

El cambio climático (III)

Causas naturales de los cambios climáticos

Miguel Guerrero

rupestreguerrero@mail.com

A lo largo de la historia de la Tierra, el clima ha experimentado transformaciones profundas, desde eras de calor intenso hasta largos periodos de glaciación. Estos cambios no comenzaron con la aparición del ser humano ni dependen exclusivamente de su actividad. Existen numerosos factores naturales que, por sí solos o en combinación, han moldeado el clima del planeta durante millones de años.

En este capítulo abordaremos las principales causas naturales de los cambios climáticos, desde las variaciones en la órbita terrestre y la actividad solar, hasta los cambios en la circulación oceánica, la composición atmosférica natural, la actividad volcánica y los impactos de grandes meteoritos. Aunque algunas de estas causas actúan a escalas de tiempo muy largas, y otras lo hacen de manera más puntual o irregular, todas han dejado huella en la historia climática de nuestro planeta.

Diferencia entre variabilidad climática y cambio climático

Es habitual confundir la variabilidad climática natural con lo que llamamos cambio climático. Por eso, antes de adentrarnos en los distintos procesos naturales que influyen en el clima, conviene distinguir ambos conceptos. La variabilidad hace referencia a las fluctuaciones que pueden producirse de

forma cíclica o irregular a lo largo de años o décadas, como es el caso de fenómenos como El Niño o los ciclos solares. El cambio climático, en cambio, se refiere a alteraciones más persistentes o estructurales en las condiciones medias del clima, que pueden extenderse durante siglos o milenios. Esta diferencia hay que tenerla en cuenta para no interpretar erróneamente los datos o las tendencias que observamos hoy.

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones naturales que ocurren en el clima de la Tierra a lo largo del tiempo. Estas oscilaciones pueden ser observadas en periodos que van desde unos pocos meses hasta varias décadas. Por ejemplo, todos estamos familiarizados con las estaciones del año, donde experimentamos cambios en temperatura y precipitaciones. Además, fenómenos como El Niño y La Niña son ejemplos claros de variabilidad climática, ya que afectan temporalmente el clima en diferentes regiones del mundo. Estas variaciones son parte del funcionamiento normal del sistema climático y pueden ser influenciadas por factores naturales internos.

Por otro lado, el cambio climático se refiere a alteraciones más profundas y duraderas en el clima de la Tierra, que se manifiestan a lo largo de periodos mucho más largos, generalmente de 30

años o más. A diferencia de la variabilidad climática, el cambio climático actual, por ejemplo, parece que está estrechamente relacionado con las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras prácticas que aumentan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Este fenómeno no solo implica un aumento en las temperaturas promedio globales, sino también cambios en los patrones de precipitación, el aumento del nivel del mar y una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos.

Muchos de los argumentos que cuestionan la existencia o gravedad del cambio climático actual se basan en confundir fenómenos pasajeros con tendencias estructurales. Por ejemplo, inviernos más fríos de lo habitual o veranos especialmente lluviosos se citan a veces como prueba de que "el clima no está cambiando", cuando en realidad forman parte de la variabilidad natural que siempre ha existido y que puede superponerse a una tendencia general de calentamiento. Esta superposición no invalida la tendencia, del mismo modo que una bajada puntual en la bolsa no significa que una economía en crecimiento esté en crisis.

También ocurre a la inversa. Periodos cálidos localizados o eventos extremos como olas de calor intensas pueden generar una percepción exagerada de que todo está fuera de control, sin considerar que el clima presenta picos naturales incluso en periodos estables. Por eso, para detectar un cambio climático real es necesario observar series de datos prolongadas, en las que se aprecie una desviación sostenida de los valores normales, y no sacar conclusiones a partir de episodios aislados.

Esta confusión es común en el debate público, donde muchas veces se ignora el contexto histórico y se utilizan datos

fragmentarios para apoyar una opinión o ideología. La ciencia del clima, en cambio, se basa en series históricas, reconstrucciones geológicas, mediciones precisas y modelos complejos que permiten distinguir entre ruido (la variabilidad) y señal (el cambio). Solo reconociendo esa diferencia podemos entender si el planeta está atravesando un cambio real y qué peso tienen en él los factores naturales y los provocados por la actividad humana.

Factores naturales que intervienen en los cambios climáticos

El clima de la Tierra es el resultado de un complejo equilibrio de factores que interactúan a distintas escalas temporales y espaciales. Si bien hoy el debate se centra en la influencia humana sobre el calentamiento global, durante la mayor parte de la historia del planeta han sido los procesos naturales los que han determinado las grandes transformaciones climáticas.

Entre los mecanismos naturales más influyentes se encuentran, en primer lugar, las variaciones en la órbita terrestre, que modifican la forma, la inclinación y la orientación del recorrido del planeta alrededor del Sol, alterando así la distribución de la radiación solar. A esto se suman los cambios en la actividad solar misma, que varía en ciclos de distinta duración y puede afectar la cantidad de energía que llega a la atmósfera. La actividad volcánica también desempeña un papel importante.

Otro factor a tener en cuenta son las variaciones en la circulación oceánica, responsables de redistribuir el calor por todo el planeta. Cambios en estas corrientes, como el conocido fenómeno de El Niño, pueden tener efectos importantes en la temperatura y el régimen de precipitaciones en regiones muy distantes entre sí. La composición química de la atmósfera,

incluso sin intervención humana, también ha variado a lo largo del tiempo por causas naturales, influyendo en el efecto invernadero y, por tanto, en la temperatura global. A esto hay que añadir los cambios en la superficie terrestre (como el avance o retroceso de los desiertos, el crecimiento de la vegetación o la extensión del hielo), que afectan tanto la reflectividad del planeta como los intercambios de energía entre la superficie y la atmósfera.

Aunque menos frecuentes, los impactos de grandes meteoritos han provocado transformaciones climáticas súbitas y extremas, capaces de desencadenar verdaderas catástrofes globales. Todos estos factores, actuando de manera individual o combinada, han dado lugar a un clima en constante evolución, cuyos patrones no pueden comprenderse plenamente si se ignoran las fuerzas naturales que lo gobiernan.

También hay otros factores que veremos más adelante, mucho menos importantes y tal vez menos influyentes, pero que de alguna manera u otra tienen su influencia.

Variaciones orbitales terrestres

Los periodos glaciares e interglaciares están modulados por los ciclos de Milankovitch (Fig.1). Estos ciclos orbitales de la Tierra afectan la cantidad y la distribución de la radiación solar que llega al planeta. Estos incluyen la excentricidad orbital (la forma de la órbita terrestre que varía en ciclos de aproximadamente 100.000 años), la inclinación axial (la inclinación del eje de la Tierra en ciclos de unos 41.000 años) y la precesión (el balanceo del eje de la Tierra en ciclos de unos 26.000 años).

Estos ciclos, propuestos por el matemático serbio Milutin Milankovitch en la primera mitad del siglo XX, pueden influir en la

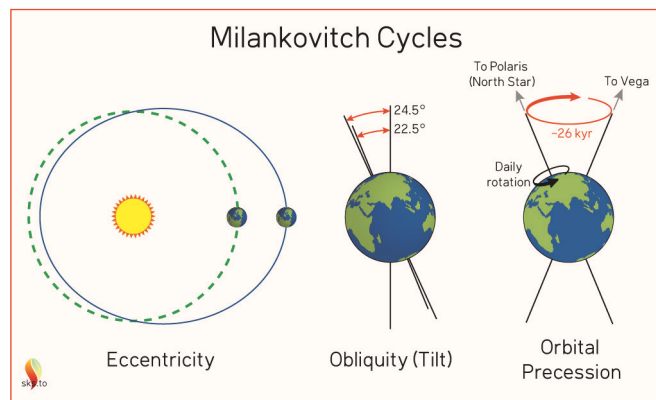


Figura 1: Representación de los ciclos de Milankovitch (excentricidad, oblicuidad y precesión) y su influencia en la radiación solar recibida en la Tierra. Fuente: Wikimedia Commons (autor: NASA / dominio público)

cantidad de radiación solar estacional y regional, lo que afecta los climas en diferentes partes del mundo y se refieren a variaciones cíclicas en la órbita terrestre alrededor del Sol que tienen influencia en el clima de la Tierra a escalas de tiempo geológicas.

La excentricidad: se refiere a los cambios en la forma de la órbita terrestre alrededor del Sol. Esta órbita oscila entre ser más circular y más elíptica en un ciclo que dura aproximadamente 100.000 años. Cuando la órbita es más elíptica, la excentricidad es mayor. Cuando la órbita es más circular, la excentricidad es menor.

La variación en la excentricidad puede causar una diferencia de entre el 1% y el 11% en la cantidad de radiación solar que recibe la Tierra. Actualmente, la diferencia en la radiación solar entre el punto más cercano (perihelio) y el más lejano (afelio) de la órbita es de aproximadamente un 6%.

La oblicuidad o inclinación axial: se refiere a la inclinación del eje de la Tierra en relación con su plano orbital, y varía en ciclos de aproximadamente 41.000 años. Esta variación influye en la distribución estacional de la radiación solar en diferentes latitudes, lo que puede afectar los patrones climáticos.

La precesión: se refiere al balanceo del eje de rotación de la Tierra, similar al giro de un trompo, y tiene un ciclo de alrededor de 26.000 años. Esta variación cambia la dirección hacia la cual apunta el eje de la Tierra en su órbita, lo que también influye en la distribución estacional de la radiación solar.

Estos ciclos de Milankovitch pueden influir en la cantidad, distribución y estacionalidad de la radiación solar que llega a la Tierra, lo que a su vez puede tener efectos en el clima terrestre a lo largo de escalas de tiempo muy largas, contribuyendo a cambios en la glaciación, las temperaturas globales y los patrones climáticos.

Variaciones en la actividad solar

El Sol es la principal fuente de energía de nuestro planeta Tierra. Es el responsable de lograr el funcionamiento correcto de la atmósfera, haciendo posible el clima, las estaciones, etc. Esta enorme estrella de gas genera un gran campo magnético, el cual pasa por un ciclo llamado "Ciclo Solar", que dura aproximadamente unos 11 años. También se le denomina "Ciclo de Schwabe", en honor al astrónomo alemán Samuel Heinrich Schwabe, quien fue uno de los primeros en descubrir y documentar las variaciones regulares en la actividad de las manchas solares a mediados del siglo XIX. A lo largo de estos 11 años, el Sol experimenta cambios en su actividad, como manchas solares y erupciones solares que aumentan y disminuyen. En el punto máximo del ciclo, conocido como "máximo solar", hay una mayor cantidad de manchas solares visibles en la superficie del Sol. Esto indica un aumento en la actividad solar, que se manifiesta en forma de explosiones solares, eyecciones de masa coronal y otros fenómenos. Estos cambios pueden influir ligeramente en la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra (Fig. 2). Aunque estas variaciones solares son relativamente

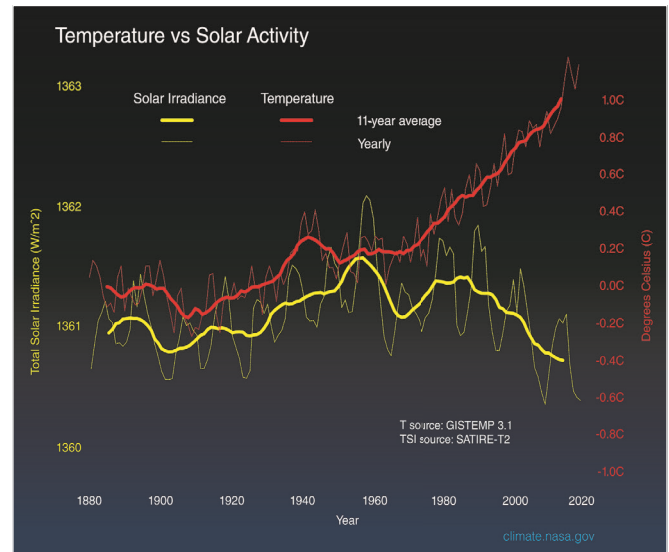


Figura 2: Comparación entre la temperatura media global de la superficie (línea roja) y la irradiación solar total recibida por la Tierra (línea amarilla) desde 1880. Las líneas gruesas representan promedios móviles de 11 años. Fuente: NASA Earth Science.

pequeñas en términos de impacto directo en el clima terrestre, pueden contribuir a variaciones climáticas a escalas de tiempo más largas.

Uno de los estudios indirectos que se realizan consiste en registrar la variación que presentan los anillos de crecimiento de los árboles y comparar unos con otros. Este crecimiento es más o menos importante dependiendo de la mayor o menor actividad solar.

Este ciclo solar puede influir en la temperatura y la variabilidad climática de la Tierra, aunque su impacto directo en la temperatura global es relativamente pequeño en comparación con otros factores, debido a que los ciclos de mayor actividad compensan los de menor actividad y viceversa, a menos que en algunas ocasiones haya diferencias sustanciales. De manera que la radiación que nos llega a la Tierra, al tener unos períodos más o menos estables, no produce variaciones significativas en la temperatura global a largo plazo.

Otro de los ciclos solares que se ha estudiado en relación con la actividad solar es el llamado "Ciclo Solar de Gleissberg". Este ciclo se refiere a variaciones de la actividad solar a largo plazo y su período es aproximadamente de 80 a 90 años. Se caracteriza por las variaciones en la cantidad de manchas solares a lo largo de esos períodos. El ciclo de Gleissberg es más largo que el ciclo solar típico de 11 años y se ha observado que durante este período, la actividad de las manchas solares experimenta oscilaciones menores pero reconocibles. Estas variaciones son un tema de estudio para los investigadores que buscan comprender mejor la dinámica de la actividad solar a largo plazo.

Al igual que otros ciclos solares, la influencia del ciclo de Gleissberg en el clima terrestre es una de varias variables complejas que interactúan en el sistema climático global, y su impacto directo y su relación con el clima aún están siendo investigados y estudiados por la comunidad científica.

Existen otros ciclos solares que los científicos han observado y estudiado en relación con la actividad solar, como el ciclo Suess/Vries y el ciclo de "Eventos Bond". El ciclo Suess, que tiene una duración aproximada de 200 años, muestra fluctuaciones en la actividad de las manchas solares y se ha relacionado con cambios en la producción de carbono-14.

El Ciclo Bond es un patrón climático de variabilidad natural propuesto que se basa en evidencia de registros geológicos y paleoclimáticos. Este ciclo ha sido sugerido para explicar patrones de variabilidad climática a largo plazo en el Hemisferio Norte, particularmente en relación con cambios en la cantidad de hielo en el Atlántico Norte. Se cree que el Ciclo Bond tiene una duración aproximada de 1.500

años, aunque su periodicidad exacta puede variar y no es completamente regular. Este ciclo se caracteriza por períodos alternantes de condiciones climáticas más frías y cálidas en el Atlántico Norte, con fluctuaciones en la cantidad de hielo en el Ártico y la formación de icebergs que se extienden hacia latitudes más bajas.

Durante los períodos fríos asociados con el Ciclo Bond, se ha observado un aumento en la actividad de icebergs y una expansión del hielo en el Atlántico Norte; mientras que en los períodos cálidos se registra una disminución de esta actividad glacial. Estos cambios han dejado huellas en los registros geológicos, como depósitos de sedimentos y capas de hielo. El Ciclo Bond ha sido objeto de estudio para comprender mejor las variaciones climáticas pasadas en el Hemisferio Norte y se ha relacionado con fluctuaciones en la circulación oceánica, particularmente con la Circulación Termohalina, que transporta agua cálida y fría alrededor del planeta.

Variaciones en la actividad volcánica

Las erupciones volcánicas son una de las manifestaciones más espectaculares del dinamismo interno de la Tierra, pero también uno de los factores naturales más importantes en la regulación del clima a corto y medio plazo. Aunque su efecto puede parecer puntual o local, determinadas erupciones tienen la capacidad de alterar la temperatura global durante meses o incluso años (Fig.3). No es la lava ni el calor lo que provoca estos cambios, sino los gases y partículas que son liberados a la atmósfera cuando alcanzan las capas más altas, como la estratósfera.

El dióxido de azufre, uno de los principales compuestos expulsados durante una gran erupción, reacciona con el vapor de

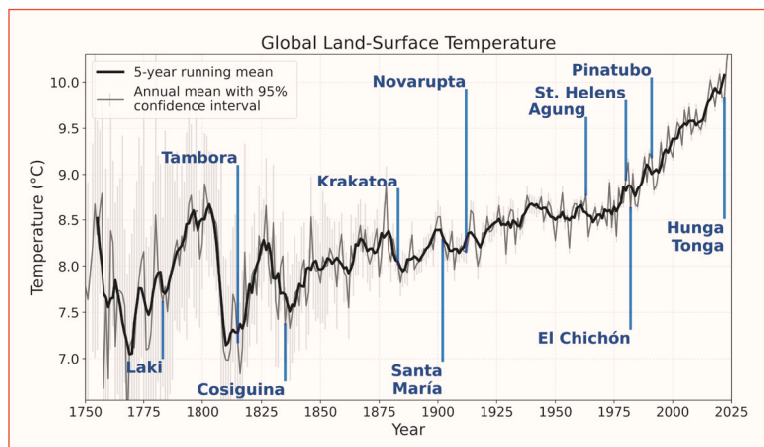


Figura 3: Variaciones en la temperatura global de la superficie en relación con grandes erupciones volcánicas (señaladas en el gráfico). Los aerosoles emitidos a la estratósfera tras estos eventos provocan un enfriamiento temporal del clima. Fuente: ClimateData.ca.

agua formando aerosoles de sulfato. Estas diminutas partículas quedan suspendidas en la atmósfera y actúan como una especie de escudo, reflejando parte de la radiación solar que normalmente llegaría a la superficie terrestre. El resultado es un enfriamiento generalizado del planeta, que puede notarse incluso en zonas muy alejadas del lugar de la erupción. En 1991, la explosión del monte Pinatubo en Filipinas liberó a la atmósfera unos 20 millones de toneladas de dióxido de azufre. En los dos años siguientes, la temperatura media global descendió alrededor de medio grado centígrado.

Este tipo de enfriamiento, sin embargo, es temporal. Los aerosoles de origen volcánico tienden a precipitarse con el tiempo o a dispersarse, por lo que su efecto no se prolonga más allá de unos pocos años. Además, no todas las erupciones tienen un impacto climático evidente. Para que un volcán influya de forma apreciable en el clima global, debe expulsar una gran cantidad de material directamente a la estratósfera, algo que ocurre solo en erupciones muy potentes y explosivas.

Históricamente, algunas erupciones han

tenido consecuencias dramáticas. La del Tambora en 1815, por ejemplo, fue tan intensa que dio lugar al conocido "año sin verano" de 1816, en el que se produjeron heladas en pleno julio en el hemisferio norte, las cosechas fracasaron y se desató una grave crisis alimentaria en Europa y América del Norte. Este tipo de eventos pone de relieve el poder que tienen ciertos procesos geológicos para modificar el equilibrio climático global, aunque de manera abrupta y transitoria.

Curiosamente, las erupciones volcánicas también liberan dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento. Sin embargo, la cantidad que emiten en comparación con las emisiones humanas es muy pequeña, y su efecto a largo plazo queda en general eclipsado por el enfriamiento temporal que provocan los aerosoles. En conjunto, la actividad volcánica actúa como un modulador natural del clima, a veces forzando descensos bruscos de temperatura que interrumpen o matizan las tendencias climáticas dominantes.

Variaciones en la circulación oceánica

Los océanos, que cubren más del 70% de la superficie terrestre, juegan un papel fundamental en la regulación del clima global. Estos vastos cuerpos de agua actúan como un gigantesco sistema de control climático, influyendo en la temperatura, los patrones de precipitación y la circulación atmosférica en todo el planeta.

Las corrientes oceánicas son uno de los principales mecanismos por los cuales los océanos afectan el clima (Fig. 4, página siguiente). Estas "cintas transportadoras" marinas mueven enormes cantidades de calor alrededor del globo. Las corrientes

la temperatura del planeta (Fig. 5). Lejos de ser estática, la composición atmosférica ha experimentado muchas variaciones a lo largo de miles de millones de años, en un baile cósmico de elementos y moléculas que ha dado forma a la vida tal como la conocemos.

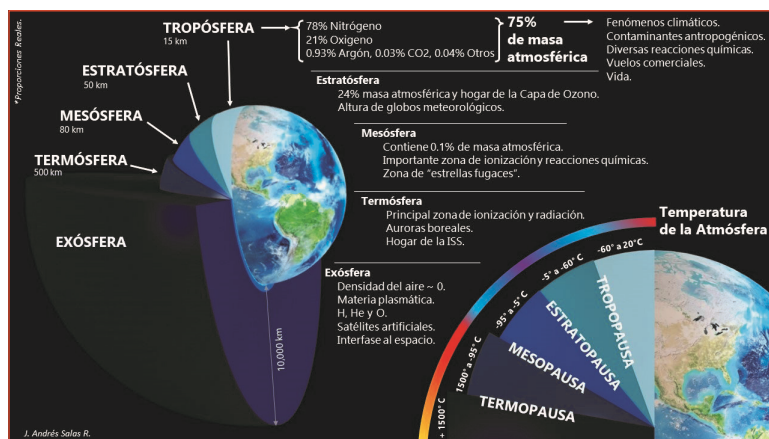


Figura 5: Infografía de la atmósfera que muestra en proporción real las capas de la atmósfera, además de otros datos importantes sobre la temperatura y funciones de las capas. Fuente: Wikipedia

Imaginemos por un momento los primeros días de nuestro planeta. La atmósfera primitiva era irreconocible comparada con la actual. Había una mezcla de hidrógeno y helio, gases ligeros que eventualmente escaparon al espacio, incapaces de ser retenidos por la gravedad terrestre. A medida que la Tierra se enfriaba, la desgasificación de la corteza liberó una nueva generación de gases como nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua, entre otros. Esta atmósfera secundaria sentó las bases para los cambios futuros.

El gran punto de inflexión llegó con la aparición de la vida, especialmente de los organismos fotosintéticos, hace unos 2.500 millones de años. Estos diminutos pero poderosos seres comenzaron a liberar oxígeno como subproducto de la fotosíntesis, transformando gradualmente la atmósfera. Este proceso, conocido como la Gran Oxidación, marcó el inicio de la

atmósfera rica en oxígeno que respiramos hoy.

Pero la historia no termina ahí. A lo largo de los eones, la Tierra ha experimentado ciclos naturales que han hecho fluctuar las concentraciones de gases como el dióxido de carbono y el metano. Estos ciclos, vinculados a cambios en la órbita terrestre y a la actividad volcánica, han provocado oscilaciones en las concentraciones de CO₂ entre 200 y 300 partes por millón durante los últimos 500.000 años. El metano, por su parte, ha bailado entre 350 y 400 partes por mil millones en el mismo período.

Incluso en escalas de tiempo más cortas, la atmósfera muestra su naturaleza dinámica. Las estaciones traen consigo cambios sutiles pero importantes. Durante el verano del hemisferio norte, por ejemplo, los niveles de CO₂ disminuyen ligeramente a medida que las plantas, en pleno crecimiento, absorben más de este gas. El vapor de agua puede variar entre el 1% y el 4% a nivel de superficie, influenciado por factores como la temperatura y la proximidad a cuerpos de agua.

Cambios en la superficie terrestre

Los cambios naturales en la superficie de la Tierra pueden afectar el albedo (reflectividad) y, por tanto, el clima. Las variaciones en la cobertura de hielo y nieve afectan la cantidad de radiación solar reflejada. Por otra parte, los cambios en la vegetación alteran el intercambio de gases y la absorción de radiación. Estos cambios, en mayor o menor medida también tienen su impacto en los cambios del clima global.

Aunque solemos pensar en el clima como un fenómeno atmosférico, la superficie terrestre desempeña un papel fundamental

en su configuración. A lo largo del tiempo, los cambios en la distribución y las características del suelo, la vegetación, los glaciares o los océanos han contribuido de forma decisiva a modelar el comportamiento climático. Estos cambios no necesitan ser violentos ni repentinos para ejercer una influencia profunda. Basta con que alteren la forma en que la superficie terrestre absorbe o refleja la energía solar, intercambia calor y humedad con la atmósfera o modifica los patrones de circulación del aire.

Uno de los factores más determinantes es la variación en la cobertura vegetal. A medida que se expanden o retroceden los bosques, las sabanas, los desiertos o las tundras, cambia también el albedo del planeta, es decir, su capacidad para reflejar la luz solar. Superficies claras como el hielo o los desiertos reflejan más radiación que las zonas boscosas, que tienden a absorberla. Cuando los glaciares avanzan, por ejemplo, aumenta el albedo y se favorece el enfriamiento. Cuando retroceden, el suelo más oscuro queda expuesto, se incrementa la absorción de calor y se refuerza el calentamiento. Este mecanismo de retroalimentación ha sido el factor principal durante los periodos glaciares e interglaciares.

El movimiento de las placas tectónicas también ha producido transformaciones importantes. A lo largo de millones de años, la deriva continental ha modificado la distribución de océanos y continentes, cambiando la forma en que las corrientes marinas y los vientos transportan energía. La formación de cadenas montañosas o la apertura y cierre de conexiones oceánicas, como el istmo de Panamá, han influido directamente en los patrones de circulación global, con consecuencias para el clima.

Otro ejemplo es la expansión de zonas áridas. A medida que los desiertos avanzan,

no solo cambia la temperatura del suelo, sino también la cantidad de polvo y partículas finas que se elevan a la atmósfera, alterando la formación de nubes y la radiación que llega a la superficie. En épocas pasadas, los ciclos de desertificación y reverdecimiento han acompañado a grandes transiciones climáticas, como las del Sahara durante el Holoceno, cuando pasó de ser una región fértil a un desierto árido.

Los cambios en los niveles del mar y en las plataformas de hielo polar también han afectado el equilibrio térmico del planeta. Cuando los casquetes polares crecen, almacenan grandes cantidades de agua dulce, y cuando se derriten, alteran la salinidad de los océanos y, con ello, las corrientes marinas que regulan el clima regional y global. Incluso la expansión o contracción de grandes lagos y humedales ha tenido efectos localizados pero persistentes sobre las temperaturas y los regímenes de precipitación.

Impactos de meteoritos

Los impactos de grandes meteoritos han tenido efectos climáticos profundos en la historia de la Tierra. Su influencia no se percibe en escalas de tiempo cortas ni como un fenómeno recurrente, pero cuando ocurren, pueden transformar el equilibrio del planeta. No se trata solo de la destrucción local que provocan al impactar, sino del conjunto de consecuencias atmosféricas y geológicas que desencadenan a nivel global (Fig. 6).

El ejemplo más conocido y estudiado es el impacto que tuvo lugar hace unos 66 millones de años en la península de Yucatán, en México. Ese evento coincidió con la extinción de los dinosaurios y marca el final del periodo Cretácico. Un meteorito de unos 10 kilómetros de diámetro liberó una energía colosal, generando incendios



Figura 6: *Recreación artística del impacto de un gran asteroide en la Tierra, como el de Chicxulub. (Mark Garlick)*

masivos, tsunamis, terremotos y una inyección de polvo, cenizas y aerosoles sulfatados en la atmósfera. Durante meses, tal vez años, la luz solar se vio severamente atenuada, lo que provocó un enfriamiento drástico de la superficie terrestre, similar a un "invierno nuclear". La fotosíntesis se interrumpió, los ecosistemas colapsaron y se produjo una extinción masiva.

Este tipo de enfriamiento inducido por partículas en suspensión es comparable, aunque mucho más extremo, al que provocan ciertas erupciones volcánicas, solo que en este caso con una intensidad y rapidez mucho mayores. No todos los impactos tienen estas dimensiones, pero incluso meteoritos más pequeños podrían alterar el clima si alcanzan zonas ricas en azufre o carbono, o si provocan incendios forestales de gran escala.

Además del enfriamiento inicial, algunos científicos han sugerido que, dependiendo del tipo de material liberado, podría producirse también un calentamiento posterior, asociado a la emisión de gases de efecto invernadero. En cualquier caso, el efecto inmediato de los grandes impactos suele ser una caída brusca de las temperaturas globales y un fuerte desajuste

de los ciclos naturales del carbono y el agua.

Otros factores naturales

El sistema climático de la Tierra es un entramado extraordinariamente complejo, donde todo está interconectado: océanos, atmósfera, biosfera, criosfera, incluso la propia corteza terrestre. En este equilibrio, cambios diminutos en una variable (como una leve variación en la órbita del planeta, una alteración sutil en la salinidad oceánica o una erupción volcánica aislada) pueden, con el tiempo, desatar transformaciones profundas y globales. Es el principio de lo que se conoce como efecto mariposa, donde pequeñas causas, en un sistema sensible y no lineal, pueden amplificarse hasta producir grandes consecuencias.

Durante millones de años, la historia climática del planeta ha estado marcada por estos pequeños empujones naturales que, a lo largo de décadas o milenios, han dado lugar a glaciaciones, periodos interglaciares, eventos abruptos de enfriamiento o calentamiento, y oscilaciones regionales que han condicionado la vida en la Tierra. Seguidamente presentamos una serie de factores que podrían tener su efecto en un cambio climático:

- Deriva continental: Los movimientos de las placas tectónicas a largo plazo pueden alterar la distribución de tierras y océanos, afectando las corrientes oceánicas y los patrones climáticos.

- Corrientes oceánicas: Las variaciones en la circulación oceánica global pueden redistribuir el calor y afectar los patrones climáticos.

- Composición atmosférica natural: Cambios en la concentración de gases de efecto invernadero por causas naturales

(a parte de los volcanes) pueden alterar el balance energético del planeta.

-Ciclos biogeoquímicos: Procesos naturales que involucran el intercambio de carbono y otros elementos entre la atmósfera, los océanos y la biosfera.

-Cambios en la magnetosfera terrestre: Variaciones en el campo magnético de la Tierra pueden afectar la cantidad de radiación cósmica que llega a la atmósfera, influyendo en la formación de nubes y el clima.

-Oscilaciones climáticas de largo plazo: Fenómenos como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) o la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) pueden causar variaciones climáticas en escalas de décadas.

- Cambios en la vegetación global: Alteraciones naturales en la cobertura vegetal pueden modificar el albedo terrestre y los ciclos de carbono.

- Variaciones en la capa de ozono: Fluctuaciones naturales en la concentración de ozono estratosférico pueden afectar la radiación ultravioleta que llega a la superficie.

- Cambios en la biota marina: Variaciones en las poblaciones de fitoplancton pueden afectar la absorción de CO₂ y la producción de aerosoles marinos.

- Fluctuaciones en la ionosfera: Alteraciones en esta capa de la atmósfera pueden influir en la propagación de ondas electromagnéticas y, potencialmente, en patrones climáticos.

- Variaciones en el polvo cósmico: Cambios en la cantidad de polvo interestelar que ingresa a la atmósfera terrestre pueden afectar la formación de nubes.

- Cambios en la rotación terrestre: Pequeñas variaciones en la velocidad de rotación de la Tierra pueden influir en la circulación atmosférica y oceánica.

- Fluctuaciones en el campo gravitatorio: Variaciones sutiles en la gravedad terrestre podrían afectar la dinámica atmosférica y oceánica.

- Cambios en la composición del núcleo terrestre: Alteraciones en el núcleo podrían afectar el campo magnético y, potencialmente, la protección contra radiación cósmica.

- Variaciones en la capa D atmosférica: Cambios en esta capa poco estudiada de la atmósfera podrían influir en la química atmosférica superior.

- Fluctuaciones en la radiación cósmica galáctica: Variaciones en la exposición a rayos cósmicos pueden influir en la formación de nubes y la química atmosférica.

- Bioluminiscencia oceánica: La mayor o menor concentración de luz producida por organismos marinos podría afectar sutilmente el albedo oceánico.

- Variaciones en la composición isotópica atmosférica: Cambios naturales en las proporciones de isótopos de ciertos elementos podrían influir en procesos atmosféricos.

- Fluctuaciones en la heliopausa: Variaciones en esta frontera del sistema solar podrían afectar la cantidad de radiación cósmica que llega a la Tierra.

- Cambios en la frecuencia de resonancia de Schumann: Alteraciones en esta frecuencia electromagnética de la Tierra podrían tener efectos sutiles en la atmósfera.

- Variaciones en la producción de aerosoles orgánicos por bosques: Cambios en la emisión de compuestos orgánicos volátiles por la vegetación podrían afectar la formación de nubes.
- Fluctuaciones en la actividad de rayos gamma terrestres: Variaciones en estos fenómenos atmosféricos podrían influir en la química atmosférica superior.
- Cambios en la composición química de la mesosfera: Alteraciones en esta capa atmosférica poco estudiada podrían tener efectos en capas inferiores.
- Variaciones en la frecuencia de impactos de micrometeoritos: Cambios en la cantidad de polvo espacial que entra en la atmósfera podrían afectar la nucleación de nubes.
- Cambios en la producción natural de aerosoles biogénicos marinos: Variaciones en la emisión de estos compuestos por el océano podrían influir en la formación de nubes marinas.
- Cambios en la actividad sísmica submarina: Alteraciones en la actividad sísmica oceánica podrían afectar las corrientes y la temperatura del agua.
- Variaciones en la producción de metano por organismos marinos: Cambios en la actividad de ciertos microorganismos podrían alterar las emisiones naturales de metano.
- Fluctuaciones en la actividad de fumarolas submarinas: Variaciones en estas emisiones podrían afectar la química oceánica local y potencialmente la circulación.
- Fluctuaciones en la producción de espuma marina: Alteraciones en la cantidad de espuma producida por los océanos podrían influir en el albedo y la formación de aerosoles marinos.
- Cambios en la actividad de bacterias metanógenas en humedales: Variaciones en la producción de metano por estos microorganismos podrían afectar las concentraciones atmosféricas de este gas de efecto invernadero.
- Variaciones en la frecuencia de tormentas eléctricas secas: Cambios en la ocurrencia de rayos sin precipitación podrían influir en la química atmosférica y la formación de ozono troposférico.
- Fluctuaciones en la actividad de fumarolas en zonas volcánicas: Variaciones en las emisiones de gases y partículas de estas fuentes podrían afectar la composición atmosférica local.
- Cambios en la frecuencia de fenómenos de bioluminiscencia oceánica masiva: Alteraciones en estos eventos podrían influir sutilmente en el albedo oceánico nocturno.
- Variaciones en la producción de polvo por erosión eólica en desiertos fríos: Cambios en la cantidad de partículas finas liberadas a la atmósfera podrían afectar la formación de nubes y la radiación solar.
- Fluctuaciones en la actividad de microorganismos productores de dimetilsulfuro en océanos: Variaciones en la emisión de este compuesto podrían influir en la formación de núcleos de condensación de nubes.
- Cambios en la frecuencia de fenómenos de niebla en bosques de altura: Alteraciones en estos eventos podrían afectar el balance hídrico y energético local.
- Variaciones en la actividad de organismos bioluminiscentes terrestres: Cambios en la producción de luz por estos organismos podrían tener efectos sutiles en el albedo nocturno de ciertas regiones.

Interacción entre factores naturales

En el sistema climático, todo está conectado, y los efectos de un fenómeno rara vez se manifiestan por separado. Es en su interacción donde alcanzan verdadera magnitud. Un leve cambio en la órbita terrestre puede coincidir con un descenso en la actividad solar, amplificando su efecto conjunto sobre las temperaturas. Una gran erupción volcánica puede añadir aerosoles a una atmósfera ya alterada por un periodo de baja radiación solar, intensificando el enfriamiento. Incluso los cambios en la cobertura vegetal, aparentemente locales, pueden modificar el albedo y la humedad del suelo, afectando a su vez a la circulación atmosférica o a las precipitaciones a escala regional.

En algunos casos, la interacción genera efectos de retroalimentación que refuerzan el cambio inicial. Si, por ejemplo, una glaciación comienza por una variación orbital, la expansión del hielo aumenta el albedo, disminuye la absorción de calor y acelera el enfriamiento. Esa nueva configuración puede, a su vez, afectar a la circulación oceánica y alterar el equilibrio del dióxido de carbono entre la atmósfera y el océano, retroalimentando el proceso. Ocurre algo parecido cuando grandes cambios tectónicos reconfiguran la circulación marina, alterando el transporte de calor entre hemisferios, lo que puede desatar un encadenamiento de respuestas climáticas en distintas zonas del planeta.

Este carácter interdependiente convierte al sistema climático en una red altamente sensible, donde pequeñas perturbaciones pueden, bajo ciertas condiciones, desencadenar transformaciones de gran escala. Lo importante no es solo qué factor cambia, sino cuándo lo hace, durante cuánto tiempo y en qué contexto. Así, el clima de la Tierra no se entiende como

resultado de una causa dominante, sino como la expresión de un equilibrio siempre inestable entre múltiples procesos que operan a distintos ritmos y escalas.

Conclusiones

El clima de la Tierra ha estado en constante transformación desde mucho antes de la aparición del ser humano. A lo largo de millones de años, ha respondido a ciclos orbitales, fluctuaciones solares, erupciones volcánicas, reorganización de los continentes, cambios en la vegetación, variaciones en los gases atmosféricos y hasta impactos cósmicos. Ninguno de estos factores actúa de forma aislada. Se combinan, se refuerzan o se contrarrestan entre sí, en un equilibrio dinámico que ha dado lugar tanto a edades de hielo como a épocas de calor tropical.

Este repaso a las causas naturales nos recuerda que el cambio climático no es una anomalía reciente, sino una característica inherente a la historia del planeta. Sin embargo, también deja claro que la mayoría de estos cambios ocurrían a lo largo de periodos muy largos, lo que permitía cierta adaptación de los ecosistemas. El ritmo actual, en cambio, parece desafiar esa lógica temporal. Por eso, una vez comprendido el peso de los factores naturales, la atención se dirige inevitablemente a otro ámbito: qué papel ha empezado a desempeñar el ser humano en este proceso.

El estudio de las causas naturales no desacredita la hipótesis de un cambio climático provocado por la actividad humana; más bien la enmarca, la contextualiza. Nos permite distinguir lo que forma parte de la respiración lenta de la Tierra y lo que podría ser un sobresalto.

En el siguiente capítulo abordaremos precisamente ese otro componente: el

impacto antropogénico y cómo, en pocas décadas, la acción humana ha llegado a convertirse en un nuevo agente geológico capaz de alterar el clima global. ■

Bibliografía:

Ferrer, Ángel. *Glaciaciones y Astronomía. Ciclos de Milankovitch*: Huygens (Boletín Huygens), n.º 40, 2003.

Berger, A. (1992). *Los ciclos de Milankovitch y su impacto en el clima de la Tierra*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Martínez-Gordillo, M., & Sánchez-Sesma, J. (2011). *Evolución del clima terrestre: causas naturales y antrópicas*. México: Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Geofísica.

Ruddiman, W. F. (2008). *Historia del clima de la Tierra: pasado y futuro*. Barcelona: Ediciones Omega.

Fernández-Armesto, F. (2010). *Historia del mundo: El medio ambiente y el clima como protagonistas*. Barcelona: Crítica.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2017). *Cambio climático: una perspectiva geológica*. Madrid: Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.

Villalba, R. (2009). *Cambios climáticos pasados y su importancia para entender el clima futuro*. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 103(2), 361-376.



TITAGUAS Serranía Alto Turia ha obtenido en 2017 la certificación de "*Reserva Starlight*" otorgada por la *Fundación Starlight* y avalada por la **UNESCO**.

Esta certificación acredita que no hay apenas contaminación lumínica, siendo un municipio respetuoso con el cielo oscuro para la Observación Astronómica.

‘Apaga una luz y enciende una estrella’ ESCUELA DE CIENCIAS “COSMOFISICA”

c/San Cristóbal, 46 - 46178 TITAGUAS
Valencia (Spain)

