

UNA BREVE HISTORIA DE LA ATMÓSFERA TERRESTRE

David QUINTERO PLAZA

Delegación Territorial de AEMET en Canarias

RESUMEN: En esta colaboración se va a dar una panorámica, a grandes rasgos, de la historia de la atmósfera terrestre. El viaje comenzará en sus orígenes, cuando la Tierra se enfrió tras el bombardeo intenso tardío (LHB, Late Heavy Bombardment), hasta la actualidad. Se hablará de las principales características de la atmósfera terrestre en cada momento de su historia enlazándolas con acontecimientos importantes en la Tierra, tales como la explosión cámbrica o el desarrollo de los homínidos. Se mostrarán hechos de la ciencia de la Paleoclimatología, aunque se pasará de puntillas sobre sus métodos de trabajo, por falta de tiempo y espacio.

Cada era de la atmósfera terrestre daría no solo para un capítulo aparte sino para una tesis doctoral, así que el enfoque será el de crear un esquema y una visión de conjunto; aquellas personas interesadas podrán ampliar sus estudios posteriormente.

Palabras clave: Tierra, atmósfera antigua, evolución, glaciaciones, eras, eones.

1. UNOS BREVES COMENTARIOS SOBRE FECHAS Y ESCALAS TEMPORALES

En este artículo aparecerán los nombres y las fechas que los geólogos utilizan en sus escritos cuando hablan sobre la historia de la Tierra. Serán la referencia principal los cuatro eones en los que se divide:

- El eón Hádico: desde el origen del planeta hace 4500 millones de años hasta hace 4000 millones de años.
- El eón Arcaico: desde los 4000 millones de años de antigüedad hasta los 2500 millones de años de antigüedad.
- El eón Proterozoico: desde 2500 millones de años hasta unos 542 millones de años.
- El eón Fanerozoico: desde hace 542 millones de años hasta hoy.

Los eones se subdividen a su vez en eras, las eras en periodos y los periodos en épocas. Por ejemplo: eón Fanerozoico, era Cenozoica, periodo Cuaternario y época Holocena denotarían con toda precisión el tiempo actual.

Los tres primeros eones (Hádico, Arcaico y Proterozoico) se agrupan a veces en un único supereón: el Precámbrico. Esto es así porque el Cámbrico se considera un punto crucial en la historia de la Tierra (fue cuando la vida dio un gran salto hacia delante). Se evitará la rigidez dividiendo el artículo en eones porque quedaría muy descompensado debido a la gran cantidad de información de las eras más recientes frente a las más antiguas. No obstante, sí se hará referencia en todo momento al punto de la línea temporal en el que tiene lugar cada evento.

2. LA ATMÓSFERA EN EL SUPEREÓN PRECÁMBRICO

Si bien la Tierra se forma como planeta hace unos 4500 millones de años, procedente de la nube de gas y polvo que formó el Sistema Solar, es complicado hablar de clima durante

los primeros millones de años, debido a la continua inestabilidad y a los agitados procesos geológicos que barrían la superficie (y el interior) del planeta. Cuando la Tierra tenía apenas 100 millones de años se cree que un planeta del tamaño de Marte (al que se ha llamado Theia) chocó contra ella y, del brutal impacto, el material expulsado se puso en órbita y formó la Luna. Probablemente ese choque explica la inclinación del eje terrestre. Tras la colisión, la Tierra debió de ser básicamente un océano de magma rodeado por una atmósfera turbulenta de vapores de silicatos (ZALASIEWICZ y WILLIAMS, 2012) (véase la figura 1).

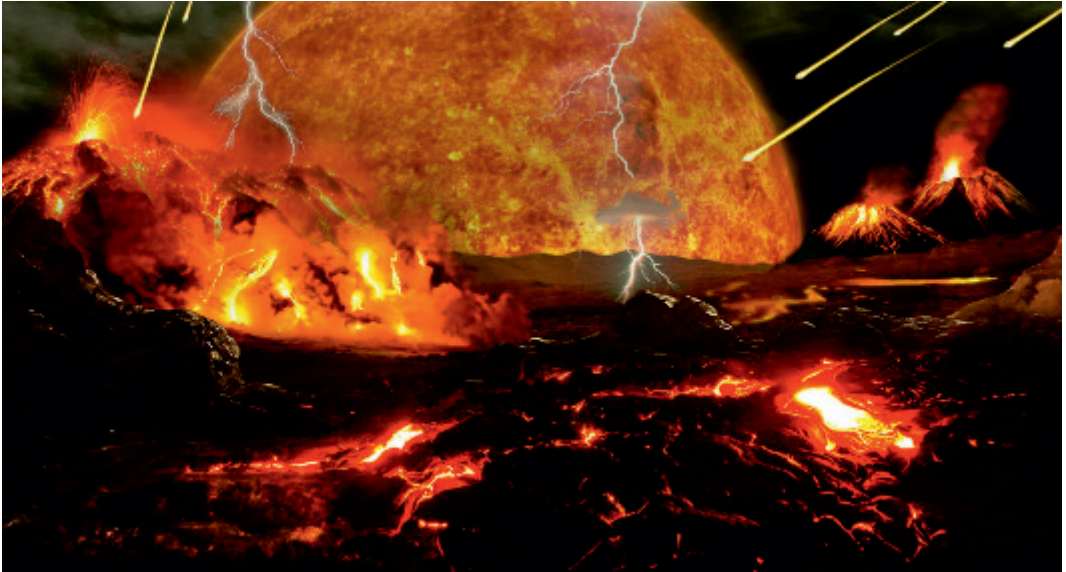


Figura 1. Visión artística del eón Hádico, realizada por Tim Bertelink y extraída de Wikimedia Commons.
(<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=Tim+Bertelink+&title=Special%3ASearch&go=Go#/media/File:Hadean.png>).

Por otro lado, hasta que la Tierra desarrolló un campo magnético propio, algo que no se sabe a ciencia cierta cuándo tuvo lugar, aunque como mínimo fue hace unos 3500 millones de años (MCELHINNEY y SENANAYAKE, 1980), la atmósfera terrestre estuvo expuesta a los vientos solares, los cuales produjeron un efecto de “poda” de la atmósfera, reduciéndola mucho o casi barriéndola del todo, como pasa hoy con Marte.

Además, hace aproximadamente entre 4100 y 3800 millones de años, la Tierra y otros cuerpos del Sistema Solar sufrieron una serie de impactos, lo que se conoce como el bombardeo intenso tardío (*Late Heavy Bombardment*). El porqué de esta serie de impactos es algo que aún se ignora, aunque una de las principales hipótesis es una resonancia orbital entre los planetas mayores que alteró las órbitas de muchos de los cuerpos del cinturón de asteroides. Es posible que estos cuerpos hayan transportado parte del agua que hoy constituye los océanos. Existen evidencias que sugieren que apenas la Tierra se enfrió desarrolló pronto océanos. Hay en cristales de zirconio de la época cantidades altas de ^{18}O , un isótopo pesado del oxígeno (el cual es usualmente ^{16}O). El agua (H_2O) es más fácil evaporarla y convertirla en vapor cuando el oxígeno es el isótopo ligero. El hecho de que estos cristales de zirconio presenten abundancias altas de ^{18}O sugiere que estuvieron en contacto con agua.

Aún más impresionantes son los indicios de vida desde hace ya unos 4000 millones de años en estromalitos, estructuras minerales que se sabe que son generadas por poblaciones de cianobacterias.

2.1. La paradoja del Sol joven y débil

Tras los primeros y agitados 500 millones de años del eón Hádico, la Tierra se estabilizó y una protoatmósfera de vapor de agua, metano y amoníaco envolvió la corteza terrestre. En este momento el Sol, por aquel entonces, era una estrella joven y con una débil luminosidad (alrededor de un 70 % de lo que emite hoy en día), sin embargo la Tierra estaba lo suficientemente cálida como para permitir agua líquida en su superficie, como se ha mencionado antes. Una de las posibles explicaciones es que los gases de efecto invernadero estaban presentes en una concentración mucho mayor de la que hay hoy en día. Sin embargo, este gas no debía ser CO₂: ciertas mediciones sugieren que la proporción de este gas era bastante baja. La opción que queda es el metano, un gas con un efecto invernadero unas 20-25 veces más potente que el CO₂.

El efecto invernadero no es la única explicación que se ha propuesto. Se ha sugerido que en aquel eón la Luna estaría más cerca y por tanto el calentamiento de marea, es decir, la fricción entre el manto y la corteza terrestres por la atracción diferencial de la Luna, sería mucho mayor. Otra explicación es la de un mayor calor interno en la Tierra con motivo de una mayor presencia de isótopos radiactivos, tales como el potasio-40, el uranio-235 y el uranio-238. Probablemente es la conjunción de estos factores lo que explicaría la paradoja del Sol joven y débil.

2.2. La Gran Oxidación

El siguiente cambio drástico en la evolución de la Tierra y su atmósfera tuvo lugar hace unos 2400 millones de años, en el eón Proterozoico, dentro todavía del supereón Precámbrico. Evidencias de varias fuentes indican que apareció oxígeno molecular (O₂) en la atmósfera terrestre. La causa de este evento, al que se llama la Gran Oxidación (*Great Oxygenation Event*), si bien todavía tiene algunas cuestiones por resolver, se cree que fue biológica.

En algún momento entre el eón Proterozoico y el Arcaico (¿o quizá antes?), las primitivas cianobacterias que poblaban la Tierra¹ descubrieron la fotosíntesis oxigénica (la que libera O₂, la más común), una forma especialmente eficiente de convertir la luz solar en energía química que se almacena en moléculas orgánicas, como el ATP (adenosín trifosfato). En la fotosíntesis oxigénica, el oxígeno es liberado como uno de los productos de la reacción. En unas primeras etapas, este oxígeno era captado sobre todo por los átomos de hierro, los cuales, al oxidarse, dieron lugar a lo que se conoce como “formaciones de hierro bandeado” (*banded iron formations*). El hierro de estas rocas sedimentarias captaba el oxígeno liberado por las cianobacterias, hasta un límite, a partir del cual el oxígeno producido fue capaz de escapar a la atmósfera (figura 2).

Aunque la fotosíntesis fue un gran descubrimiento para determinadas cianobacterias, supuso una verdadera catástrofe para los organismos que no estaban habituados a este gas. El oxígeno es muy reactivo, y venenoso si uno no está adaptado a él. Muchos microorganismos perecieron como consecuencia del evento de la Gran Oxidación. Sin

¹ El origen de la vida, si bien un tema fascinante por sí mismo, no será tratado aquí por falta de espacio.

embargo, los organismos que resistieron al oxígeno, crecieron en complejidad y variedad y (bastante) tiempo después (alrededor de hace mil millones de años), las primeras células eucariotas aparecieron en el planeta. Estas células, que probablemente absorbieron bacterias y que luego se convirtieron en orgánulos simbióticos tales como mitocondrias y cloroplastos, tenían un núcleo separado en el que almacenaba la mayor parte de su material genético. Se reproducían intercambiándolo, en lugar de simplemente replicarse y esta reproducción, llamada sexual, supuso una importante aceleración para la evolución de la vida (ZALASIEWICZ y WILLIAMS, 2012).

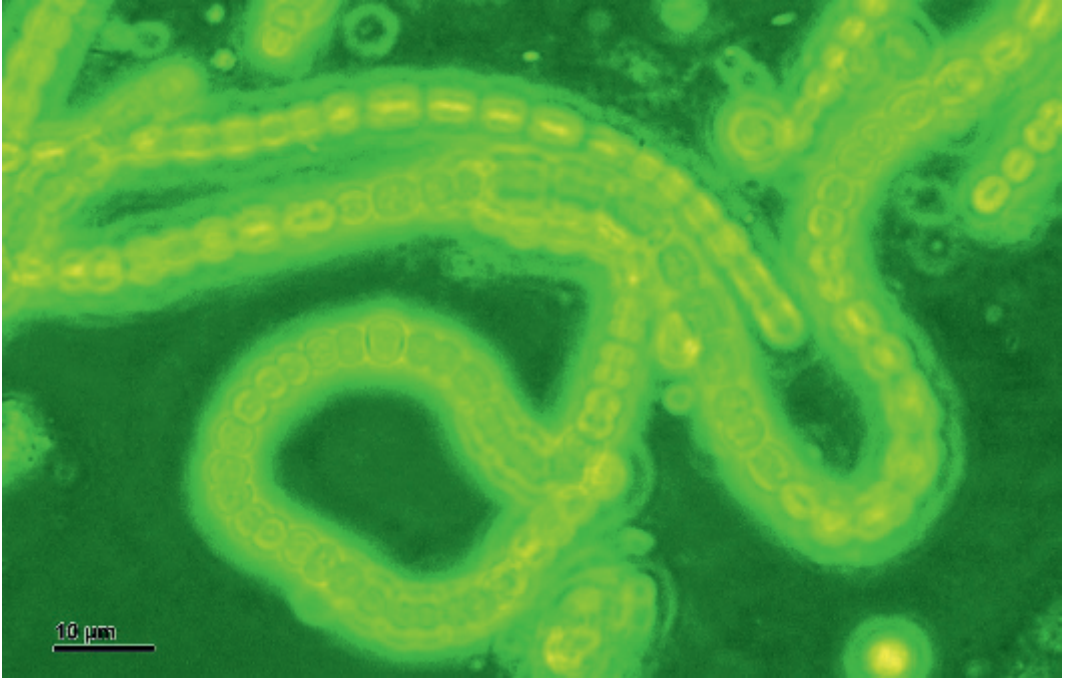


Figura 2. Cianobacterias, su actividad fotosintética dio lugar a la Gran Oxidación, por Doc. RNDr. Josef Reischig, CSc y extraída de Wikimedia Commons. ([https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=Special:Search&limit=20&offset=40&profile=default&search=Doc.+RNDr.+Josef+Reischig#/media/File:Cyanobacteria_\(248_07\)_Mixture;_native_preparation;_green_filter.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=Special:Search&limit=20&offset=40&profile=default&search=Doc.+RNDr.+Josef+Reischig#/media/File:Cyanobacteria_(248_07)_Mixture;_native_preparation;_green_filter.jpg)).

2.3. Primeras glaciaciones

Además de la extinción de muchos microorganismos, el evento de la Gran Oxidación tuvo como consecuencia la que fue probablemente la primera gran glaciación en la historia climática y geológica de la Tierra. Anteriormente parece que hubo una glaciación, llamada Pongola, aunque no está del todo claro cuáles fueron su extensión y sus efectos: parece que tuvo lugar cuando se rompió el primer supercontinente primitivo (Vaalbara), aunque hay bastantes incertidumbres todavía.

La Tierra ha experimentado cinco grandes glaciaciones. La primera de ellas se denomina glaciación Huroniana o de Makganyene, y fue debido a la extracción de los gases de efecto invernadero como consecuencia de la Gran Oxidación. El oxígeno liberado se combinó con

el metano atmosférico para formar agua y dióxido de carbono. Como se ha dicho antes, el metano es hasta 25 veces más potente como gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono, así que su eliminación de la atmósfera supuso un descenso muy importante de las temperaturas. De hecho, algunos autores consideran que la glaciación Huroniana fue un evento de tipo *Snowball Earth*.

La *Snowball Earth* (Tierra bola de nieve) es un caso extremo e hipotético en el que una glaciación especialmente potente convierte a la Tierra en una bola de hielo. El climatólogo ruso Mijaíl Budyko fue posiblemente el primero en proponer que uno o varios eventos así tuvieron lugar en el pasado. Teniendo en cuenta que el hielo introduce una realimentación positiva en el clima (es decir, que más hielo significa más reflexión de la luz y por lo tanto mayor bajada de la temperatura), según estimaciones del propio Budyko, una vez que los glaciares hubiesen llegado a los 30 grados de latitud norte o sur, nada podría pararlos y continuarían su avance hasta envolver la Tierra por completo. Algo así paralizaría el ciclo biogeoquímico del agua, ya que no llovería ni nevaría en una Tierra bola de nieve. Por supuesto, muchas especies se extinguirían (y de hecho hubo una importante extinción en este periodo), sin embargo, la evolución, aunque por otros caminos, sería capaz de seguir su curso.

Tanto si hubo *Snowball Earth* como si no, lo cierto es que la glaciación Huroniana terminó, hace unos 2100 millones de años. Se piensa que fue la tectónica de placas la responsable: al incrementarse la actividad volcánica hubo una nueva emisión de gases de efecto invernadero que calentaron la Tierra. Si ocurrió así teniendo una Tierra bola de nieve el efecto debió de ser espectacular: cientos de millones de toneladas de hielo resquebrajándose con un sonido atronador y liberando una energía de fusión tan alta que se especula que numerosos y potentísimos huracanes circunnavegaron el globo.

El nuevo y activo vulcanismo tuvo como consecuencia una era cálida en la Tierra y la vida prosiguió su desarrollo, primero inventando la célula eucariota y posteriormente formando agregaciones de estas células en los primeros organismos multicelulares.

Hacia el final del eón Proterozoico tuvieron lugar tres glaciaciones más. Básicamente se puede resumir la historia climática de la Tierra como un bamboleo constante entre glaciaciones e “invernaderos” en los que apenas había hielo; de hecho, la etapa actual, una Tierra templada con polos fríos como para albergar hielo es la forma menos habitual a efectos históricos (HARTMANN, 2015). Estas nuevas glaciaciones fueron la consecuencia del *chemical weathering* o meteorización. La meteorización tiene lugar cuando las altas cantidades de dióxido de carbono en el aire se combinan con el vapor de agua (las temperaturas, como se ha indicado, eran altas de nuevo y había suficiente evaporación) como para formar H_2CO_3 . Este ácido degrada los silicatos de las rocas y a efectos netos va reduciendo, lenta pero inexorablemente dado que es una realimentación negativa, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, y por tanto disminuye el efecto invernadero y enfría el planeta. Para algunos autores, algunas de estas glaciaciones pudieron dar lugar de nuevo a una nueva *Snowball Earth*, este tema es motivo de fuertes debates todavía. En cualquier caso, lo que parece es que fue de nuevo el vulcanismo producido por la tectónica de placas quien puso fin a esta situación y calentó de nuevo la Tierra. Como curiosidad, se puede mencionar que es en este periodo (hace unos 650 millones de años) cuando los biólogos han estimado que tiene lugar el ancestro común más cercano de todos los organismos vivos de hoy en día; esto se calcula analizando los ADN de las diferentes criaturas y comparando las partes en común y su deriva o modificación en el tiempo (aproximadamente constante).

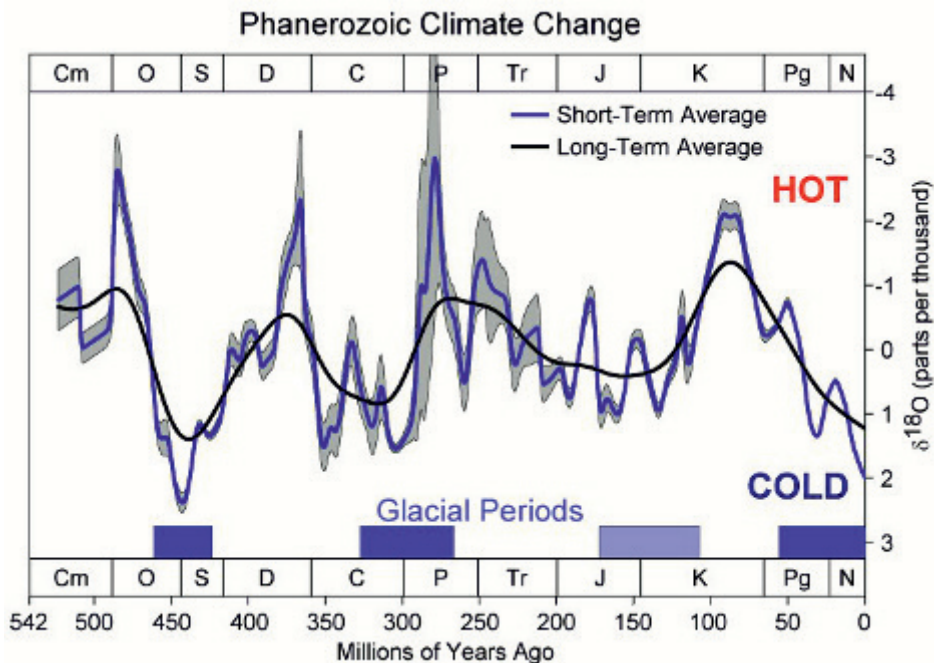


Figura 3. Variaciones de temperatura en el eón Fanerozoico, reconstruidas mediante los isótopos de oxígeno. Se aprecia la tendencia descendente de la etapa final, revertida desde hace apenas 200 años por la acción humana (inapreciable en la escala del gráfico). (Dragon flights para Global Warming Art Project).

3. LOS PRIMEROS PASOS EN EL EÓN FANEROZOICO

El eón Fanerozoico comenzó con uno de los acontecimientos más importantes de la historia de la vida en la Tierra: la explosión cámbrica, hace unos 520 millones de años (figura 3). Aprovechando unas condiciones cálidas (unos 7 grados de temperatura media superior a la actual), los primeros animales, evolucionados de organismos multicelulares, comenzaron una fase de evolución acelerada. La vida experimentó con todo tipo de formas y diseños, algunos realmente extraños y sorprendentes, como los acorazados trilobites. De hecho, es gracias al hecho de que muchos animales desarrollaron concha por lo que los biólogos tienen hoy en día fósiles que les permiten estudiar con detalle el periodo. Fue también la época en la que los animales salieron del agua por primera vez y conquistaron la tierra firme.

Dos edades de hielo de importancia tuvieron lugar en el eón Fanerozoico: la primera, hace unos 450 millones de años, por una activa meteorización y por cambios en la posición en la órbita terrestre, de la que se hablará más adelante; y la segunda que tuvo lugar en el Carbonífero, hace unos 325 millones de años, un periodo así llamado porque la Tierra estaba repleta de bosques, que absorbían dióxido de carbono de la atmósfera (de hecho, es de estos bosques de donde vienen la mayoría de las actuales reservas de carbón). Estos frondosos bosques, llenos de helechos y otras plantas verdes, en su drenaje del dióxido de carbono atmosférico, produjeron una nueva edad de hielo, la llamada glaciación de Karoo. Fue la tectónica de placas la que de nuevo puso fin a un periodo frío, no solo a través del vulcanismo, sino mediante el movimiento de las masas continentales, juntándolas en un solo

continente llamado Pangea. Este supercontinente mantuvo húmedas las zonas costeras, pero las zonas del interior estaban demasiado lejos del mar como para poder beneficiarse de la humedad, con lo que los verdes y frondosos bosques del Carbonífero comenzaron a decaer y el efecto neto de reducir CO_2 por parte de la vegetación disminuyó considerablemente. La Tierra volvió a calentarse.

3.1. La extinción del Pérmico-Triásico o la Gran Mortandad

El final de la glaciación Karoo, hace unos 260 millones de años, permitió un clima relativamente estable pero que duró poco, puesto que apenas 10 millones de años después tuvo lugar el que es el mayor evento de extinción de la vida que ha tenido lugar en la historia de la Tierra (los científicos cuentan unos cinco grandes eventos de extinción). La extinción del Pérmico-Triásico (PT) acabó con alrededor del 90 % de la vida en la Tierra.

La hipótesis más sólida para explicar el porqué de esta extinción masiva es la aparición de una fase de vulcanismo tremendamente activo. En lo que hoy es Siberia existe una masa considerable de roca ígnea que emergió del manto de la Tierra hace unos 250 millones de años. Algunos autores postulan que fue un fenómeno geológico producido por la tectónica de placas, otros que fue el resultado de intensos corrimientos de tierra debidos al impacto de un meteorito. En cualquier caso, una serie de erupciones volcánicas gigantescas emitieron toneladas de lava y gases que produjeron un cambio climático radical, oscureciendo el Sol y liberando grandes cantidades de gases venenosos para la vida. Estos *traps* siberianos (así llamados) crearon un efecto invernadero tan salvaje que la temperatura de los océanos se elevó mucho, extinguiendo numerosas especies y rompiendo los enlaces de puente de hidrógeno de los hidratos o “clatratos” de metano del fondo del mar. El metano, como se sabe, es un muy poderoso gas de efecto invernadero, lo que vino a acentuar aún más el cambio climático.

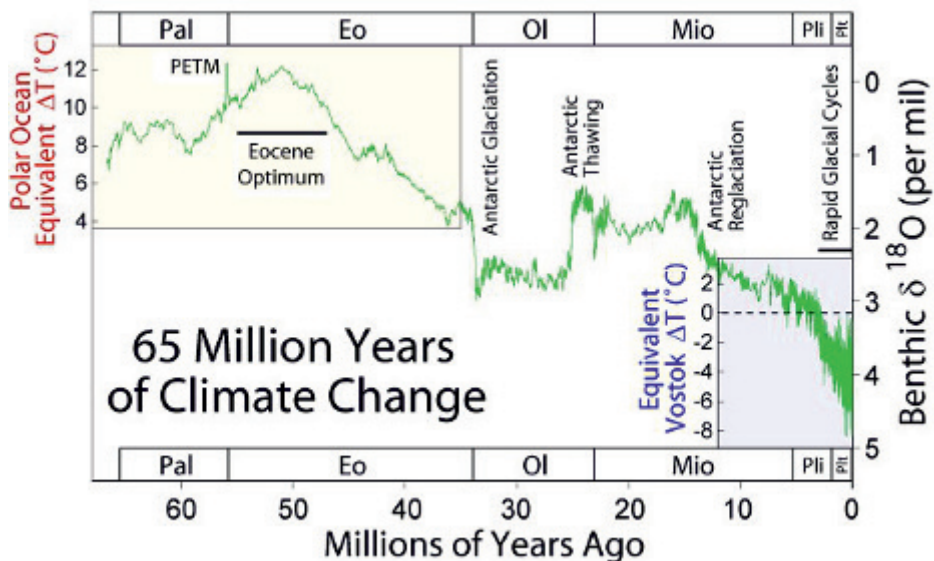


Figura 4. Variaciones en la temperatura con respecto a la actualidad, reconstruidas a través de isótopos del oxígeno. (Robert A. Rhode para Global Warming Art Project).

La vida tardó bastante en recuperarse de una serie de eventos tan extremos, pero lo hizo, y tras la extinción PT comenzó la Era de los Reptiles, especialmente de los dinosaurios, que duró hasta hace unos 65 millones de años, cuando una nueva extinción (aunque menor que la PT), provocada al parecer por el impacto de un cometa, los borró de la faz de la Tierra, aunque, como antes, ciertos organismos se adaptaron, sobrevivieron y transmitieron sus genes.

4. LA TIERRA EN LA ERA CENOZOICA

La era Cenozoica es la última era geológica. Está dividida en varios periodos y marca el inicio de los mamíferos y (mucho más tarde) del ser humano.

El planeta estaba templado en el Paleoceno, el primer periodo de la era Cenozoica, pero se calentó bastante en lo que se ha llamado el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (o en inglés, el *Paleocene Eocene Thermal Maximum* o PETM). Las pruebas indican que la causa de este calentamiento fue la emisión masiva durante muchos miles de años de CO₂ a la atmósfera. La causa de la causa, es decir, el porqué de esta emisión, es algo que no se sabe con seguridad, aunque los sospechosos habituales están presentes: vulcanismo, impacto de asteroide o cometa, liberación de metano o cambios en la órbita terrestre (figura 4).

Mecanismos de meteorización y de almacenamiento de dióxido de carbono y eliminación del metano redujeron las temperaturas ligeramente, aunque el enfriamiento generalizado que tuvo lugar sobre todo al final del Eoceno, varios millones de años tras el PETM, es algo que todavía se discute. Tiene especial fuerza la teoría de que por aquel entonces la Antártida se separó de Australia y Sudamérica, abriendo un pasillo (*tasmanian gateway*) que establecía un flujo circumpolar de agua que protegía de aguas cálidas al continente antártico y encapsulaba su incipiente clima frío. Una Antártida con cada vez más y más hielo producía una realimentación positiva en el clima: el albedo del hielo reflejaba más luz solar y por tanto la Tierra se enfriaba. Bosques y tundras comenzaron a aparecer en latitudes altas mientras la Antártida se convertía en un auténtico continente helado. De hecho, en los últimos 30 millones de años la tendencia general ha sido al enfriamiento (salvo en los últimos dos siglos), y se piensa que la Antártida y su albedo han sido la causa, aunque seguramente no la única (BAEZ, 2012).

Tras el Eoceno y el Oligoceno llegó el Plioceno, una época que se estudia activamente porque los niveles de CO₂ existentes eran muy similares a las 410 ppmv (partes por millón en volumen), que hay en la actualidad. No obstante, la tendencia, como se ha dicho, era hacia el enfriamiento. Así, el siguiente periodo, el Cuaternario, mostró un enfriamiento global más claro y son muchísimas las hipótesis propuestas para explicarlo, quizá sea la suma de todas las que de hecho lo explican (ZALASIEWICZ y WILLIAMS, 2012).

Por un lado, a nivel geológico, el Cuaternario ha estado marcado por la creación de nuevas montañas, con una actividad más propia de una Tierra joven que de la fase de edad intermedia en la que está el planeta. No se sabe por qué ha tenido lugar esto, aunque posiblemente cambios en la dinámica de la corteza y el manto terrestres estén detrás. En cualquier caso, más montañas significan más rocas para meteorizar. Por otro lado, la unión de América del Norte y del Sur reforzó la corriente del Golfo, que redistribuye el calor, alejándolo de la zona más puramente ecuatorial. Un fenómeno similar tuvo lugar en el sudeste asiático cuando Nueva Guinea y Australia se acercaron a Borneo. También se especula con una reducción de la mezcla entre aguas frías y cálidas en el Pacífico, que permitiría que las aguas cálidas del nivel superficial durasen más tiempo y aportasen más humedad al ambiente,

propiciando que esa humedad precipitase, en los inviernos fríos, en forma de nieve. Hay incluso propuestas más exóticas, como la de si la Tierra pudo atravesar una zona del espacio (en su movimiento junto al resto del Sistema Solar alrededor de la galaxia) con bastante densidad de polvo, lo que redujo la radiación recibida del Sol. En cualquier caso, sí que es cierto que los factores astronómicos son importantes, de modo que sí puede ser interesante detenerse un momento en una teoría que explicaría cómo los movimientos de la Tierra en el espacio afectan al clima.

4.1. Los ciclos de Milankovitch

Además de los movimientos de rotación y traslación de la Tierra; en su viaje por el espacio, el planeta ejecuta otros movimientos que tienen una importancia capital para el clima. Los tres más relevantes son: los cambios en la excentricidad de la elipse, es decir, en la forma de la órbita, con un periodo de unos 100 000 años; un cabeceo del eje entre los 21,5 y los 24,5 grados, con un periodo de unos 40 000 años, llamado oblicuidad del eje; y un giro del eje de la Tierra con un periodo de unos 21 000 años, llamado precesión de los equinoccios. Estos tres movimientos fueron estudiados por Milutin Milankovitch, quien calculó la radiación que recibiría un punto cualquiera de la Tierra en función de esos parámetros astronómicos².

Las variaciones en la órbita terrestre podrían explicar algo que se venía observando en los estratos geológicos desde hace tiempo: la alternancia de edades de hielo en el Cuaternario (parece que fue el escritor Johann Wolfgang von Goethe, quien era también un gran científico, el primero en ofrecer una explicación apelando a edades de hielo) que sí parece que podrían haber llegado casi hasta España.

Aunque los ciclos de Milankovitch explican bastante bien las edades de hielo del Cuaternario, su señal se ve entremezclada con otros factores climáticos: son muchas las variables que entran en juego en un sistema tan complejo como el clima. Por ejemplo, la señal más fuerte de los movimientos orbitales terrestres es la de la oblicuidad, con un periodo de 40 000 años, y así ha sido observado desde el principio del Cuaternario (hace 2,5 millones de años). Pero desde hace un millón de años, la señal más fuerte es la de la excentricidad de la órbita (con periodo de 100 000 años), cuando los cálculos teóricos indican que esta señal debiera ser la más débil. Una posible explicación a este misterio es que las grandes masas de hielo se movían al principio sobre suelo sedimentario, sobre el que moverse es fácil; a medida que el tiempo pasaba este suelo desaparecía para dejar al descubierto roca desnuda, sobre la que el desplazamiento es más costoso, y de ahí la resonancia del hielo con el mayor y más lento de los ciclos, el de 100 000 años de la excentricidad orbital. En cualquier caso, no es la única explicación ofrecida a este misterio.

4.2. El Holoceno

Hace unos 10 000 años la Tierra experimentó un enfriamiento bastante súbito, conocido como el Dryas Reciente (*Younger Dryas*). Duró unos 1300 años y para su explicación compiten un par de teorías que, como viene siendo habitual en la Paleoclimatología, tal vez tengan ambas parte de razón. La teoría principal es una interrupción de la corriente del

² Algunos autores sugieren como importante el cambio de inclinación del plano de la órbita terrestre con respecto al del Sistema Solar, con un periodo también de 100 000 años, si bien no se contemplará en el análisis al no ser uno de los movimientos originalmente considerados por Milankovitch.

Golfo por un súbito incremento de agua dulce en el Atlántico Norte, posiblemente al desbordarse los lagos de la parte este de los Estados Unidos de América y Canadá. Otra teoría señala que un cometa llamado Clovis impactó contra la Tierra en esa época, induciendo un enfriamiento global.

El nombre Dryas viene por una flor, la *Dryas octopetala*, habitual en los Alpes que, debido al enfriamiento generalizado, empezó a florecer en los bosques de las altas latitudes.

En el Pleistoceno, la etapa anterior al Holoceno, un cierto grupo de homínidos comenzó a andar erguido, probablemente para tener una visión más clara por encima de la vegetación de la sabana africana en la que moraban. Con el paso del tiempo empezaron a desarrollar herramientas y su capacidad craneal fue en aumento. Los humanos modernos (*Homo sapiens*) aparecieron hace unos 150 000 años, y aprovecharon una época interglacial para salir de África y comenzar a explorar el mundo.

Algunos autores especulan que la llegada del Dryas Reciente obligó a los seres humanos a establecerse y a aprovisionarse de víveres para combatir el frío; esto, sugieren, pudo ser el inicio de la agricultura. No todos los especialistas concuerdan aunque sí que es evidente que el Dryas Reciente modificó los estilos de vida de los humanos de la época.

En general, el clima en el Holoceno ha resultado relativamente estable. Tras el Dryas Reciente, la Tierra se calentó, evento probablemente explicado por la teoría de Milankovitch, alcanzándose la temperatura más alta de esta época, aunque parece que el calentamiento fue muy desigual. A este evento se lo conoce como el Óptimo climático del Holoceno, y tuvo lugar entre el 6000 y el 2500 a. C. Un nuevo calentamiento tuvo lugar en Europa en la Alta Edad Media, alrededor del año 900 d. C. Los paleoclimatólogos no se ponen del todo de acuerdo sobre si este calentamiento fue global o afectó tan solo a Europa. La causa más probable fue el aumento de la actividad solar. Cuando el Sol presenta abundancia de manchas solares, la cantidad de radiación recibida en la Tierra aumenta (las manchas son zonas de alta actividad magnética). Las manchas presentan un ciclo de 11 años y otro de unos 80 años, superpuestos (es decir, el ciclo total es aproximadamente la suma de estas dos ondas con esos dos periodos). Se ha de decir que este tipo de actividad solar ejerce una variación muy pequeña (aunque apreciable) en el clima siendo, gracias a la cercanía de la Tierra, por lo que es posible detectar señales tan débiles. Para un profundo análisis del impacto del Sol en el clima de la Tierra, véase ABELEDO (1998).

El siguiente cambio climático (evidentemente un enfriamiento) se conoce como la Pequeña Edad de Hielo. Tuvo lugar entre los siglos XIV y XIX y está ampliamente documentado: hay cuadros de lagos y ríos helados, por ejemplo, entre otros muchos registros. Sin embargo, a nivel global, el enfriamiento medio según algunos autores apenas llegó al grado (1 °C) (CROWLEY y LOWERY, 2000). Este periodo frío parece coincidir de forma aproximada con un periodo de muy baja actividad solar, en el que hubo muy pocas o ninguna mancha solar, llamado el mínimo de Maunder. También es posible que el vulcanismo fuese un poco más intenso de lo habitual: especialmente notoria fue la explosión del volcán Tambora, en Indonesia, en 1815, dando origen al “año sin verano”. Las cenizas reflejaron mucha radiación solar e hicieron que los amaneceres y atardeceres fuesen especialmente llamativos, debido a la gran cantidad de luz difractada por esa ceniza (hay quien sugiere que las pinturas del acuarelista inglés Turner estuvieron inspiradas por estos atardeceres). Fue en este año también cuando un grupo de intelectuales británicos que veraneaba en Suiza, ante la imposibilidad de salir por el mal tiempo, decidieron entretenerse contándose historias de terror: la joven escritora Mary Shelley alumbró su gran obra, *Frankenstein*, durante esta etapa de

reclusión. Desgraciadamente, no todo fueron avances en el mundo del arte; el año sin verano mermó mucho las cosechas y provocó carestías y hambrunas que dejaron muchos muertos.

5. EL ANTROPOCENO Y CONCLUSIONES

Hace poco más de 200 años, un joven cuáquero británico llamado Abraham Darby creó una fundición de hierro. No tardó en sentirse frustrado por la lentitud y lo costoso del método usual para fundir el hierro. Inquieto y perspicaz, Darby llevó a cabo varias pruebas y acabó inventando un proceso para producir hierro de calidad y a gran escala en un alto horno (ZALASIEWICZ y WILLIAMS, 2012), quemando para ello grandes cantidades de carbón (en realidad, coque, un derivado). Como subproducto de este proceso, la fundición emitía ingentes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera. Comenzaba no solo la Revolución industrial sino también un periodo histórico que algunos historiadores llaman el Antropoceno (de *anthropos*, ser humano, en griego). El nombre elegido no es fruto del azar, sino del

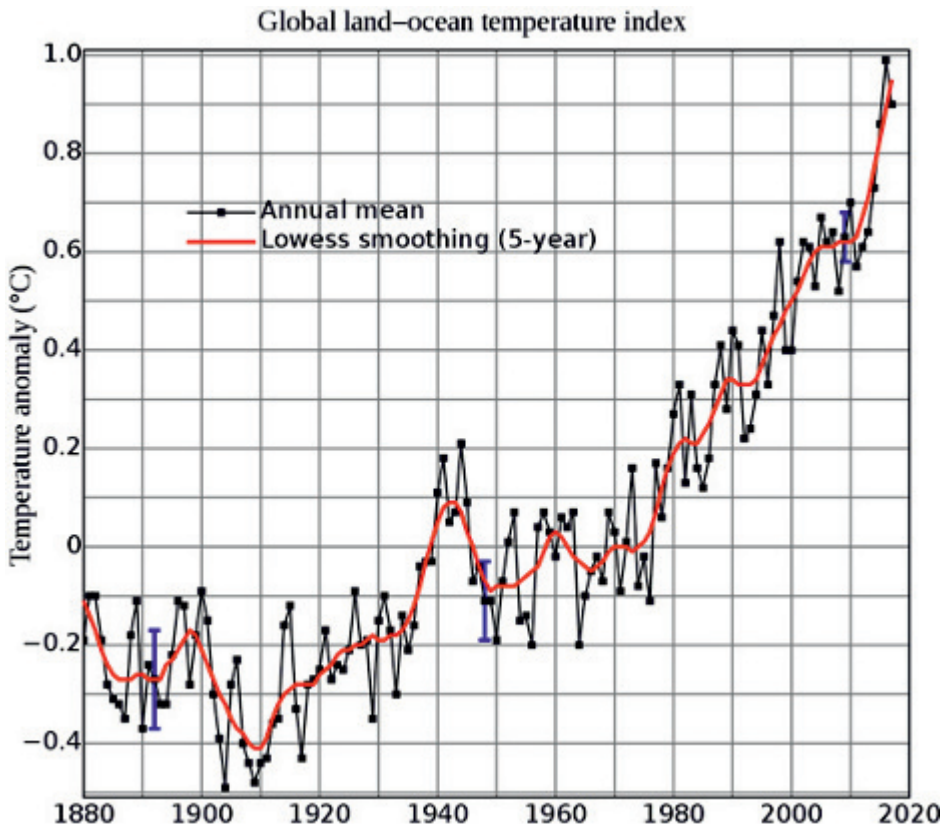


Figura 5. Temperatura en los últimos años, según el Instituto Goddard de Estudios Espaciales (NASA) y extraída de Wikimedia Commons.

(https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=Special:Search&limit=20&offset=20&profile=default&search=NASA+Goddard+Institute+for+Space+Studies+#/media/File:Global_Temperature_Anomaly.svg).

énfasis en los cambios y las modificaciones que los seres humanos, con su comportamiento, realizan en el clima y en general en el entorno.

Los niveles de CO₂ y (en menor medida) de otros gases de efecto invernadero han subido de forma espectacular desde el comienzo de la Revolución industrial, y la Tierra ha revertido la tendencia global al enfriamiento que venía experimentándose en todo el Cuaternario (véanse por ejemplo las figuras 4 y 5). La Tierra se calienta a una velocidad muy elevada si bien, en esta colaboración, no se entrará en un mayor detalle en relación con esta cuestión sobre la que el lector podrá encontrar información en abundancia.

Como se ha visto, la historia climática de la Tierra es una historia pendular, con continuas oscilaciones entre épocas frías y cálidas. Es una historia serena y gradual en ocasiones, pero también violenta y agitada en otras. Muchos millones de años después de aquellas cianobacterias que descubrieron la fotosíntesis oxigénica, de nuevo una especie tiene el poder de configurar el planeta y en gran medida dirigir su destino. Esta especie, el *Homo sapiens*, es prácticamente una recién llegada en términos geológicos y biológicos. Todos confiamos y deseamos que esté a la altura de los acontecimientos.

BIBLIOGRAFÍA

ABELED, M. (1998). La historia del sol y el cambio climático. McGraw-Hill.

Baez, J. C. (2012). <https://johncarlosbaez.wordpress.com/2012/10/22/mathematics-of-the-environment-part-4/>.

CROWLEY, T. J. y LOWERY, T. S. (2000). How warm was the medieval warm period? *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 29, no 1, pp. 51-54.

HARTMANN, D. L. (2015). *Global Physical Climatology*. Newnes.

MCÉLHINNEY, T. N. W. y SENANAYAKE, W. E. (1980). Paleomagnetic Evidence for the Existence of the Geomagnetic Field 3.5 Ga Ago. *Journal of Geophysical Research*, 85, p. 3523.

ZALASIEWICZ, J. y WILLIAMS, M. (2012). *The Goldilocks Planet: The 4 Billion Year Story of Earth's Climate*, Oxford University Press.