

“La atmósfera e hidrosfera fueron esencialmente similar a las actuales desde hace unos 3800 Ma y son los procesos tectónicos y el cambio en la actividad biológica los desencadenantes de los cambios ambientales”.



Los
yacimientos
minerales
como
indicadores
ambientales
en la
Tierra Arcaica

IGNACIO SUBÍAS

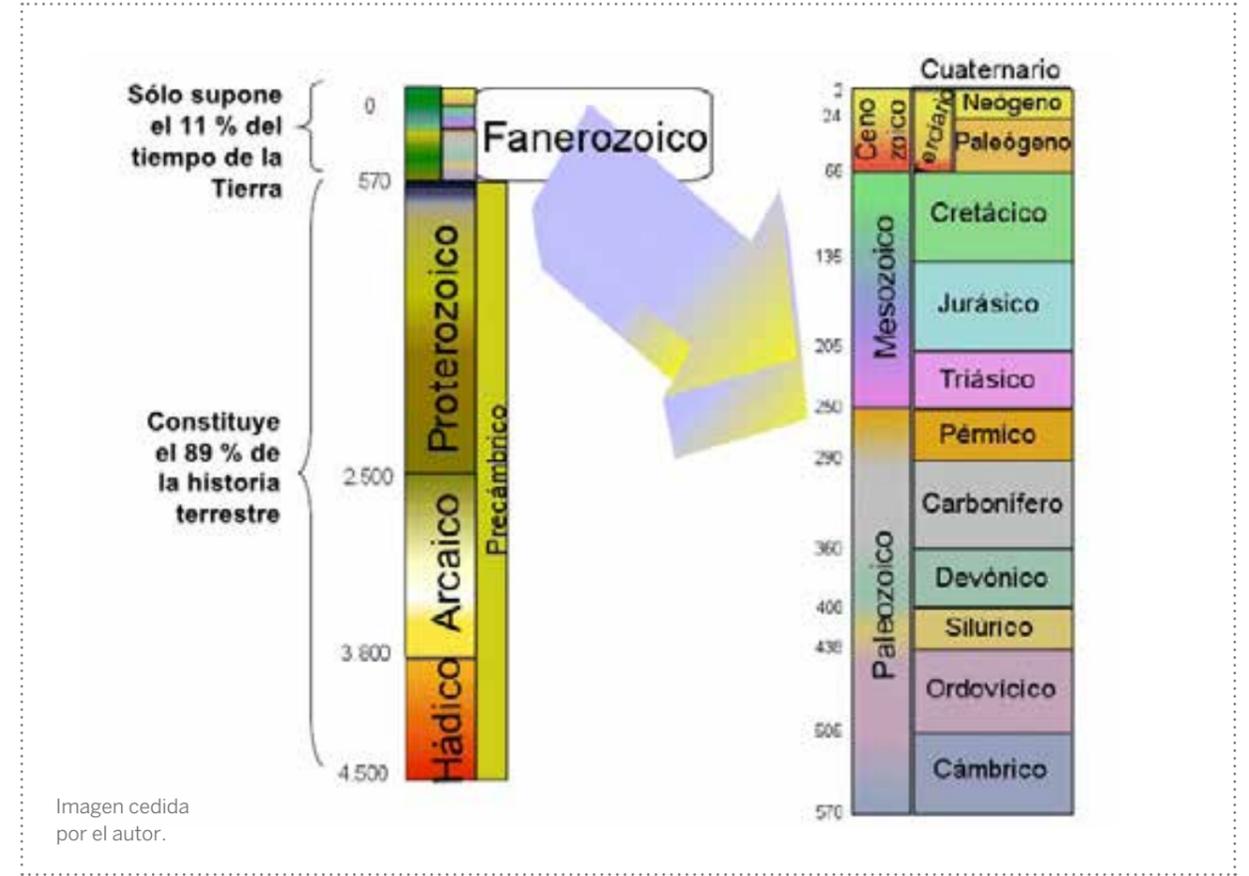


Imagen cedida por el autor.

Antes de entrar en materia veamos qué significa la expresión *Tierra Arcaica* que figura en el título. Para ello consideremos algunos datos de interés:

- La edad del Universo se estima entre 15000 y 18000 millones de años (Ma).
- La edad del Sistema Solar es de unos 5000 Ma.
- La edad de la Tierra es de 4600 Ma.
- Las rocas más antiguas datan de hace 3960 Ma.
- Los primeros indicios de fósiles datan de hace 3800 Ma.

Todo ello nos recuerda una de las peculiaridades de la Geología: su dimensión temporal. Todos conocemos y entendemos lo que dura un día, un mes, o un año pero, cuando hablamos de miles de años, millones, y de miles de millones de años, es posible que se desborde nuestra capacidad de comprensión. La escala del tiempo geológico, dada su enormidad, se divide en unidades más manejables que fragmentan la

historia de la Tierra en eones, eras, períodos y otras subdivisiones menores.

Es en una de esas divisiones, el supereón Precámbrico, donde situamos la *Tierra Arcaica*. El Precámbrico es todo el tiempo geológico previo a la aparición de metazoos de concha dura y que abarca desde los 4600 Ma hasta los 545 Ma, momento denominado *explosión de vida cámbrica*.

Este tiempo Precámbrico se subdivide en tres eones:

- **Hádico o Hadeico (4600-3950 Ma)**. Una etapa con escaso registro geológico a pesar de que, teniendo en cuenta la temperatura inicial y la masa y volumen del planeta, este debería haber dispuesto de una corteza sólida. Se postula que la desaparición de la primitiva corteza fue consecuencia de un calentamiento extra provocado por frecuentes impactos muy violentos de grandes asteroides, el denominado bombardeo intenso tardío (Gomes et al., 2005).

▲
Esquema temporal del tiempo geológico. Destacando el supereón Precámbrico.

- **Arcaico (3960-2500 Ma)**, caracterizado por la presencia de grandes masas de rocas graníticas y por los cinturones de rocas verdes (*greenstone belts*) que son sucesiones de rocas volcanosedimentarias, cuya característica más importante en el contexto de este artículo es la presencia de formaciones bandeadas de hierro (*Banded Iron Formations*, BIF).

Durante todo este periodo de tiempo, la tectónica de placas, como la conocemos, no es el régimen tectónico de la Tierra. Predomina lo que se conoce como tectónica de litosfera estática (*stagnant lid convection*) que se caracteriza porque no hay placas corticales móviles, permanecen estáticas, dicho de otra forma, no hay subducción (ver figura adjunta apartado C). Por su parte, el Manto asciende hasta la superficie y se enfría por procesos de convección. Esta situación se origina cuando las fuerzas que afectan al Manto no exceden el límite de comportamiento elástico-plástico.

- **Proterozoico (2500-545 Ma)**. En este periodo disminuye el calor procedente del Manto, la creación de una corteza continental más estable y la aparición de las primeras cordilleras orogénicas y las primeras cuencas sedimentarias. En este Eón aparece la vida a partir de aminoácidos y moléculas

orgánicas formadas durante el Arcaico, cuando la Tierra supuestamente carecía de atmósfera, lo que propició que los rayos UV bombardearan la Tierra. La vida comienza con células heterótrofas procariontas y sufre cambios muy importantes, apareciendo, hacia los 680 Ma, los primeros metazoos de cuerpo blando. Durante este periodo se asume que la Tectónica de Placas es activa lo que provoca que la litosfera se fracture al superar el límite elástico, hundiéndose en el Manto (subducción).

Desde entonces, se han desarrollado una serie de procesos geológicos que han diferenciado la corteza, el manto y el núcleo, han formado la atmósfera y los océanos y han desarrollado la vida. Y son estos procesos geológicos los que han quedado registrados en los yacimientos minerales.

CARACTERÍSTICAS DE LOS YACIMIENTOS MINERALES PRECÁMBRICOS

Históricamente los dos tipos de yacimientos minerales ligados a la composición de la atmósfera y océanos son los paleoplaceres de uranio, principalmente el yacimiento de Witwatersrand (Sudáfrica) y las formaciones bandeadas de hierro (BIF). Investigaciones más recientes han ampliado esta lista incluyendo depósitos sedimentarios de manganeso, lateritas y

exhalativo-sedimentarios. En el presente artículo nos centraremos en los dos primeros y en los yacimientos sedimentario-exhalativos (SEDEX).

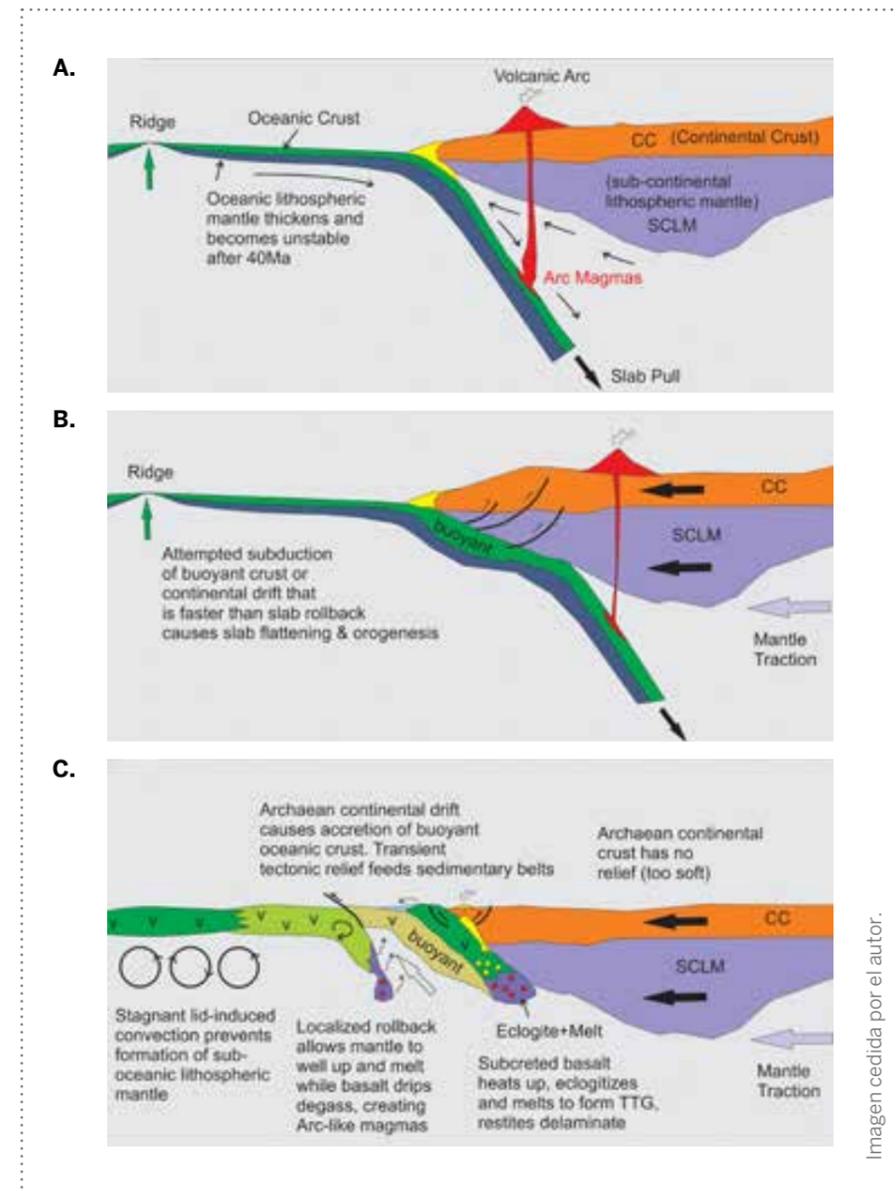
El yacimiento de Witwatersrand (Sudáfrica) ha sido, y seguirá siendo a medio plazo, el distrito productor de oro más grande del mundo. La mayor parte del oro junto a pirita, uraninita y, localmente, bitumen se encuentran en conglomerados fluviales depositados en la cuenca central del Rand hace 2900-2840 Ma, es decir, durante el Arcaico. Su excelente preservación se debe al depósito de una potente secuencia de basaltos inmediatamente después de su sedimentación,

hace 2710 Ma (Frimmel et al., 2005). Hay yacimientos minerales similares en Canadá, Brasil, India, Ghana, Gabón y Australia que abarcan una edad entre 2900 y 200 Ma, y muestran en su mineralogía un cambio que se interpreta como el tránsito entre condiciones reductoras y oxidantes alrededor de los 2000 Ma.

El origen de estas mineralizaciones auríferas ha sido controvertido durante décadas, con argumentos que indican un origen detrítico (paleoplacer) o bien un origen hidrotermal. Actualmente, se considera que la mayor parte del oro y del uranio tiene un origen hidrotermal y que ambos elementos proceden de una



Uraninita.
spiadellabo.com



A.- Subducción activa.
B.- Subducción de terrenos menos densos que provoca la aparición de un segmento horizontal y la migración del volcanismo.
C.- Tectónica de litosfera estática.

Imagen cedida por el autor.

removilización local de partículas detríticas por lo que se trataría de un yacimiento de tipo placer modificado hidrotermalmente. La geoquímica isotópica apunta que la erosión de masas de rocas graníticas y, en mayor medida, de rocas de tipo *greenstone belt* pondría en circulación el oro y el uranio. Este hecho nos lleva a una pregunta clave teniendo en cuenta que, en las condiciones atmosféricas actuales, la uraninita no hubiera soportado un transporte detrítico dado el carácter soluble del uranio en condiciones oxidantes, ¿fue la atmósfera arcaica una atmósfera reductora?

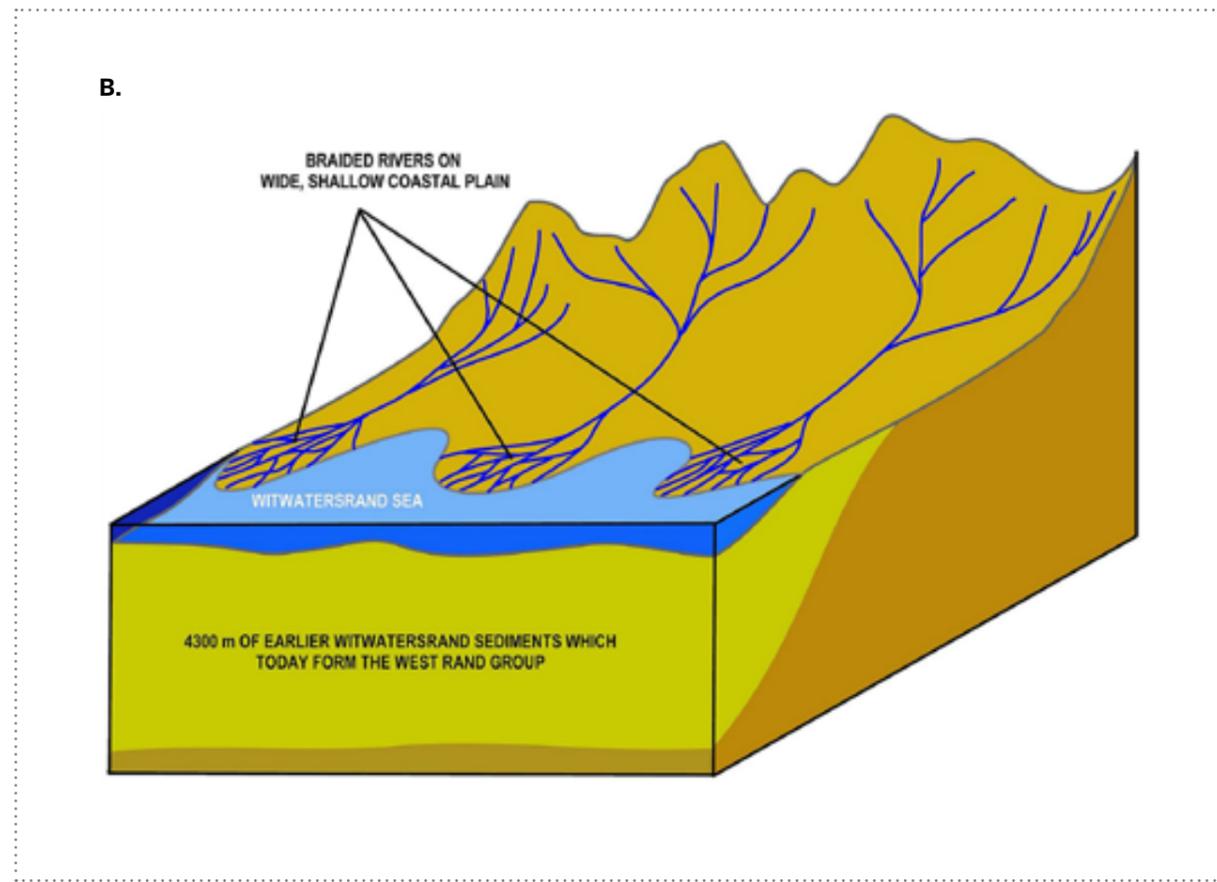
Las *formaciones bandeadas de hierro (BIF)* y su versión de alta ley (>60% Fe) representan los recursos de hierro más grandes en cuanto a producción, reservas y empleo de geólogos en el mundo. Las BIF, también denominadas jaspilitas o itabiritas, pueden definirse como un precipitado químico marino caracterizado por la alternancia de bandas ricas en óxidos de hierro y bandas de chert¹, que en su conjunto contienen al menos un 15% de Fe (Hagemann et al., 2016). Estas formaciones se convierten en yacimientos al sufrir bien procesos de alteración supergénica y/o meteorización, bien procesos hidrotermales o bien una combinación de ambos. Estos procesos provocan que el

contenido en hierro supere el 60%. Se pueden diferenciar tres tipos de BIF y yacimientos asociados según el ambiente geológico donde se han formado:

- **Tipo Algoma (>2500 Ma).** Las BIF están relacionadas con secuencias volcanosedimentarias submarinas en márgenes convergentes.
- **Tipo Lago Superior (2500-1800 Ma).** Las BIF están relacionadas con secuencias sedimentarias en márgenes pasivos.
- **Tipo Rapitan (715-580 Ma).** Las BIF están relacionadas con secuencias sedimentarias interpretadas como depósitos glaciares asociados a los eventos conocidos como *Snowball Earth* (Hoffman et al., 1998). Este último tipo se escapa de los objetivos de este artículo.

El hierro necesario para la formación de los BIF procede de la erosión química de los continentes y de la actividad hidrotermal submarina, siendo esta última fuente la predominante.

Para la precipitación de los óxidos de hierro, bien sea por procesos orgánicos o inorgánicos, como veremos, es necesaria la existencia de oxígeno libre en la atmós-



A.



A.- Aspecto del conglomerao de Witwatersrand.

B.- Recreación paleogeográfica de la cuenca sedimentaria de Witwatersrand.

Imágenes cedidas por el autor.

fera y la disponibilidad de oxígeno disuelto en los océanos. Por lo tanto, ¿la atmósfera y los océanos estaban totalmente oxigenados desde hace 3800 Ma?

Los *yacimientos sedimentario-exhalativos (SEDEX)* son depósitos estratiformes de sulfuros masivos en los que dominan pirita, galena y esfalerita, los sulfuros de hierro, plomo y cinc, respectivamente. Aunque el detalle de su formación es complejo, se considera que son un depósito submarino producto de la circulación de fluidos hidrotermales en cuencas marinas controladas por fallas (rift). Los metales son transportados por los fluidos hidrotermales en condiciones reductoras mientras que la reducción del sulfato marino, vía bacterias, proporciona el azufre necesario (Goodfellow et al., 1993). Aunque este tipo de yacimientos minerales aparece a lo largo de buena parte de la Historia Geológica, existen dos máximos temporales: uno, entre 1800-1600 Ma (Proterozoico medio) y otro, 600-300 Ma (Proterozoico tardío-Paleozoico). En este contexto temporal es muy importante tener presente que no existe este tipo de yacimientos en el Arcaico, por lo

“El hierro necesario para la formación de los BIF procede de la erosión química de los continentes y de la actividad hidrotermal submarina”.

NOTA

1. Chert: roca sedimentaria compuesta por cristales de cuarzo, e incluso ópalo (sílice amorfa), micro a criptocristalinos (tamaño menor a las 30 micras).

que la pregunta es inmediata, ¿marcan los depósitos SEDEX la primera aparición de cantidades significativas de sulfato en el agua marina? Si nos fijamos en las edades, la desaparición de los BIF coincide con la aparición de depósitos SEDEX, ¿quiere decir esto que la composición del agua marina cambió pasando de estar dominada por el hierro a tener amplia disponibilidad de azufre?

COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA E HIDROSFERA ARCAICA

Uno de los aspectos fundamentales, a la hora de comprender la evolución de la Tierra, es conocer en qué momento existió disponibilidad de oxígeno libre en la atmósfera terrestre. Y lo es porque la disponibilidad de oxígeno libre influye directamente en los ciclos biogeoquímicos de aquellos elementos que existen en más de un estado de oxidación en la Naturaleza: Fe, Mn, U, V, Mo... y que están presentes en los yacimientos minerales. Asimismo, el contenido en O₂ influye en la concentración atmosférica de CO₂ y CH₄, los gases de efecto invernadero que serían un sustituto al débil calor de un Sol en sus primeras etapas (70-80% de la luminosidad actual), serían la fuente y producto de actividades biológicas, así como el origen de la lluvia ácida que erosionaría las primeras masas continentales.

Actualmente la controversia en este punto se centra en dos posibilidades: 1) ¿se fue enriqueciendo la atmósfera terrestre en O₂ hasta que hubo disponibilidad de oxígeno libre hacia los 2300-2100Ma, periodo conocido como Gran Evento de Oxigenación (GOE, por sus siglas en inglés) ?, o 2) ¿fue la atmósfera terrestre óxica desde el Arcaico (~3800Ma)?

Vayamos colocando piezas para intentar resolver este rompecabezas. Recordemos, en primer lugar, que el O₂ no podría haberse acumulado en la atmósfera por sí solo, debido a que el oxígeno, como elemento libre, es muy reactivo y se combina rápidamente con otros elementos. Por otra parte, en la Tierra ya existía vida antes de que la atmósfera tuviera oxígeno libre. De hecho, en cuanto pudo formarse agua sobre la superficie terrestre surgieron una serie de metabolismos primitivos que se mantenían productivos en ausencia de oxígeno. Y esto fue así porque el único filtro para la radiación ultravioleta era el agua, por lo que, para no desnaturalizarse, los organismos debían vivir en ella.

Uno de estos metabolismos primitivos son las bacterias metanógenas, que usaban el CO₂ para producir azúcares sencillos. Se tiene evidencia de su existencia desde hace 4000 Ma. Además de estos organismos, existieron comunidades de microbios procariotas y *biofilms* que obtenían la energía para su crecimiento celular de su propio metabolismo, al imponer reacciones redox entre las especies ferrosas y férricas del hierro, de metanótrofos y de bacterias sulfato reductoras (Brown, 2006).

Según Dutkiewicz et al. (2006), las cianobacterias surgieron hace unos 3500 Ma y con ellas comenzó la producción de oxígeno, ya que transforman la energía solar en energía química para así transformar el carbono inorgánico (CO₂ atmosférico) en carbono orgánico (azúcares) a través de pigmentos conocidos como clorofila. En otras palabras, el oxígeno que estos organismos producen es un producto de desecho. Por consiguiente, parece probada la existencia de oxígeno libre desde el Arcaico. Sin embargo, este oxígeno habría sido rápidamente eliminado para producir una oxidación en masa que dio lugar al depósito de los BIF, recordemos que son las mayores reservas de Fe de la Tierra. Además, el metano atmosférico, provocado por la abundancia de organismos anaerobios, también fue una trampa importante para el oxígeno molecular, ya que se oxida rápidamente en presencia de la radiación

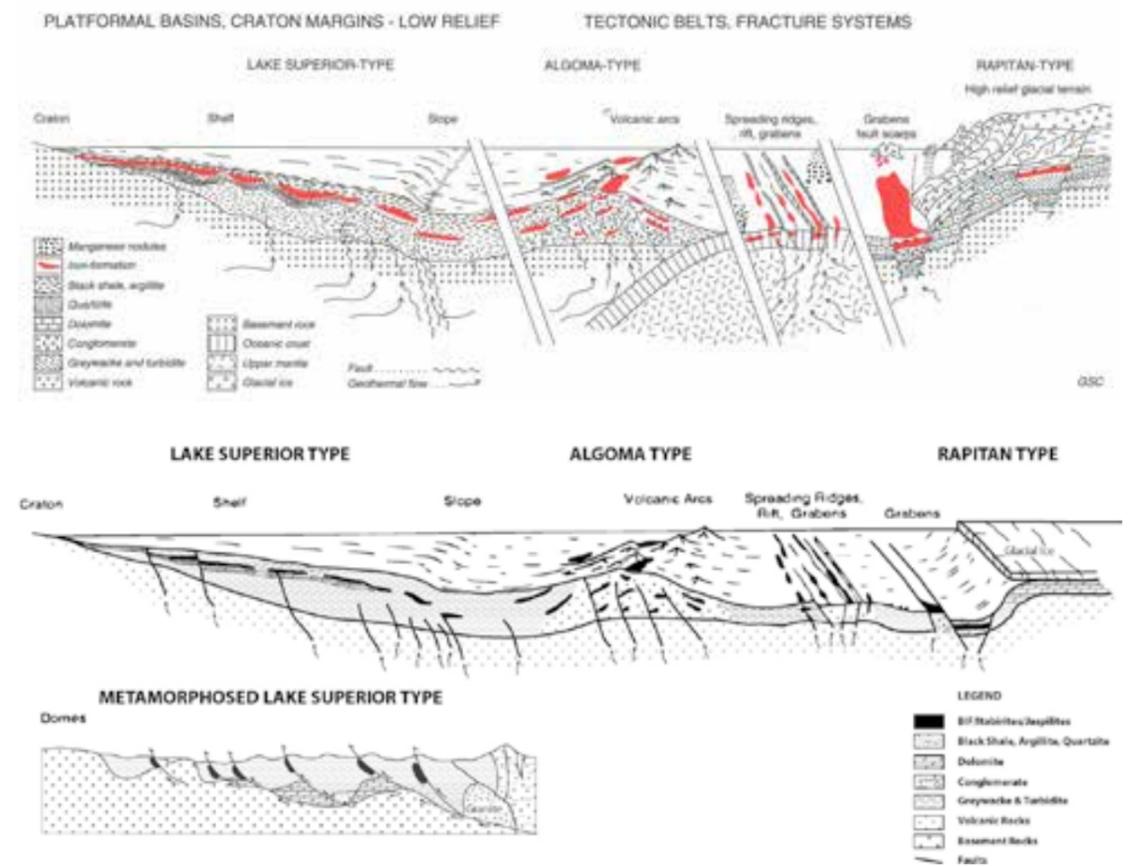
“Las cianobacterias surgieron hace unos 3500 Ma y con ellas comenzó la producción de oxígeno”.

Imágenes cedidas por el autor.

A.



B.



A.- Muestra de un BIF de tipo Lago Superior compuesto por hematites (gris) y chert (rojo). GSC 1995-203A.

B.- Ambientes tectónicos de los diferentes tipos de BIF.

ción ultravioleta produciendo CO_2 . La importancia de estas trampas de oxígeno queda en evidencia si consideramos que, con las tasas actuales de fotosíntesis, los niveles actuales de oxígeno atmosférico se hubieran alcanzado en 2000 años.

Entonces, ¿qué mecanismos podemos invocar para explicar que finalmente el oxígeno se acumulara en la atmósfera? En primer lugar, tras la formación de los BIF de tipo Algoma, la disponibilidad de hierro en los océanos disminuyó drásticamente lo que se tradujo en una salida de oxígeno a la atmósfera que, concomitantemente, produjo un aumento en la oxidación del

metano y la formación de CO_2 . Puesto que el CO_2 tiene un potencial de efecto invernadero varias veces menor que el del metano, se produjo una disminución considerable en la temperatura global lo que desencadenó la glaciación Huroniana hace 2400 Ma, aproximadamente. Por último, no se debe olvidar que el oxígeno es tóxico para los microorganismos anaerobios dominantes entonces, lo que provocó una crisis ecológica y su práctica extinción.

No olvidemos que estos procesos debieron ser episódicos como lo demuestra el hecho de que entre los 2500-1800 Ma volvió a producirse un depósito masi-

vo de BIF de tipo Lago Superior. Estas fluctuaciones en la concentración de oxígeno atmosférico quedaron reflejadas en los contenidos en uranio y molibdeno de los sedimentos marinos (Lyons et al., 2014). Asimismo, las anomalías en ciertos elementos de las Tierras Raras son también marcadores de que la atmósfera Arcaica no fue completamente anóxica, sino que existió cierto grado de oxidación (quizá inferior al 1% del actual) en los océanos de aquella época.

Por su parte, los yacimientos SEDEX nos proporcionan otra pieza del rompecabezas. La ausencia de este tipo de depósitos durante el Arcaico nos habla de las

limitaciones en cuanto a disponibilidad de azufre en este eón y esto se produce porque no hay posibilidad de meteorizar sulfuros en condiciones anóxicas. Por el contrario, la presencia de SEDEX durante el Proterozoico evidencia un aumento en la concentración atmosférica de O_2 , lo que favorece la meteorización de sulfuros y el consiguiente aumento en la concentración de sulfatos en la hidrosfera. La actividad de bacterias sulfato reductoras en el fondo marino provocaría un aumento en la concentración de H_2S en los océanos lo que favoreció el depósito de mineralizaciones de sulfuros metálicos en el fondo marino, principalmente a partir del GOE (200 Ma).



“El metano atmosférico, provocado por la abundancia de organismos anaerobios, también fue una trampa importante para el oxígeno molecular”.



▲
Foto de un testigo de sondeo del yacimiento SEDEX Lady Loretta (Australia) mostrando laminaciones microbianas en pirita.

Imagen cedida por el autor.

El yacimiento de uranio de Oklo (Gabón) tiene como particularidades que: 1) la relación $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ fue lo suficientemente elevada como para favorecer reacciones naturales de fisión. Actualmente esto es imposible de observar ya que la desintegración natural provoca que la concentración del ^{235}U es demasiado baja para activar estas reacciones y 2) el contenido en U es del 10% por m^3 de roca. Estas concentraciones tan elevadas se explican por la existencia de procesos de disolución-precipitación de uranio que implican la circulación de aguas subterráneas oxigenadas cuya existencia supone, obviamente, un alto nivel de oxígeno en la atmósfera. El uranio oxidado precipitó al ponerse en contacto con hidrocarburos presentes en las rocas. Estos procesos tuvieron lugar hace ~ 1950 Ma lo que es compatible con lo expuesto en párrafos anteriores acerca de la existencia del Gran Evento de Oxigenación.

Si bien lo expuesto anteriormente es la hipótesis más aceptada, hay autores como Ohmoto et al. (2006) que opinan, basados en una interpretación novedosa de los BIF, que 1) las concentraciones en O_2 , CH_4 , CO_2 , Fe^{2+} y H_2S en la atmósfera y océanos es esencialmente similar desde hace 3800 Ma, 2) que las comunidades microbianas en los océanos (reductores de sulfato, cianobacterias, metanógenos) han sido esencialmente los mismos desde entonces, 3) que la concentración de CO_2 ha ido disminuyendo continuamente así como ha aumentado el pH de la hidrosfera. Postulan como responsable del cambio drástico que supuso la desaparición de los BIF a un cambio en la dinámica del Manto terrestre. Este cambio impuso que las plumas mantélicas² fueran más pequeñas y menos frecuentes lo que, a su vez, provocó que los sistemas hidrotermales submarinos fueran más pequeños y de una vida más corta. Recuerde el lector en este punto que la principal fuente del hierro de los BIF fueron precisamente los sistemas hidrotermales submarinos.

NOTA

2. Las Plumitas del Manto: son columnas estrechas de material proveniente del manto que existen bajo la corteza terrestre, produciendo puntos calientes y lugares con vulcanismo anómalo.

CONCLUSIONES

Nuestra comprensión sobre las condiciones ambientales de la Tierra Arcaica ha evolucionado en las últimas décadas gracias al estudio de algunos tipos de yacimientos minerales, cuyas características están ligadas a la composición de la atmósfera e hidrosfera. Así, los yacimientos de oro-uranio, los BIF y los SEDEX apuntan a la existencia de una atmósfera reductora durante el Arcaico y unos océanos caracterizados por la presencia de organismos con un metabolismo claramente distinto al actual basado en el oxígeno.

Estos mismos yacimientos proporcionan evidencias sobre la existencia de un aumento progresivo en la concentración de oxígeno, que dio lugar al Gran Evento de Oxigenación hace unos 2000 Ma.

Sin embargo, no hay que olvidar que hipótesis alternativas sugieren que la atmósfera e hidrosfera fueron esencialmente similar a las actuales desde hace unos 3800 Ma, y que son los procesos tectónicos y el cambio en la actividad biológica los desencadenantes de los cambios ambientales.

Ignacio Subías
Cristalografía y Mineralogía
Dpto. Ciencias de la Tierra
Universidad de Zaragoza

“La concentración de CO_2 ha ido disminuyendo continuamente así como ha aumentado el pH de la hidrosfera”.

BIBLIOGRAFÍA

- Brown, DA (2006). Microbial mediation of iron mobilization and deposition in iron formations since the early Precambrian. *In*: Kesler, SE y Ohmoto, H (eds) Evolution of Early Earth's atmosphere, Hydrosphere, and Biosphere-Constraints from Ore Deposits. Geological Society of America 198: 239-256.
- Dutkiewicz, A, Volk, H, George, SC, Ridley, J, Buick, R (2006). Biomarkers from Huronian oil-bearing fluid inclusions: an uncontaminated record of life before the Great Oxidation Event. *Geology* 34(6): 437.
- Frimmel, HE, Groves, DI, Kirk, J, Ruiz, J, Chesley, J, Minter, WEL (2005). The formation and preservation of the Witwatersrand goldfields, the largest gold province in the world. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: 769-797.
- Gomes R, Levison HF, Tsiganis K, Morbidelli A (2005). Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature* 435: 466-469.
- Goodfellow, WD, Lydon, JW, Turner, RJW (1993). Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulphide deposits. *Geological Association of Canada Special Paper* 40: 201-251.
- Hagemann SG, Angerer T, Duuring P, Rosière CA, Figueiredo e Silva RC, Lobato L, Hensler AS, Walde DHG (2016). BIF-hosted iron mineral system: A review. *Ore Geology Reviews* 76: 317-359.
- Hoffman, PF, Kaufman, AJ, Halverson, GP, Schrag, DP (1998). A Neoproterozoic snowball earth. *Science* 281: 1342-1346.
- Lyons, TW, Reinhard, CT, Noah J, Planavsky, NJ (2014). The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature* 506: 307-315.
- Ohmoto, H, Watanabe, Y, Yamaguchi, KE, Narai, H, Haruna, M, Kakegawa, T, Hayashi, K, Kato, Y (2006). Chemical and biological evolution of early Earth: constraints from banded iron formations. *In*: Kesler, SE y Ohmoto, H (eds) Evolution of Early Earth's atmosphere, Hydrosphere, and Biosphere-Constraints from Ore Deposits. Geological Society of America 198: 291-331.