

El efecto invernadero y el cambio climático

¿De dónde viene el aumento global de la temperatura?

Es indiscutible que la tendencia al calentamiento en los últimos 50 años, en $0,13\text{ }^{\circ}\text{K}$ por década, es casi el doble de grande que en los últimos 100 años. En 2015, el aumento de la temperatura a nivel mundial alcanzó el valor de $0,85\text{ }^{\circ}\text{K}$.

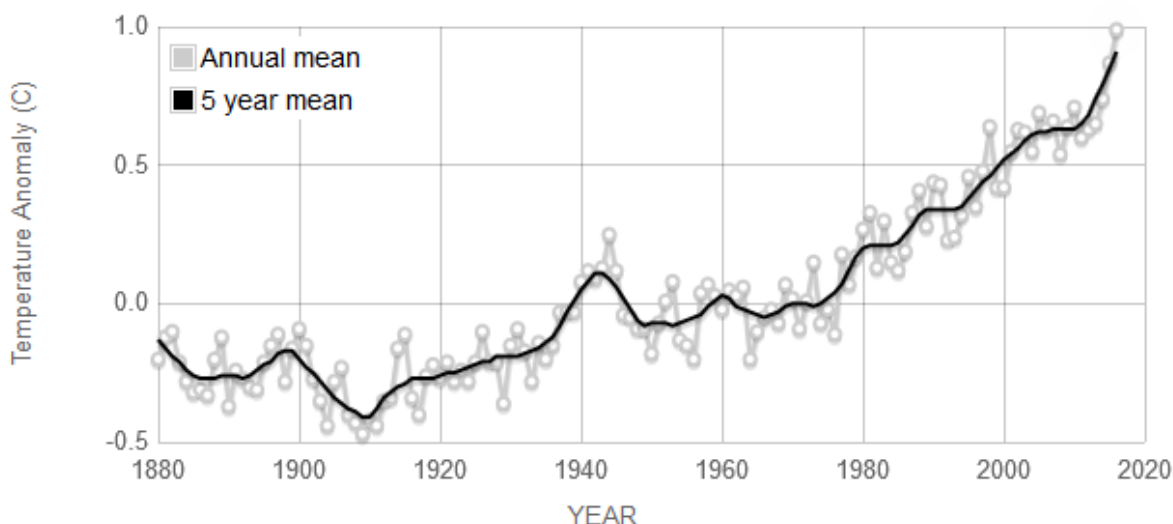


Fig. 1: Índice mundial de temperatura tierra-océano.

de: NASA Goddard Institute for Space Studies, Licencia: CC 0

Los críticos de la tesis del cambio climático antropogénico (hecho por el hombre) sostienen que siempre hubo variaciones de temperatura muy fuertes en la historia del clima de la Tierra, mucho antes de que la humanidad fuera capaz de influir sobre el mismo. Pero mientras tanto, se conoce exactamente la tendencia climática de los últimos 50 000 años en la Tierra.

Con base en la investigación de sedimentos, anillos de crecimiento de los árboles y núcleos de hielo, se puede remontar la tendencia de la temperatura de los últimos 50 000 años a un año en particular. Es cierto que hubo una variedad de cambios bruscos de temperatura sin la intervención humana. Sin embargo, todos estos cambios de temperatura ocurrieron de forma relativamente abrupta en unos cuantos años.

En contraste, en los últimos 150 años se ha visto un calentamiento continuo sin precedentes. Esto sucedió en paralelo a la industrialización y al aumento e intensificación de la agricultura, así como al aumento de la producción asociada de CO_2 , CH_4 , N_2O y otros gases artificiales, lo que puede considerarse una prueba del cambio climático provocado por el hombre.

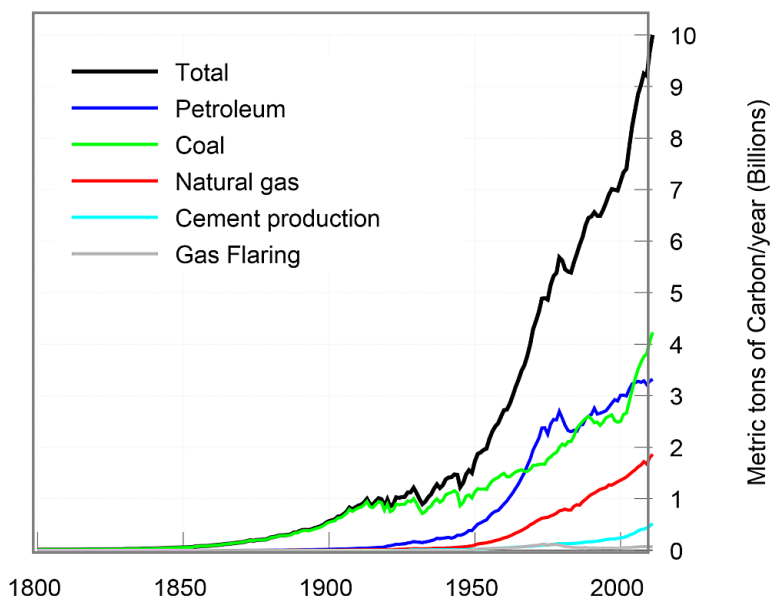


Fig. 2: Emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles entre 1800 y 2007.

Fuente: Global_Carbon_Emission_by_Type_to_Y2004.png: Mak Thorpederivative work: Autopilot (talk) - <http://cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/CSV-FILES/> and Global_Carbon_Emission_by_Type_to_Y2004.pngOriginal Data citation: "Marland, G., T.A. Boden, and R. J. Andres. 2007. Global, Regional, and National CO₂ Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, United States Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.", CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10868614>

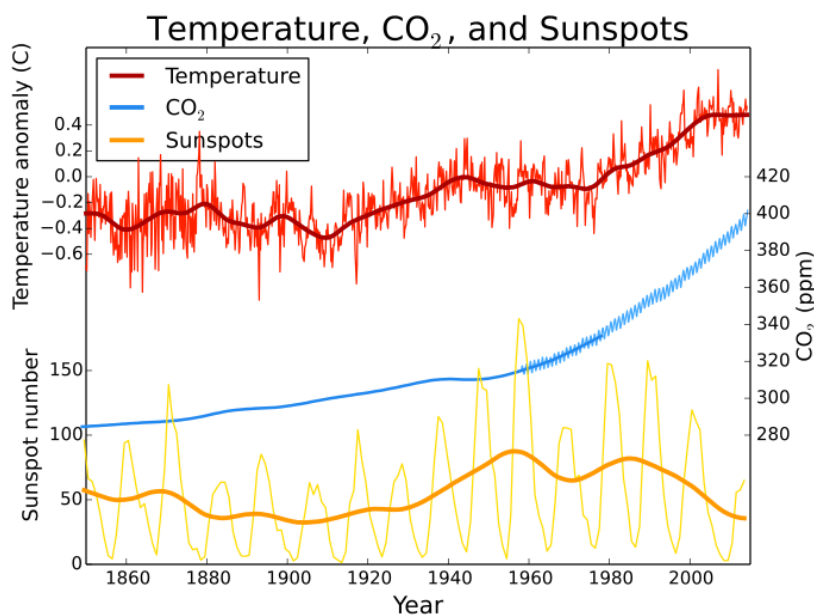


Fig. 3: Temperatura promedio, CO₂ en la atmósfera y actividad solar desde 1850. Las líneas gruesas para la temperatura y la actividad solar muestran un suavizado de los datos en bruto (promedio de 25 años).

De Leland McInnes at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, fuente: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6696694>

La afirmación de que el cambio climático es causado por las fluctuaciones de la actividad solar no tiene sustento, como lo muestra el gráfico.

¿Qué influye sobre el clima local además del clima global?

Las diferencias locales de temperatura en la Tierra causan corrientes constantes de aire y mar entre regiones más cálidas y más frías. Así es que el clima de Europa Central, por ejemplo, debido a la corriente cálida del Golfo resulta más caliente que lo que corresponde a la ubicación geográfica. Pero podría hacer más frío en Europa si la Corriente del Golfo colapsa como resultado del calentamiento de Europa. La llamada Corriente del Golfo es termohalina, es decir, se mantiene mediante diferencias en la temperatura y el contenido de sal.

En el pasado, el clima en Alemania estaba determinado principalmente por las corrientes de aire occidentales y orientales. El hecho de que durante algunos años el clima en Alemania ha estado cada vez más determinado por las corrientes del norte y el sur, a diferencia del pasado, se debe a menudo a los cambios en las temperaturas del agua del mar en el Océano Ártico.

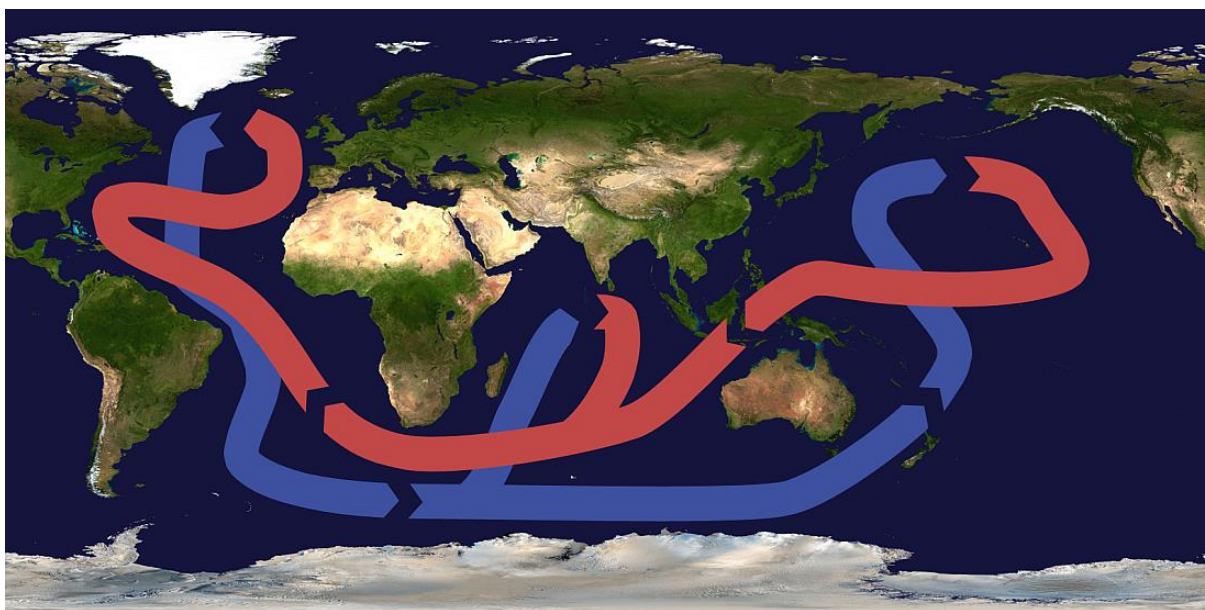


Fig. 4: La “cinta transportadora termohalina global”.

De: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=138193> (fuente: https://de.wikipedia.org/wiki/Meeresstr%C3%B6mung#/media/File:Thermohaline_circulation), licencia: CC BY-SA 3.0

Glaciares en crecimiento - ¿no contradice esto el cambio climático?

Los glaciares se están derritiendo en los Alpes, en América del Sur y en el Himalaya, pero en Nueva Zelanda crecen. Esto no representa una contradicción con el calentamiento global porque debido al aumento de las temperaturas del mar alrededor de Nueva Zelanda, aumenta la formación de vapor de agua y, por tanto, la de nubes. Estas nubes son llevadas lejos debido a las corrientes de aire. Por lo tanto, nieva más que en el pasado en las altas montañas (más de 3000 m) de Nueva Zelanda, que está rodeada de mar cálido, y los glaciares crecen allí. Por el contrario, los glaciares se derriten en Groenlandia y la capa de hielo del Ártico se vuelve más delgada y más pequeña. La capa de hielo en el borde de la Antártida en la actualidad se está derritiendo, pero en el interior de la Antártida está creciendo debido al aumento de las nevadas.

El efecto invernadero y sus causas

El efecto invernadero debería ser la causa del cambio climático global. Pero, ¿qué exactamente es este efecto invernadero? El efecto invernadero está erróneamente representado como algo que

es negativo de por sí. En primer lugar, es necesario corregir esto al señalar que sin el efecto invernadero, la vida no sería posible en la Tierra en absoluto. Sin el efecto invernadero, es decir, sin atmósfera, ¡la temperatura promedio de la superficie terrestre sería de tan sólo -18 °C! Por lo tanto, hacemos una distinción entre el efecto invernadero natural y el efecto invernadero causado por el hombre (el efecto invernadero intensificado antropogénicamente).

Temperatura de la Tierra sin atmósfera

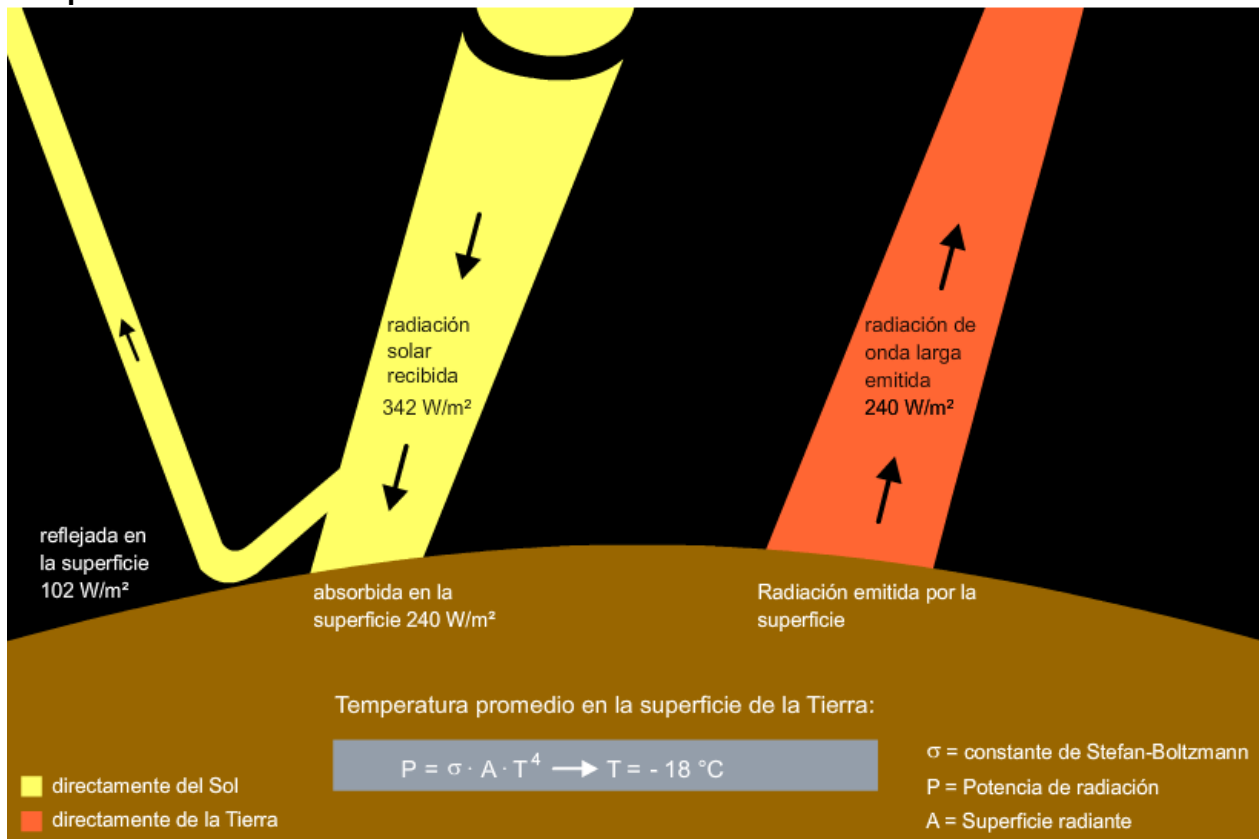


Fig. 5: Sin el efecto invernadero, la superficie de la Tierra estaría fría a -18 °C.

Primero imaginemos la Tierra sin sus capas de gases, nubes y polvo. La Tierra es, por lo tanto, una esfera desnuda sobre la cual inciden los rayos del Sol, lo cual propiciaría el calentamiento hasta alcanzarse una temperatura específica. Que esta temperatura no siempre se eleve aún más, se debe al llamado “equilibrio de radiación”. Al llegar a una determinada temperatura, la esfera terrestre irradia la misma cantidad de energía por unidad de tiempo que absorbe por unidad de tiempo; la energía de irradiación es entonces la misma que la energía de radiación. Vemos en el gráfico que la suma de la radiación reflejada directamente de la superficie terrestre (102 W/m²) y la energía radiada de la superficie terrestre calentada (240 W/m²) es igual a la energía solar radiada (342 W/m²).

Esta temperatura de la superficie de la Tierra, la cual corresponde al equilibrio de radiación, se puede calcular mediante la ley de Stefan-Boltzmann.

$$S_E = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S_E}{\sigma}}$$

Aquí, S_E es la densidad de radiación en W/m^2 . La densidad de la radiación solar sobre la órbita de la Tierra alrededor del Sol es 1370 W/m^2 . Debido a que esta radiación cósmica no actúa sobre la superficie esférica ($4 \cdot \pi \cdot r^2$) de la Tierra, sino en la sección transversal ($\pi \cdot r^2$), la densidad de radiación recibida, en relación con la superficie esférica de la Tierra, se calcula como:

$$1370 \cdot (\pi \cdot r^2) / (4 \cdot \pi \cdot r^2) = 342 \text{ W/m}^2.$$

Según la ley de Stefan-Boltzmann, una temperatura superficial de -18°C es el resultado para una Tierra sin atmósfera. Sin un efecto de calentamiento adicional, la Tierra no sería habitable para los humanos a una temperatura tan baja.

¿Cómo es que la superficie de la Tierra tiene una temperatura de hasta 15°C ?

Como se mencionó anteriormente, el 100 % de la energía incidente del Sol también debe ser irradiada de vuelta desde la Tierra de acuerdo a la ley del equilibrio de radiación. ¿Por qué, entonces, se presenta un aumento en la temperatura de la Tierra?

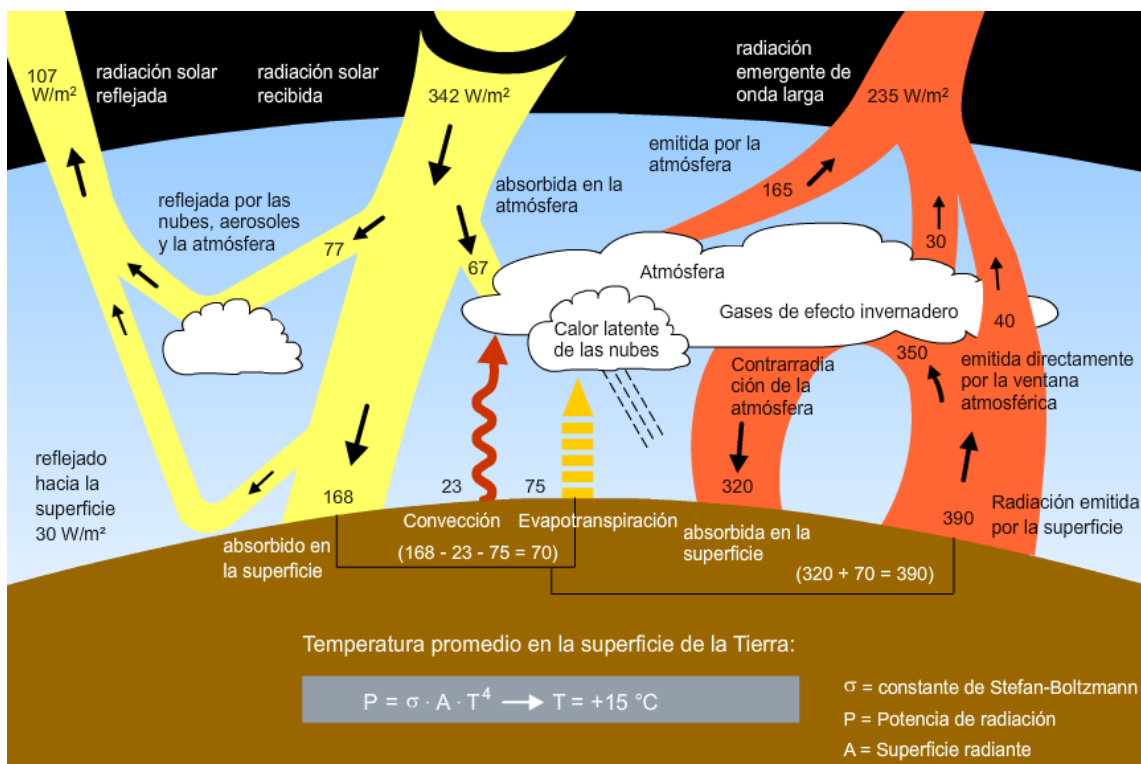


Fig. 6: Equilibrio de radiación global de la Tierra.

En forma simplificada, esto se puede explicar de la siguiente manera:

Radiación solar

- Debido a la elevada temperatura de la superficie solar de aprox. 6000 °C, la luz solar que cae sobre la Tierra es relativamente de onda corta (con el principal foco en UV hasta cerca de IR).
- Cuando la luz solar llega a la atmósfera terrestre, alrededor del 22 % de la luz solar se refleja de nuevo directamente al espacio. La parte principal de la luz (70 %) penetra a través de la atmósfera porque no tiene lugar prácticamente ninguna absorción a estas cortas longitudes de onda (CO₂, CH₄, N₂O y otros gases no absorben longitudes de onda cortas). Sólo ciertos aerosoles, partículas de hollín y de cenizas también absorben en este rango de onda corta (casi 20 %).
- En la superficie terrestre se refleja aproximadamente el 9 % y vuelve desde allí hacia el espacio. El 50 % restante es absorbido mediante la conversión de la energía de radiación de la luz en energía térmica (= movimiento de las partículas más pequeñas de la materia).

Convección y evapotranspiración

- Vía convección (capas ascendentes de aire calentado) y evaporación del agua (evapotranspiración) es transportado de nuevo a la atmósfera alrededor del 58 % de la energía térmica almacenada en la superficie de la Tierra.
- Este aire y capas de nubes calentados irradian de nuevo ondas largas, una parte relativamente grande de las cuales irradian hacia la superficie terrestre (emisión).

Re-radiación de la superficie terrestre

- 42 % de la energía térmica acumulada se irradia directamente de nuevo desde la superficie de la Tierra. Sin embargo, en comparación con el Sol, la temperatura de la superficie de la Tierra es muy baja, por lo que la radiación terrestre es extremadamente de onda larga (IR lejano).
- Una buena parte de esta radiación de onda larga es absorbida por muchos gases en la atmósfera. Las bandas de absorción de H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, etc. se encuentran exactamente en el rango de la longitud de onda de la radiación de la superficie terrestre (CO₂, por ejemplo, con una absorción máxima para aprox. 15 µm).

Emisión de la atmósfera

- Las moléculas de gas calentadas* ahora irradian de nuevo una buena parte de vuelta hacia la superficie terrestre (= "emisión").
* El calor es almacenado como energía cinética, tal como la vibración y rotación.

Aumento de temperatura de la Tierra mediante la formación de capas cálidas próximas a la superficie

- Consecuencia: La superficie de la Tierra se mantiene caliente mediante la formación de capas calentadas por encima de la misma. Y esto a pesar de que (debido a la conservación de la energía y al equilibrio de radiación) a excepción de la energía consumida para la fotosíntesis, más del 99,99 % de la energía es irradiada de vuelta al espacio.

¡La reflexión no explica el efecto invernadero!

A menudo se leen declaraciones erróneas que explican el efecto invernadero con base en la reflexión. Pero como ya hemos visto, el efecto invernadero se debe principalmente a la absorción de la radiación de onda larga emitida por la Tierra por parte de las moléculas de gas de efecto invernadero. La re-radiación (¡que no es igual a la reflexión!) de estas moléculas junto con las moléculas calientes transportadas mediante convección y evapotranspiración, causan una emisión sobre la Tierra y la formación de capas calentadas cerca de la Tierra.

Así que la atmósfera no refleja la radiación emitida por radiación de la superficie terrestre, sino que la absorbe y la irradia de nuevo.

En la física de las ondas electromagnéticas la reflexión (del latín reflectere = flexión hacia atrás) se refiere a la devolución en una interfaz. En contraste, en la absorción se realiza una conversión de la forma de energía. Si un cuerpo calentado por la absorción irradia de nuevo la energía de radiación, se habla de re-radiación y no de reflexión.

El efecto invernadero causado por el hombre

Aumento de la temperatura de la Tierra por el aumento de los gases de efecto invernadero

En este sentido, los gases de efecto invernadero no producen ninguna energía. En cambio, ayudan a mantener un equilibrio a un nivel en el cual la capa atmosférica más cerca de la tierra, en la cual vivimos, es lo suficientemente cálida para sustentar vida. Si la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera aumenta como resultado de las actividades humanas, aumenta la absorción, incrementando así la emisión, y por lo tanto, también la temperatura en las capas cercanas a la tierra.

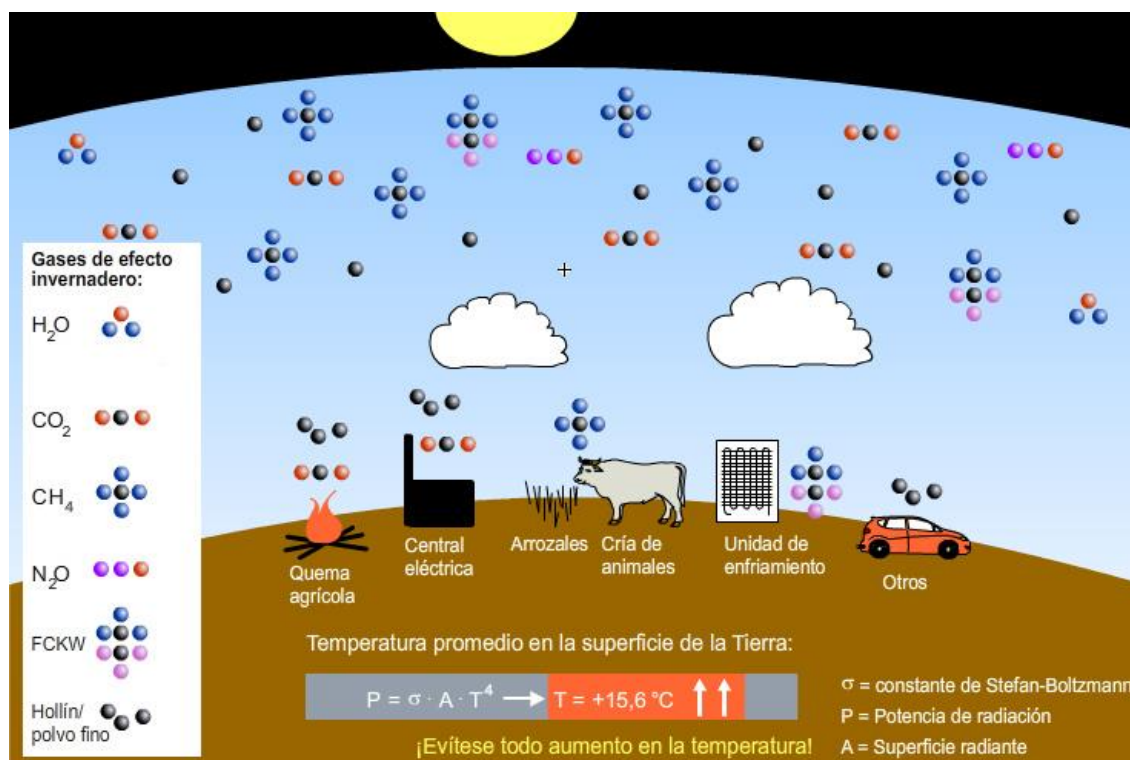


Fig. 7: Aumento de la temperatura global debido a los gases de efecto invernadero causados por los seres humanos.

La física de los gases de efecto invernadero

En moléculas, la intensidad de las fuerzas de enlace entre los átomos y su cambio durante la vibración determina el intervalo de longitud de onda en el cual la energía es absorbida. La radiación térmica de onda larga sólo puede ser absorbida por aquellas moléculas que consistan de varios tipos de átomo y que cambien su momento dipolar durante la vibración. Los gases no polares biatómicos, tales como el O_2 y el N_2 , sólo pueden ejecutar vibraciones simétricas sin cambiar el momento bipolar. El dióxido de carbono triatómico ejecuta ambas vibraciones, simétricas y asimétricas. Éstas son estimuladas por el calor de radiación en el intervalo de $4,3\ \mu m$ hasta $15,3\ \mu m$ un intervalo que traslapa adecuadamente con el espectro de radiación de la superficie calentada de la Tierra, el cual va de $3\ \mu m$ hasta $60\ \mu m$. Contra este fondo, la concentración de CO_2 en la atmósfera resulta particularmente significativa.

¿Qué gases contribuyen al efecto invernadero?

Los gases de origen natural tales como vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) absorben la radiación térmica desde la superficie de la Tierra y fortalecen la contrarradiación que se lanza de vuelta a la Tierra. Con gases, en particular, la capacidad de emisión y absorción depende en gran medida de la longitud de onda. Esto es particularmente cierto en el caso de los tres principales gases de efecto invernadero: vapor de agua, CO_2 y metano. El oxígeno (O_2) y el nitrógeno (N_2) son los dos gases principales que constituyen aproximadamente el 99 % de la atmósfera. No tienen ninguna capacidad de emisión ni de absorción en el intervalo de radiación térmica de onda larga que es importante en términos de la energía de la Tierra.

En términos de cantidad, el vapor de agua es naturalmente el que contribuye más (aproximadamente dos tercios) al efecto invernadero. El CO_2 ocupa el segundo lugar con una proporción de aproximadamente el 15 %; O_3 se encuentra en tercer lugar con una proporción aprox. del 10 % y finalmente el óxido nítrico (N_2O) y CH_4 , cada uno con alrededor de un 3 %. Para un cálculo preciso de las proporciones, también sería necesario conocer la influencia de las nubes y partículas flotantes tales como polvo y aerosoles en la radiación solar y térmica.

Las partículas de cenizas liberadas durante una gran erupción volcánica y la concentración de SO_2 en la atmósfera debido al blindaje de la superficie terrestre contra la luz solar pueden provocar, por ejemplo, una reducción de la temperatura de la tierra durante varios años. Este ha sido el caso a menudo en la historia geológica.

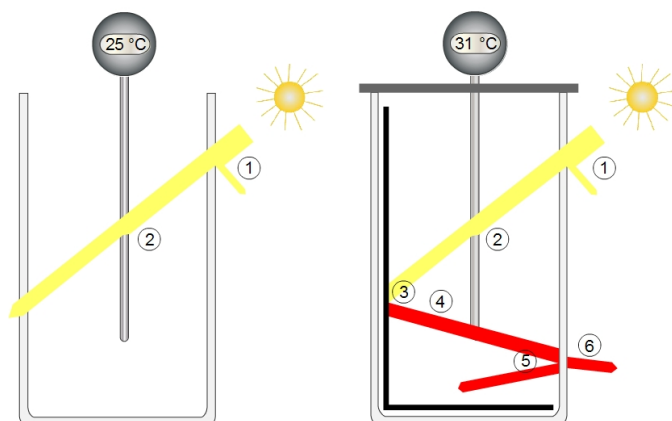
Para obtener más información sobre las fuentes, la eficacia y la duración de los gases de efecto invernadero producidos por el hombre, véase también la hoja informativa “¿De dónde vienen los gases de efecto invernadero?”. Para el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero ver también el módulo informativo “Desarrollo de las emisiones de gases de efecto invernadero”. Ambos medios se encuentran disponibles en el portal de medios didácticos de la Siemens Stiftung.

Efecto invernadero en el vaso como un modelo para la atmósfera de la Tierra

Se utiliza un vaso para beber transparente hecho de PET, que se coloca bajo la luz solar, una vez abierto y vacío, y una vez cubierto y un lado revestido con cartulina negra.

En el segundo caso, la temperatura aumenta mucho más.

Balances de radiación: el efecto invernadero en el vaso de precipitados



Leyenda para la figura

1. Reflexión en la pared del vaso
2. Absorción en el sensor
3. La absorción en la cartulina negra
4. Radiación de onda larga sobre la cartulina negra
5. Absorción y re-irradiación de la pared del vaso
6. Radiación de la pared del vaso al entorno

Fig. 8: Efecto invernadero en el vaso.

En el experimento se aporta energía al recipiente climático en forma de radiación, pero la producción de energía del contenido del vaso está “frenada” por la radiación. ¿Por qué? La mejor manera de entenderlo es si se examina el proceso en varias etapas.

Radiación de onda corta: La radiación de la luz solar alcanza una temperatura (= temperatura de color, véase la curva de radiación de Planck) de 6000 K, una bombilla halógena llega hasta 3400 K. En ambos casos se trata, en comparación con los infrarrojos lejanos, de una radiación de onda corta, de aprox. 250 nm hasta aprox. 1000 nm (es decir, luz ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja cercana). Esta radiación de onda corta pasa casi al 100 % por las paredes de nuestro vaso de plástico sin ser absorbida. (Algo similar sucede en la atmósfera terrestre, por la que pasan casi 2/3 de la luz solar radiada, aprox. 1/3 es reflejada).

Absorción en el vaso Si en el vaso hay un material como papel negro, éste absorberá casi el 100 % de la luz de onda corta y por ello se va a calentar (lo mismo ocurre con la superficie terrestre).

Re-radiación de onda larga del papel absorbente: El material de absorción, calentado a aprox. 310 K, cede ahora calor al aire en el interior a través de golpes de calor de sus partículas más pequeñas. Por otro lado, ahora se irradia de nuevo. Debido a la temperatura más baja el espectro del reenvío de la radiación del aire caliente y del papel absorbente está en el rango de los infrarrojos de onda larga con una longitud de onda de varios μm .

También la superficie terrestre más caliente cede nuevamente su calor sobre todo a través de la radiación. Una buena parte también es transportada por la llamada convección, es decir, el aire y el vapor de agua calentados por la superficie cálida de la tierra se elevan y transportan el calor. Este efecto también lo tenemos en nuestro vaso, pero lo evitamos con la tapa.

Reflexión, absorción y re-irradiación de la pared del vaso: La radiación de onda larga es en parte reflejada y en parte absorbida por la pared del vaso. La pared calentada por la absorción irradia a su vez una parte de la energía hacia el interior del recipiente y otra parte al entorno. De esta manera, mediante la reflexión directa en la pared del vaso y la emisión hacia la pared calen-

tada del vaso, se frena el reenvío de la energía y el interior del vaso estará más caliente que el entorno. El interior de nuestro vaso no puede ceder directamente energía de radiación hacia afuera, dado que sólo puede pasar por la pared del vaso una pequeña cantidad de dicha energía.

El mismo efecto ocurre sobre la superficie terrestre: una parte de la energía cedida es absorbida por las nubes y las partículas de gas que se encuentran en el aire. Éstas sólo envían una parte al espacio, el resto vuelve a irradiar hacia la Tierra. Esta emisión contribuye de forma fundamental al aumento de la temperatura de la Tierra. Este efecto es potenciado si en el ámbito de ondas largas hay una proporción mayor de gases absorbentes, como el CO_2 , presentes en la atmósfera.

Sin embargo, cabe mencionar que en nuestra configuración del experimento una importante pérdida de calor no se produce debido a la radiación, sino por la convección en el interior del vaso hacia las paredes y por conducción térmica directa a través de las paredes.

Otras aplicaciones del efecto invernadero en la tecnología y la vida cotidiana: Las aplicaciones prácticas del efecto invernadero incluyen invernaderos y casas de ahorro energético. Otro fenómeno es que un automóvil puede calentarse fuertemente en el interior en invierno cuando está soleado, o que hace más frío en las noches claras de invierno que en las noches nubladas.