

La Tierra hace 3000-2500 millones de años: Cuando las cianobacterias cambiaron radicalmente el curso de la historia geológica del planeta

Roberto Oyarzun, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España. oyarzun@geo.ucm.es

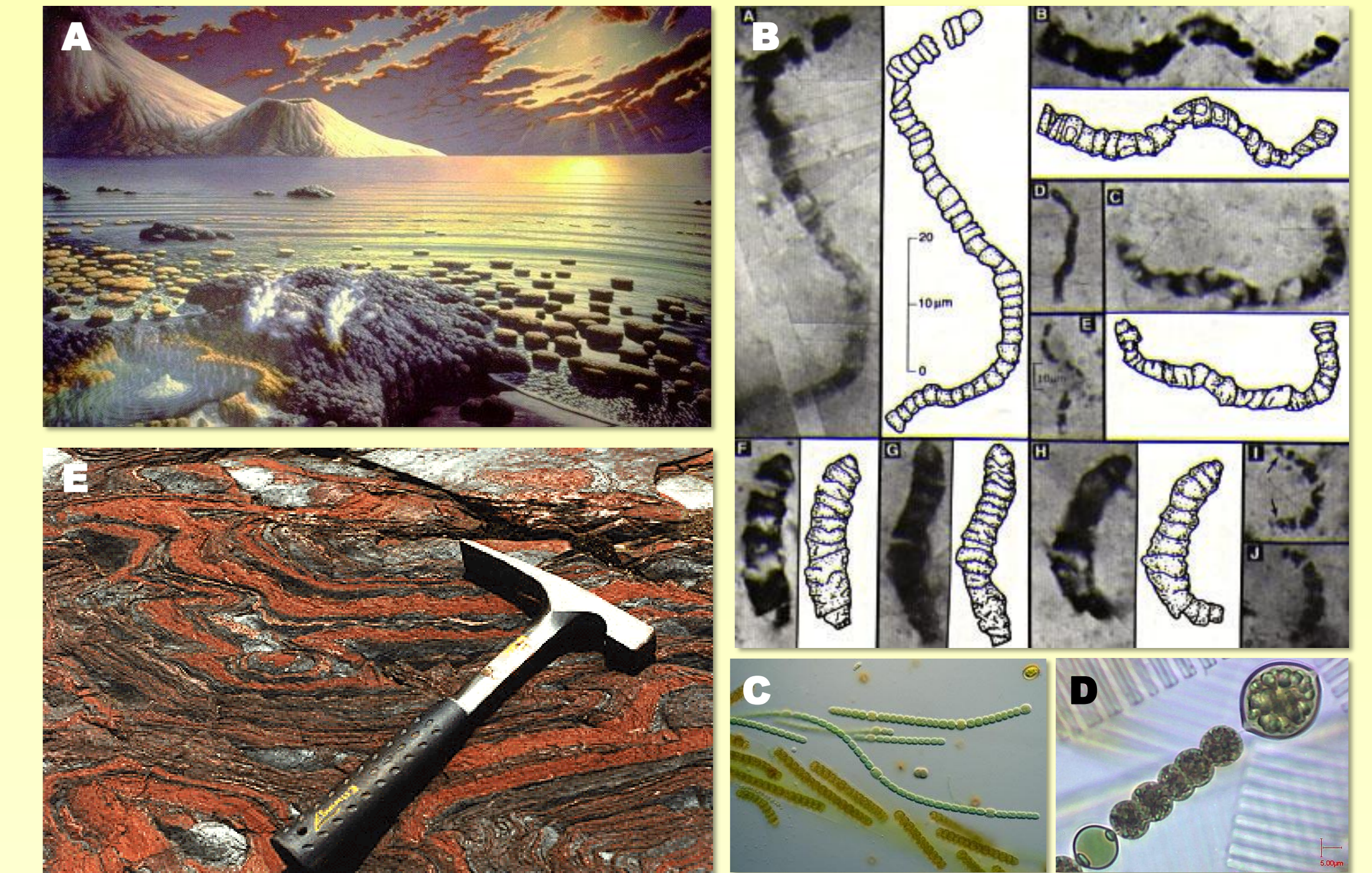
Javier Lillo, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, 28933 Móstoles, España. javier.lillo@urjc.es

Jorge Oyarzún, Departamento de Minas, Facultad de Ingeniería y CEAZA, Universidad de La Serena, Casilla 554, La Serena, Chile. joyarzun@userena.cl

Introducción al tema y algunas propuestas

Tanto la tectónica como el marco ambiental del Precámbrico son temas complejos y elusivos. Sin embargo, si algo sabemos con certeza es que la transición del Arqueozoico al Proterozoico (hace unos 2500 millones de años) separó dos mundos marcadamente diferentes, acarreado profundos cambios en las condiciones ambientales, sedimentación, estilo de subducción y magmatismo (Fig. 1). Por ejemplo, los complejos magmáticos del Arqueozoico son representativos de condiciones de fugacidad de oxígeno bajas, y existen buenos argumentos para sostener la idea de que el manto superior terrestre fue más reducido que el actual. Por lo tanto cabe preguntarse cuales fueron las condiciones que permitieron la oxidación de este dominio y que en términos finales, permitieron la generación de magmas calco-alcalinos en arcos de islas. En este sentido, sugerimos que la aparición de la vida fotosintética (cianobacterias), la subsecuente oxidación de los océanos, y la precipitación masiva de sedimentos de hierro oxidado pueden ser los eslabones perdidos de una historia que incluiría la subducción de estos sedimentos químicos, una subida en la fugacidad de oxígeno, y por último, la formación de complejos calco-alcalinos. Hacia finales del Arqueozoico (2500 millones de años) el magmatismo calco-alcalino estaba firmemente establecido y un punto crucial guarda relación con la naturaleza del mismo. No solamente estos magmas estaban más enriquecidos en sílice, sino que eran más oxidados que sus contrapartes primitivas (komatiitas, basaltos de fondos oceánicos). De esta manera, una subida en la fugacidad de oxígeno en el manto superior puede ser considerada como el requisito *sin equa non* que permitió la formación de magmas calco-alcalinos. Así sugerimos que la aparición de las cianobacterias (hace más de 3700 millones de años atrás) puede haber jugado un papel decisivo en la modificación del marco tectonomagmático del Arqueozoico, incrementando el potencial de oxidación de los océanos y por lo tanto induciendo la precipitación masiva de óxidos de hierro en los fondos oceánicos como minerales del tipo FeO(OH).

Si los procesos de subducción, del tipo que fueran, eran ya activos en las etapas temprana y media del Arqueozoico tenemos que concluir necesariamente que una cantidad masiva de oxidados de hierro fue introducida en cuñas mantélicas. La fusión de estos sedimentos habría liberado oxígeno, contribuyendo así a la oxidación de este dominio, y por tanto induciendo la formación de magmas calco-alcalinos.



En tiempos del Arcaico. A) Reconstrucción artística de una zona de costa durante el Arqueozoico, mostrando actividad volcánica y una colonia de estromatolitos, B) Microfósiles del Apex Chert, Australia. Estos organismos son del Arqueozoico (3465 millones de años) y parecen cianobacterias filamentosas, C) y D) Cianobacterias actuales: género *Anabaena*, y E) Formación Bandeada de Hierro, mostrando capas alternantes de magnetita, hematitas (hierro rojo) y chert.

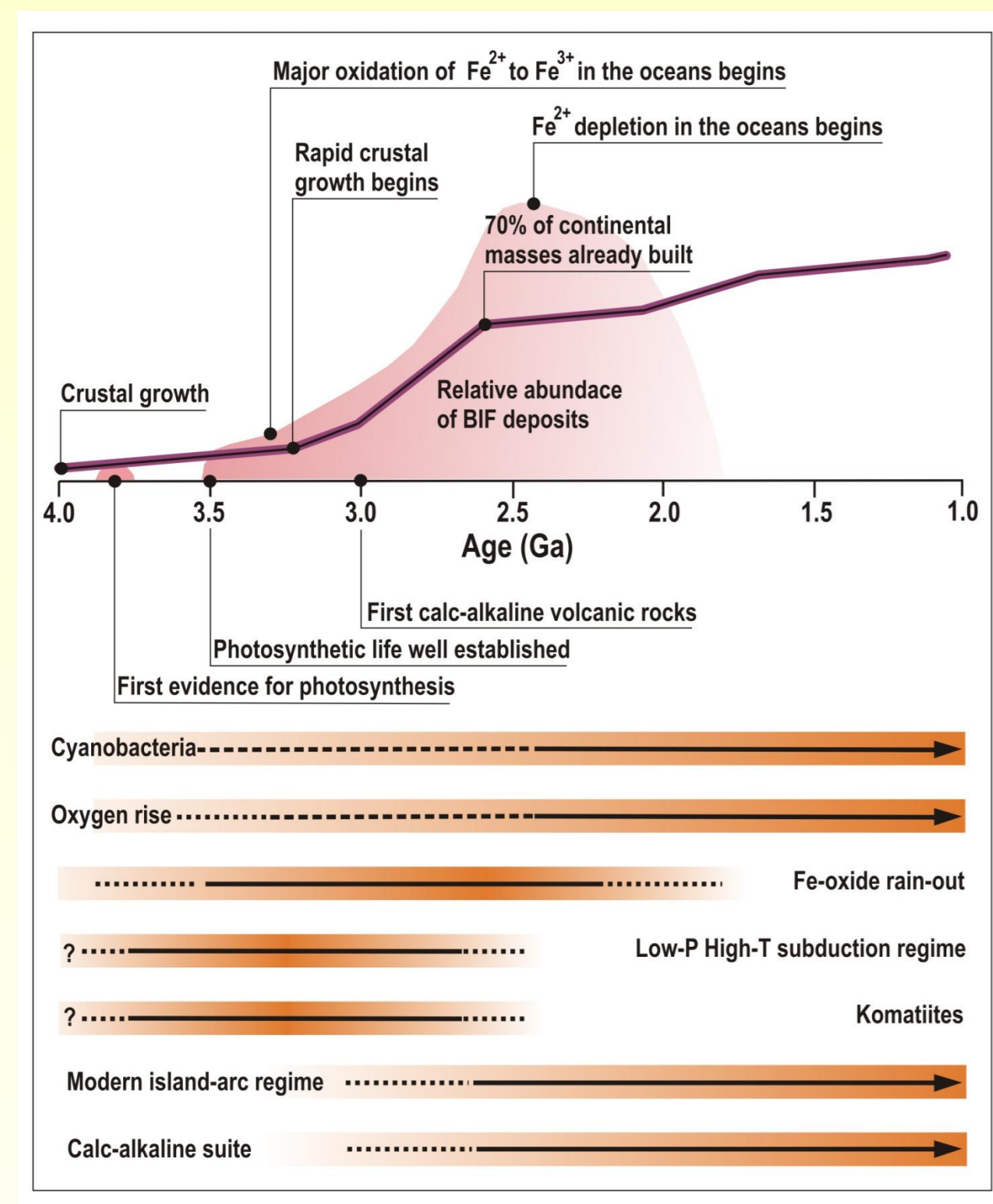


Fig.1. Esquema simplificado mostrando los principales eventos ambientales, geodinámicos, y magmáticos durante el Arqueozoico y parte del Proterozoico.

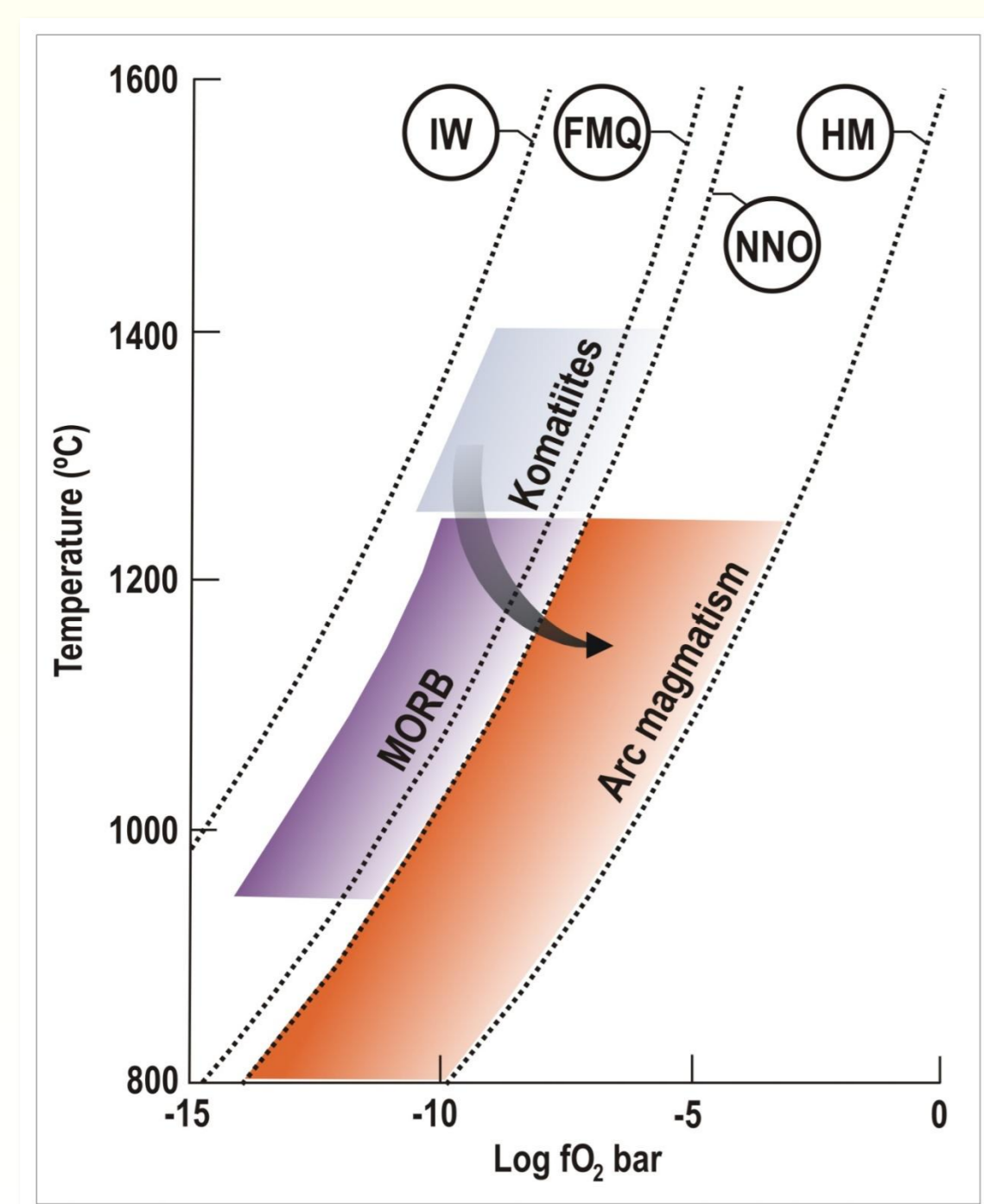
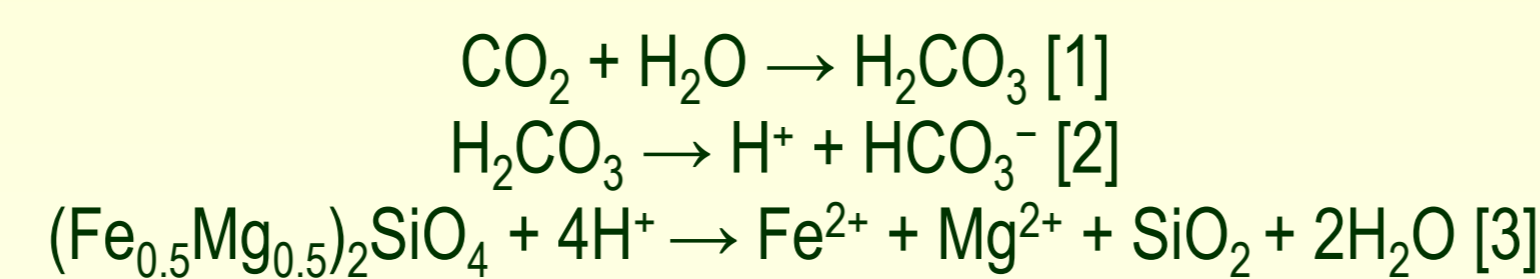


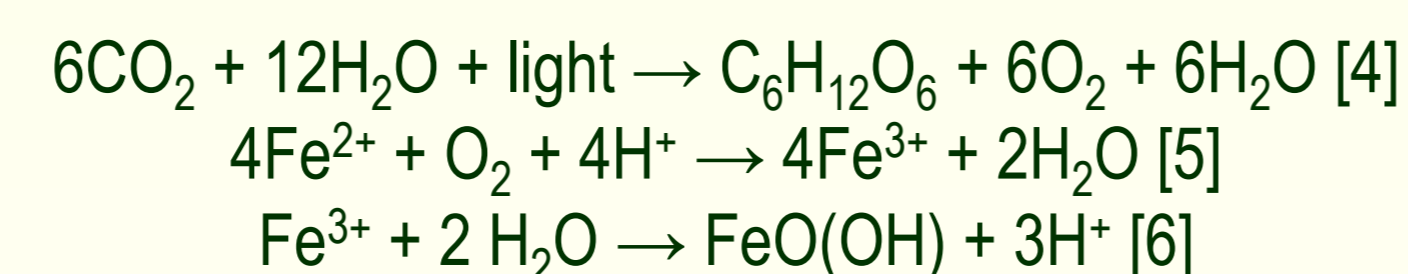
Fig.3. Gráfico de Log f_{O_2} versus $T^\circ C$ para el magmatismo de arco, basaltos de fondo oceánico, y komatiitas. Buffers: IW: hierro-wustita, FMQ: fayalita-magnetita-cuarzo, NNO: Ni-NiO. Flecha: posible *trend* evolutivo para la fugacidad de oxígeno durante la transición del Arqueozoico al Proterozoico.

Hidrólisis de silicatos en los continentes, remoción del hierro, fotosíntesis, océanos progresivamente oxidados y el destino final de Fe²⁺

El CO₂ atmosférico y el agua reaccionan para formar ácido carbónico (Ecuación 1), lo que induce una acidificación de las aguas (Ecuación 2), la hidrólisis de silicatos de Fe-Mg, y por último la solubilización del hierro como cationes del tipo Fe²⁺ (Ecuación 3) (Fig. 2):



Dado que las condiciones oxidativas en los océanos pueden haber empezado hace unos 3800-3700 millones de años (Fig. 1), en esta época debe ya haber comenzado una carrera entre los cationes de hierro incorporados a los mares y el oxígeno fotosintéticamente generado en estos. Fue justamente este oxígeno, generado por la fotosíntesis de las cianobacterias (Ecuación 4), el que indujo la precipitación más grande de la historia geológica de óxidos de hierro (Ecuaciones 5 y 6):



Sobre el destino último de los sedimentos ricos en óxidos de hierro durante la subducción: oxidación de la cuña mantélica

El trabajo experimental en minerales y productos cerámicos indica que el tratamiento térmico a 900°C de goethita (FeO(OH)) induce la formación de hematitas (Fe₂O₃). Sabemos que esta última se transforma en magnetita (Fe₃O₄) durante el metamorfismo. Por otra parte, trabajos experimentales recientes sugieren que la fusión de hematitas a 1150°C (Ecuación 7) induce la liberación de O₂:



La oxidación de la cuña mantélica, la fusión parcial de la misma y la formación subsecuente de complejos calco-alcalinos (Fig. 2). Esta es la parte clave de la historia. Como comentábamos anteriormente, los magmas calco-alcalinos no solo están enriquecidos en sílice sino que son distintivamente más oxidados que sus contrapartes primitivas (Fig. 3). Estas relaciones no solo son aplicables a los magmas en sí, sino también a su fuente mantélica. En otras palabras, si no se oxida el manto superior, no se forman magmas calco-alcalinos.

Fuente: Oyarzun R., Lillo, J., Oyarzun, J. (2008) No Water, No Cyanobacteria—No Calc-Alkaline Magmas: Progressive Oxidation of the Early Oceans May Have Contributed to Modernize Island-Arc Magmatism. *International Geology Review*, vol. 50 (in press).

Figs. A a D tomadas de:
<http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Paleontology/Paleozoology/Precambrian/Precambrian.htm>
<http://www.fossilmuseum.net/Paleobiology/Precambrian-Fossils.htm>

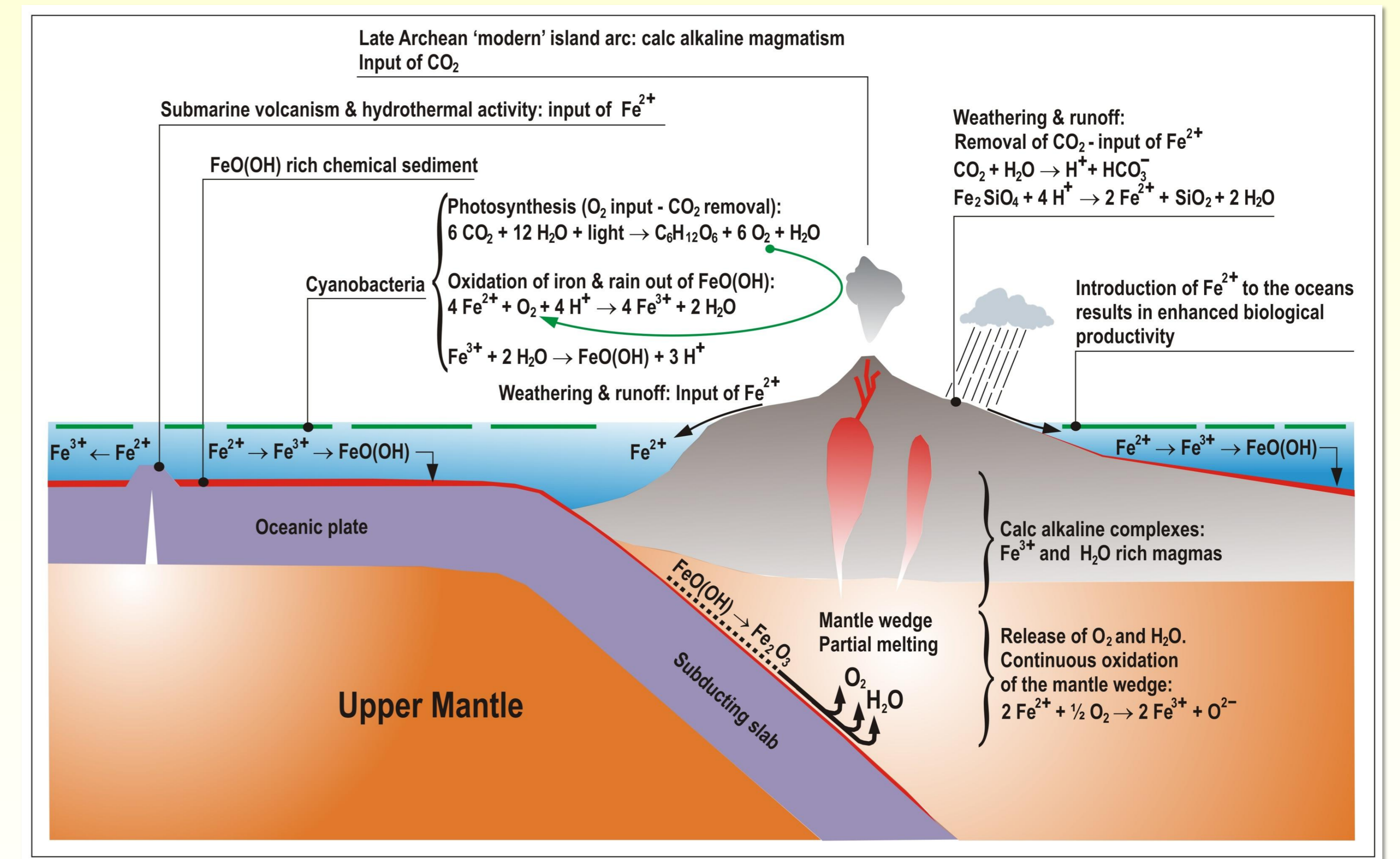


Fig.2. Escenario potencial para el Arqueozoico superior, mostrando las relaciones entre cianobacterias, productividad biológica, fotosíntesis, oxidación de Fe²⁺ a Fe³⁺, subducción de sedimentos ricos en óxidos de hierro, liberación de O₂ y volátiles, oxidación de la cuña mantélica, y generación de magmas calco-alcalinos.

La Tierra sin cianobacterias en sus orígenes: ¿un mundo muerto como Venus?

Es difícil concebir la Tierra sin cianobacterias en sus orígenes. Por ejemplo, consideremos el caso de Venus. A pesar de sus muchas similitudes Venus y la Tierra siguieron caminos divergentes en su evolución. Quizás la explicación para esto no haya que buscarla en si Venus tuvo o no océanos en sus orígenes, sino en si la vida fotosintética se desarrolló en estos alguna vez. Sin cianobacterias, Venus habría carecido de un mecanismo eficiente para reciclar el CO₂ aportado por la actividad volcánica. A diferencia de la Tierra, probablemente no hubo glaciaciones en sus orígenes sino un efecto invernadero desbordado que literalmente vaporizó el agua que pudiera haber existido. Así, Venus es hoy un planeta geológicamente primitivo, sin tectónica de placas, sin agua, donde la temperatura (unos 470°C) y la presión atmosférica (unos 90 bares) hacen que la vida, tal cual la entendemos en la Tierra, sea prácticamente imposible.