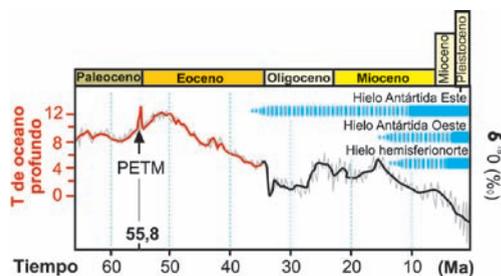


EL LÍMITE PALEOCENO / EOCENO

EL GRAN CALENTAMIENTO DE LA TIERRA

¿Existen en el registro geológico calentamientos climáticos similares al actual?

Tras la gran extinción del límite Cretácico / Terciario (Apartado 2.4.11 de esta guía) el ambiente climático del Paleoceno fue poco a poco estabilizándose, aunque en general se puede decir que el clima se mantenía bastante más calido que en la actualidad. Al final de este periodo (hace 55,8 Ma) el clima de la Tierra sufrió uno de los mayores calentamientos climáticos repentinos de su historia y también quedó registrado en las rocas de Zumaia. Este episodio, que sirve para definir el límite entre las épocas Paleoceno y Eoceno, se conoce con las siglas PETM (Paleocene Eocene Thermal Maximun) y cambió totalmente las condiciones climáticas y bióticas de la Tierra.



Evolución del clima en los últimos 60 Ma. Tras la extinción de los dinosaurios el clima sufrió un gran calentamiento llamado PETM, que dió lugar al clima calido del Eoceno inicial. Después, la temperatura ha ido descendiendo hasta la actualidad. (Modificado de Zachos et al., 2001)

Esta brusca anomalía del carbono coincide en el tiempo con otra anomalía isotópica, en este caso la de los **isótopos estables del Oxígeno**. La relación entre los diferentes isótopos del oxígeno funciona como un termómetro del pasado, ya que esta relación queda fosilizada en las conchas y esqueletos de los organismos y en algunos minerales en el momento de su formación. El ^{18}O es más pesado que el ^{16}O , de manera que le cuesta mucho más evaporarse en épocas frías y su concentración aumenta en los océanos. Por esta razón, el fuerte descenso en la proporción de ^{18}O con respecto a la de ^{16}O se interpreta como un fuerte calentamiento climático. Los datos isotópicos indican que la temperatura media del clima terrestre ascendió unos 5 ó 6 $^{\circ}\text{C}$ (hasta los 25-27 $^{\circ}\text{C}$), notándose en mayor medida en los polos, donde las temperaturas medias subieron 8-10 $^{\circ}\text{C}$ (hasta los 18 $^{\circ}\text{C}$).

Los datos del ^{13}C indican que aunque la emisión principal se produjo en unos pocos miles de años, la Tierra necesitó algo más de 100.000 años para reciclar el carbono orgánico y equilibrar su distribución isotópica.

Hay también otras anomalías bastante generalizadas relacionadas con este calentamiento:

- Se produce una disolución de carbonatos en el mar, lo que indica que el agua marina se acidificó.
- Hay cambios en las proporciones de los minerales de arcillas, que nos indican mayor aridez en bajas latitudes y mayor humedad en altas latitudes.
- Hay decantación de arcillas negras que indican un aumento en la productividad orgánica en los océanos.

LAS PISTAS DEL CALENTAMIENTO

La evidencia principal que este evento dejó en el registro geológico es una gran caída en las relaciones isotópicas del carbono. Los organismos marinos y terrestres utilizan el Carbono para construir sus conchas y sus esqueletos, de manera que los restos fósiles nos aportan información sobre la relación isotópica del carbono en el ambiente. Los organismos seleccionan preferentemente el isótopo ligero del Carbono 12 para fabricar su materia orgánica, y por lo tanto el ambiente está enriquecido en Carbono 13. Esta caída se interpreta como una gran inyección de Carbono orgánico (^{12}C) a los océanos y la atmósfera. Se calcula que se emitieron cerca de 2.000 gigatoneladas al año durante los primeros mil años del calentamiento. La cantidad total emitida debió ser equivalente a la que se supone tenemos hoy enterrada en forma de combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón.

La relación parece bastante clara. El Carbono, en forma de CO_2 y CH_4 , contaminó fuertemente los océanos y la atmósfera y produjo un efecto invernadero intenso, provocando un calentamiento casi repentino que cambió la distribución climática y condicionó la adaptación de las especies. Pero ¿cómo y por qué sucedió todo esto? ¿Cómo podemos encajar todas estas pista en una teoría?

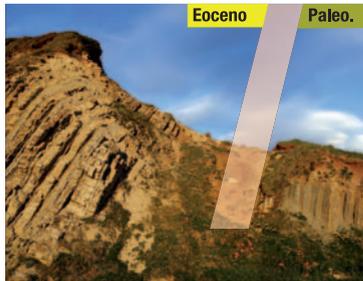
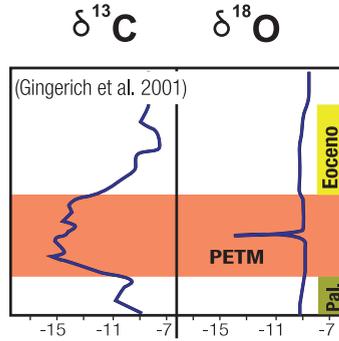
ANOMALÍAS ISOTÓPICAS DEL PETM

Lugares y ambientes



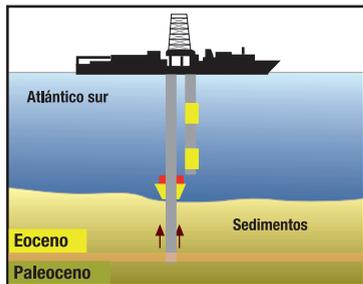
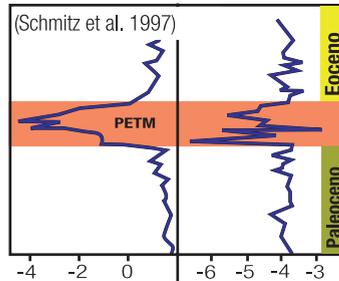
Arroyo Mimbres (Wyoming): ambiente continental

El paisaje desértico de Wyoming era hace 55 millones de años una extensa planicie donde había lagos y discurrían ríos. Los datos isotópicos han sido obtenidos de los suelos fósiles de las antiguas llanuras de inundación.



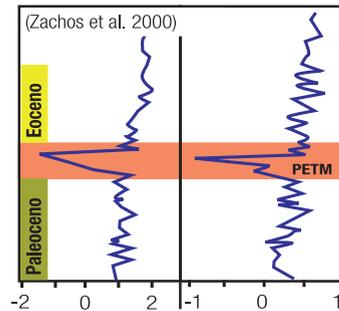
Zumaia: fondos marinos profundos de latitudes bajas

Las capas del flysch de Zumaia representan antiguos fondos marinos de bastante profundidad. Los datos isotópicos han sido tomados de las rocas y de las conchas de los foraminíferos.



Atlántico sur: fondos profundos de latitudes altas

El programa ODP (Ocean Drilling Program) obtiene muestras de sedimentos de diferentes edades del fondo oceánico. Los datos isotópicos se han obtenido de las conchas de los foraminíferos bentónicos depositados en el nicho marino.



Interpretación de los datos

Los datos isotópicos indican que la contaminación de carbono y el calentamiento fueron generalizados, pero este fue más intenso en las latitudes altas y en las zonas continentales.

EL CULPABLE DEL CALENTAMIENTO: LOS HIDRATOS DE METANO

La dimensión de las variaciones isotópicas implica un aporte de carbono orgánico inmediato tres veces superior a todo el carbono existente en la biosfera, por lo que este no puede venir únicamente de la actividad biológica del planeta. Se han propuesto teorías relacionadas con un aporte biológico, con actividad volcánica, con grandes incendios o incluso con el impacto de un cuerpo extraterrestre carbonatado, pero ninguna de ellas encaja 100% con los datos del PETM.

La teoría más aceptada está relacionada con la desestabilización de los hidratos de metano de origen orgánico (ricos en ^{12}C) acumulados en los fondos marinos de la plataforma y el talud continental. El metano se produce en los fondos marinos por una bacteria metanogénica que vive de la materia orgánica de los sedimentos, en situaciones de poco oxígeno. Los hidratos de metano son una especie de hielo formado por moléculas de agua alrededor de una molécula de metano y son estables en un rango muy limitado de bajas temperaturas y altas presiones. Probablemente los fondos oceánicos sufrieron un pequeño calentamiento relacionado con la potente actividad volcánica de la época y este desencadenó la desestabilización de los hidratos de metano, que comenzó a burbujear hacia la superficie. Además hay que tener en cuenta que, como resultado de la potente actividad biológica a lo largo del Paleoceno, la cantidad de materia orgánica y metano acumulada en los fondos tuvo que ser muy importante.

Se han registrado también grandes desprendimientos en los taludes continentales de esta época que pudieron ayudar también a la desestabilización de los hidratos.

Una vez que el metano llega a la atmósfera provoca un efecto invernadero muy potente y en unas pocas décadas se oxida y se convierte en CO_2 , que permanece en la atmósfera durante mucho más tiempo y provoca algunas consecuencias que encajan perfectamente con los indicios descritos en este mismo apartado:

- Un calentamiento constante del planeta por el incremento del efecto invernadero.
- Una mayor meteorización y erosión continental en altas latitudes por clima cálido y lluvia acidificada.
- Una acidificación importante del océano a medida que va absorbiendo el CO_2 atmosférico. Esta acidificación disuelve las conchas de carbonato cálcico de los organismos marinos, que no se precipitan al fondo del mar.



Los hidratos de metano son estables bajo un rango muy limitado de altas presiones y bajas temperaturas. En cuanto varían estas condiciones, los hidratos se desestabilizan y las moléculas de metano comienzan a burbujear hacia la superficie.

Estas anomalías isotópicas se ha podido identificar en ambientes muy diferentes y geográficamente muy distantes. Polecat Bench en Wyoming representa un ambiente continental, diferentes localizaciones del Pirineo muestran el mismo fenómeno en ambientes marinos de poca profundidad y Zumaia lo hace para ambientes marinos profundos. Esta consistencia geográfica indica que la emisión de carbono y el calentamiento fueron procesos generalizados y afectaron a todos los ambientes. La temperatura terrestre y oceánica subió como mínimo 5°C , pero este aumento fue muy desigual y afectó con más fuerza en latitudes altas.

LAS CONSECUENCIAS BIOLÓGICAS DEL CALENTAMIENTO

La subida de temperatura fue muy intensa y los seres vivos tuvieron que adaptarse al cambio. El calentamiento del límite P/E (PETM) se pareció más a una explosión evolutiva que a una extinción; de hecho, solamente se reconoce una desaparición masiva en foraminíferos bentónicos, lo cual está cargado de toda lógica si tenemos en cuenta que estos vivían en los fondos oceánicos, más afectados por el evento. El resto de los ecosistemas y de las especies sufrieron cambios, adaptaciones y migraciones importantes que se explican a continuación.

Los foraminíferos y organismos planctónicos no sufrieron una extinción, pero especies de aguas cálidas migraron hacia latitudes más altas en busca de sus condiciones de temperatura naturales. Aparecieron nuevas especies, y algunas que tenían poca importancia hasta entonces se vieron favorecidas y registraron un importante apogeo.

Este calentamiento afectó de forma directa a los ecosistemas continentales, aunque para entender la respuesta biológica hay que tener en cuenta que en aquel tiempo existían puentes continentales entre América, Europa y Asia, de manera que los animales pudieron migrar fácilmente entre continentes. Desde el punto de vista evolutivo, el PETM se caracteriza por el inicio de la evolución y expansión de los mamíferos modernos, entre los que se pueden destacar la aparición de los primeros caballos y verdaderos primates. Un mecanismo de adaptación curioso utilizado en el PETM por varios mamíferos consistió en disminuir su tamaño, para luego volver a aumentarlo cuando el calentamiento se calmó. Este es un mecanismo de adaptación muy común que responde a la disponibilidad de nutrientes, pero que en este caso se dio de manera excepcionalmente rápida.



Los mamíferos migraron y disminuyeron su tamaño para hacer frente al calentamiento del PETM. En la imagen se pueden observar el fémur y la tibia de uno de los primeros caballos conocidos en Norteamérica en esta época. Los primeros caballos eran del tamaño de un gato.

Las plantas sufrieron también importantes variaciones. Las que ya existían se adaptaron disminuyendo el tamaño de sus hojas o migrando hasta 100 kilómetros en busca de su hábitat natural y aparecieron también nuevas especies que poblaron los tupidos bosques del Eoceno.

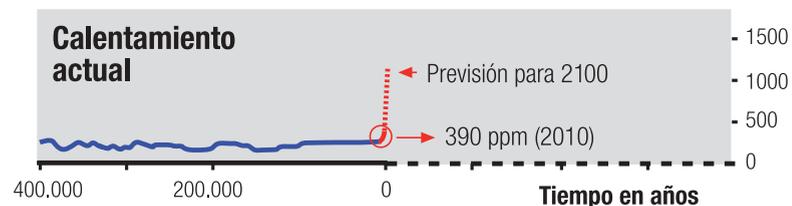
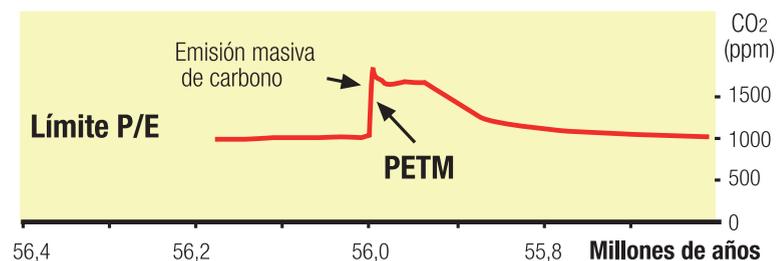
El PETM supuso un reajuste total del sistema evolutivo y biológico de la Tierra.

RELACIÓN ENTRE EL PETM Y EL CAMBIO CLIMÁTICO ACTUAL

El estudio de los mecanismos y las consecuencias del PETM es una cuestión de máxima actualidad, ya que en opinión de muchos científicos este calentamiento se parece mucho al que empezamos a experimentar hoy.

La cantidad de CO₂ emitida desde el siglo XVIII hasta la fecha por la quema de combustibles fósiles no supera ni el 10% de la cantidad que se emitió en el PETM o de todo el carbono que todavía queda enterrado en el subsuelo en forma de petróleo, gas, carbón, metano, etc. En este sentido podemos considerar que el calentamiento actual representa la antesala de un escenario similar al PETM, ya que si el ser humano continúa quemando los combustibles fósiles al ritmo actual, no tardará mucho en provocar una situación parecida a la de hace 55,8 Ma.

Emisiones de Carbono



Comparación de las cantidades de carbono emitidas a la atmósfera en un contexto actual de crecimiento de población y no control de emisiones (datos obtenidos del IPCC).

^

El estudio del PETM es también muy importante para entender el papel del metano (CH_4), ya que aunque todavía no se le supone una responsabilidad importante, este gas podría jugar en un futuro cercano un papel similar al que jugó en el PETM. Los fondos marinos actuales y el suelo de las regiones polares están cargados de hidratos de metano que se podrían desestabilizar en respuesta a pequeñas subidas de temperatura provocadas por el calentamiento antrópico. A partir de este momento, el proceso se vería multiplicado, ya no tendría vuelta atrás y las consecuencias podrían ser muy graves, ya que el CH_4 provocaría un efecto invernadero muy rápido y potente y después dejaría una atmósfera muy contaminada de CO_2 . Por este motivo el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) propuso un calentamiento asumible de 3°C , ya que a partir de ahí se podrían desencadenar procesos naturales cuyo control quedaría ya fuera de nuestro alcance. El metano es una gran trampa que conviene no destapar.



Lo sección de Zumaia contiene uno de los afloramientos P/E de tipo marino profundo más conocidos del mundo.

• Sendero Algorri: A7



Los suelos congelados de las zonas árticas están cargados de materia orgánica y metano estable a bajas temperaturas. Una leve subida de la temperatura global podría liberar este metano a la atmósfera y provocar una catástrofe de consecuencias impredecibles.

^

La historia está escrita en las rocas, si el ser humano quemara todo los combustibles fósiles enterrados y provocará la emisión de metano natural provocaría un escenario similar al del PETM y podría poner en peligro la continuidad de nuestra sociedad con consecuencias tan difíciles de gestionar como:

- Subidas muy importantes de temperatura. Las zonas más pobladas del planeta alcanzarían temperaturas medias de verano superiores a 35°C .
- Fusión de los hielos y subida de varios metros del nivel del mar, con inundaciones importantes en zonas costeras muy pobladas.
- Cambio de los hábitats y cinturones climáticos actuales, con expansión de los desiertos y las zonas áridas.
- Lluvia ácida y erosión de los continentes.
- Aumento de los fenómenos atmosféricos catastróficos.
- Grandes extinciones de especies, ya que en la actualidad están ya sometidas a mucha presión por el ser humano y además no pueden utilizar la migración como elemento de respuesta ante el calor, ya que actualmente los ecosistemas y el hábitat salvaje están compar-timentados y son cada vez más escasos.
- Graves problemas en la agricultura y en la disponibilidad de agua.
- Acidificación del océano y menor productividad marina.
- ...



Un escenario similar al PETM expandiría los desiertos y provocaría grandes dificultades para la agricultura y el abastecimiento de agua. La zona mediterránea sería una de las más afectadas del mundo.

^