

## **As escalas da evolução do Planeta e a Terra Primitiva**

Fernando J.A.S. Barriga  
GeoFCUL e Creminer,  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
Edifício C2, Piso 5, Campo Grande, 1749-016 Lisboa  
[f.barriga@fc.ul.pt](mailto:f.barriga@fc.ul.pt)

### **Introdução**

Lembro-me de, muito criança ainda, com uns cinco anos, deitado sem sono, na sesta a que a minha mãe me obrigava, me assustar com a ideia do infinito, do para sempre, fosse no Céu ou no Inferno. Mais tarde, nos primeiros anos do liceu, a questão passou a ser a origem da Terra e do Universo. Após muitas excursões colhendo minerais e rochas, algumas com fósseis de faunas hoje extintas, tornou-se evidente para mim a existência de uma evolução na Terra. Durante algum tempo não houve conflito entre o catecismo, os livros de Ciências e as minhas próprias observações. O choque foi a revelação de que, com base em observações geológicas, se podia concluir, como fizeram James Hutton e Charles Lyell, que “não se vê um princípio nem se pressente um fim”, ou seja, que a Terra (e o Espaço) poderiam ter sido sempre mais ou menos como hoje os vemos, repetindo-se os ciclos geológicos sem grandes novidades, excepto a substituição das faunas e das floras<sup>1</sup>.

Hoje temos uma percepção bem diferente. Sabemos, sem grande margem para dúvidas, que a Terra teve um princípio, e que evoluiu marcadamente desde então. Um dos aspectos decisivos foi a descoberta da idade da Terra, aliás uma questão que apaixonou os melhores espíritos durante séculos. Até meados do século XVIII, a questão era teológica. Em 1650 um bispo irlandês (James Ussher) proclama, com base em minuciosas interpretações dos textos bíblicos, que a Terra foi criada num

---

<sup>1</sup> Os pais da geo-história (Hutton e Lyell) admitiam a possibilidade de um princípio, mas sem terem evidência para ele, numa provável concessão ao conceito religioso da Criação.

domingo, 23 de Outubro, do ano de 4004 antes de Cristo. Esta afirmação, reproduzida em numerosas edições da Bíblia, influenciou o pensamento de muitos geólogos da época, impedindo-os de interpretar correctamente o que observavam no terreno. Florescem nesta época ideias inspiradas no Dilúvio Universal, com formação das rochas sedimentares num único ciclo, derivado de uma catástrofe global. Um século mais tarde, Hutton apresenta a ideia de que existiram vários ciclos, e que os processos geradores das rochas são lentos e continuados, idênticos aos actuais. A conclusão lógica é que a Terra tem muitas centenas de milhões de anos de idade.

Este conceito foi atacado inesperadamente por William Thompson, mais conhecido por lorde Kelvin. Numa série de publicações e conferências entre 1862 e 1899, o mais notável físico britânico de então analisou exaustivamente a questão da idade da Terra, com base numa análise térmica que incluiu a energia solar, a história de arrefecimento de um objecto com a massa e composição da Terra, e os efeitos gravitacionais energéticos, concluindo finalmente que a idade da Terra deveria ser entre 20 e 40 Ma<sup>2</sup>. Esta conclusão foi um rude golpe para as ideias dos geólogos. Basta pensar nos grandes cortes de sequências de rochas, de que o exemplo mais notável é o Grand Canyon do rio Colorado, nos EUA (Figura 1) para se perceber como é impensável que a Terra seja tão jovem. Os cálculos de lorde Kelvin estavam grosseiramente errados, porque faltava a principal fonte de calor gerado no interior da Terra, a radioactividade, descoberta por Henri Becquerel em 1897.



Figura 1. O Grand Canyon do Rio Colorado (Foto FB)

Esta história é hoje frequentemente citada para ilustrar uma outra característica das investigações geológicas. É que, não obstante o recurso cada vez maior da Geologia a

---

<sup>2</sup> Ma – mega anos - milhões de anos

técnicas e métodos da Física e da Química, não devemos permitir que os resultados analíticos ou as modelações teóricas, tantas vezes tão elegantes e aparentemente irrefutáveis, se sobreponham às evidências geológicas directas, às várias escalas, desde a cartográfica à microscópica. Os sistemas naturais são complexos e imperfeitamente compreendidos. Devemos ter a humildade de aceitar este facto. Nada pode substituir a observação da própria natureza.

Apesar das conclusões erradas de lorde Kelvin, não se deve subestimar, de forma alguma, a importância decisiva que têm as determinações físicas e químicas nos estudos geológicos. Assim, a radioactividade fornece simultaneamente o calor que faltava nas equações de lorde Kelvin e o processo de fazer datações absolutas das rochas, através da medição das abundâncias dos isótopos radioactivos e dos respectivos produtos, conhecidas as respectivas constantes de transformação. O desenvolvimento experimental nesta área tem permitido avanços enormes. Utilizam-se hoje numerosos sistemas isotópicos, do urânio-chumbo ao rénio-ósmio e outros. Consoante os períodos de semitransformação, assim este ou aquele sistema é útil em rochas mais ou menos antigas, ou desta ou daquela composição. Importa utilizar sistemas que se mantenham fechados ao longo da história geológica das rochas ou minerais em análise. Este aspecto é extremamente importante. Por exemplo, o sistema potássio-árgon conduz frequentemente a resultados errados devido à perda do árgon, gasoso e por isso muito móvel. Por outro lado, sabemos hoje que a maioria das rochas experimenta uma evolução complexa, ligada a fenómenos posteriores à génese, que podem mobilizar alguns dos átomos envolvidos nos cálculos de idade. É o caso do sistema rubídio-estrôncio, que muitas vezes é mais útil como traçador de processos que na datação das rochas. Outro aspecto analítico de grande interesse é a possibilidade de obter análises pontuais, em cristais individualizados. Desta forma é possível saber a idade dos vários componentes de rochas complexas, com minerais formados em diferentes épocas, ou datar os componentes detríticos independentemente das rochas em si. Estão neste caso as datações obtidas recentemente em cristais de zircão de rochas da Austrália Ocidental, perto da cidade de Perth. As rochas têm 3 Ga<sup>3</sup>, mas contêm cristais de zircão, detríticos, em que se

---

<sup>3</sup> Ga – giga anos – milhares de milhões (10<sup>9</sup>) de anos

obtiveram idades de 4.3 e até de 4.4 Ga. As implicações destas idades (e outras características dos cristais estudados) são apaixonantes, como veremos mais adiante.

## O Tempo Geológico

Alguns fenómenos geológicos, como os sismos e o vulcanismo, têm lugar numa escala de tempo que nos permite apercebermo-nos deles, às vezes agudamente, dada a nossa pequenez e a fragilidade da obra humana perante tais fenómenos. Contudo, grande parte da dinâmica da Terra tem lugar numa escala demasiado longa para que nos apercebamos dela. O tempo geológico é excessivo, os números são tão grandes que pouco significam. A Tabela 1 mostra algumas das principais divisões da história da Terra, com idades em milhões de anos (Ma) e ao lado as datas correspondentes à Terra se ter originado a 1 de Janeiro, sendo hoje 31 de Dezembro do mesmo ano, ou seja, condensando a idade da Terra num ano. É curioso constatar que a diversificação da vida em formas superiores, dominando a Terra, se verifica a escasso mês e meio do fim de tal ano; que a extinção dos dinossáurios é já depois do Natal; e que o Homem aparece na Terra a menos de três horas do fim do ano. Apenas para reflexão, nesta escala o nascimento de Cristo foi há 13,7 segundos e a bomba de Hiroshima explodiu há quatro décimas de segundo.

Tabela 1. Alguns marcos importantes da história da Terra, em milhões de anos (Ma) e respectivas datas no período de um ano.

	10 <sup>6</sup> anos	Dia	Mês	Hora : m : s
Origem da Terra	4600	1	Janeiro	0 : 0 : 0
Início do Arcaico	3960	20	Fevereiro	
Início do Proterozóico	2500	16	Junho	
Início do Câmbrico	540	19	Novembro	
Aparecimento dos Dinossáurios	250	12	Dezembro	
Extinções em massa	65	26	Dezembro	
Aparecimento do Homem	2	31	Dezembro	20
Nascimento de Cristo	0.002	31	Dezembro	23 : 59 : 46,3
Bomba de Hiroshima	0.000056	31	Dezembro	23 : 59 : 59,6

## A Terra Primitiva

Existe hoje razoável unanimidade em considerar-se que a Terra teve origem no sistema Solar, há cerca de 4,6 Ga, segundo o indica o estudo dos meteoritos e rochas lunares, a partir de poeira cósmica proveniente de ciclos estelares anteriores, incluindo explosões do tipo supernova (dada a presença de elementos pesados). - Contudo, não se conhecem materiais terrestres com essa idade. Ignoramos portanto quase tudo sobre a Terra verdadeiramente primitiva, incluindo se no início existiu ou não uma fase de fusão generalizada. Os cristais de zircão australianos já mencionados atrás, com idades de 4,3/4,4 Ga são os materiais terrestres mais antigos que se conhecem. O zircão é um mineral que se forma tipicamente em rochas ácidas (graníticas), portanto já evoluídas. Por outro lado, as proporções dos isótopos do oxigénio que existe nestes cristais sugerem que eles se tenham formado com intervenção de água líquida, o que por sua vez levanta a possibilidade da existência de oceanos. Estas interpretações são apaixonantes, apenas diminuídas por se tratar de cristais isolados, o que aumenta as incertezas acerca das interpretações.

As *rochas* mais antigas são os gnaisses de Acasta (Norte do Canadá) com 3,96 Ga, cuja composição granítica e tonalítica evidencia já derivação a partir de materiais marcadamente evoluídos, possivelmente uma crosta primitiva de composição basáltica. As rochas sedimentares mais antigas que se conhecem ocorrem na costa oeste da Gronelândia (Península de Isua), e têm 3,8 Ga de idade. São constituídas pelos mesmos minerais que continuam hoje a formar-se, nas rochas sedimentares actuais (incluindo óxidos de ferro - magnetite e hematite, cherte, calcite, e mesmo sulfatos, formados no ambiente sedimentar, para além de minerais detríticos em rochas como grauvaques e argilitos). Estes e outros sedimentos Arcaicos ocorrem intimamente associados a enormes quantidades de rochas vulcânicas, das mais variadas composições (komatitos, basaltos, andesitos, riólitos), em conjuntos submarinos, geralmente pouco deformados, e apresentando metamorfismo de baixo grau - caracterizado pela formação de vários minerais verdes, como clorite, epídoto e actinolite (anfíbola verde), a que damos o nome de faixas de rochas verdes (*greenstone belts*), separadas por grandes extensões de gnaisses semelhantes aos de

Acasta. As condições em que se formaram as faixas de rochas verdes do Arcaico podem ter sido semelhantes às actuais, mas numa Terra com a) poucas e/ou pequenas extensões de terrenos emersos (quase não se encontram sedimentos terrígenos); b) mais quente - a temperatura da água dos oceanos no início do Arcaico parece ter sido perto de 100°C; e c) com frequentíssimas e muito grandes erupções vulcânicas. O quimismo da Terra está em claro desequilíbrio com o da atmosfera actual, com cerca de 21% de oxigénio livre. Não resta qualquer dúvida de que este resulta essencialmente da actividade biológica, representando, em termos de saldo líquido, o resultado da fixação de carbono na biosfera, e nos sedimentos, a partir de CO<sub>2</sub>. A Terra anterior ao desenvolvimento da vida era certamente anóxica.

## **A Origem da Vida**

Os sedimentos de Isua contêm evidência de que a vida florescia já nessa época: existe grafite igual à que deriva da incarbonização de seres vivos, e alguns cientistas pensam mesmo ter descoberto fósseis de bactérias nestas rochas. Todos conhecemos as experiências de Stanley Miller e Harold Urey em inícios dos anos cinquenta, que conseguiram sintetizar macromoléculas orgânicas precursoras de proteínas, através de descargas eléctricas em soluções aquosas ricas em amónia, metano e hidrogénio. Daqui nasceu a teoria da sopa primordial, postulando-se a existência de oceanos primitivos ricos em tais componentes, a partir dos quais se teria originado a Vida na Terra. Estes oceanos teriam posteriormente evoluído para os que actualmente conhecemos. Acontece, contudo, que não há qualquer evidência geológica para que estes oceanos tenham alguma vez existido. Por exemplo, se minerais como argilas, micas e clorites se formassem a partir de um fluido rico em amónia, deveriam reter pequenas quantidades deste componente, o que não se verifica.

Estudos recentes sugerem outra possibilidade, mais aliciante. Conhecem-se no fundo dos oceanos actuais campos hidrotermais, onde brotam, de autênticas chaminés, fluidos a temperaturas até mais de 350°C, ricos em metais. Devido ao arrefecimento brusco e mistura com água do mar normal, formam-se minerais como pirite (FeS<sub>2</sub>), calcopirite (CuFeS<sub>2</sub>), esfalerite (ZnS) e muitos outros, que constituem as chaminés e

outros edifícios por onde o fluido passa. Estas estruturas (Figura 2) apresentam-se geralmente cobertas de seres vivos, desde mantos de bactérias a caranguejos, mexilhões e espectaculares vermes tubíporas com vários metros de comprimento. As bactérias, que constituem a base da cadeia alimentar, obtêm a energia e nutrientes através de reacções químicas (nas quais intervém o enxofre), e não da fotossíntese, pois no fundo do mar não há luz.

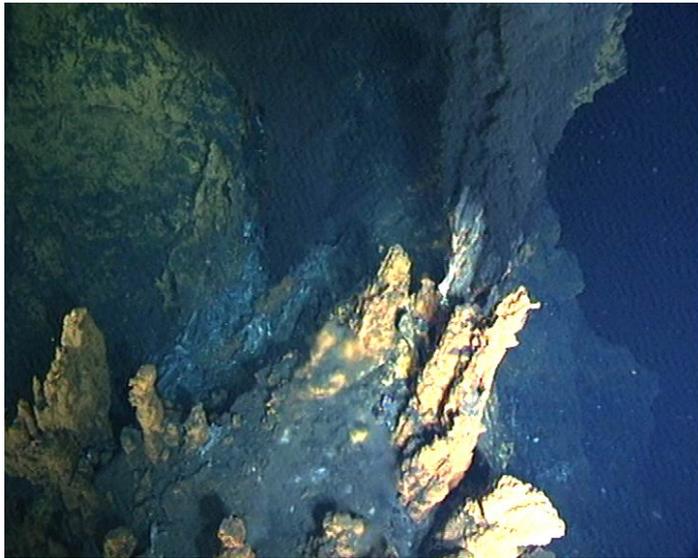


Figura 2. Chaminés hidrotermais submarinas no campo Raibow, mar dos Açores. Foto Missão Saldanha, FCT (Portugal)/Ifremer (França)

A partir de idades de 3,5 Ga e mais jovens, na maioria dos sedimentos do Arcaico, encontram-se enormes quantidades de fósseis, não só de bactérias, mas também de algas cianofíceas. A presença de restos destes seres vivos é muito importante, porque mostra que se produzia já então oxigénio. Se este era ou não suficiente para oxigenar os oceanos, e começar a acumular-se na atmosfera, é motivo de aceso debate. Apontam-se geralmente as formações ferríferas bandadas (arcaicas e proterozóicas) e os conglomerados com pirite e uraninite ( $UO_2$ ) do Proterozóico Inferior (2,2 a 2,5 Ga) como os principais argumentos a favor de um modelo redutor para a Terra durante o Arcaico, e oxigenação progressiva ao longo do Proterozóico. Mas a génese destas rochas pode explicar-se de várias formas, sem necessidade de oceanos redutores, cuja existência é de resto contra-indicada pela presença de carbonatos e sulfatos, e pelo estilo redox da actividade hidrotermal submarina arcaica, análogo ao actual. O que parece certo é que entre impactes meteoríticos (e outras influências cósmicas) e intensa actividade vulcânica, as condições de vida na Terra não foram, durante a maior parte do Pré-câmbrico, suficientemente estáveis para permitirem o aparecimento de seres evoluídos. Pense-se nas extinções em massa de há 65 Ma,

provavelmente devidas à queda de um único meteorito, de dimensões relativamente modestas. A ausência de estabilidade poderá de resto ser a chave para outras peculiaridades do Pré-câmbrico, incluindo a génese das formações ferríferas.

Quanto à crosta continental, enquanto a evolução litológica do Arcaico ao Fanerozóico é surpreendentemente pequena, os estilos tectónicos e paleo-ambientais parecem ter-se modificado radicalmente. As diferenças mais notórias conseguem explicar-se com base num modelo de arrefecimento secular do interior da Terra, apoiado na existência de komatitos (lavas ultramáficas) apenas no Arcaico (implicando temperaturas de extrusão de cerca de 1700°C, e portanto gradientes geotérmicos elevados), e aumento progressivo, até aos nossos dias, da abundância de rochas como eclogitos e xistos azuis, típicas de metamorfismo em condições de baixo gradiente geotérmico. Se se aceitar que a principal fonte de calor no interior da Terra foi sempre, como actualmente, a produção radioactiva, o arrefecimento é consequência lógica da diminuição da quantidade de material radioactivo. Os elementos existentes sugerem que a tectónica de placas passou a dominar há cerca de 1 Ga, enquanto no Arcaico as zonas de subida e descida de material mantélico estavam separadas por distâncias de poucas centenas de quilómetros. O Proterozóico terá sido uma idade de transição entre os dois estilos. A abundância de rochas de composição granítica, desde o início do Arcaico conhecido, sugere que a diferenciação do material síalico foi muito precoce. A enorme escassez de rochas terrígenas, contudo, sugere que a crosta de tipo continental começou por ser fina e imersa, e lateralmente muito extensa, possivelmente cobrindo todo o globo. O arrefecimento progressivo terá permitido subducção de materiais síalicos até profundidades cada vez maiores e, como consequência, é possível que a crosta continental tenha vindo a diminuir de volume, do Arcaico até aos nossos dias. Simultaneamente, e talvez um pouco paradoxalmente, a quantidade de terra emersa aumentou, devido a - espessamentos por colisão continental, à custa de áreas cada vez maiores de crosta oceânica (hoje cerca de 70% da superfície da Terra).

As dúvidas e polémicas acerca da natureza da Terra durante os tempos pré-câmbricos são muitas: é necessário recorrer a observações indirectas e incompletas (a maioria das rochas já não existe, para não falar dos oceanos e atmosfera!), e alguns dos factos observáveis podem ser interpretados de várias maneiras. Mas estas dificuldades, por outro lado, tornam o estudo particularmente apaixonante. Tal como os detectives dos romances policiais, os geólogos têm que observar factos muito

diversos, com o máximo rigor, interpretá-los, e construir modelos e teorias, que muitas vezes podem ser testados por novas observações.

### **Bibliografia**

- Blatt H, G Middleton, R Murray, 1980. **Origin of Sedimentary Rocks** (2ª edição). Prentice Hall, Englewood Cliffs, 782 p.
- Bowring SA, IS Williams, W Compston, 1989. 3.96 Ga Gneisses from the Slave Province, Northwest Territories, Canada. **Geology** 17:971-975.
- Lovelock J, 1993. **The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth**. Oxford University Press
- Mojzsis SJ, Harrison TM, Pidgeon RT, 2001. Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago. **Nature** 409:178-181
- Rapp RP, 1991. Origin of Archean Granitoids and Continental Evolution. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, 72:225-229.
- Stanley SM, 1989. **Earth and Life Through Time** (2ª edição). Freeman, New York, 689 p.
- Wilde SA, Valley JW, Peck WH Graham CM, 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. **Nature** 409:175-178.
- Windley, BF, 1995. **The Evolving Continents** (3ª edição). John Wiley, New York.