—, el incentivo para cooperar se debilita. Esta atmósfera de hostilidad empuja a las naciones a priorizar su seguridad inmediata y a desatender sus compromisos de reducción de emisiones de GEI. La cooperación climática se sustenta en la transparencia y la verificación mutua; valores incompatibles con un escenario de desconfianza donde las reglas del juego se rompen unilateralmente.
- Debilitamiento del derecho internacional y de organismos supranacionales: La restauración de la diplomacia y el multilateralismo, con el fortalecimiento de instituciones como la ONU y la Organización Mundial del Comercio (OMC) —que debe integrar criterios verdes en el intercambio global— no es algo opcional, sino una condición *sine qua non*. En un marco donde no se respeta el derecho internacional ni las recomendaciones de los organismos que conforman el sistema global de ciencia, gobernanza y cooperación internacional para temas como la paz o el cambio climático, el desarrollo de las medidas para avanzar hacia un futuro sostenible no tiene ninguna posibilidad de éxito.

En resumen: no podemos enfriar el planeta en un clima de guerra fría (o caliente). La construcción de un futuro sostenible es, por definición, una tarea de paz. Sin una voluntad de cooperación que trascienda las fronteras y los arsenales armamentísticos, la lucha contra el CCA está abocada al fracaso.

Este decimoséptimo factor, por otra parte, no es una pieza aislada del conjunto. Por el contrario, es un catalizador que potencia a la mayoría de los anteriores. En efecto, el declive del multilateralismo refuerza el individualismo, alimenta el auge de populismos y nacionalismos y da alas al negacionismo y a los bulos climáticos, al presentar la agenda verde como una «conspiración exterior» o una debilidad frente al enemigo. *Se puede ampliar este aspecto pidiendo a los estudiantes que busquen más relaciones entre otras explicaciones y que, finalmente, se pronuncien respecto a la importancia relativa que les atribuyen en cuento a su capacidad de actuar como un obstáculo que dificulta el desarrollo y puesta en práctica de las medidas necesarias para afrontar el CCA.*

En este último apartado hemos analizado algunas de las razones más importantes que explican por qué no estamos haciendo más de lo que hacemos (y mejor), para enfrentarnos al problema del CCA y mitigar sus graves consecuencias antes de que sea demasiado tarde para evitar cambios catastróficos e irreversibles a escala planetaria.

Para terminar, queremos insistir en que dichas razones no han de verse como elementos que justifican la inacción, sino como verdaderos obstáculos a superar. Una conclusión clave es que estos obstáculos no constituyen compartimentos estancos, sino que se hallan interconectados y se potencian entre sí; por ello, para afrontar el cambio climático de forma eficaz, es imprescindible su tratamiento urgente, conjunto y en todos los ámbitos: social, político, económico y educativo. El éxito de dicho tratamiento dependerá fundamentalmente de que se perciba el CCA como lo que realmente es: un problema global y absolutamente prioritario que afecta no solo a las generaciones actuales, sino también a las futuras, las cuales no entenderían que, teniendo los medios y el conocimiento, no hiciéramos todo lo necesario para frenarlo y mitigar sus efectos, protegiendo así su derecho a un planeta habitable.

CUESTIONES, EJERCICIOS Y PROBLEMAS

Nota previa: La mayoría de las actividades siguientes no tienen una respuesta numérica sino que han sido propuestas para favorecer el debate y la discusión argumentada a la luz de lo tratado en el tema.

1. ¿Es peligroso el efecto invernadero? Diferencias entre efecto invernadero, aumento del efecto invernadero y cambio climático.
2. Actualmente ya hay coches eléctricos en el mercado. Dado que el tráfico a motor es responsable de una parte muy considerable de las emisiones no naturales de CO₂ a la atmósfera, si la gran mayoría de los vehículos fuesen eléctricos (varios gobiernos europeos ya han aprobado medidas para conseguir este objetivo antes de 2050) ¿podría solucionarse el problema del aumento del efecto invernadero?
3. Dicen que el uso de combustibles como el biodiesel no aumenta la cantidad de CO₂ existente en la atmósfera. Sin embargo, en Química se estudia que al quemar estos productos siempre se produce CO₂. ¿No es algo contradictorio? Por otra parte, suponiendo que no se de ese aumento, ¿habría algún posible inconveniente para impulsar el uso de este tipo de combustibles a gran escala?
4. Aunque no seamos capaces de reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, los combustibles fósiles acabarán por agotarse y a partir de ese momento la concentración de CO₂ en la atmósfera debería comenzar a disminuir gracias a la fotosíntesis de las plantas, con lo que los problemas medioambientales creados se irían solucionando poco a poco de forma natural. ¿Es así?
5. Algunos expertos en sostenibilidad afirman que los graves problemas que aquejan a nuestro planeta están conectados unos con otros formando una especie de red y que eso hace imposible que, por ejemplo, el calentamiento global, pueda ser tratado separadamente de los demás problemas. Es necesario aclarar esto, ya que mucha gente puede no entender, por ejemplo, qué tiene que ver la miseria en la que vive una gran parte de la humanidad con la emisión creciente de CO₂ por industrias y vehículos en los países más desarrollados, o los conflictos bélicos con el cambio climático, etc. Por otra parte, si se tratase de solucionar la miseria de miles de millones de personas... ¿no se potenciaría más todavía dicha emisión?
6. Para no emitir tanto CO₂ a la atmósfera debemos consumir menos pero... si reducimos mucho el consumo entramos en crisis económica, se cierran empresas y se pierde empleo. ¿No sería mejor entonces no combatir el cambio climático y tratar de adaptarnos a él?
7. Vamos a suponer que todos los gobiernos del mundo se pusieran de acuerdo en una serie de medidas económicas y medioambientales, para afrontar el cambio climático. ¿Podrían tener éxito si la población mundial continuase aumentando al mismo ritmo con que lo hace ahora?, (según datos de Naciones Unidas, unos 80 millones más de habitantes cada año, entre 1990 y 2020).
8. Algunos afirman que la Comunidad Valenciana es una de las comunidades españolas que emite menos CO₂ a la atmósfera, debido a que gran parte de la electricidad que consumimos proviene de la central nuclear de Cofrentes, situada a solo 80 km de Valencia. ¿Puede la energía nuclear ayudar a solucionar el problema del cambio climático? Por ejemplo, Francia, que tiene muchas más centrales nucleares que España ¿cuánto CO₂ menos emite (por habitante y año) que otros países similares? Debatid la cuestión dando argumentos a favor y en contra.

9. ¿Es verdad que el consenso entre la comunidad científica, acerca de que el cambio climático actual está causado fundamentalmente por los seres humanos, es prácticamente total? En las redes sociales e internet... se difunden a menudo noticias de gente que niega el cambio climático. ¿A quién hemos de hacer caso? Si los científicos han mostrado claramente la gravedad de la situación ¿por qué la ciudadanía no reacciona?

10. En la película “El día de mañana” el científico protagonista explica la entrada en una nueva era glaciaria en el hemisferio norte, por la incorporación masiva de agua dulce procedente del deshielo, que paraliza la Corriente del Golfo. Este mismo efecto, se sugiere que podría tener lugar, en el documental de Al Gore “Una verdad incómoda” si se fundiesen los hielos de Groenlandia. ¿Podría realmente ocurrir esto? ¿Qué es lo que ya está ocurriendo con las corrientes oceánicas y por qué?

11. En algunos textos y documentales sobre el calentamiento global se menciona que nos queda poco tiempo para evitar que se produzcan graves cambios de carácter irreversible en nuestro planeta. Los científicos advierten también de la necesidad de evitar que la temperatura media global aumente en solo dos grados con respecto a la que había al inicio de la era industrial. A veces da la sensación de que nos amenazan con el fin del mundo ¿No se está exagerando? ¿Tanto influyen un par de grados más?

12. El CH₄ es un gas invernadero unas 28 veces más potente que el CO₂ y el vapor de agua es quien más contribuye al efecto invernadero en nuestro planeta. Además, siempre que se queman hidrocarburos no solo se produce CO₂ sino también H₂O. ¿Por qué, entonces de quien más se habla es del CO₂?

13. Los expertos sobre cambio climático se refieren, a veces, a procesos de retroalimentación que pueden desencadenar cambios grandes y abruptos en el clima. ¿Hasta qué punto esto es así? ¿Podría afectar, a nosotros o a nuestros hijos, alguno de estos cambios? El aumento de la temperatura media global será necesariamente lento (la Tierra es muy grande), así que cabe plantearse si no habrá tiempo para ir adaptándonos a las nuevas condiciones.

14. Según la mayoría de los gobiernos de la Comunidad Europea es urgente acordar estrategias conjuntas para luchar contra el cambio climático. Entonces... ¿Por qué no se han tomado ya una serie de medidas efectivas a nivel europeo como, por ejemplo, la obligación de que todo nuevo edificio disponga de paneles solares? Es más, ¿Por qué el gobierno español entre 2012 y 2018 desarrolló una política energética en contra del uso de las energías renovables poniendo, por ejemplo, obstáculos muy serios al autoconsumo? ¿Qué cambios en cuanto al uso de la energía se han propuesto posteriormente y cuáles se han podido desarrollar?

15. ¿Podrán todos los países soberanos someterse a un procedimiento de control y decisión internacional con una serie de medidas que afecten a sectores estratégicos para su desarrollo, como la energía, el transporte o la agricultura? Los precedentes no son muy optimistas (haced una revisión crítica de las conclusiones de los encuentros internacionales ya celebrados o en marcha y de los países que no están dispuestos a cumplir lo que allí se acuerde).

16. Cuáles son las principales razones por las que los jóvenes (y el resto de la sociedad) deberíamos preocuparnos por el problema del cambio climático antrópico. ¿En qué nos va a afectar concretamente?

17. Un problema tan enorme e importante como es el del cambio climático, ¿no es responsabilidad de las grandes industrias y de los políticos?, ¿qué importancia puede tener lo que cada uno de nosotros haga o deje de hacer?

18. Seguro que la ciencia acabará encontrando la manera de resolver el problema del cambio climático, igual que ha resuelto ya muchos otros, entonces ¿para qué preocuparnos?

19. ¿Cuáles son los problemas más preocupantes a los que se enfrenta la humanidad? ¿Cuál habría que empezar a resolver prioritariamente? ¿Se puede hacer de forma aislada (primero uno, luego otro, etc.)?

20. En una situación de crisis económica y financiera, la puesta en práctica de medidas adecuadas con las que afrontar problemas tan graves como el cambio climático, la contaminación o el agotamiento de recursos naturales, es vista por muchos dirigentes como un obstáculo a la salida de dicha crisis, para la que no ven otra solución que reactivar el consumo, volviendo a las tasas de crecimiento anteriores. Sin embargo, también hay quienes afirman que esa crisis constituye una buena oportunidad para reconsiderar el modelo económico vigente, basado en los combustibles fósiles y en el hiperconsumo, y comenzar a cambiarlo por otro basado en energías renovables, nuevas tecnologías y sostenibilidad, que al mismo tiempo que crea nuevos empleos permita avanzar en la solución de esos problemas. Organizad un debate en el que se argumente a favor de una y otra postura.

21. ¿Por qué la atmósfera deja pasar la mayor parte de las radiaciones solares que la atraviesan y, sin embargo, atrapa y refleja en todas direcciones la mayor parte de la radiación que emite la Tierra hacia el espacio? Es decir: ¿Por qué el efecto invernadero se da principalmente en un solo sentido?

22. La sustitución de una bombilla incandescente de 100 W por otra moderna de bajo consumo evita la emisión de unas 0,5 toneladas de CO₂ al año. Calculad cuántas toneladas de CO₂ dejaron de emitirse por la sustitución de 10 millones de esas antiguas bombillas. Rdo. $5 \cdot 10^6$ t al año.

23. Una persona cambia una antigua bombilla incandescente de 60 W por otra equivalente de bajo consumo de 10 W. Suponiendo que esa bombilla esté encendida un total de 500 h al año y que cada kWh se pague a 0,20 euros. a) ¿Cuánta energía y cuánto dinero se ahorraría por ese pequeño cambio? b) ¿Y si en lugar de una sola persona fuesen 100 millones? Rdo. a) 25 kWh y 5 €; b) 2500 000 000 kWh y 500 000 000 €.

24. Según su distancia al Sol, la temperatura media de Venus debería ser 155 °C y la de Marte de -63 °C, mientras que las temperaturas medias reales son 447 °C y -55 °C. ¿A qué pueden deberse esas diferencias? (Se sabe que la atmósfera de Venus es muy densa y está formada aproximadamente por un 96% de CO₂ y un 3,5% de N₂, mientras que Marte tiene una atmósfera muy tenue).

25. ¿Por qué la deforestación favorece el efecto invernadero?

26. En las noches despejadas de invierno suele notarse que la temperatura baja bastante más que durante la misma época si el cielo permanece nublado. ¿A qué puede ser debido?

27. Los HFCs son gases invernadero en auge, debido a la creciente demanda mundial de aire acondicionado y refrigeración en general. Con este dato, proponed un posible ciclo de reforzamiento, similar a los que se han presentado al final del apartado 5 de esta unidad.

28. En 2025, una persona gastó de media al mes: 300 kWh de electricidad y 40 m³ de gas natural. Además hizo 20000 km con su todoterreno. También realizó un viaje de ida y vuelta Madrid-Shanghái en avión. ¿Cuántos kg totales de CO₂ supusieron ese año todas esas acciones?

Datos: Suponed que por cada kWh se han producido 376 g de CO₂. Cada m³ de gas natural quemado produce aproximadamente 2 kg de CO₂. El coche emite 230 g de CO₂ por cada km recorrido. En un avión de pasajeros (el vehículo que más CO₂ produce) se emiten aproximadamente unos 94,2 g de CO₂ por persona y kilómetro. Distancia Madrid-Shanghái es de 9217 km.

Rdo. 8650,1 kg de CO₂

29. Los datos siguientes han sido extraídos (excepto los últimos) del anexo II del V informe del IPCC. A partir de ellos, construid una gráfica que muestre la evolución histórica de la concentración de CO₂ atmosférico y haced una predicción de cuándo podría alcanzarse una concentración de 500 ppm si no actuamos y se sigue la tendencia plasmada dicha gráfica. Luego buscad en la bibliografía qué efectos puede tener aproximarse o sobrepasar dicha concentración.

Año	Concentración de CO ₂ en ppm	Año	Concentración de CO ₂ en ppm
1760	276,5	1920	303,3
1780	278,2	1940	310,4
1800	282,6	1960	316,7
1820	283,3	1980	338,0
1840	284,1	2000	368,7
1860	286,1	2021	416,0
1880	289,8	2022	417,9
1900	296,2	2024	422,7

30. Una cuestión especialmente importante es la percepción de la ciudadanía sobre el cambio climático y sus efectos. Para que esta se ajuste a la realidad, es necesario (entre otras cosas) conocer bien los bulos que al respecto circulan por las redes sociales y saber rebatirlos. Por ejemplo:

- Las estelas que dejan los aviones a reacción son en realidad productos químicos con los que los gobiernos están cambiando el clima.
- La DANA que asoló muchos pueblos de la provincia de Valencia el 29 de noviembre de 2024, fue enviada por Marruecos para perjudicar al campo español con el que rivaliza.
- El CO₂ apenas representa el 0,04% en la atmósfera y además es beneficioso para el crecimiento de las plantas. No se le puede atribuir que sea el causante de un calentamiento que obedece solo a causas naturales.

Os proponemos que forméis grupos de trabajo y realicéis una investigación respecto a estos bulos (y otros que ya conozcáis o nuevos que podáis encontrar), buscando información científica y argumentos para rebatirlos, así como organizaciones que se dedican sistemáticamente a desmentirlos. Después, haced una puesta en común en clase, exponiendo y debatiendo los resultados obtenidos por cada grupo.

31. Sabemos que una meta muy importante es que el aumento de la temperatura media en la superficie terrestre no supere los 1,5 °C respecto de la temperatura media en la época preindustrial. De acuerdo con los científicos del IPCC, para que esto se pueda lograr, se requiere una disminución en 2030 del 45% de las emisiones globales de CO₂ respecto de 2010.

En la tabla siguiente se reproducen algunos datos, obtenidos de la Agencia Internacional de la Energía, respecto a las emisiones mundiales de CO₂ (en gigatoneladas) debidas a la combustión de derivados del petróleo, gas y carbón para obtener energía y a procesos industriales, correspondientes a distintos años entre 1990 y 2023. (<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>).

- a) Utilizad dicha tabla para construir la gráfica correspondiente (colocad los años en abcisas y valores desde el 2000 hasta el 2030).
- b) Analizad cuál es la tendencia y completad la gráfica dibujando una posible evolución de las emisiones desde 2023 hasta 2030 en la que se cumpla el objetivo mencionado.
- c) ¿A qué pudo deberse la disminución de emisiones globales observada en 2020?

Año	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Gt	21,3	22,4	24,6	28,7	32,6	34,7	34,3	37,4

32. En la página siguiente se reproducen unos recortes de prensa, publicados hace ya bastantes años, sobre el cambio climático. Uno, alertando sobre la necesidad de realizar cambios radicales a nivel mundial, sin lo cual los daños ocasionados por el cambio climático, serán irreversibles. En el otro se comentan además algunas posibilidades de negocio que abre el cambio climático. Leed con atención ambos textos y luego debatid y argumentad en torno a las siguientes cuestiones: ¿A costa de qué y de quienes se obtendrán esos beneficios económicos? ¿Quiénes los obtendrán? ¿Podrán compensarse con ellos los daños de todo tipo ocasionados?

[El País](#). 15 de abril de 2014

Cuanto más tiempo pasa, peores son las predicciones sobre los efectos del cambio climático. Solo una acción decidida y radical a nivel mundial podrá asegurar que la temperatura no suba más de dos grados de aquí a finales de siglo. Esta es la enésima advertencia que lanza el panel científico de Naciones Unidas ante la pasividad que demuestra la comunidad internacional, y especialmente los países que más contaminan —Estados Unidos y China— frente al reto más importante que tiene el planeta. En un nuevo informe, en este caso sobre políticas a aplicar, el panel científico alerta de que no hay demasiado tiempo, pero si se toman decisiones valientes y radicales a nivel global, aún es posible evitar el desastre y mitigar los efectos, aunque no por completo pues las emisiones realizadas ya han provocado un aumento de temperaturas que está alterando el clima.

Sin esa determinación, las consecuencias se verificarán muy pronto: aumentarán los fenómenos meteorológicos extremos, que serán más frecuentes y más virulentos; la subida del nivel del mar provocará cuantiosos daños económicos, especialmente en los países insulares; las oleadas de calor y las inundaciones echarán a perder enormes extensiones de cultivo, con lo que las cosechas disminuirán hasta en un 50%; se producirán oleadas migratorias y enfrentamientos por los recursos, en particular por el agua, y veremos un nuevo fenómeno: el de los refugiados climáticos.

El cambio que reclama el panel de Naciones Unidas exige un nuevo acuerdo político que permita ir más allá del Protocolo de Kioto que, además de no haberse cumplido, se ha demostrado totalmente insuficiente. El nuevo acuerdo debe adoptarse en la cumbre prevista en París en 2015, para entrar en vigor a partir de 2020. Europa debe seguir siendo el gran impulsor del cambio. Su objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% respecto a 1990 debe generalizarse y, si es posible, aumentarse.

[El País](#). 24 de febrero de 2014

El año pasado un satélite de la Nasa registró en la Antártida 92,9° bajo cero. La segunda temperatura más baja de la historia. Incluso en los veranos marcianos, en sus polos, la climatología resulta más benigna. A la vez, el periodo que va de 1983 a 2012 el más cálido en 1400 años, según las conclusiones del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. En este mundo extremo, la [OCDE advierte](#) de que casi la mitad de la población mundial vivirá en 2030 en condiciones graves de estrés hídrico, algunos se preparan para hacer (mucho) dinero.

El calentamiento global aumenta la posibilidad de padecer alergias, incrementa los déficits nutricionales, multiplica la exposición de la población [a catástrofes ambientales](#) y enfrenta a millones de seres humanos al desabastecimiento de agua y alimentos. Frente a esta situación, la industria actúa de dos formas: adaptándose o innovando. Y ambas pueden ser muy lucrativas.

La previsible carestía de agua está provocando que cada vez más países e inversores acaparen tierras en África y Latinoamérica para asegurarse reservas acuíferas. La plataforma [Land Matrix](#) ya contabiliza 35,64 millones de hectáreas de tierras (casi cuatro veces el tamaño de Portugal) acaparadas en el mundo.

Como señala el periodista [McKenzie Funk](#), quien acaba de publicar *Windfall (The Booming Business of Global Warming)*: “el deshielo en el Ártico abre paso a la explotación de las petroleras y a nuevas rutas de navegación y comercio”, lo cual, a la vez, podría avivar la tensión geopolítica entre los países de la zona.

El cambio climático minará la producción mundial de alimentos. Compañías como Cargil, (negocio del grano), Monsanto (primer fabricante de semillas genéticamente modificadas), o Yara, (fertilizantes), obtienen ya beneficios récord”, avisa Devlin Kuyek, experto de la ONG Grain. Y advierte: “El control de las multinacionales resulta cada vez más extremo”.

ANEXOS

ANEXO I

IDEAS ALTERNATIVAS SOBRE CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL CAMBIO CLIMÁTICO. CUESTIONES PARA ANALIZAR SU INCIDENCIA

Jaime Carrascosa Alís

Entre una gran parte de la población, incluso en los mismos estudiantes de ciencias, se detectan con frecuencia una serie de ideas sobre algunos conceptos importantes relacionados con el problema del Cambio Climático, que son muy diferentes a las ideas científicamente aceptadas. La existencia de tales ideas alternativas o simplistas, supone un serio obstáculo para una formación adecuada en torno a este grave problema y, por tanto, para avanzar de forma más efectiva en la lucha contra el mismo. No son exactamente bulos, aunque los bulos también pueden ser fuente de estas ideas o contribuir a consolidarlas.

El origen de este tipo de ideas seguramente es diverso. Puede estar ligado al tratamiento, habitualmente superficial, que se suele hacer en los medios de comunicación cuando se refieren a estos temas. También es posible que el estudio del cambio climático no se contemple adecuadamente en los currículos escolares o que, por falta de tiempo u otras razones, no se le dedique en clase la atención necesaria.

En este anexo, comentaremos brevemente algunas de tales ideas para proponer, a continuación, una serie de cuestiones específicas con las que se puede analizar su extensión y su implantación entre estudiantes de distintos niveles educativos.

1. El hielo flotante cuando se funde y se convierte en agua líquida hace subir el nivel de agua líquida previamente existente.

Esta idea lleva a pensar que la fusión de la enorme masa de hielo flotante que hay en los océanos Ártico y Antártico produciría un gran aumento en el nivel del mar, lo cual es científicamente incorrecto ya que el efecto directo provocado por dicha fusión en el nivel del mar sería casi despreciable. Hemos dicho casi despreciable y no cero o nulo, porque junto con la idea alternativa expuesta, coexiste otra (esta entre personas con mayor formación científica) según la cual el volumen del agua líquida resultante de esa fusión es idéntico al volumen de hielo sumergido y, por tanto, solo por causa de esa fusión el nivel del mar no se vería directamente alterado. Esta segunda idea, solo es científicamente aceptable en el caso de masas de hielo flotantes en agua dulce, pero no lo es en lo que se refiere a masas de hielo flotante (sea cual sea su origen) en el mar donde, aunque el aumento sea muy poco, no es nulo. Fijémonos que estamos hablando de aumento del nivel del mar debido directamente al cambio de estado de hielo a agua líquida, ignorando otros efectos que se producirían como un aumento en la temperatura del agua y su consiguiente dilatación térmica. (Ved los detalles en el siguiente anexo 2).

2. El gas que más contribuye al efecto invernadero es el dióxido de carbono y el que menos contribuye es el vapor de agua.

Posiblemente esta idea se debe a no distinguir dos cosas claramente distintas: el efecto invernadero y el aumento del efecto invernadero. Si hablamos de efecto invernadero, el gas que más contri-

buye al mismo es el vapor de agua, mucho más que el resto de todos los demás gases juntos. En cambio, si de lo que hablamos es del aumento del efecto invernadero, el gas que más contribuye a dicho aumento es el dióxido de carbono (ved más detalles en los contenidos de este tema).

3. Una de las causas más importantes del cambio climático, es la disminución en el grosor de la capa de ozono.

Considerar el adelgazamiento experimentado en la capa de ozono como una causa del cambio climático, es una idea ampliamente extendida. Algunos estudiantes la justifican argumentando que los rayos ultravioleta llegan a la superficie de la Tierra con más potencia y la calientan más, aumentando así el efecto invernadero. Curiosamente, en muchos casos también se defiende que este adelgazamiento, de alguna manera, ha sido causado o es una consecuencia más del cambio climático. No obstante, ninguna de esas dos ideas (aunque se hallan ampliamente extendidas, se detectan todos los niveles educativos y gozan de gran aceptación), se puede considerar como científicamente aceptable. El adelgazamiento de la capa de ozono no es una causa del cambio climático. Tampoco el cambio climático como tal, ha sido hasta ahora causa directa de dicho adelgazamiento, aunque esto, desgraciadamente, puede cambiar (para mayor aclaración ved la nota al pie de la página 90 de esta unidad).

Para poder cuantificar la extensión de las ideas anteriores entre distintos niveles educativos y también en qué medida se perciben como científicamente correctas, hemos elaborado las siguientes cuestiones específicas, en las que el convencimiento acerca de que la respuesta dada es correcta, se mide con una nota de seguridad que va de 0 a 10 (0 mínimo, 10 máximo):

CUESTIONARIO

1. Imagina que todo el hielo que hay flotando sobre las aguas del océano Ártico (polo norte) y del océano Antártico (polo sur), se fundiera transformándose en agua líquida.

¿Qué consecuencias directas importantes piensas que tendría en el planeta la fusión de esa inmensa cantidad de hielo flotante?

Utiliza la tabla siguiente para escribirlas (cita como máximo tres consecuencias distintas).

	Consecuencia	Seguridad
1		
2		
3		

Si deseas aclarar o justificar brevemente alguna respuesta puedes hacerlo a continuación:

2. Todas las sustancias siguientes se encuentran en la atmósfera en estado gaseoso:

Ozono, metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, vapor de agua, nitrógeno

Si se considera globalmente el **efecto invernadero**, resulta que de todas ellas:

Seguridad

-La que más contribuye a este efecto es -----

-La que no contribuye a este efecto es -----

3. La disminución de grosor de la capa de ozono es un problema muy grave para toda la humanidad y muchos otros seres vivos, ya que dicha capa actúa como un filtro para las radiaciones ultravioleta. A continuación, se hacen dos afirmaciones sobre la capa de ozono. Indica si crees que la afirmación es verdadera o es falsa, poniendo una X en la casilla correspondiente (podría ser una verdadera y otra falsa, las dos verdaderas o las dos falsas):

Afirmación	Verdadera	Falsa	Seguridad
La disminución del grosor de la capa de ozono ha sido una consecuencia más del cambio climático actual.			
La disminución del grosor de la capa de ozono ha sido una de las causas del cambio climático actual.			

4. Durante los últimos 100 años el nivel del mar ha subido casi 20 cm. Por favor, indica a qué se debe o puede deberse dicha subida:

Seguridad

a) -----

b) -----

Como ampliación o complementarias a las cuestiones anteriores, se pueden utilizar también las siguientes:

5. Imagina que todo el hielo que hay flotando en las aguas del océano Ártico (polo norte) y del océano Antártico (polo sur), se fundiese totalmente convirtiéndose en agua líquida. Si eso se produjese, el nivel del mar (subraya solamente la opción con la que estés más de acuerdo):

Seguridad

- a) No subiría nada
- b) Subiría mucho menos de un metro
- c) Subiría entre uno y diez metros
- d) Subiría mucho más de diez metros

Si deseas aclarar o justificar brevemente tu respuesta puedes hacerlo a continuación:

6. A continuación se enumeran cuatro procesos que desencadenan graves daños para el medio ambiente, los seres humanos y una gran parte de los seres vivos en general.

Para cada caso, señala con una X en la casilla correspondiente según creas que el proceso es una de las causas directas más importantes del Cambio Climático actual:

Problema medioambiental	Agente causante del AEI		Seguridad
	SI	NO	
Crecientes emisiones de dióxido de carbono			
Pérdida de masa forestal			
Disminución del grosor de la capa de ozono			
Erupciones volcánicas			

El profesorado interesado en cuantificar en qué medida estas ideas afectan a sus alumnos, así como la fortaleza de las mismas, pueden utilizar las cuestiones anteriores para averiguarlo. Nosotros, hace años, lo hicimos con estudiantes de Enseñanza Secundaria y también con otros de Magisterio. Los resultados se pueden consultar en:

Carrascosa, J., Martínez, S., Alonso, M. y Ruíz, J.J. (2022). Análisis de algunas ideas alternativas relacionadas con el cambio climático. *Revista Científica* 45 (3), 296-314. DOI: <https://doi.org/10.14483/23448350.17442>

En el siguiente anexo II, se expone una posible estrategia adecuada para tratar una de tales ideas.

ANEXO II

CONTRIBUCIÓN DE LA FUSIÓN DEL HIELO CONTINENTAL Y DEL HIELO MARINO AL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR

Autores: Jaime Carrascosa Alís. Salvador Martínez Sala. Manuel Alonso Sánchez
Diciembre 2018.

Antes de comenzar, conviene reflexionar acerca de la siguiente cuestión (escogiendo la propuesta que se considere más adecuada y, en su caso, adjuntando una breve explicación).

A.1. *Supongamos un enorme bloque de hielo flotando en medio de un pequeño lago de agua dulce a comienzos del verano. Cuando avance el estío y ese bloque de hielo se haya fundido totalmente, se puede afirmar que el nivel del agua del lago, debido a este hecho (elige una de las opciones siguientes):*

- a) *Habrá disminuido algo*
- b) *Permanecerá igual que antes*
- c) *Habrá aumentado un poco*
- d) *Habrá aumentado bastante*
- e) *No tengo ninguna opinión*



La propuesta correcta a la cuestión anterior es la b. En efecto: el hecho de fundirse todo el bloque de hielo no altera para nada el nivel del agua existente en ese momento porque, en este caso, el volumen total de agua líquida que se genera, es justamente igual al volumen de la parte sumergida del bloque de hielo y, consecuentemente, el nivel del agua del lago no variaría por esta causa¹¹.

A continuación, aplicando el principio de Arquímedes y algunos conocimientos básicos de Física, trataremos de demostrar el razonamiento anterior.

Datos y símbolos que se van a utilizar:

Densidad del agua dulce líquida: $d_a = 1000 \text{ kg/m}^3$

Densidad del hielo: $d_h = 916,8 \text{ kg/m}^3$

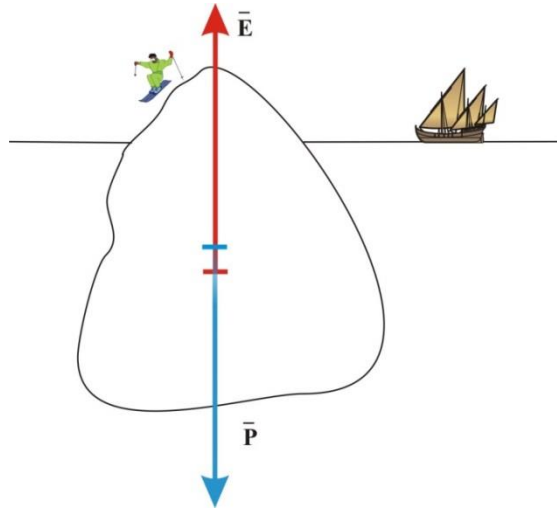
Volumen total del bloque de hielo flotante: $V_T = 100 \text{ m}^3$

Volumen de la parte del hielo sumergido: V_s

¹¹ Naturalmente, sí podría variar por otras como la evaporación, aportes externos, dilatación del agua por aumento de la temperatura, etc.

Conviene recordar que, según el principio de Arquímedes, el empuje experimentado por el hielo es una fuerza vertical y hacia arriba de valor igual al peso del volumen de agua que desaloja (el volumen de agua desalojada coincide exactamente con el volumen de hielo sumergido V_s).

Por otra parte, al encontrarse el bloque de hielo en equilibrio, se cumplirá que los módulos de la fuerza de empuje \vec{E} y de la fuerza peso \vec{P} , han de ser iguales ($E = P$).



A.2. Podemos ahora plantearnos cuanto valdrá el volumen de hielo sumergido V_s

En principio, cabe esperar que el volumen sumergido de hielo dependa de la densidad del hielo, de la densidad del agua del lago y del volumen total del bloque:

$$V_s = f(d_h, d_a, V_T)$$

Concretamente, se puede pensar que V_s aumentará cuando, a igualdad de todos los restantes factores influyentes, d_a disminuya, d_h aumente o bien el volumen V_T aumente. Incluso es posible imaginar algún caso límite como, por ejemplo, que si $V_T \rightarrow 0$ el volumen de parte sumergida V_s también tenderá a 0, o bien que si la densidad del hielo pudiera aumentar hasta casi igualar a la densidad del agua líquida del lago ($d_h \rightarrow d_a$) el bloque sería prácticamente agua dulce líquida y $V_s \rightarrow V_T$.

Igualando los módulos de la fuerza de empuje y de la fuerza peso:

$$E = P \rightarrow V_s \cdot d_a \cdot g = V_T \cdot d_h \cdot g \rightarrow V_s = \left(\frac{d_h}{d_a} \right) \cdot V_T \quad (1)$$

Si analizamos el resultado anterior nos daremos cuenta de que no solo es dimensionalmente homogéneo (condición imprescindible para aceptarlo) sino también que en él se contemplan las hipótesis y casos límite considerados.

Sustituyendo valores en (1) se obtiene: $V_s = 91,68 \text{ m}^3$

A.3. ¿Qué volumen V_a de agua líquida produce el bloque de hielo cuando se funde totalmente?

Está claro que, aunque los volúmenes sean distintos ($V_a \neq V_h$), la masa de agua líquida (m_a) y la masa de hielo del cual procede (m_h) han de ser iguales ($m_a = m_h$). Calcularemos, pues, la masa de agua líquida y con ella y la densidad del agua líquida, el volumen de agua líquida, V_a , pedido:

$$m_a = m_h = d_h \cdot V_T ; \quad V_a = \frac{m_a}{d_a} \rightarrow \quad V_a = \frac{d_h \cdot V_T}{d_a} \quad (2)$$

Con las ecuaciones (1) y (2), comprobamos que $V_a = V_s$

Sustituyendo valores:

$$V_a = \frac{916,8 \cdot 100}{1000} = 91,68 \text{ m}^3$$

Así pues, el volumen de agua líquida que produce la fusión total del hielo flotante, cuando se trata de agua dulce, coincide exactamente con el volumen de la parte sumergida de dicho hielo. Vale la pena darse cuenta de que (1) y (2) son iguales porque la densidad del agua del lago y la densidad del agua resultante de la fusión del hielo, también lo son (por eso hemos utilizado para ambas el mismo símbolo, d_a).

Por tanto, en estas condiciones:

El nivel de agua del lago no cambiará por causa de que se funda el bloque de hielo que flota en él.

A esta misma conclusión se puede llegar de forma cualitativa mediante una estrategia experimental, fácil de llevar a cabo en cualquier laboratorio escolar. Como inicio de la misma, se puede plantear al alumnado que *proponga una posible experiencia destinada a mostrar que la fusión de hielo flotante sobre el agua dulce no altera el nivel de la misma*. La realización de esta actividad por los alumnos distribuidos en pequeños grupos de trabajo, junto con la orientación del profesor, suele conducir a la propuesta de utilizar diversos recipientes como botellas o probetas grandes y trozos de hielo adecuados. Basta con, por ejemplo, introducir el trozo de hielo en una de tales probetas y añadir después agua líquida hasta un determinado nivel para comprobar que, una vez fundido totalmente el trozo de hielo, el nivel sigue siendo el mismo que inicialmente

Cabe ahora preguntarse:

A.4. ¿Ocurre lo mismo cuando hablamos de un gran bloque de hielo flotando en el océano?

Se trata de una pregunta muy importante, ya que, si no ocurriese lo mismo y resultase que el agua generada por la fusión del bloque de hielo ocupase más volumen que la parte sumergida del bloque de hielo que la originó, tendríamos que la fusión del hielo del casquete polar ártico y de la banquisa de hielo antártica, debido al calentamiento global, sí que estaría contribuyendo directamente, en alguna medida, al aumento del nivel del mar.

Y lo cierto es que tenemos razones para pensar que no ocurre lo mismo. En efecto: el agua salada es más densa que el agua dulce, por lo que **una misma masa de hielo** flota más en el mar que en un lago de agua dulce. Acabamos de ver que, en el caso del lago, el volumen de agua líquida generado coincide exactamente con el volumen de la parte de hielo sumergida. En el caso del mar, el volumen de agua generado será el mismo que en el caso del lago (recordemos que la masa de hielo es la misma en ambos), pero como el volumen de hielo sumergido en el mar es menor que en el lago de agua dulce, el agua líquida generada tendrá un volumen algo mayor que el del hielo sumergido. La diferencia entre ambos volúmenes $\Delta V = V_a - V_s$ es el volumen de agua que puede, en principio, afectar al nivel del mar contribuyendo a su elevación. No obstante, antes de ningún tratamiento operativo, siempre que se pueda, conviene realizar alguna **estimación cualitativa previa**. En este caso, por ejemplo, podemos avanzar que esa diferencia de volumen no debe ser muy grande, ya que la diferencia entre la densidad del agua de mar y la densidad del agua dulce tampoco lo es.

A.5. Si llamamos d_{am} a la densidad del agua marina y aceptamos un valor medio de 1027 kg/m^3 , calculad el volumen sumergido para un bloque de hielo cuyo volumen total sea de 100 m^3 .

Teniendo en cuenta que el bloque de hielo se encuentra en equilibrio, la fuerza de empuje y el peso han de tener el mismo módulo (y sentidos contrarios), así que procediendo igual que anteriormente, tendremos que:

$$E = P \rightarrow V_s \cdot d_{am} \cdot g = V_T \cdot d_h \cdot g \rightarrow V_s = \left(\frac{d_h}{d_{am}} \right) \cdot V_T \quad (3)$$

Y sustituyendo valores: $V_s = \left(\frac{916,8}{1027} \right) \cdot 100 \rightarrow V_s = 89,27 \text{ m}^3$

Como vemos, el hecho de que el agua de mar sea más densa que el agua dulce, implica que el volumen de hielo sumergido es menor que anteriormente (porque flota más) y, por tanto, también es menor que el volumen de agua líquida originado cuando se funde todo el bloque. Basta comparar las expresiones (2) y (3) para, sin necesidad de ningún cálculo, darse cuenta de ello. Además se ha utilizado para d_h el mismo valor que en el caso anterior ($916,8 \text{ kg/m}^3$), sin distinguir si el bloque de hielo corresponde a un glaciar que desemboca en el mar (formado a partir de nieve caída) o bien se ha formado por congelación de agua marina (es decir, a partir de agua salada). Esto es así porque en este último caso, debido a determinados procesos físicos, la densidad del hielo marino con el tiempo llega a ser prácticamente igual a la del hielo continental y cuando se funde, lo que resulta es fundamentalmente agua líquida dulce. No ocurre lo mismo con la densidad del agua marina, la cual varía de unos lugares a otros.

A.6. ¿En cuánto excede ahora el agua líquida producida al volumen de hielo sumergido?

Como es lógico este exceso vendrá dado por $\Delta V = V_a - V_s$

Sustituyendo V_a y V_s por sus expresiones correspondientes (2) y (3), tenemos que:

$$\Delta V = V_a - V_s = \left(\frac{d_h}{d_a} \right) \cdot V_T - \left(\frac{d_h}{d_{am}} \right) \cdot V_T$$

Y simplificando, obtenemos finalmente:
$$\Delta V = d_h V_T \cdot \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{d_{am}} \right) \quad (4)$$

Si analizamos el resultado obtenido, podemos darnos cuenta de que ΔV será nulo cuando las densidades del agua resultante de la fusión del hielo y del líquido en el que se encuentra flotando dicho hielo sean iguales (como ocurre cuando el hielo se encuentra en un lago de agua dulce). Si se trata de un bloque de hielo flotando en el mar, como $d_{am} > d_a$ ocurrirá que $\Delta V > 0$ y ese ΔV es el que incide en el nivel del agua aumentándolo.

Si sustituimos los valores numéricos pertinentes en la expresión (4), obtenemos $\Delta V = 2,41 \text{ m}^3$. A este mismo resultado numérico, podríamos haber llegado directamente sin más que considerar que el bloque de hielo marino de 100 m^3 de volumen genera al fundirse totalmente el mismo volumen de agua líquida independientemente de cómo se haya originado o de dónde se encuentre. Como ese volumen ya se calculó anteriormente y era de $91,68 \text{ m}^3$, basta una simple resta para obtener el ΔV buscado:

$$\Delta V_a = 91,68 - 89,27 = 2,41 \text{ m}^3$$

Esta diferencia, insistimos, sí que afecta al aumento del nivel del mar, aunque mucho menos que si se tratase de agua líquida procedente de un bloque de hielo continental. En efecto, acabamos de ver que 100 m^3 de hielo continental producen $91,68 \text{ m}^3$ de agua líquida y que toda esa agua al ser vertida en el mar actúa directamente aumentando el nivel de este, mientras que del mismo volumen de hielo flotante, al fundirse totalmente, solo $2,41 \text{ m}^3$ del agua líquida generada, inciden en el nivel del mar (el resto, hasta $91,68 \text{ m}^3$, ocupa el mismo volumen que ocupaba la parte sumergida del hielo).

En conclusión: En términos de aumento del nivel del mar, la fusión de cada m^3 de hielo flotante equivale a un aporte extra de $0,0241 \text{ m}^3$ de agua.

Podemos preguntarnos ahora, por la intensidad de este efecto. Para ello puede ser útil situarnos en un escenario hipotético en el que se fundiese totalmente todo el hielo existente en el planeta, tanto continental como hielo marino flotante, en un momento dado, analizando cada caso por separado y cuantificando la elevación del mar que se produciría.

Como punto de partida, aceptaremos como válidos los valores medios que se dan en la siguiente tabla, aunque no correspondan con los valores reales actuales (muy posiblemente, menores).

Hielo		Volumen (km^3)	% del total
Continental	Marino flotante		
Glaciares		87000	0,29
Groenlandia		2 980 000	9,95
Antártida		262 777 000	87,74
	Casquete ártico	20000	0,07
	Banquisa antártica	585 500	1,95

A.7. *A partir de la tabla, calculad el volumen total de hielo continental total y el volumen total de hielo flotante existentes en el planeta para el periodo correspondiente a los datos de dicha tabla.*

Simplemente sumando los datos correspondientes, se obtiene:

Volumen total de hielo continental $\approx 29,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

Pero si lo que nos interesa es el volumen de hielo continental realmente capaz de producir un aumento del nivel del mar cuando se funde, conviene saber que en la Antártida hay unos $2,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ de hielo situados por debajo del nivel del mar y que, por tanto, su fusión no afectaría al nivel del agua marina. Restando, pues, este volumen del total, obtenemos que:

Volumen total de hielo continental efectivo = $29,3 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^6 = 26,8 \cdot 10^6 \text{ km}^3$

Sumando también los datos correspondientes, se obtiene:

Volumen total de hielo flotante $\approx 605500 \text{ km}^3$

A.8. *Teniendo en cuenta los dos últimos resultados numéricos obtenidos y admitiendo que la superficie estimada de los océanos y mares del planeta es de unos $360 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, calculad el aumento (en metros) que se produciría en el nivel del mar si todo el hielo continental se fundiese completamente y el agua líquida originada acabase en el mar. ¿Y si todo el hielo flotante en el mar se fundiese?*

En cuanto al hielo continental (situado sobre tierra), basta aplicar la expresión (2) anteriormente deducida para obtener el volumen de agua que se produciría:

$$V_a = \frac{d_h \cdot V_T}{d_a} = \left(\frac{916,8}{1000} \right) \cdot 26,8 \cdot 10^6 = 24,57 \cdot 10^6 \text{ km}^3$$

Utilizando ahora la expresión matemática que relaciona el volumen V con la superficie S y la altura h, se obtiene:

$$V = S \cdot h \rightarrow h = V/S \rightarrow h = 24,57 \cdot 10^6 / 360 \cdot 10^6 = 0,06825 \text{ km} = 68,25 \text{ m}$$

Si tenemos en cuenta la imprecisión de las medidas, podemos situar dicho aumento, entre 60 y 70 m por encima del nivel actual.

Como la superficie marina no es la base de ningún cilindro, todo ese aumento de nivel haría que el agua del mar se adentrara kilómetros en todos los continentes, cambiando totalmente la configuración de los mapas. Naturalmente, hemos considerado un proceso hipotético, pero conviene no olvidar que el hielo continental, a consecuencia del calentamiento global, se está fundiendo y que eso ya está contribuyendo al aumento del nivel del mar (que ha sido de unos 19 cm en los últimos 100 años) y a la disminución de su salinidad, ambas cosas de muy graves consecuencias para toda la humanidad y la biodiversidad en general.

Aplicando la misma expresión (2) pero con los datos relativos al hielo marino flotante:

$$V_a = \frac{d_h \cdot V_T}{d_a} = \left(\frac{916,8}{1000} \right) \cdot 605\,500 = 555\,122,4 \text{ km}^3 \text{ de agua líquida}$$

Pero, según hemos visto anteriormente, ahora, a diferencia del hielo terrestre, solo una pequeña fracción de esta agua incide en el aumento del nivel del mar. Concretamente, $0,0241 \text{ m}^3$ de agua líquida por cada 1 m^3 de hielo marino flotante que se funde totalmente (equivalente a $0,0241 \text{ km}^3$ por cada 1 km^3). Teniendo esto en cuenta, obtenemos:

$$\Delta V = 605.500 \cdot 0,0241 \approx 14\,592,55 \text{ km}^3$$

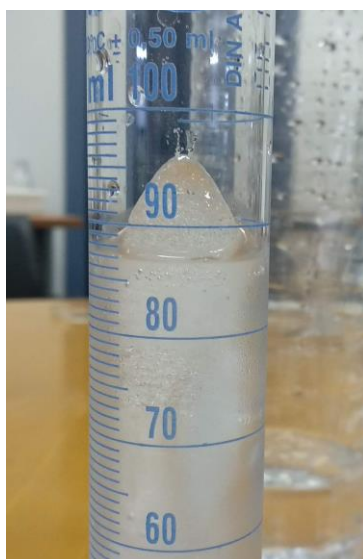
$$\text{Con lo que } h = V/S = 4,05 \cdot 10^{-5} \text{ km} \approx 4 \text{ cm}$$

Vemos, pues, que la subida del nivel del mar ocasionada directamente por la fusión de todo el hielo flotante (cualquiera que sea su origen) existente en un momento dado, se puede considerar despreciable frente a la subida ocasionada por la fusión del hielo continental asentado en tierra, por lo que, en lo que se refiere al calentamiento global, es perfectamente lícito ignorar la contribución de la fusión del hielo flotante al aumento del nivel del mar¹² (no así respecto a otros problemas, como, por ejemplo, la disminución de biodiversidad o el aumento de temperatura en las regiones polares debido a la pérdida progresiva de ese enorme escudo protector...).

Otra posible estrategia para resolver este problema es optar por la vía experimental. Ello, además, es una forma de someter a prueba el resultado obtenido teóricamente. Al igual que en el caso anterior, se puede recurrir a la utilización de botellas de plástico o probetas grandes y trozos de hielo adecuados. Sin embargo, aquí, en lugar de utilizar agua líquida dulce, se utiliza una disolución saturada de sal en agua. Obviamente, su densidad no es la misma que la del agua de mar, pero el experimento sirve igualmente para comprobar que al introducir un trozo de hielo en una probeta grande y después añadir el agua salada hasta alcanzar un nivel determinado, una vez completada la fusión del hielo, el nivel del líquido, al contrario que en la experiencia anterior, no es el mismo que inicialmente, sino que ha aumentado. El hecho de utilizar una disolución saturada de sal en agua hace que, al ser la densidad de dicha disolución sensiblemente mayor que la densidad del agua de mar, el aumento de volumen sea más perceptible. Por supuesto, esta comprobación, se puede hacer, incluso, de forma cuantitativa y constatar que los resultados numéricos (el obtenido teóricamente y el obtenido experimentalmente), dentro del margen de error correspondiente, coinciden.

En nuestro caso, se utilizó una probeta de 100 ml (calibrada en ml), en la que se introdujo un bloque cilíndrico de hielo de 28,87 g de masa (previamente fabricado con agua destilada) e inmediatamente después se vertió parte de una disolución saturada de sal común en agua destilada (densidad 1,18 g/ml) hasta enrasar a 85 ml. Una vez fundido totalmente el hielo, se volvió a medir el volumen de agua salada resultante en el interior de la probeta, el cual resultó ser de 89 ml, lo que supone un aumento de volumen $\Delta V = 4 \text{ ml}$. En la figura siguiente se puede observar la probeta utilizada en un momento dado durante la fusión del hielo en su interior.

¹² Hablamos de contribución directa debida exclusivamente a la fusión. Otra cosa es la mayor elevación del mar que se produciría debido a la expansión térmica de un agua más caliente.



Bloque de hielo fundiéndose en una disolución de sal común en agua. (Fuente: elaboración propia)

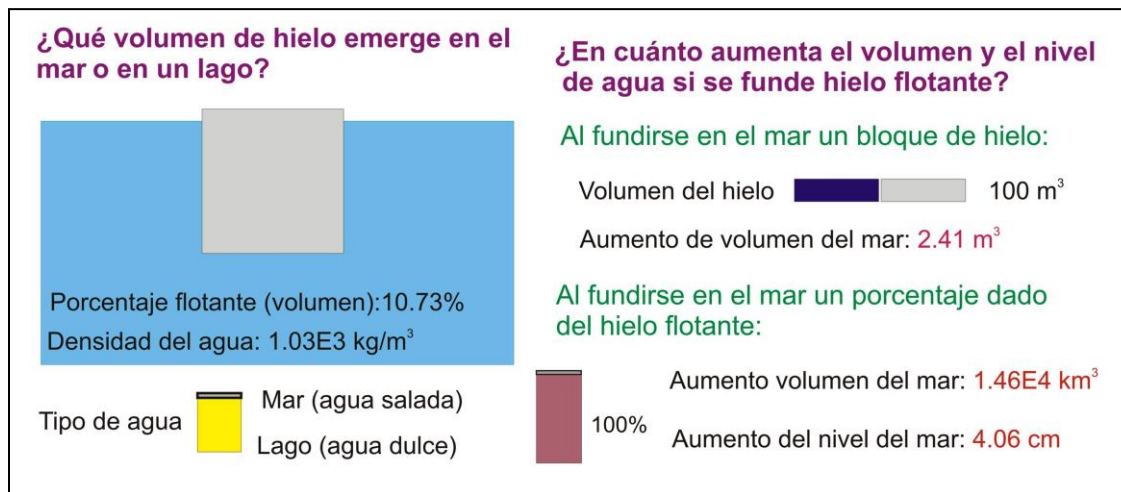
Introduciendo los datos experimentales en la ecuación 4 anterior (donde se ha sustituido d_{am} por la densidad del agua salada utilizada), se obtiene:

$$\Delta V = d_h V_T \cdot \left(\frac{1}{d_a} - \frac{1}{d_{am}} \right) = 28,87 \cdot \left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{1180} \right) = 0,0044 \text{ m}^3 = 4,4 \text{ ml}$$

Calculando la imprecisión absoluta correspondiente, se obtiene $\varepsilon(\Delta V) = \pm 0,5 \text{ ml}$, con lo que: $\Delta V = (4,4 \pm 0,5) \text{ ml}$. Como puede verse, el resultado experimental obtenido queda dentro del intervalo de imprecisión del resultado teórico.

Para reforzar varios de los conceptos involucrados en este anexo existen dos animaciones interactivas que se pueden utilizar:

En una de ellas se representa un bloque de hielo flotando sobre una masa de agua. Los alumnos pueden usar un controlador manual para elegir entre agua marina y agua dulce, y otro para fijar el volumen total inicial del bloque de hielo flotante. La animación calcula y representa el porcentaje de hielo flotante, junto con el aumento del volumen de agua líquida que se produciría si se fundiera totalmente dicho bloque. También permite obtener el incremento en el volumen y en el nivel del mar que tendría lugar si se fundiera un porcentaje (que se puede determinar usando un tercer controlador manual) de todo el hielo flotante actual.



La otra animación, remite a la estrategia de resolución del problema por vía experimental. Representa un trozo de hielo flotante en una probeta llena de una disolución salina, y se pueden usar tres controladores manuales para modificar la densidad de la disolución, la masa del pedazo de hielo y la propia densidad del hielo. Además de calcular los porcentajes y los volúmenes de hielo flotante y sumergido, la animación también obtiene el incremento volumen que se produciría en la probeta si se derritiera el pedazo de hielo.

Las dos animaciones y el programa para hacerlas correr están disponibles en la página “Web de Materiales para la Enseñanza y la Divulgación de la Física”, de la Sección Local de Alicante de la RSEF. <https://www.dedfisica-rsef.com/recursosdidacticos/index.htm>
 (Para abrirlas en el ordenador se necesita instalar el programa libre y gratuito [Modellus2.5](#) en ordenadores de 32 bits o la aplicación [Modellus 3](#) en ordenadores de 64 bits).

ANEXO III

LA CORRIENTE DE CHORRO POLAR

Jaime Carrascosa Alís

Joaquín Martínez Torregrosa

El Chorro Polar (o *jet stream*) es una especie de río de aire a gran altitud que se forma donde convergen dos masas de aire con propiedades muy distintas: la Célula de Ferrel (aire templado de latitudes medias) y la Célula Polar (aire muy frío del Ártico).

Se trata de un fenómeno que juega un papel fundamental en la meteorología del hemisferio norte (y que afecta de lleno a la península ibérica). Por ello conviene prestarle toda nuestra atención analizando *cuáles son sus características principales, qué funciones desempeña, cómo se forma, cómo puede alterarse y qué consecuencias puede tener dicha alteración en el clima terrestre.*

En la respuesta a las cuestiones anteriores, desempeñan un papel fundamental dos factores claves: Uno consiste en comprender cómo el contraste térmico entre dos zonas de la Tierra está relacionado con un gradiente de presión horizontal en altura sobre dichas zonas y los efectos que esto produce. El otro es comprender qué es la fuerza de Coriolis y qué efectos tiene en el movimiento de las corrientes de aire. Por eso, antes de comenzar a estudiar la corriente de chorro polar, nos detendremos en aclarar estos factores.

NOTA PREVIA: Este anexo se ha elaborado de forma que, si el profesor lo estima conveniente, puede saltar los apartados 1 y 2, y pasar directamente al tercero. No obstante, en el caso de alumnado con nivel educativo de Física de segundo de bachillerato en adelante, es conveniente tratar estos dos primeros apartados como aspectos previos que van a permitir una comprensión más profunda de los contenidos a tratar inmediatamente después.

1. Contraste térmico y gradiente de presión en la atmósfera

A menudo imaginamos la atmósfera como una masa de aire homogénea que rodea la Tierra. Pero cuando profundizamos un poco, vemos que en realidad es un enorme mar de aire, en el fondo del cual estamos nosotros y que ese aire se amontona más en el suelo por efecto de la gravedad, haciendo que la presión atmosférica en la superficie terrestre o, más precisamente, al nivel del mar sea máxima y disminuya conforme ascendemos y hay, cada vez, menos aire sobre nosotros. Por otra parte, aunque la atmósfera gira solidariamente con la Tierra alrededor de su eje de rotación debido a la fuerza de la gravedad, también se producen en ella corrientes de aire que se desplazan en distintas direcciones, debido a la intervención de otras fuerzas.

Una de las corrientes de aire más importantes es la conocida como “Chorro Polar”, la cual tiene un papel muy importante en el clima terrestre. Para comprender mejor cómo se genera y cómo se

mueve dicha corriente, conviene que antes nos detengamos en analizar las fuerzas que actúan sobre una porción de aire atmosférico:

-En la dirección vertical, están la fuerza gravitatoria (hacia abajo) y la debida al gradiente de presión —es decir, la que se origina por la diferencia de presión a distintas alturas— (hacia arriba).

-Si la presión varía en dirección horizontal (es decir, paralelamente a la superficie terrestre), habrá también una fuerza debida al gradiente de presión horizontal. Dicha fuerza se dirigirá siempre desde donde haya más presión a donde haya menos presión. Será, por tanto, perpendicular a las isobaras (líneas que unen puntos de igual presión).

-Si la porción de aire que estamos considerando, se mueve respecto de sus alrededores o límites, habrá fuerzas de rozamiento actuando sobre ella, oponiéndose a dicho movimiento.

- Finalmente, es preciso tener en cuenta que nos interesa el movimiento del aire respecto a nuestro suelo, que es un sistema de referencia no inercial (debido a la rotación de la Tierra en torno a su eje). Por ello, cualquier observador terrestre, que desee aplicar las leyes de la mecánica de Newton a la porción de aire considerada deberá tener en cuenta la acción de la fuerza de Coriolis y la fuerza centrífuga.

Naturalmente, aplicar las leyes de Newton con todas esas fuerzas que hemos citado, es un problema complejo. No obstante, podemos hacer algunas simplificaciones:

a) Estudiaremos únicamente flujos de aire horizontales, de modo que podamos considerar que las fuerzas en la vertical (debidas a la gravedad y al gradiente de presión vertical) se equilibran por lo que, en general, no las tendremos en cuenta.

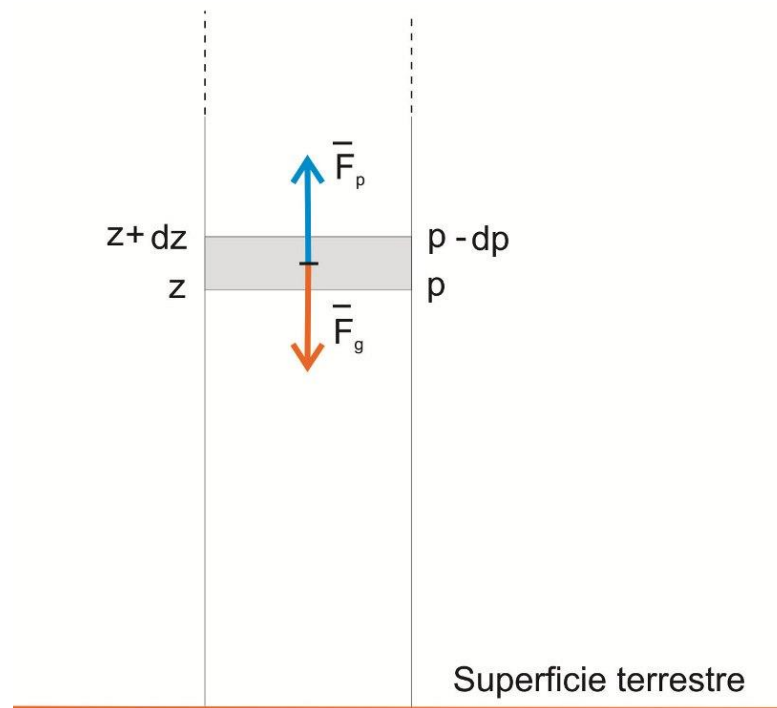
b) Supondremos que las fuerzas de fricción de la porción de aire en movimiento con el aire de su entorno son despreciables frente a las restantes fuerzas.

c) Finalmente, para trayectorias curvas en la horizontal, supondremos que las posibles fuerzas centrífugas horizontales son despreciables comparadas con las de Coriolis.

Para entender las fuerzas horizontales (paralelas al suelo) debidas al gradiente de presión horizontal, es necesario analizar antes el equilibrio vertical en la atmósfera:

Sabemos que en la superficie del planeta y, en particular, al nivel del mar, el valor de la presión atmosférica es máximo (se puede considerar como el fondo del mar de aire) y vale aproximadamente 1 atm, para ir disminuyendo conforme se asciende hasta valer 0 cuando se llega al final de la atmósfera. Por tanto, sobre una banda de aire dada (que consideraremos en reposo), existe una

fuerza¹³ de presión hacia arriba, que se equilibra con la fuerza peso de dicha banda, tal y como se indica en el siguiente esquema:



En el esquema de arriba se reproduce la cara frontal de una columna de aire y dentro de ella una banda de espesor infinitesimal, p es la presión, z la altura sobre el suelo, \mathbf{F}_p la fuerza debida al gradiente de presión y \mathbf{F}_g la fuerza peso. Además, designaremos como m_B la masa total de la banda de aire considerada y supondremos que su superficie es la unidad, V su volumen y dz su altura.

Para un estado de equilibrio se cumplirá que: $F_p = F_g$

$$F_p = -dp \cdot S \rightarrow F_p = -dp$$

El signo menos de la ecuación anterior se debe a que estamos trabajando con el módulo de un vector (la fuerza del gradiente de presión) que no puede ser nunca inferior a 0, y dp es la diferencia entre la presión en la superficie superior de la banda y la presión en la superficie inferior (una cantidad negativa).

$$F_g = m \cdot g = \rho \cdot dV \cdot g = \rho \cdot S \cdot dz \cdot g \rightarrow F_g = \rho \cdot dz \cdot g$$

$$\text{Igualando las expresiones anteriores: } -dp = \rho \cdot dz \cdot g \rightarrow dp = -\rho \cdot g \cdot dz \quad (1)$$

¹³ En este anexo, representaremos las magnitudes vectoriales indistintamente mediante su símbolo en letra negrilla o bien en letra normal con la flecha de vector arriba.

Por otra parte, si hacemos la aproximación de considerar el aire como un gas ideal, podemos escribir que:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

donde n es el número de moles de moléculas, R la constante de los gases y T la temperatura en la superficie (que supondremos constante para toda la columna de aire considerada, desde el suelo hasta la altura z).

Sabemos que $n = N/N_A$ donde N es el total de “moléculas de aire” de la banda y N_A el número de Avogadro. Además, el cociente R/N_A es una constante que se designa por k y se conoce como constante de Boltzmann.

Teniendo esto en cuenta en la ecuación anterior, obtenemos que:

$$p \cdot V = \frac{N \cdot R \cdot T}{N_A} \rightarrow p \cdot V = N \cdot k \cdot T$$

La masa total de la banda de aire puede expresarse como el producto del total de “moléculas de aire” por la masa promedio de una de esas hipotéticas moléculas (m). Es decir: $m_b = N \cdot m$, de donde $N = m_b/m$. Además, sabemos que $\rho = m_b/V$, de donde $V = m_b/\rho$, con lo que la ecuación anterior se puede expresar también como:

$$p \cdot \frac{m_b}{\rho} = \frac{m_b \cdot k \cdot T}{m} \text{ y simplificando: } p = \frac{k}{m} \cdot \rho \cdot T \quad (2)$$

Dividiendo las ecuaciones (1) y (2):

$$\frac{dp}{p} = \frac{-m \cdot \rho \cdot g \cdot dz}{k \cdot \rho \cdot T} \text{ y simplificando: } \frac{dp}{p} = \frac{-m \cdot g \cdot dz}{k \cdot T}$$

El cociente $H = kT/mg$ se denomina *altura de escala* de la atmósfera¹⁴ (mediante análisis dimensional, es fácil constatar que tiene dimensiones de longitud). Introduciendo esta magnitud en la última ecuación, se obtiene:

$$\frac{dp}{p} = \frac{-dz}{H} \quad (3)$$

Para la atmósfera terrestre y una temperatura de 15 °C ($T = 288$ K) esta altura resulta ser 8,4 km.

¹⁴ H también puede expresarse en función de la constante R . Basta tener en cuenta que $k = R/N_A$ y que el producto $N_A \cdot m$ es la masa molar M promedio del aire, con lo que obtenemos $H = RT/Mg$

Proceder a integrar la igualdad (3) anterior para una columna de aire de altura z , donde p_0 es la presión en el suelo y p la presión en la parte superior de dicha columna. Después, analizad el significado físico de la expresión obtenida.

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = -\int_0^z \frac{dz}{H} \rightarrow \ln \frac{p}{p_0} = -\frac{z}{H} \rightarrow \frac{p}{p_0} = e^{-z/H} \rightarrow p = p_0 \cdot e^{-z/H} \quad (5)$$

La ecuación 5 que acabamos de obtener, tiene una importancia fundamental en la física de la atmósfera: Nos dice que la presión atmosférica a una cierta altura z sobre la superficie terrestre depende de la relación z/H y que esa dependencia no es lineal.

El análisis de dicha dependencia se facilita si escribimos la ecuación (5) como:

$$p = \frac{p_0}{e^{z/H}} \quad (6)$$

La presión será mayor cuanto mayor sea H , es decir, cuanto mayor sea la temperatura T . En efecto: recordemos que $H = kT/mg$ por lo que, si consideramos m y g constantes, H es directamente proporcional a T ($H = \text{cte} \cdot T$).

Por otra parte, la ecuación (6) permite comprender el significado físico de H . En efecto, para $H = z$, ocurre que $p = p_0/e$, es decir, si subimos una altura H en la atmósfera, la presión se reduce a $1/e$ de su valor inicial (que equivale aproximadamente a un 37% de su valor inicial).

Por tanto, si existe un gran contraste térmico entre dos columnas de aire situadas a distinta latitud, también existirá un elevado gradiente horizontal —paralelo al suelo— de presión en altura, que generará una fuerza que acelerará el aire desde donde haya más presión a donde haya menos. En la Tierra, dos zonas entre las que se da un gran contraste térmico son el ecuador y los polos, por eso el aire de la parte alta de la troposfera tiende a moverse del ecuador hacia los polos a gran velocidad.

Pero, como hemos dicho, no es ésta la única fuerza que debemos considerar para comprender el movimiento de las masas de aire respecto al suelo terrestre. Para que un observador terrestre pueda explicar el movimiento de las masas de aire respecto a él, necesita introducir en el principio fundamental de la dinámica ($\Sigma F = ma$) un factor (con dimensiones de fuerza pero que no cumple el principio de acción-reacción) que se llama “fuerza de Coriolis”.

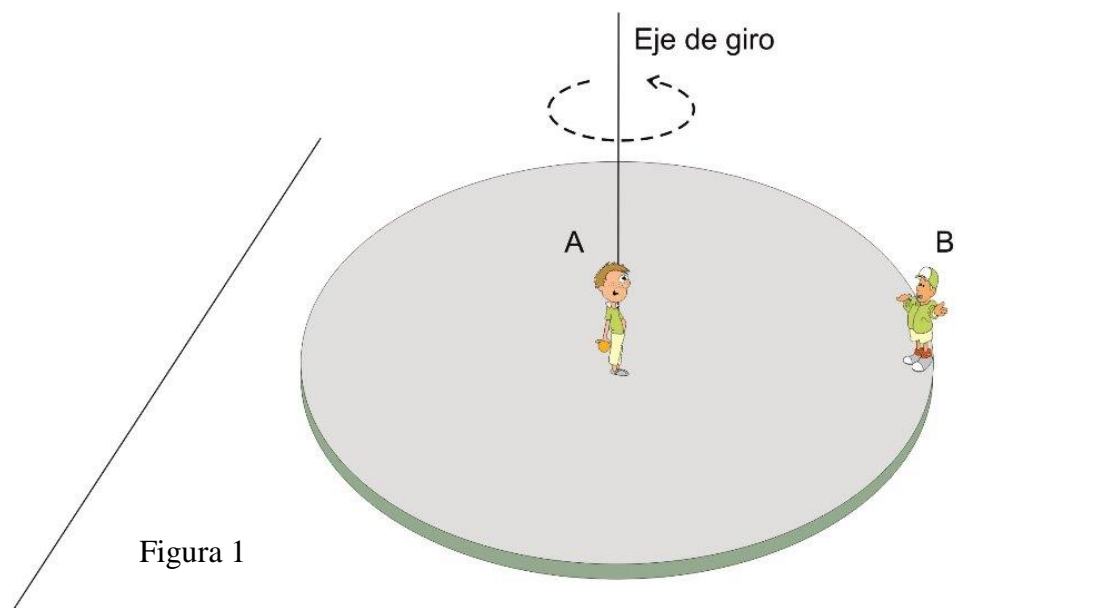
2. Fuerza de Coriolis

Las leyes de la dinámica de Newton únicamente son válidas en sistemas de referencia inerciales, es decir, en reposo o con movimiento rectilíneo y uniforme. Las posibles fuerzas que actúan sobre objetos situados en dichos sistemas, se denominan fuerzas reales. Cabe plantearse, pues, la cuestión de *qué es lo que ocurre cuando trabajamos con sistemas de referencia no inerciales*.

Supongamos un autobús que se está alejando con velocidad constante de un observador O que se encuentra parado en la acera. Dicho observador no tiene inconveniente en afirmar que un pasajero P que se encuentra de pie en el centro del autobús (y sin sujetarse a nada), también se aleja de él a velocidad constante (la misma que el autobús). Si, de repente, el autobús frena (sin desviarse), deja de ser un sistema de referencia inercial. *¿Qué diría en este caso el observador O que le ocurre al autobús?* Diría que sobre el autobús ha actuado una fuerza resultante en sentido contrario a su movimiento, la cual lo frena. *¿Y respecto a lo que le ocurre a P?* la fuerza de frenado actúa sobre el autobús pero no sobre P (nadie ni nada le empuja ni retiene) de manera que, si no hubiese ningún rozamiento, O diría que a P no le ocurre nada, puesto que sigue alejándose de él con la misma velocidad que llevaba cuando el autobús comenzó a frenar (claro está, hasta que choque contra la parte delantera del autobús).

En cambio, un observador O' situado dentro del autobús amarrado sólidamente a su asiento mediante el cinturón de seguridad vería que, de pronto, P sale disparado con velocidad creciente hacia la parte delantera. Para dicho observador, sobre P actúa una fuerza resultante (aunque no sepa quién la ejerce). Decimos que el autobús frenando es un sistema de referencia no inercial. En estos sistemas acelerados, podemos aplicar las leyes de Newton de la dinámica, admitiendo la existencia de pseudofuerzas (también llamadas fuerzas de inercia) para explicar los posibles cambios de movimiento que experimenta cualquier objeto respecto de un observador O' situados ambos en dicho sistema no inercial.

Imaginemos ahora una plataforma giratoria plana que da vueltas alrededor de un eje perpendicular a la misma y que pasa por su centro. En ella se encuentran dos niños (A y B) fijos a la misma. Supongamos que el A se halla justo en el eje y que el B se encuentra frente a él justo en el borde de la plataforma. Además supondremos que la superficie es perfectamente lisa y que la plataforma gira con velocidad angular ω constante en torno al eje vertical que la atraviesa por su centro, tal y como se indica en la figura 1:

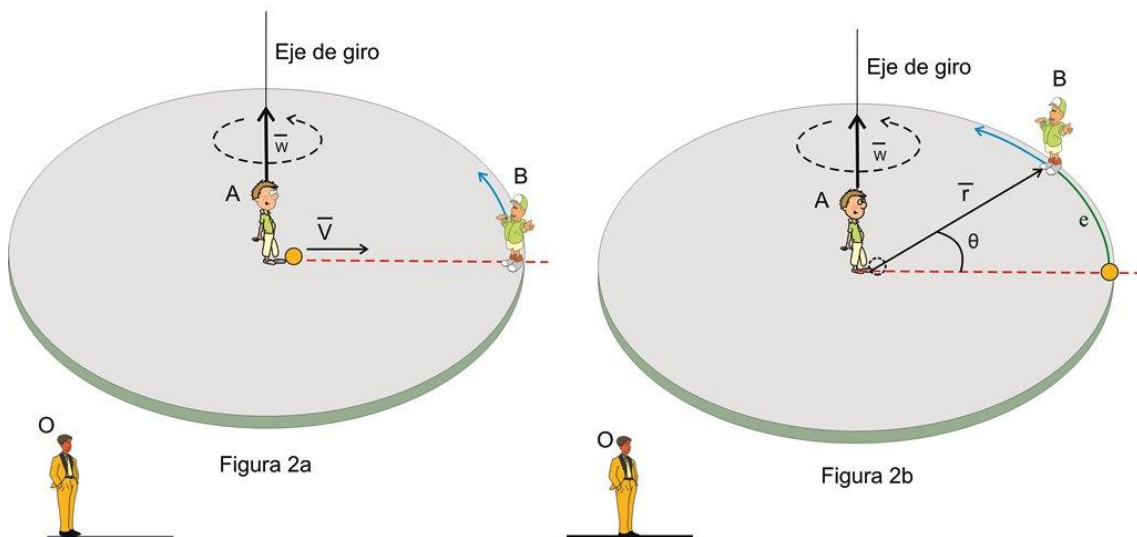


Como la plataforma gira con movimiento circular uniforme, se trata de un sistema acelerado y, por tanto, no inercial. Los niños pueden pensar que ellos están en reposo y que es todo el exterior a su plataforma el que gira a su alrededor (de igual forma que nosotros podemos pensar que estamos en reposo y es el Sol el que da una vuelta entera alrededor de la Tierra cada día).

Si en un instante dado, A le lanza a B directamente por el suelo una bola para que este la recoja ¿creéis que podrá hacerlo?

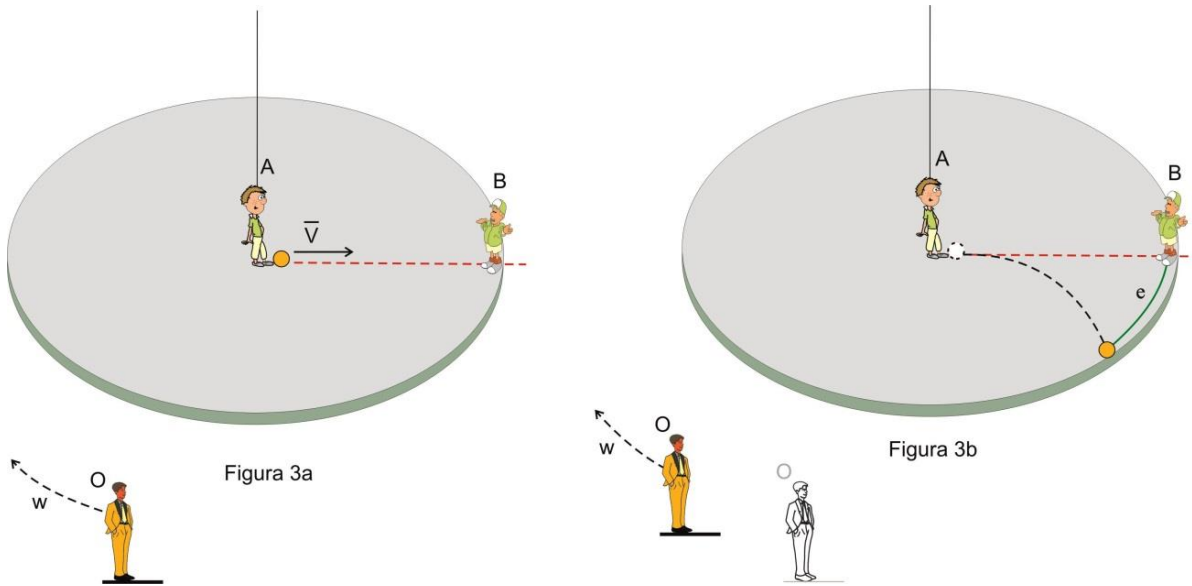
La respuesta correcta a esta cuestión es que no. Para comprenderlo, vamos a analizar qué es lo que vería un observador inercial O situado fuera de la plataforma (figuras 2a y 2b siguientes). Para O la bola sale de A en dirección radial (línea punteada en rojo) y con una rapidez v . Para él la bola se mueve en línea recta, y si B no la recoge es porque este se mueve solidariamente con la plataforma y cuando la bola llega al borde (figura 2b), B ya no está donde se encontraba inicialmente, es decir, en el preciso instante que salió la bola (figura 2a).

En las figuras, siempre según el observador O, \mathbf{r} es el vector de posición de B, mientras que θ es el ángulo descrito por B desde que A lanza la pelota hasta que esta llega al borde. La línea en verde, representa la longitud del arco correspondiente a dicho ángulo, a una distancia r del centro y w la rapidez angular (constante) con que gira la plataforma y cualquier elemento fijo en ella (excepto el niño A que no gira por encontrarse en el propio eje). Sobre el eje, hemos dibujado el vector velocidad angular correspondiente.



Podemos ahora plantearnos qué es lo que vería un observador fijo a la plataforma. Por ejemplo: *¿Qué es lo que observaría B?* Para contestar esta cuestión hay que “montarse en la plataforma” y tener en cuenta que para A o para B ellos (y la plataforma) están en reposo y es el exterior quien gira a su alrededor en el sentido de las agujas del reloj. Teniendo esto en cuenta, lo que vería B,

en el instante que se lanza la pelota (que tomaremos como $t = 0$) y en el instante en que esta llega al borde (t), sería lo que, respectivamente, se reproduce en las figuras 3a y 3b siguientes:



Según B la bola sale radialmente desde A directa hacia él (figura 3a), pero por el camino algo la desvía de su trayectoria y le hace describir una línea curva. Además vería a O moviéndose en sentido horario con movimiento circular uniforme respecto del centro de su plataforma (figura 3b).

Para B, ni él, ni A, ni tampoco la plataforma, se han movido de como estaban sino que es el exterior (incluyendo a O) quien gira en torno a ellos, y para explicar el movimiento que observan que hace la bola, desviándose de su trayectoria inicial, recurren a la denominada **fuerza de Coriolis**, atribuyéndole a ella esa desviación lateral.

Es importante darse cuenta de que la longitud del arco comprendido entre la bola y B en la figura 3b es exactamente la misma que en la 2b.

Desde un sistema inercial el observador O, comprobaría que el ángulo θ cambia con el tiempo, de acuerdo con las ecuaciones del movimiento circular y uniforme. Por tanto, de acuerdo con la figura 2b, podría expresar θ como:

$$\theta = w \cdot t \quad (1)$$

Para O cualquier elemento fijo a la plataforma a una distancia dada del eje (por ejemplo, el niño B) describe una trayectoria circular con rapidez angular w constante. Por otra parte, la distancia recorrida por B en su giro (coloreada de verde), coincide con la longitud "e" del arco descrito (ved figura 2b anterior), por lo que podemos expresarla como:

$$e = r \cdot \theta \quad (2)$$

Consideremos ahora la bola que sale radialmente del origen con rapidez lineal v , para, después de un tiempo t , llegar al borde de la plataforma. Según el observador inercial O , como acabamos de ver, la bola no hace sino seguir una trayectoria rectilínea con la misma dirección y sentido que la de la velocidad inicial de salida. Por tanto, el desplazamiento experimentado por la bola en ese tiempo será (ved figura 2b):

$$r = v \cdot t \quad (3)$$

Sustituyendo ahora las ecuaciones (1) y (3) en la ecuación (2), obtenemos que:

$$e = v \cdot w \cdot t^2 \quad (4)$$

La distancia e , como hemos visto, es la misma que la distancia que según los niños (A y B), se desvía la bola por la acción de la fuerza de Coriolis en el sistema de referencia de la plataforma rotatoria. En dicho sistema (ved figura 3b), la desviación es hacia la derecha del vector velocidad (mirando a lo largo del mismo).

La ecuación anterior (4) se puede expresar como:

$$e = v \cdot w \cdot t^2 = \frac{1}{2} (2v \cdot w) \cdot t^2 = (1/2) a_{co} \cdot t^2$$

El producto $v \cdot w$ tiene dimensiones de aceleración ($L \cdot T^{-2}$), de manera que $2v \cdot w$ se conoce como aceleración de Coriolis (a_{co}).

Si designamos como m la masa de la bola, la fuerza de Coriolis sobre ella será:

$$F_{co} = m \cdot a_{co} \rightarrow F_{co} = m \cdot 2v \cdot w$$

La Tierra gira en torno a su eje. Por tanto, rigurosamente hablando, no es un SRI y las leyes de Newton no son válidas. Sin embargo, el efecto suele ser tan pequeño que en la mayoría de casos podemos despreciarlo. No obstante, sí que se nota, y hay que tenerlo muy en cuenta, cuando se trata del movimiento de grandes masa de aire o de corrientes oceánicas. En esos casos para poder estudiar tales movimientos aplicando las leyes de Newton, hemos de tener en cuenta también a las fuerzas de inercia (o pseudofuerzas) como la de Coriolis o la fuerza centrífuga, que juegan un papel muy importante en la Meteorología y en el clima terrestre. No obstante, la Tierra no es igual que la plataforma plana que hemos considerado para poder abordar inicialmente el problema. Esto hace que la expresión que acabamos de obtener para el módulo de la fuerza de Coriolis, sólo sea válida para un observador situado en el polo, que es el único lugar en el que el vector velocidad angular es perpendicular al suelo sobre el que se halla dicho observador (como ocurría con la plataforma).

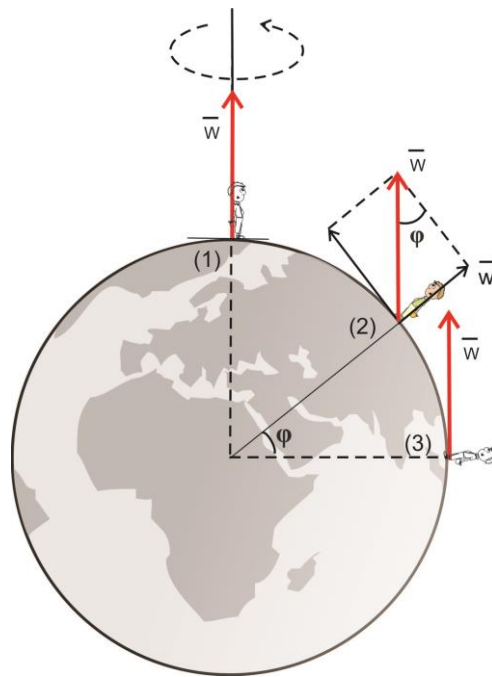


Figura 4

En la figura anterior, en el observador (1) el eje de la Tierra sale hacia arriba coincidiendo con el eje de dicho observador, y el suelo bajo sus pies se puede considerar como equivalente a la plataforma plana rotatoria de las figuras anteriores. Podemos ver cómo el vector velocidad angular (en rojo) es, en este caso, perpendicular al suelo.

Cuando el observador se halla en una zona intermedia como la (2), la velocidad angular ya no es perpendicular al suelo (su plataforma). El aire, para dicho observador, se mueve sobre la superficie terrestre que le rodea, por tanto, solo le afecta la rotación respecto del eje vertical que sale de sus pies en dirección radial. Para poder abordar el problema en esta situación, lo que hacemos es descomponer el vector velocidad angular en dos componentes: una perpendicular al suelo (de módulo w') y otra paralela al suelo, siendo w' la responsable de la fuerza de Coriolis. De la figura, queda claro que:

$$w' = w \cdot \text{sen}\phi$$

Vale la pena darse cuenta de que conforme se mueve el observador de (1) hacia (3), w' va disminuyendo progresivamente.

En la posición (3), el observador se encuentra en el ecuador terrestre. En esa zona, el eje terrestre está completamente “tumbado” respecto del observador y $w' = 0$. Por tanto, la fuerza de Coriolis, también lo será.

Fijémonos que la expresión obtenida para w' en la posición intermedia (2), tiene carácter general, ya que en ella se contemplan los otros casos considerados. En efecto, cuando el observador está

en el polo, $\varphi = 90^\circ$ y $w' = w \cdot \sin \varphi = w \cdot \sin 90^\circ = w$; mientras que cuando el observador se halla en el ecuador, $\varphi = 0^\circ$ y $w' = w \cdot \sin \varphi = w \cdot \sin 0^\circ = 0$.

La expresión general de la fuerza de Coriolis en el sistema Tierra, un sistema no inercial para cualquier observador terrestre, es pues:

$$F_{co} = m \cdot 2v \cdot w \sin \varphi$$

Que corresponde al producto vectorial: $\vec{F}_{co} = 2m \cdot (\vec{v} \times \vec{w})$

De acuerdo con el producto vectorial, la fuerza de Coriolis sobre una porción de aire que en el hemisferio norte se dirige hacia el polo en una zona de latitud media (como la 2 del esquema anterior), será perpendicular al plano formado por los vectores velocidad lineal y velocidad angular y en sentido este (hacia dentro del papel), tal y como se indica en la figura 5 siguiente:

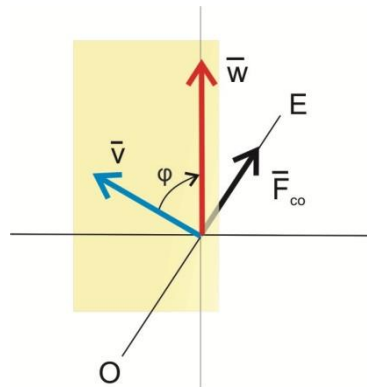


Figura 5

3. Características principales del Chorro Polar

El Chorro Polar es una potente y estrecha corriente de vientos muy intensos, con velocidades que suelen oscilar entre los 130 km/h y los 250 km/h, alcanzando con relativa frecuencia picos de 300 km/h y en alguna ocasión (condiciones extremas) valores del orden de 500 km/h. Dicha corriente circula de oeste a este en la parte alta de la troposfera, entre 9 km y 12 km de altura, donde vuelan los aviones de crucero.

Aunque se trata de un fluido y sus bordes son difusos, esquemáticamente se puede visualizar como una especie de cinta estrecha alrededor del eje terrestre (ved figura 6). La anchura de esta cinta oscila entre 200 km y 500 km, mientras que su espesor vertical varía entre 1 km y 5 km. Forma ondas de aspecto similar a los meandros de un río, cuyo tamaño puede variar bastante dependiendo de la diferencia de temperatura entre el aire que llega del ecuador y el aire que llega del polo. Cuanto mayor es el contraste térmico, más potente es el chorro y de menor amplitud son las ondas que se forman.

En invierno (hemisferio norte) el contraste de temperatura entre el polo y el ecuador es máximo. Esto explica, como veremos más adelante, que el chorro sea más fuerte y se desplace hacia el sur (latitudes 30° N - 35° N), pudiendo alcanzar incluso las islas Canarias en sus ondulaciones.

En verano (hemisferio norte) el contraste térmico disminuye. El aire cálido de latitudes bajas empuja al sistema hacia el polo. Por eso el chorro se debilita y la latitud media sube hasta los 50° N - 60° N, con lo que las borrascas atlánticas se van hacia Escocia, Noruega o Islandia, dejando a España bajo la influencia del anticiclón de las Azores.

4. Qué funciones desempeña

Guía las borrascas atlánticas las cuales viajan como “subidas” al chorro que las arrastra. Cuando es fuerte y estable, separa el aire frío polar (al norte del chorro) del aire cálido subtropical (al sur del chorro).

No es una línea recta. Por el contrario, como ya hemos indicado, suele ondularse más o menos produciendo lo que se conoce como “ondas de Rossby”, las cuales permiten que aire frío baje al sur y que aire cálido suba al norte, tal y como se indica en el esquema siguiente:

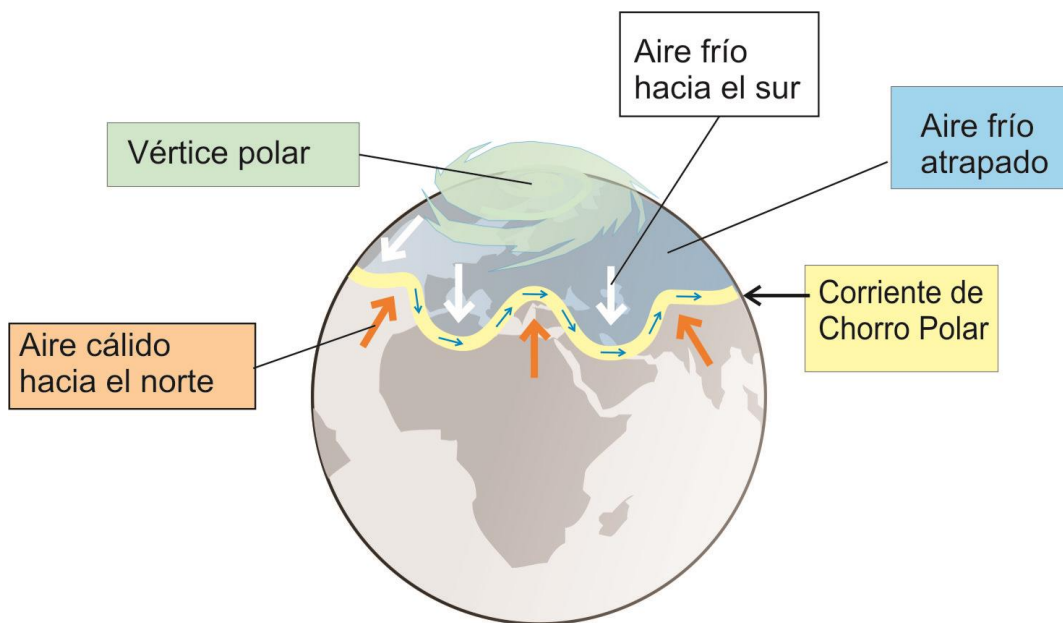


Figura 6

Cuando, por distintas razones, se vuelve más bajo y serpenteante, permite que las borrascas se muevan por latitudes más bajas.

Su trayectoria es clave para la meteorología: un chorro directo hacia la Península Ibérica trae inestabilidad y lluvias persistentes, mientras que su desplazamiento al norte permite la entrada de altas presiones (estabilidad y sol).

5. Cómo se forma

Para comprender bien cómo se forma, es necesario tener en cuenta los efectos de la temperatura, la presión y el giro de la Tierra.

Imaginemos dos columnas de aire, una sobre el Ecuador (cálida) y otra sobre el Polo norte (fría):

En el Ecuador el aire caliente se expande y se eleva. Eso implica que a 10 km de altura, todavía hay mucho aire por encima. Es decir: hay **alta presión en altura**.

En el Polo el aire, al estar frío, es más denso y se comprime hacia el suelo. A 10 km de altura, casi no queda aire por encima. Es decir: hay **baja presión en altura**.

El aire viaja desde donde hay más presión a donde hay menos. A 10 km de altura, el aire "siente" que hay mucha presión en el Ecuador y muy poca en el Polo. Esa diferencia genera una fuerza (Fuerza del Gradiente de Presión), que designaremos como F_p la cual empuja el aire hacia el Polo.

Si la Tierra no girase sobre sí misma, veríamos que ese aire iría directo al norte formando una única y gigantesca "célula de convección", en la que el aire caliente subiría en el ecuador y viajaría por arriba hasta el polo donde se enfriaría y caería, para acabar regresando al ecuador por la superficie terrestre.

Sin embargo, como la Tierra gira de O a E (y nosotros con ella) vemos que, de hecho, no lo hace así. Lo que ocurre es que el aire en altura que "intenta" ir hacia el N, se desvía hacia el E. A unos 30 ° de latitud, ese aire se ha desviado tanto que casi se mueve ya hacia el E y no puede avanzar más hacia el polo norte. Esto contribuye a que se "amontone" y descienda al suelo (más frío, seco y denso que antes), regresando hacia el ecuador por la superficie, dando lugar a lo que se conoce como "Célula de Hadley". Este mecanismo de regreso se justifica porque el aire denso que "cae" genera una zona de alta presión, mientras que en el ecuador, el aire caliente que asciende genera una zona de baja presión, de modo que el aire se mueve por la superficie terrestre de mas a menos presión y se cierra el ciclo.

En realidad, entre el ecuador y el polo norte, existen tres células: la de Hadley (1), la de Ferrel (2) y la Polar (3). Y lo mismo entre el ecuador y el polo sur. Si nos situamos en el hemisferio norte con la vista hacia el oeste, veríamos que el sentido de la corriente de aire en la Polar y la de Hadley es el mismo (horario) pero la corriente de aire en la célula de Ferrel circula en sentido contrario (antihorario), de modo que esta actúa como una especie de engranaje mecánico entre las otras dos. En el esquema siguiente (figura 7) se ha representado (no a escala) un corte transversal de la mitad del hemisferio norte, en el que se pueden apreciar dichas células.

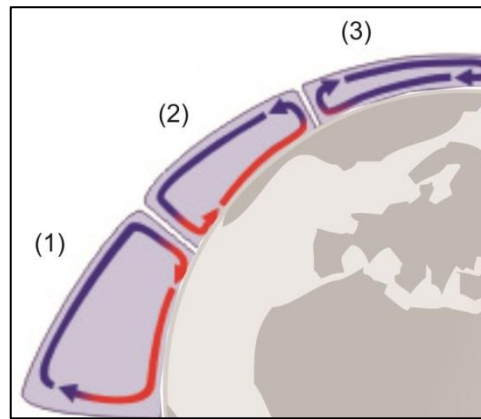


Figura 7

Conviene tener en cuenta que estas células, dada la forma esférica de la Tierra, si pudiesen visualizarse desde el espacio serían algo parecido a tubos cilíndricos, un tanto aplastados, rodeando a la Tierra a modo de cinturones, desde el ecuador a los polos (tres en el hemisferio norte y otras tres, simétricas, en el hemisferio sur). Lo que vemos en los esquemas, corresponde a un corte transversal de esos tubos.

Para comprender cómo se forma la corriente de Chorro Polar, utilizando las leyes de la dinámica de Newton, admitimos la existencia de una pseudofuerza llamada “Fuerza de Coriolis” (F_{co}) la cual, en el hemisferio norte, desvía esa corriente de aire hacia la derecha de tal forma que parte del aire que iba al N acaba girando hasta soplar de O a E y describir finalmente un movimiento circular en torno al eje terrestre.

El módulo de la fuerza de Coriolis viene dado por la expresión:

$$F_{co} = m \cdot 2v \cdot \omega \cdot \sin \varphi$$

donde m es la masa de la porción de aire sobre la que se ejerce la fuerza, v la rapidez lineal con que se mueve respecto al suelo, ω la rapidez angular de la Tierra en torno a su eje y φ la latitud del lugar (entre $\varphi = 0$ en el ecuador y $\varphi = 90^\circ$ en el polo).

El proceso se puede esquematizar de forma sencilla en los siguientes pasos:

a) Al principio el aire siente sobre todo la fuerza F_p debida al gradiente de presión y acelera hacia el N (en el ecuador, donde $\varphi = 0$, la fuerza de Coriolis es nula). El vector F_{co} , es siempre perpendicular a la velocidad lineal del objeto, con sentido hacia la derecha si se mira a lo largo del vector velocidad cuando la rotación (vista desde arriba) es en sentido antihorario.

b) Al ganar velocidad y aumentar la latitud φ , la fuerza de Coriolis F_{co} perpendicular a la velocidad y que tira de ese aire hacia el E, se hace cada vez mayor.

c) Como consecuencia de una F_{co} cada vez más grande la trayectoria se hace cada vez más curva, hasta que la velocidad del viento apunta hacia el este, F_{co} hacia el sur y F_p hacia el norte, de modo que esas dos fuerzas tienen la misma dirección y sentidos contrarios. No obstante, no llegan a anularse porque F_p es algo mayor que F_{co} , lo que proporciona la aceleración centrípeta necesaria para que la corriente de chorro realice el movimiento circular alrededor del eje N-S de la Tierra, que observamos.

En la figura 8 siguiente se han representado los tres pasos anteriores, considerando las fuerzas horizontales que actúan sobre una pequeña porción de aire a una cierta altura sobre la superficie terrestre. Para mayor claridad, el vector velocidad (excepto en el tercer paso), se ha representado algo alejado de los vectores fuerza.

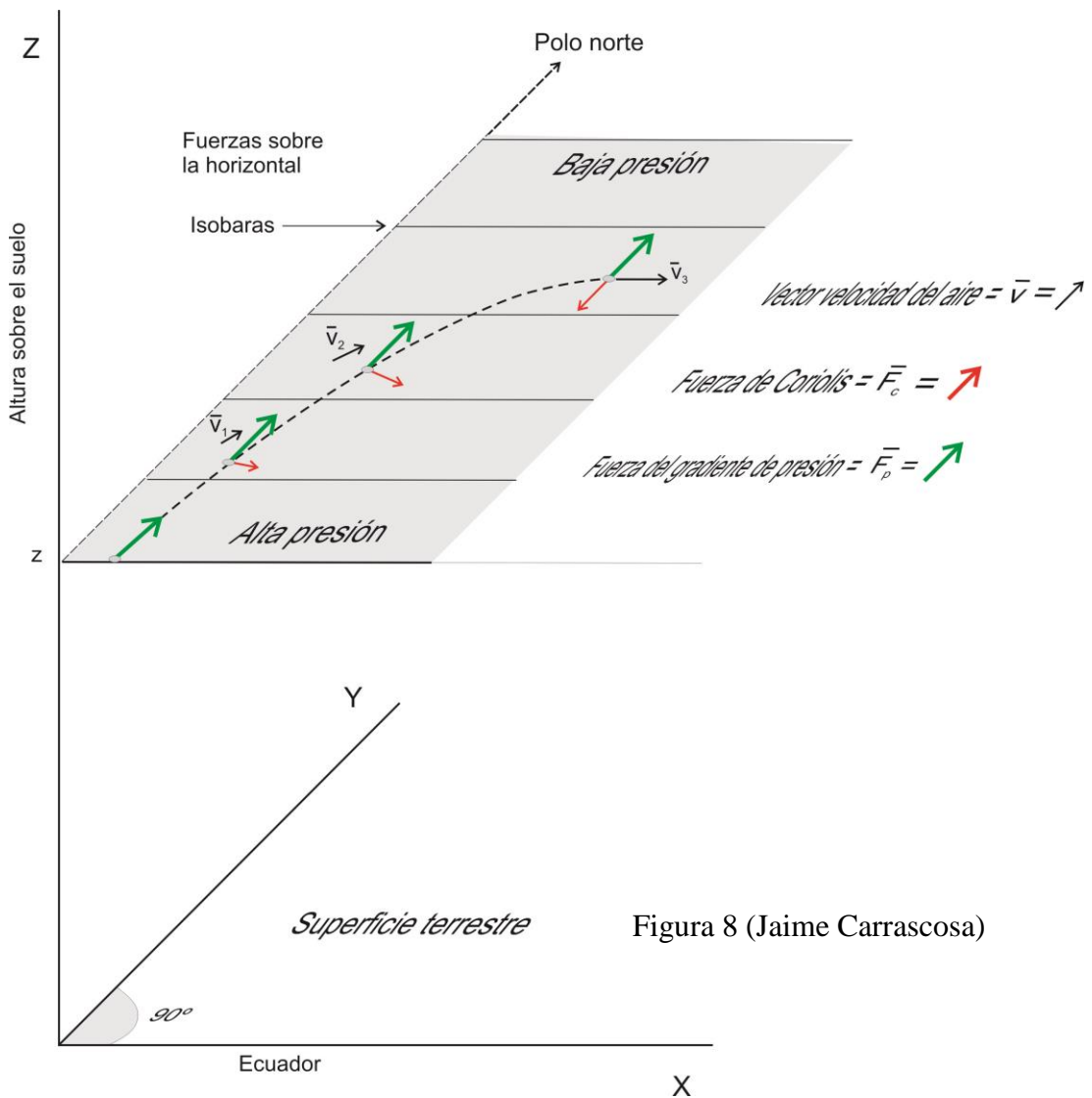


Figura 8 (Jaime Carrascosa)

En realidad, la diferencia de presión que origina el chorro polar se debe a una diferencia de temperatura. Es decir, la intensidad del gradiente de presión en la “horizontal” (línea paralela al suelo) entre dos puntos situados a una cierta altura del suelo, depende de lo grande que sea la diferencia de temperatura entre las columnas de aire (consideradas isotérmicas) en las que se hallan estos puntos.

Sobre la célula de Ferrel el aire es templado y sobre la célula Polar es gélido, con lo que a una misma altitud z (por ejemplo sobre los 10 km), la presión en el aire templado es mucho mayor que en el aire polar, con lo que se genera un enorme gradiente de presión, de forma que el aire a alta presión de la célula de Ferrel se mueve rápidamente hacia la zona de baja presión sobre el Polo. Si la Tierra no girase se tendría un viento brutal en la dirección norte, pero debido a la fuerza de Coriolis F_{co} que lo empuja hacia la derecha, ese viento gira hacia el este y cuanto más rápido se mueve y más se acerca al polo, mayor es F_{co} , de forma que llega un momento en el que se llega a un estado de casi equilibrio y ese viento no logra llegar al eje terrestre sino que queda atrapado girando en torno a él.

¿Cómo es posible que un sistema que rodea todo el globo con forma de toroide produzca un chorro de viento de una anchura aproximada de unos 200 km (el chorro)?

Entre otras razones, hay que considerar que:

Aunque las células de Ferrel y Polar son gigantescas, no se mezclan gradualmente. El aire cálido de la célula de Ferrel y el aire gélido de la Polar chocan de forma abrupta y el gradiente de presión es máximo en la zona de convergencia de ambas células. Como la velocidad del viento es proporcional a dicho gradiente, el viento solo alcanza velocidades de “chorro” en esa estrecha franja en la que el contraste es extremo. Fuera de ella el gradiente de presión se suaviza y el viento cae drásticamente. En esa franja (de 200 km a 300 km) F_p es algo mayor (y opuesta) a F_{co} , dando lugar a una fuerza centrípeta responsable del movimiento circular del Chorro Polar en torno al eje terrestre.

Se llama corriente de chorro porque es como un río de aire confinado que se mueve a gran velocidad. Por debajo del mismo el choque entre la célula de Ferrel y la Polar, por encima el Vórtice Polar y por los lados el gradiente de presión.

Como el contraste de temperatura entre la célula de Ferrel y la Polar es máximo en invierno, el gradiente de presión es mayor y el Chorro Polar es mucho más fuerte y veloz en esa época.

En resumen: Sin gradiente de presión, no habría viento; pero sin gradiente térmico, no habría diferencia de presión. Si existe mucho contraste térmico, ello implica mucha diferencia de presión en altura, lo que genera un chorro más veloz y potente, con ondulaciones menos acusadas. Por el contrario, si el contraste térmico es poco, lo que tenemos es un gradiente de presión pequeño y, por tanto, una corriente de chorro más lenta y debilitada, con la formación de grandes meandros.

6. ¿Cómo se puede alterar el chorro polar y qué consecuencias tiene?

El calentamiento global es un potente motor del cambio climático antrópico y, entre otros efectos, está haciendo que el contraste térmico entre el ecuador y el polo disminuya, lo que sin duda tiene efectos importantes sobre las corrientes de chorro y, consecuentemente, sobre el clima terrestre.

En condiciones normales (chorro fuerte y rápido), la corriente de chorro funciona como una cinta transportadora de alta velocidad que arrastra las borrascas del Atlántico de oeste a este. Las borrascas pasan rápido: llueve un día o dos, y el chorro se las lleva hacia Europa central o el norte.

El problema es que la acelerada disminución del hielo marino ártico, la reducción de la capa de nieve, los patrones de evapotranspiración y otras anomalías meteorológicas han provocado que el Ártico se caliente mucho más rápido que otras partes del globo. Este efecto se conoce como "Amplificación Ártica".

Al calentarse más el Ártico que el promedio mundial, el chorro pierde fuerza (puesto que disminuye el gradiente térmico y con él la diferencia de presión) y empieza a serpentear más, con lo que las borrascas se desplazan más lentas. Esos meandros se vuelven tan profundos que ocurren varias cosas. Entre otras:

-Velocidad de avance casi nula. El viento dentro del chorro sigue soplando, pero la onda misma (la curva) deja de desplazarse hacia el este, asemejándose a una onda estacionaria, en la que una borrasca puede quedar atascada sobre una región durante mucho más tiempo del habitual (bloqueo meteorológico).

-Aislamiento. A veces, una de esas curvas hacia el sur se estira tanto que se "estrangula" y se separa de la corriente principal. Esto es lo que conocemos como una DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos). Es, literalmente, una bolsa de aire frío y baja presión que se queda flotando sin que nadie la empuje (DANAS más frecuentes).

- Los meandros más profundos, permiten una progresión mayor de lo habitual, de aire frío hacia latitudes más bajas y, al mismo tiempo, de más aire cálido hacia latitudes más altas (ved figura 6 anterior).

7. Vórtice polar y chorro polar

El Vórtice Polar (ved figura 6 anterior) se puede imaginar como un gigantesco remolino de aire extremadamente frío que se sitúa justo encima del Polo. Se encuentra en la estratosfera (más arriba que el chorro polar, entre los 15 y 50 km de altura). Solo existe con fuerza en invierno. Cuando el Polo Norte deja de recibir luz solar, el aire se enfría drásticamente, se vuelve muy denso y empieza a girar a velocidades vertiginosas debido a la rotación terrestre.

El Vórtice Polar actúa como si fuese un "congelador cerrado" que mantiene el aire más frío del planeta confinado sobre el Ártico por arriba del chorro polar. No obstante, aunque se hallan a distintas alturas, ambos sistemas están relacionados y se influyen mutuamente:

-El Chorro Polar (que como sabemos está más abajo) actúa como el límite físico que encierra al aire frío del Vórtice (sería algo así como "la tapa" del congelador. Si el chorro es fuerte y rectilíneo, el aire frío se queda "atrapado" arriba, en el Ártico.

-Cuando el Vórtice Polar estratosférico es muy intenso y circular, ayuda a que el Chorro Polar de abajo también sea fuerte y estable.

El problema es que la Amplificación Ártica de la que hemos hablado antes, a veces favorece que viajen burbujas de un aire más cálido hacia la estratosfera. Ese calor repentino deforma el Vórtice Polar pudiendo llegar a romperlo, lo que hace que empuje con menos fuerza al Chorro Polar hacia abajo. Esto contribuye a que el Chorro pierda su forma circular y se vuelva muy ondulado (meandros gigantes) desplazándose más al sur. Además, en esta situación, masas de aire polar que antes estaban confinadas en el Vórtice, pueden ahora desplazarse por los meandros del Chorro hacia latitudes más bajas, provocando olas de frío extremo en lugares donde no es habitual.

8. El Chorro Polar y la aviación

La corriente de chorro no solo influye en la meteorología sino que también es una pieza fundamental de la logística mundial. Los aviones de largo alcance vuelan a altitudes de entre 9 y 12 km precisamente para encontrarse con este "río de aire".

En efecto, las líneas aéreas planifican sus rutas basándose en la posición diaria de la corriente de chorro. De la misma manera que un nadador avanza más rápido a favor de la corriente de agua, los aviones utilizan el chorro para volar a favor de una corriente de aire y poder ahorrar así tiempo y combustible:

-Hacia el Este (por ejemplo: Nueva York → Madrid): Los aviones se "suben" al chorro. Con vientos de cola que pueden superar los 300 km/h, el avión alcanza velocidades muy grandes respecto al suelo sin apenas forzar los motores. Esto reduce el tiempo de vuelo y el consumo de combustible, con el consiguiente ahorro de emisiones de CO₂.

-Hacia el Oeste por ejemplo: Madrid → Nueva York): Aquí el chorro es un obstáculo a superar por lo que los pilotos intentan evitar el núcleo del chorro o bien buscan altitudes diferentes para no volar con un viento de cara tan fuerte, lo que alargaría el viaje y aumentaría el gasto.

El calentamiento global no solo está haciendo que el chorro sea más errático y sinuoso, sino que está afectando los vuelos debido fundamentalmente a:

-Más Turbulencias: Es el efecto más preocupante. El calentamiento global aumenta la "cizalladura" (la diferencia de velocidad entre distintas capas de aire). Esto genera más turbulencias. Si los aviones tienen que desviarse constantemente para evitar zonas turbulentas o vientos de cara más fuertes, consumirán más combustible, alimentando de esta forma el ciclo del calentamiento global.

-Vuelos de ida más rápidos, de vuelta más lentos: Al aumentar el contraste térmico en algunas capas altas de la atmósfera, el chorro se vuelve localmente más intenso. Esto está batiendo récords en vuelos transatlánticos hacia Europa (algunos han bajado de las 5 horas), pero a cambio, los vuelos hacia América tardan cada vez más, habiéndose comprobado que no se da un equilibrio y que el gasto de combustible en los vuelos en contra del chorro (de este a oeste), supera al de los vuelos que se realizan a favor (de oeste a este), con el consecuente aumento de las emisiones de CO₂.

-Dificultad en el despegue: Aunque ocurre en el suelo y no en el chorro, el aire más cálido es menos denso. En días de calor extremo, a los aviones les cuesta más generar sustentación, lo que obliga a reducir el peso (menos pasajeros o carga) para poder despegar con seguridad.

En resumen: La aviación se enfrenta a un reto de adaptación. Para finales de siglo, viajar en avión podría ser más caro y menos confortable. Además un mayor calentamiento global implica la alteración del Chorro (más turbulencias) con vuelos menos eficientes y más largos, lo que da lugar a más emisiones de CO₂.

9. Conclusión

Parece claro que si la temperatura media del planeta sigue aumentando, la Amplificación Ártica tendrá un papel fundamental en el debilitamiento del Vórtice Polar y las corrientes de chorro presentarán cada vez ondulaciones más acusadas y persistentes en el tiempo, lo cual contribuirá a aumentar extremos climáticos como tormentas, olas de calor, descolgamiento de más DANAS, etc., afectando también, como acabamos de ver a la aviación.

ANEXO IV

RECURSOS DE EDUCACIÓN NO REGLADA SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

En este anexo se ofrece una selección de centros de divulgación, plataformas digitales y recursos audiovisuales para profundizar en el estudio del cambio climático. Esta lista no pretende ser exhaustiva y se actualiza periódicamente para ofrecer herramientas relevantes en materia de cambio climático y sostenibilidad.

1. Observatori del Canvi Climàtic

Es un centro educativo y divulgativo de referencia, gestionado por la Fundación València Clima i Energia. Su espacio está diseñado para ofrecer una experiencia interactiva y dinámica, ideal para visitas escolares y público general.

- **Qué ofrece:** Exposiciones interactivas, talleres para centros educativos y asesoramiento ciudadano sobre transición energética.
- **Ubicación:** Calle Doctor Lluch, 60, 46011 (Valencia).
- **Web oficial:** climaienergia.com/observatori
- **Contacto:** observatori@climaienergia.com

2. Divulgameteo

Portal del físico y comunicador científico José Miguel Viñas. Es un recurso excelente para niveles universitarios y profesorado, ya que ofrece rigor científico con un lenguaje accesible.

- **Recurso destacado:** Una sección de "Lecturas recomendadas" donde se pueden descargar publicaciones y artículos técnicos sobre la evolución del clima.
- **Web:** divulgameteo.es/lecturas-recomendadas

3. Proyecto Climántica

Una plataforma de educación ambiental pionera de la Xunta de Galicia que utiliza el cambio climático como eje transversal para conectar temas como la biodiversidad, la energía y la hidrosfera. Nivel educativo de secundaria. Permite abordar el problema del cambio climático mediante un enfoque interdisciplinar.

- **Para docentes:** Dispone de 8 unidades didácticas interdisciplinares. Su estructura modular permite a los profesores utilizar capítulos aislados según las necesidades del aula.
- **Idiomas:** Contenidos disponibles en castellano, gallego e inglés.
- **Web:** climantica.org

4. MEDiNa. Meteorología, Educación y Divulgación (AEMET)

MEDiNa (Meteorología, Educación y DIvulgación en el ámbito Nacional), es un proyecto de AEMET, que debe su nombre en honor de D. Mariano Medina Isabel (1922-1994). Con este proyecto AEMET pretende acercarse a la sociedad, desde un punto de vista divulgativo, para atender esa necesidad que se demanda cada vez más, desde diferentes colectivos.

- **Qué ofrece:** Unidades didácticas actualizadas, experimentos para realizar en clase, juegos interactivos y el repositorio "Arcimis" con materiales históricos y actuales.
- **Web:** medina.aemet.es/cambio-climatico

5. Recursos Audiovisuales:

Existe una amplia oferta en este campo y se puede acceder a muchos documentales y películas de gran interés mediante una sencilla búsqueda en internet. Solo a título de ejemplo (hay muchas más opciones), mencionaremos:

Clásicos Imprescindibles

- **Una verdad incómoda (2006) y su secuela (2017):** El despertar de la conciencia global de la mano de Al Gore.
- **Home (2009):** Una visión aérea impresionante de la fragilidad de la Tierra. [Disponible gratis en YouTube].
- **Before the Flood (Antes de que sea tarde, 2016):** Documental de National Geographic con Leonardo DiCaprio que explora soluciones actuales.

Para el debate y la crítica

- **Merchants of Doubt (Ciencia a sueldo, 2014):** Sobre cómo se construye la desinformación y el negacionismo.
- **Chasing Ice (Persiguiendo el hielo, 2012):** Captura de forma visualmente impactante el deshielo de los glaciares.

Ficción

- **The Day After Tomorrow (El día de mañana, 2004):** Cine de catástrofes para analizar (críticamente) la diferencia entre tiempo y clima. Sobre un posible efecto catastrófico relacionado con el cambio climático.
- **No mires arriba (2021):** Una sátira brillante sobre la indiferencia social y política ante las advertencias científicas.
- **Mariposas Negras (2025):** Una película de animación para adultos que trata el cambio climático desde una perspectiva de desigualdad social. Muy recomendada para debates post-visualizado.
- **Flow (2025):** Un viaje visual sin diálogos sobre un gato que sobrevive a una gran inundación. Es perfecta para conectar con la empatía hacia el mundo animal frente al colapso ambiental.
- **El Eternauta (Serie Netflix, 2025):** Aunque es ciencia ficción, la adaptación de esta obra plantea escenarios de supervivencia extrema que resuenan con las crisis climáticas actuales.

Documentales de impacto

- **Black Water (2025/2026):** Dirigido por Natxo Leuza. Es fundamental para entender el concepto de *refugiado climático*. Se centra en el éxodo masivo en Bangladesh debido a la subida del nivel del mar. Es crudo, humano y actual.

- **Planeta en Peligro (Serie BBC/RTVE Play):** Una producción reciente que utiliza tecnología de vanguardia para mostrar cómo han cambiado ecosistemas específicos en los últimos cinco años. Disponible en plataformas públicas como RTVE Play.
- **Gracias por la lluvia" (Julia Dahr):** Aunque tiene unos años, sigue siendo el referente "no reglado" más emotivo sobre cómo un agricultor keniano vive el cambio climático en primera persona.

Recursos Digitales y Plataformas

- **SUNCINE (Cada Aula un Cine):** Es el festival de cine ambiental más importante. Tienen una plataforma gratuita para centros y educadores con guías didácticas para cada película.
- **EducaClima:** Un portal excelente que segmenta recursos (vídeos, juegos, noticias) por edades y temáticas (agua, residuos, energía).
- **CENEAM (Centro Nacional de Educación Ambiental):** Su canal de YouTube y sus "Guías de Bibliotecas Verdes" son tesoros de materiales informativos descargables.

6. Recursos en Abierto

Para complementar, se sugieren estos canales y vídeos específicos:

- **Conferencia "Desertificación y Cambio Climático":** Un encuentro clave grabado en la Ciutat de les Arts i les Ciències de Valencia que analiza la problemática en el arco mediterráneo. [Ver en YouTube.](#)
- **Hope! En el pie del cambio:** Serie de micro-documentales y recursos sobre sostenibilidad que ofrecen una visión optimista y basada en la acción. [Web Futuro Verde.](#)

Esta unidad didáctica acabó de revisarse el 14 de mayo de 2026.

Se insta a su copia, divulgación y utilización con fines educativos, sin más que citar la fuente. Se puede acceder a la misma en la página web: didactica fisica quimica.es donde, normalmente, se va actualizando cada año, así como en la plataforma de ResearchGate y en la web: Divulgameteo.es

Jaime Carrascosa Alís

Fuentes bibliográficas consultadas para la elaboración de esta unidad

- Abellán-López, M. A. (2021). El cambio climático: negacionismo, escepticismo y desinformación. *Tabula Rasa*, 37, 283-301.
<https://doi.org/10.25058/20112742.n37.13>
- Banco Mundial. Comunicado de prensa. 18 de mayo de 2023. Las ciudades son la clave para resolver la crisis climática. Accesible en marzo de 2024 en:
<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/05/18/cities-key-to-solving-climate-crisis>
- Bohigas, X. (2017). Centrales nucleares, emisiones de CO₂ y cambio climático. *PAPELES de relaciones ecosociales y cambio global*, 138, pp 109-121. Accesible en:
https://www.fuhem.es/papeles_articulo/centrales-nucleares-emisiones-de-co2-y-cambio-climatico/
- Bosch, J. (2024). *Jaque a la democracia*. Ariel (Barcelona). [8]
- Carrascosa, J., Martínez, S., Alonso, M. y Ruíz, J.J. (2022). Análisis de algunas ideas alternativas relacionadas con el cambio climático. *Revista Científica* 45 (3), 296-314.
<https://doi.org/10.14483/23448350.17442>
- Carrascosa Alís, J. (2024). Del cambio climático hacia la construcción de un futuro sostenible, *preprint*, DOI: 10.13140/RG.2.2.30563.37928/1
- Carrascosa Alís, J., Gil Pérez, D. y Vilches Peña, A. (2024). Los mapas conceptuales: Una herramienta educativa para hacer frente al cambio climático y a la crisis socioambiental global. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 8(2), 53-65.
<https://doi.org/10.17979/arec.2024.8.2.10683>
- Cavan, E.L., Belcher, A., Atkinson, A. *et al.*, (2019). The importance of Antarctic krill in biogeochemical cycles. *Nature Communications* 10, 4742.
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12668-7>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., Bauer-Gottwein, P. (2021). Polar drift in the 1990s explained by terrestrial water storage changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114.
<https://doi.org/10.1029/2020GL092114>
- Diamond, J. (2006). *Colapso*. Por qué unas sociedades perduran y otras desaparecen. Debate (Barcelona).
- Epstein, Z., Sirlin, N., Arechar, A., Pennycook, G., Rand, D. (2023). The social media context interferes with truth discernment. *Science*. Downloaded from: <https://www.science.org> on December 04, 2024
- Escrivá, A. (2021). ¿Todavía no es tarde? *Mètode: Revista de difusió de la Investigació*, ISSN 2171-911X, Vol. 3, Nº. 110, págs. 108-108.
- Gil Pérez, D. y Vilches, A. (2017). El olvido de la demografía en los estudios de Sostenibilidad. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 1(2), 1-17.
- Gil Pérez, D. y Vilches, A. (2019). La comprensión e impulso de la sostenibilidad: un requisito imprescindible para una acción educativa y ciudadana eficaz. *Revista de educación ambiental y sostenibilidad*, 1(2), 1-14.
- Global Carbon Budget (GCB).
<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- Heras, F. (2017). Respuestas ante el negacionismo climático. *Papeles de Relaciones Ecosociales y Cambio Global*. Nº 140 2017/18, pp. 119-130.
- Heras, F. (2018). ¿Cómo comunicar el cambio climático? *Observatorio de la sostenibilidad*. Fundación Cristina Enea. San Sebastián (España).
- IPCC (1988-2023). Intergovernmental Panel on Climate Change. Assessment Reports about knowledge on climate change, its causes, potential impacts and response options. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/reports/>

- IPCC (2011). Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Accesible en abril de 2022 en: https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf
- IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24.
DOI: [10.1017/9781009157940.001](https://doi.org/10.1017/9781009157940.001)
- IPCC (2019). El océano y la criosfera en un clima cambiante. Accesible en abril de 2025 en: <https://www.unep.org/es/resources/informe/informe-especial-del-ipcc-sobre-el-oceano-y-la-criosfera-en-un-clima-cambiante>
- Janoš, T., Quijal-Zamorano, M., Shartova, N. *et al.*, Heat-related mortality in Europe during 2024 and health emergency forecasting to reduce preventable deaths. *Nat Med* (2025).
<https://doi.org/10.1038/s41591-025-03954-7>
- Jiménez, R. y Moreno, L. (2021). Energía nuclear compacta: discutamos. *Catalunyapress*.
<https://www.catalunyapress.es/texto-diario/mostrar/3297316/>
- Kivi, I.R., Makhnenko, R.Y., Oldenburg, C.M., Rutqvist, J. and Vilarrasa, V. (2022). Multi-layered systems for permanent geologic storage of CO₂ at the gigatonne scale. *Geophysical Research Letters*, 49 (24) e2022GL100443. DOI: [10.1029/2022GL10044](https://doi.org/10.1029/2022GL10044)
- Kotz, M., Levermann, A. & Wenz, L. (2024). The economic commitment of climate change. *Nature* 628, 551–557. [8] <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07219-0>
- Lenton, M.T. (2021). *Tipping points in the climate system*. Weather. Royal Meteorological Society. (RMetS). Brief Reports. Open Acces. <https://doi.org/10.1002/wea.4058>
- Lynas, M., Houlton, Z.B., Perry, S. (2021). Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature. *Environmental Research Letters*. 16 (2021) 114005.
- Mártil, I. (2020). *Energía solar: De la utopía a la esperanza*. Escolar y Mayo (Madrid).
- Moreno, I. (2025). *Atmósfera de bulos. Despejando las principales dudas y mitos sobre el cambio climático*. Penguin Random House. Grupo Editorial, SAU. (Barcelona).
- Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo sostenible. Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Núñez Mora, J.A. (2020). Noches muy cálidas en las ciudades mediterráneas.
<https://aemetblog.es/2020/07/03/noches-muy-calidas-en-las-ciudades-mediterraneas/>
- OMM. Unidos en la Ciencia. (2023). Informe de la Organización Meteorológica Mundial.
En: <https://library.wmo.int/idurl/4/68235>
- ONU. Noticias. Las ciudades, “causa y solución” del cambio climático. 18 Septiembre 2019. Accesible en mayo de 2025 en: <https://onu-habitat.org/index.php/las-ciudades-causa-y-solucion-del-cambio-climatico>
- Oreskes, N. (2004). The Scientific Consensus on Climate Change. *Science*, 306, (5702): 1686.
DOI: [10.1126/science.1103618](https://doi.org/10.1126/science.1103618)
- Oreskes, N y Conway, E, M. (2018). *Mercaderes de la duda*. Capitán Swing Libros. Oyarzún, J. (2014). Cambio climático global, ascenso del nivel de los mares y otras consecuencias: Una revisión y síntesis del conocimiento actual. www.aulados.net.

- Pérez-Torres, Vanesa. (2024). ¿De qué depende que actuemos ante el cambio climático o nos quedemos de brazos cruzados? *The Conversation*. 29 de abril. Accesible en internet: <https://theconversation.com/de-que-depende-que-actuemos-ante-el-cambio-climatico-o-nos-quedemos-de-brazos-cruzados-225831>.
- Rico, I., Izagirre, E., Serrano, E., López-Moreno, J. I. (2017). Superficie glaciaria actual en los Pirineos: Una actualización para 2016. *Pirineos*, 172, e029. Accesible en internet (05-01-2021): <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172004>
- Rifkin, J. (2010). *La civilización empática. La carrera hacia una conciencia global en un mundo en crisis*. Barcelona: Paidós.
- Ripple, J.W., Wolf, C., Jilian, W, G., Rockström, J., Mann, M.E., Oreskes, N., Lenton, M.T., Rahmstorf, S., Newsome, M, T., Xu, C., Svenning, J.C., Cardoso, P.C., Beverly E. L. and Crowther, W.T. (2024). The 2024 state of the climate report: Perilous times on planet Earth. *BioScience*, 2024, 0, 1–13. Downloaded from: <https://academic.oup.com/bioscience/advance-article/doi/10.1093/biosci/biae087/7808595>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. *et al.*, (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* **461**, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Seo, K., Ryu, D., Eom, J., Jeon, T., Kim, J., Youm, K., et al., (2023). Drift of Earth's pole confirms groundwater depletion as a significant contributor to global sea level rise 1993–2010. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103509. <https://doi.org/10.1029/2023GL103509>
- Solomon, S., Stone, K., Yu, P., et al., (2023). Chlorine activation and enhanced ozone depletion induced by wildfire aerosol. *Nature* 615, 259–264. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05683-0>
- Supran G and Hickey C (2022) Three Shades of Green(washing): *Analysis of Social Media Discourse by European Oil, Car, and Airline Companies*. Available at <https://ati.io/three-shades-of-greenwashing/>
- Valladares, F. (2023). *La Recivilización. Desafíos, zancadillas y motivaciones para arreglar el mundo*. Editorial Planeta (Barcelona).
- Vilches, A., Gil Pérez, D., Toscano, J.C. y Macías, O. (2008). Obstáculos que pueden estar impidiendo la implicación de la ciudadanía y, en particular, de los educadores, en la construcción de un futuro sostenible. Formas de superarlos. *Revista CTS*, 11 (4), 139-162 (2008). <http://oeibolivia.org/files/Volumen%204%20-%20N%C3%BAmero%2011/doss06.pdf>
- Vilches, A. y Gil Pérez, D. (2008). La Sostenibilidad y el debate nuclear, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 5 (1), 94-99.
- Vilches, A. y Gil Pérez, D. (2012). Año Internacional de la Energía Sostenible para Todos: La transición desde las energías no renovables a la energía sostenible. *Revista Española de Física*, 26 (4), 15-18.
- Vilches, A. y Gil Pérez, D. (2015). Ciencia de la Sostenibilidad: ¿Una nueva disciplina o un nuevo enfoque para todas las disciplinas? *Revista Iberoamericana de Educación*, 69 (1), 39-60.
- Viñas, J.M. (2022). *Nuestro reto climático*. Editorial Alfabeto (Madrid).
- Viñas, J.M.(2024). El negacionismo climático y otros bulos atmosféricos. Videoconferencia en la Universidad de la Rioja. <https://www.youtube.com/watch?v=old2HFDOWtA>
- WMO. State of the Global Climate 2023. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023>
- Yeon-Hee, K; Seung-Ki, M; Nathan, P. G; Dirk, N; Elizaveta, M. (2023). Observationally-constrained projections of an ice-free Arctic even under a low emission scenario. *Nature Communications*. June. [5]. DOI: [10.1038/s41467-023-38511-8](https://doi.org/10.1038/s41467-023-38511-8)

