Capítulo 7. O laboratório ferruginoso

Carajás, fotoferrotrofia e o longo atraso da oxigenação planetária

> **Modelo de trabalho**
>
> Mares ferruginosos restritos podem ter alternado longos períodos dominados por fotoferrotrofia com episódios breves de vantagem para organismos produtores de oxigênio. Carajás e Kostomuksha são dois grandes candidatos neoarqueanos a esse regime. O registro disponível sustenta o cenário químico; a seleção ecológica e sua influência posterior sobre o Grande Evento de Oxidação permanecem hipóteses testáveis deste livro.

Carajás · fotoferrotrofia · cianobactérias · ferro · fósforo · oxigênio · Grande Evento de Oxidação · BIF · Neoarqueano · ca. 2,76–2,42 Ga

Resumo

A fotossíntese que produz oxigênio surgiu muito antes de o oxigênio se acumular na atmosfera. Entre a invenção biológica e o Grande Evento de Oxidação existe um atraso de centenas de milhões de anos que pede mecanismo. Parte da resposta está nos sumidouros químicos. Ferro

dissolvido, gases vulcânicos, matéria orgânica e crosta reduzida consumiam o oxigênio recém-produzido. Outra parte pode ter sido ecológica. Em oceanos ricos em Fe^{2}□ e pobres em fósforo, os fotoferrotrofos do capítulo 3 tinham condições para interceptar luz e nutrientes antes das cianobactérias.

Este capítulo pergunta se mares restritos, vulcânicos e ferruginosos criaram um regime diferente. A ressurgência trazia ferro e fósforo; a oxidação removia ambos; o confinamento permitia que o reservatório se esgotasse localmente; nova ressurgência reiniciava o ciclo. Nas fases ricas em ferro, os fotoferrotrofos dominariam e o Fe^{2}□ limitaria os produtores de oxigênio. Nas fases de exaustão, comunidades produtoras de oxigênio poderiam ocupar por algum tempo a zona iluminada. Repetida durante milhões de anos, essa alternância ofereceria seleção, refúgio e expansão sem exigir uma atmosfera oxigenada.

Carajás e Kostomuksha são apresentados como os maiores candidatos conhecidos a esse tipo de laboratório por volta de 2,75 Ga. A arquitetura das bacias, os BIFs, os isótopos de ferro e as reconstruções de fósforo sustentam o ambiente. A ideia de que esse ambiente favoreceu linhagens produtoras de oxigênio e participou da transição que culminou no GOE pertence ao modelo deste livro. Nitrogênio, molibdênio, urânio, selênio e tálio podem transformá-la em teste.

1. O problema é o atraso

Convém começar pelo evento que dá nome ao problema. O Grande Evento de Oxidação, ou GOE, é o intervalo em torno de 2,4 Ga em que o oxigênio livre passou a existir de modo permanente na atmosfera. Antes dele, o oxigênio ficava abaixo de um cem-milésimo do nível atual, o limite que o capítulo 3 extraiu dos isótopos de enxofre. Depois dele, chegou a um centésimo ou mais, ainda muito abaixo do ar de hoje, mas suficiente para mudar a química de toda a superfície. A data vem do desaparecimento daquela assinatura de enxofre nas rochas sedimentares, e os melhores perfis a situam entre 2,45 e 2,32 Ga (Bekker et al., 2004; Gumsley et al., 2017; Warke et al., 2020). O evento foi oscilante,

com idas e vindas, e a oxigenação permanente pode ter se consolidado só duzentos milhões de anos depois do primeiro pulso (Poulton et al., 2021).

A atmosfera, portanto, levou tempo para responder à vida. Evidências químicas de oxidação localizada antecedem o GOE em centenas de milhões de anos, e os relógios moleculares colocam a origem da fotossíntese com oxigênio no Arqueano, embora sua idade exata continue aberta (Planavsky et al., 2014; Crowe et al., 2013; Fournier et al., 2021). Entre a inovação metabólica e sua expressão planetária houve um intervalo longo. O enigma central está nessa distância.

A imagem que resolve metade do enigma é a da banheira. Produzir oxigênio não bastava para acumulá-lo, assim como abrir uma torneira não enche uma banheira enquanto o ralo escoa na mesma velocidade. O oxigênio produzido numa lâmina d'água arqueana encontrava uma fila de credores. Oxidava o Fe^{2+} dissolvido, reagia com gases e minerais reduzidos, sustentava a respiração de outros organismos e desaparecia antes de alcançar a atmosfera. Ferro, gases vulcânicos e minerais reduzidos eram os ralos da Terra arqueana, e a atmosfera só poderia responder de forma persistente quando a torneira superasse o conjunto deles. Esses sumidouros explicam grande parte da demora.

Resta a outra metade, que é ecológica. Quais organismos controlavam a produção primária nos mares ferruginosos, e em que condições os produtores de oxigênio conseguiam crescer? A pergunta não é sobre o ralo. É sobre quem estava segurando a torneira.

2. Quem controlava a luz

Num oceano estratificado, a água profunda carrega Fe^{2+} e nutrientes. Quando sobe até a zona iluminada, ela oferece substrato a dois tipos de fotossíntese que competem pela mesma luz e pelo mesmo fósforo. As cianobactérias usam água como fonte de elétrons e liberam oxigênio. Os fotoferrotrofos usam ferro, pela equação do capítulo 3, e liberam ferrugem. Quem vence depende do que a água traz.

Ozaki et al. (2019) modelaram essa competição e encontraram o critério. Acima de uma razão crítica entre ferro dissolvido e fósforo na água que sobe, os fotoferrotrofos consomem o nutriente antes que as cianobactérias o alcancem e restringem a produtividade com oxigênio. O número sai da aritmética das próprias equações. Cada átomo de carbono fixado por fotoferrotrofia exige quatro átomos de ferro. Uma célula precisa de cerca de cento e seis átomos de carbono para cada átomo de fósforo, a proporção que os oceanógrafos chamam de razão de Redfield. Logo, uma água com mais de quatrocentos átomos de ferro para cada átomo de fósforo permite que os fotoferrotrofos usem todo o fósforo disponível, e as cianobactérias ficam sem nutriente. Abaixo dessa razão, sobra fósforo para a fotossíntese com oxigênio. O oceano ferruginoso funciona, nesse modelo, como barreira ecológica além de sumidouro químico.

O ferro também pode agir diretamente sobre as cianobactérias. Experimentos de Swanner et al. (2015) mostraram queda da produção de oxigênio sob concentrações elevadas de Fe²□. O efeito depende da linhagem e das condições, mas dá corpo a uma dupla pressão plausível. Escassez de fósforo e toxicidade do ferro. O produtor de oxigênio já existia; o ambiente limitava sua escala.

3. A vantagem fotoferrotrófica

A vantagem se realimenta. Os fotoferrotrofos oxidam ferro sem liberar oxigênio, produzem biomassa e geram hidróxidos férricos. Esses precipitados descem e, como o capítulo 5 mostrou, adsorvem fósforo com enorme eficiência. A produtividade sem oxigênio reduz, assim, o nutriente disponível para seus concorrentes e reforça a própria vantagem. Quanto mais ferro oxidam, mais fósforo levam para o fundo, menos sobra para quem produz oxigênio.

O circuito tem uma fresta. A precipitação intensa pode esgotar o ferro na camada superficial ou empurrar a frente ferruginosa para baixo. Durante esse intervalo, a toxicidade diminui e a razão entre ferro e fósforo cai abaixo do limiar. Os organismos produtores de oxigênio ganham

espaço. O oxigênio produzido oxida o ferro que resta, acelera a limpeza local e amplia por algum tempo a zona favorável. O retorno da ressurgência recoloca Fe^{2}□ no sistema e fecha a janela.

Essa oscilação é uma inferência, ainda não um fato observado em Carajás. Sua força está em reunir processos conhecidos numa previsão que pode ser lida no testemunho de sondagem. Se o mecanismo operou, as fácies de exaustão de ferro devem coincidir com sinais independentes de que o oxigênio estava sendo usado. O BIF registraria os pulsos ferruginosos; os pelitos e carbonatos associados guardariam a resposta biológica.

4. O mar restrito como regime de oscilação

O oceano aberto dilui perturbações e repõe reservatórios. Uma bacia restrita conserva melhor as consequências de cada pulso, pela mesma razão que a banheira de ralo fechado do capítulo 5 concentra o que a torneira traz. O balanço entre conexão oceânica, ressurgência, produtividade e precipitação pode levar a camada superficial de um extremo ao outro muitas vezes. O confinamento importa porque permite exaustão local antes que o oceano profundo restaure as condições iniciais.

A própria formação ferrífera pode contribuir para a estabilidade do regime. Hidróxidos de ferro reagem com sulfeto e podem limitar sua acumulação, enquanto a deposição remove ferro e fósforo da coluna. Chamar esse assoalho de termostato é útil como imagem, desde que a imagem preserve seus limites. A capacidade do ferro de controlar o sulfeto depende do fluxo, da mineralogia e do balanço de massa. Precisa ser demonstrada camada por camada; o tamanho do BIF, sozinho, não prova proteção contínua contra a euxinia do capítulo 5.

O laboratório proposto não fabrica uma linhagem numa direção predeterminada. Ele seleciona comunidades dentro de um campo variável. Períodos hostis eliminam populações sensíveis; janelas favoráveis permitem expansão; refúgios conectados conservam diversidade; a repetição testa soluções metabólicas e fisiológicas. A palavra laboratório

descreve esse regime de experimentação ambiental. Ela não afirma descendência direta entre os micro-organismos de Carajás e a biosfera que mais tarde oxigenou o planeta.

5. Carajás e Kostomuksha, dois candidatos

Por volta de 2,76 a 2,74 Ga, Carajás e Kostomuksha reuniam vulcanismo, restrição de bacia e sedimentação ferrífera em grande escala, como o capítulo 5 mostrou. São dois dos melhores candidatos conhecidos ao regime descrito aqui, não os únicos ambientes possíveis. A preservação é desigual e grande parte do fundo oceânico arqueano desapareceu. O mapa atual mostra sobreviventes, não a distribuição completa dos ecossistemas.

Carajás oferece escala excepcional, e oferece um instrumento que ainda não apareceu neste livro. O ferro tem quatro isótopos estáveis, e quando apenas uma parte do Fe²□ de uma água é oxidada, o precipitado fica enriquecido nos isótopos pesados e a água que sobra, nos leves. Um BIF com valores muito positivos de ferro pesado registra, por isso, oxidação parcial, lenta, de um reservatório grande, e não a oxidação completa que um oceano cheio de oxigênio produziria. A Formação Carajás tem média reportada de +2,06 por mil no índice δ□□Fe, entre as mais altas conhecidas (Fabre et al., 2011). A interpretação de Rego et al. (2021) atribui essa oxidação dominante à fotoferrotrofia sob condições amplamente sem oxigênio. Esse é o estado de referência que a hipótese das janelas precisa ultrapassar.

O fósforo acrescenta a medida crítica. Rego et al. (2023) combinaram as razões entre fósforo e ferro dos depósitos com coeficientes experimentais de partição e reconstruíram para a água do mar arqueana uma média de 0,063 micromolar, trinta vezes menos que o oceano profundo de hoje. Para Carajás, o intervalo calculado foi de 0,004 a 0,18 micromolar. São estimativas derivadas do registro mineral, não medições diretas do oceano. Mesmo assim, apontam para forte escassez de fósforo e adsorção em hidróxidos férricos, exatamente o terreno em que a competição de Ozaki se torna relevante. Com tão pouco fósforo e

tanto ferro, a razão da seção 2 fica, na maior parte do tempo, do lado dos fotoferrotrofos.

A literatura reunida para este livro ainda carece de uma investigação sistemática, em Carajás, com isótopos de nitrogênio e traçadores como molibdênio, urânio, selênio e tálio nos intervalos ferríferos e nas rochas finas associadas. Essa ausência impede afirmar que as janelas existiram. Também oferece uma oportunidade incomum, porque o mecanismo produz sinais que podem ser procurados em testemunhos já disponíveis.

Kostomuksha fornece o controle da mesma idade. Sua associação entre cinturão de rochas verdes, vulcanismo e BIF permite perguntar se duas bacias independentes responderam da mesma forma ao ferro e ao confinamento. O registro de enxofre e a idade refinada do cinturão ampliam a comparação (Slabunov et al., 2025). Convergência entre os dois sistemas fortaleceria o mecanismo ambiental; divergência ajudaria a identificar qual ingrediente faltou.

6. Dos BIFs neoarqueanos ao GOE

A sucessão global oferece uma hipótese de escala. Carajás e Kostomuksha registram grandes sistemas por volta de 2,75 Ga. Entre 2,67 e 2,50 Ga, sinais de oxidação localizada aparecem em diferentes margens arqueanas, os chamados sopros de oxigênio, embora alguns registros continuem disputados (Anbar et al., 2007; Kendall et al., 2010; Riding et al., 2014; Slotznick et al., 2022). Entre 2,50 e 2,43 Ga, as grandes formações ferríferas de plataforma e a transição atmosférica se sobrepõem no tempo. A contagem de ciclos orbitais gravados nas camadas refina a deposição das formações Kuruman, na África do Sul, e Dales Gorge, na Austrália, e o desaparecimento da assinatura de enxofre delimita a mudança atmosférica (Gumsley et al., 2017; Warke et al., 2020; Lantink et al., 2024).

A coincidência permite uma leitura causal, mas ainda não a demonstra. A multiplicação de plataformas rasas e bacias ferruginosas pode

ter expandido os nichos em que produtores de oxigênio alternavam desvantagem e oportunidade. À medida que o Fe^{2}□ superficial era consumido, a produtividade com oxigênio crescia e reforçava a própria remoção do ferro. O mecanismo de Ozaki poderia então operar em mais de uma bacia e ajudar a converter oásis locais numa alteração atmosférica oscilante.

Outros controles permaneceram ativos. O fluxo de gases reduzidos dos vulcões, a composição da crosta, o enterramento de carbono, a disponibilidade de nutrientes e o balanço de enxofre (Reinhard et al., 2017; Konhauser et al., 2017). O GOE resulta da interação desses termos. O laboratório ferruginoso acrescenta uma ponte ecológica entre a origem antiga do metabolismo e sua expansão posterior. Não substitui o orçamento químico do planeta.

O Supergrupo Minas, em Minas Gerais, funciona como comparação de segunda geração. A Formação Cauê registra deposição de ferro na janela da transição; os carbonatos da Gandarela e do Fecho do Funil acompanham a reorganização posterior do ciclo do carbono, culminando nos valores anômalos do chamado evento Lomagundi, quando enormes quantidades de carbono orgânico foram enterradas e o oxigênio subiu (Babinski et al., 1995; Bekker et al., 2003). A coluna reúne ferro, plataforma e resposta biológica, mas sua continuidade não estabelece uma linhagem que parte de Carajás. O que pode ser comparado é o regime. Duração das janelas, nutrientes e intensidade dos traçadores.

O pulso de BIFs de 1,88 Ga na América do Norte pertence a outra configuração tectônica e a outro estado do oceano (Rasmussen et al., 2012). É um controle tardio, não a chegada documentada de uma revolução nascida em Carajás. A geografia dos supercontinentes e a transmissão entre blocos serão tratadas no capítulo 12. Aqui basta conservar a pergunta local e seu possível alcance planetário.

7. Como ler o testemunho

Os traçadores que a hipótese pede merecem uma palavra cada, porque é neles que ela vive ou morre. O nitrogênio tem dois isótopos estáveis, e a sequência de reações que converte amônia em nitrato e depois em gás, a nitrificação seguida da desnitrificação, só funciona com oxigênio e deixa o nitrogênio que sobra enriquecido no isótopo pesado. Um enriquecimento de ^{15}N numa rocha fina é, por isso, uma pegada de oxigênio em uso. Molibdênio e urânio são solúveis em água oxidada e insolúveis em água reduzida; quando se acumulam num sedimento marinho, registram que havia oxigênio atacando rochas em algum lugar a montante. O selênio muda de estado de oxidação em faixas diferentes das do ferro e refina o intervalo. O tálio acompanha os óxidos de manganês, que só se formam com oxigênio, e registra sua ciclagem. Nenhum deles é inequívoco sozinho. O argumento depende da convergência entre eles e de sua posição na pilha, não de uma anomalia isolada.

O primeiro teste procura covariação dentro de Carajás. Intervalos de menor aporte de Fe^{2+} ou de exaustão ferrífera devem coincidir com sinais de ciclagem aeróbica. Enriquecimento de ^{15}N, mudanças coordenadas em molibdênio, urânio e selênio, e tálio onde a ciclagem de óxidos de manganês tiver sido preservada.

O segundo teste compara Carajás e Kostomuksha com seções abertas da mesma idade. O mecanismo prevê maior frequência ou melhor preservação de oscilações nas bacias restritas. Se margens abertas mostrarem sinais de oxigênio sistematicamente anteriores e mais fortes, ou se os dois candidatos permanecerem uniformemente sem oxigênio em múltiplos traçadores, a prioridade atribuída ao confinamento perde força.

O terceiro teste acompanha o tempo. Carajás, a Cauê e os sistemas da transição para o GOE devem formar um gradiente mensurável, com janelas de oxigênio progressivamente mais longas e inventários de metais sensíveis cada vez maiores. A ausência desse gradiente enfraquece a ideia de expansão. Sua presença ainda exigirá distinguir herança bi-

ológica de convergência ecológica.

8. Níveis de confiança

São evidência ou consenso forte a anterioridade da fotossíntese com oxigênio ao GOE; a datação do GOE pelo desaparecimento da assinatura de enxofre e seu caráter oscilante; a competição prevista para oceanos com alta razão entre ferro e fósforo; a toxicidade do Fe²□ observada em experimentos; a fotoferrotrofia como interpretação principal da oxidação do ferro em Carajás; os valores positivos de δ□□Fe; a reconstrução de fósforo muito baixo; e a arquitetura restrita e ferruginosa de Carajás e Kostomuksha.

São modelos publicados o mecanismo competitivo de Ozaki, os sumidouros químicos do oxigênio, os oásis de oxigênio anteriores ao GOE e a cronologia das plataformas ferríferas de 2,5 Ga.

São hipóteses deste capítulo as janelas repetidas de exaustão de ferro em mares restritos; a seleção ecológica acumulada nesses intervalos; Carajás e Kostomuksha como candidatos principais; e a expansão posterior desse regime em plataformas maiores. Cada elo possui observáveis capazes de confirmá-lo, corrigi-lo ou encerrá-lo, e a seção 7 lista quais.

Conclusão

Carajás pode ter processado mais que ferro. Sua bacia reunia luz, Fe²□, fósforo escasso, ressurgência, confinamento e tempo. A combinação favorecia os fotoferrotrofos durante grande parte do ciclo. A própria eficiência da precipitação de ferro, porém, podia abrir intervalos em que a camada superficial perdia ferro e as comunidades produtoras de oxigênio ganhavam espaço. O retorno da água profunda fechava a janela. A bacia respirava aos pulsos antes que a atmosfera pudesse fazê-lo.

Essa imagem permanece hipótese. Ela ganha valor porque desce ao tes-

temunho. Prevê relações entre fácies, ferro, nitrogênio e metais sensíveis; exige comparação com Kostomuksha e Minas; aceita desaparecer se os sinais faltarem. Se sobreviver, o maior distrito de ferro conhecido também será um arquivo do intervalo em que a vida já produzia oxigênio enquanto o planeta ainda aprendia a conservá-lo.

O capítulo seguinte deixa a zona fótica e volta à crosta. A margem norte de Carajás, aberta pelo rifte precursor do capítulo 6, vai receber uma plataforma, uma colisão e a última compressão do interior do continente.

Referências

Anbar, A. D. et al. (2007). A whiff of oxygen before the Great Oxidation Event? Science, 317, 1903–1906. https://doi.org/10.1126/science.1140325

Babinski, M.; Chemale Jr., F.; Van Schmus, W. R. (1995). The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Precambrian Research, 72, 235–245.

Bekker, A. et al. (2003). Chemostratigraphy of carbonates from the Minas Supergroup, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a stratigraphic record of Early Proterozoic atmospheric, biogeochemical and climatic change. American Journal of Science, 303, 865–904. https://doi.org/10.2475/ajs.303.10.865

Bekker, A. et al. (2004). Dating the rise of atmospheric oxygen. Nature, 427, 117–120. https://doi.org/10.1038/nature02260

Bekker, A.; Slack, J. F.; Planavsky, N.; Krapež, B.; Hofmann, A.; Konhauser, K. O.; Rouxel, O. J. (2010). Iron formation: the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. Economic Geology, 105, 467–508. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.467

Crowe, S. A. et al. (2013). Atmospheric oxygenation three billion years ago. Nature, 501, 535–538. https://doi.org/10.1038/nature12426

Fabre, S.; Nédélec, A.; Poitrasson, F.; Strauss, H.; Thomazo, C.; Nogueira, A. (2011). Iron and sulphur isotopes from the Carajás mining province (Pará, Brazil): implications for the oxidation of the ocean and the atmosphere across the Archaean-Proterozoic transition. Chemical Geology, 289, 124–139. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.07.019

Fournier, G. P.; Moore, K. R.; Rangel, L. T.; Payette, J. G.; Momper, L.; Bosak, T. (2021). The Archean origin of oxygenic photosynthesis and extant cyanobacterial lineages. Proceedings of the Royal Society B, 288, 20210675. https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0675

Gumsley, A. P. et al. (2017). Timing and tempo of the Great Oxidation Event. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, 1811–1816. https://doi.org/10.1073/pnas.1608824114

Kendall, B. et al. (2010). Pervasive oxygenation along late Archaean ocean margins. Nature Geoscience, 3, 647–652. https://doi.org/10.1038/ngeo942

Konhauser, K. O. et al. (2017). Iron formations: a global record of Neoarchaean to Palaeoproterozoic environmental history. Earth-Science Reviews, 172, 140–177. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.012

Lantink, M. L. et al. (2024). Towards an astrochronological framework for the lower Paleoproterozoic Kuruman and Brockman Iron Formations. South African Journal of Geology, 127, 325–349. https://doi.org/10.25131/sajg.127.0005

Ozaki, K.; Thompson, K. J.; Simister, R. L.; Crowe, S. A.; Reinhard, C. T. (2019). Anoxygenic photosynthesis and the delayed oxygenation of Earth's atmosphere. Nature Communications, 10, 3026. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10872-z

Planavsky, N. J. et al. (2014). Evidence for oxygenic photosynthesis half a billion years before the Great Oxidation Event. Nature Geoscience, 7, 283–286. https://doi.org/10.1038/ngeo2122

Poulton, S. W. et al. (2021). A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation. Nature, 592, 232–236. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03393-7

Rasmussen, B.; Fletcher, I. R.; Bekker, A.; Muhling, J. R.; Gregory, C. J.; Thorne, A. M. (2012). Deposition of 1.88-billion-year-old iron formations as a consequence of rapid crustal growth. Nature, 484, 498–501. https://doi.org/10.1038/nature11021

Rego, E. S. et al. (2021). Anoxygenic photosynthesis linked to Neoarchean iron formations in Carajás (Brazil). Geobiology, 19, 326–341. https://doi.org/10.1111/gbi.12438

Rego, E. S. et al. (2023). Low-phosphorus concentrations and important ferric hydroxide scavenging in Archean seawater. PNAS Nexus, 2, pgad025. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad025

Reinhard, C. T. et al. (2017). Evolution of the global phosphorus cycle. Nature, 541, 386–389. https://doi.org/10.1038/nature20772

Riding, R.; Fralick, P.; Liang, L. (2014). Identification of an Archean marine oxygen oasis. Precambrian Research, 251, 232–237.

Slabunov, A. I. et al. (2025). Age of banded iron formations of the Kostomuksha Greenstone Belt: first zircon dating. Geology of Ore Deposits, 67, 237–250. https://doi.org/10.1134/S1075701524700466

Slotznick, S. P. et al. (2022). Reexamination of 2.5 Ga "whiff" of oxygen interval points to anoxic ocean before GOE. Science Advances, 8, eabj7190. https://doi.org/10.1126/sciadv.abj7190

Swanner, E. D. et al. (2015). Modulation of oxygen production in Archaean oceans by episodes of Fe(II) toxicity. Nature Geoscience, 8, 126–130. https://doi.org/10.1038/ngeo2327

Trendall, A. F.; Basei, M. A. S.; de Laeter, J. R.; Nelson, D. R. (1998). SHRIMP zircon U-Pb constraints on the age of the Carajás Formation, Grão Pará Group, Amazon Craton. Journal of South American Earth Sciences, 11, 265–277.

Warke, M. R. et al. (2020). The Great Oxidation Event preceded a Paleoproterozoic "snowball Earth". Proceedings of the National Academy of Sciences, 117, 13314–13320. https://doi.org/10.1073/pnas.2003090117