



$10^7$  m

Grande parte da dinâmica da Terra tem lugar numa escala demasiado longa para nos apercebermos dela.

FERNANDO J.A.S. BARRIGA  
GeoFCUL e Creminer,  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
f.barriga@fc.ul.pt

# AS ESCALAS DA EVO E A TERRA PRIMITIVA

Sabemos, sem margem para dúvidas, que a Terra teve um princípio, e que evoluiu muito desde então. Um dos aspectos decisivos foi a descoberta da idade da Terra, uma questão que apaixonou os melhores espíritos durante séculos. Até meados do século XVIII, a questão era teológica. Em 1650 o bispo irlandês James Ussher proclama, com base em minuciosas interpretações dos textos bíblicos, que a Terra foi criada num domingo, 23 de Outubro, do ano 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, segundo as quais haveria 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 de 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.

Esta ideia foi atacada por William Thompson, mais conhecido por Lord Kelvin. Numa série de publicações e conferências entre 1862 e 1899, o mais notável físico britânico de então analisou exhaustivamente a questão da idade da Terra, com base numa análise térmica que incluía a energia solar, a história de arrefecimento de um objecto com a massa e composição da Terra, e os efeitos gravitacionais, concluindo finalmente que a idade da Terra devia situar-se entre 20 e 40 milhões de anos. Esta conclusão foi um rude golpe para as ideias dos geólogos.

# LUÇÃO DO PLANETA

Basta pensar nos grandes cortes de seqüências de rochas, de que o exemplo mais notável é o Grand Canyon do rio Colorado, nos EUA (Fig. 1) para se perceber como é impensável que a Terra seja tão jovem. Os cálculos de Lord Kelvin estavam grosseiramente errados, porque faltava a principal fonte de calor gerado no interior da Terra, a radioactividade, que só foi descoberta por Henri Becquerel em 1897.



Fig. 1. Panorâmica do Grand Canyon do rio Colorado, no Arizona (Foto do autor, 1995).

Apesar das conclusões erradas de Lord Kelvin, não se deve subestimar a importância decisiva das determinações físicas e químicas nos estudos geológicos. Assim, a radioactividade fornece simultaneamente o calor que faltava nas equações de Lord Kelvin e o processo de efectuar

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 elementos e os períodos de semidesintegração, assim este ou aquele sistema é útil em rochas mais ou menos antigas, ou com esta ou aquela composição. Importa utilizar sistemas que se mantenham fechados ao longo da história geológica das rochas ou minerais em análise. Por exemplo, o sistema potássio-árgon conduz frequentemente a resultados errados devido à perda do árgon, que é gasoso e por isso muito móvel.

Também 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 do que na datação das rochas. Outro aspecto analítico de grande interesse é a possibilidade de análises pontuais em cristais individualizados. Desta forma é possível datar os componentes detríticos independentemente das rochas em si, como se fez recentemente em cristais de zircão de rochas da Austrália Ocidental. As rochas (conglomerados) têm 3000 milhões de anos, mas contêm cristais de zircão, detríticos, em que se obtiveram idades de 4300 e até de 4400 milhões de anos. As implicações destas idades (e outras características dos cristais estudados) são apaixonantes, como veremos adiante.

## O TEMPO GEOLÓGICO

Alguns fenómenos geológicos, como os sismos e o vulcanismo, têm lugar numa escala de tempo que nos permite a sua percepção, por vezes de forma aguda, dada a nossa pequenez e a fragilidade humana perante tais fenómenos. Contudo, grande parte da dinâmica da Terra tem lugar numa escala demasiado longa para que nos apercebam dela. 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 e as datas correspondentes num intervalo de um ano, de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro. É curioso verificar que a diversificação da vida em formas superiores, dominando a Terra, se verifica a escasso mês e meio do fim de tal ano (início do Câmbrico); que a extinção dos dinossáurios é já depois do Natal; e que o Homem aparece na Terra a

menos de quatro horas da passagem do ano. Apenas para reflexão: nesta escala, o nascimento de Cristo foi há 13,7 segundos e a bomba de Hiroshima explodiu há apenas quatro décimas de segundo.

Alguns marcos importantes da história da Terra, em milhões de anos e respectivas datas no período de um ano

Divisões da História da Terra		10 <sup>6</sup> anos	Dia	Mês	Hora	m	s
Pré-Câmbrico	Eon Hadeano	4600	1	Janeiro	0	0	0
	Início do Arcaico	3960	20	Fevereiro			
	Eon Arcaico						
	Início do Proterozóico	2500	16	Junho			
Eon Fanerozóico	Início do Câmbrio	540	19	Novembro			
	Era Paleozóica						
	Aparecimento dos Dinossaúros	250	12	Dezembro			
	Era Mesozóica						
	Extinção dos Dinossaúros	65	26	Dezembro			
	Era Cenozóica						
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 aceitar que a Terra teve origem no sistema solar, há cerca de 4600 milhões de anos, conforme indica o estudo dos meteoritos e rochas lunares, a partir de poeira cósmica proveniente de ciclos estelares anteriores, incluindo explosões de supernovas (dada a presença de elementos pesados). Os cristais de zircão australianos já mencionados, com idades de 4300 a 4400 milhões de anos, 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 existem 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, apesar das incertezas que as rodeiam.

As *rochas* mais antigas são os gnaisses de Acasta (Norte do Canadá) com 3960 milhões de anos, cuja composição granítica evidencia já derivação a partir de materiais muito 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 3800 milhões de anos. São constituídas pelos mesmos minerais que continuam hoje a formar-se, nas rochas sedimentares actuais (incluindo óxidos de ferro – magnetite e hematite, cherte – uma espécie de sílex –, e minerais oxigenados como car-

bonatos e até sulfatos). Estes e outros sedimentos arcaicos ocorrem intimamente associados a enormes quantidades de rochas vulcânicas, com composições desde ultrabásicas (komatitos) a ácidas (graníticas), em conjuntos submarinos, geralmente pouco deformados, e apresentando metamorfismo de baixo grau – caracterizado pela formação de vários minerais verdes, como clorite e actinolite (anfíbola verde), a que damos o nome de faixas de rochas verdes (*greenstone belts*), separadas por grandes extensões de gnaisses. As condições em que se formaram as faixas de rochas verdes do Arcaico podem ter sido semelhantes às actuais, mas numa Terra

- com poucas e/ou pequenas extensões de terrenos emersos (quase não se encontram sedimentos terrígenos);
- mais quente - a temperatura da água dos oceanos no início do Arcaico parece ter sido perto de 100°C;
- com erupções vulcânicas frequentes e muito grandes.

O quimismo da Terra está em claro desequilíbrio com o da atmosfera actual, com cerca de 21% de oxigénio livre. Não resta qualquer dúvida que este resulta essencialmente da actividade biológica, representando, em saldo líquido, o resultado da fixação de carbono na biosfera, e nos sedimentos, a partir de dióxido de carbono. A Terra antes do desenvolvimento da vida era certamente pobre em oxigénio livre.

## 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. São famosas as experiências de Stanley Miller e Harold Urey, em inícios dos anos 50, 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. Contudo, 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 alicianante. Conhecem-se no fundo dos oceanos campos

hidrotermais, onde brotam, de autênticas chaminés, fluídos a temperaturas até mais de 350°C, ricos em metais. As estruturas (Fig. 2) apresentam-se geralmente cobertas de seres vivos, desde mantos de bactérias a caranguejos, mexilhões, amêijoas gigantes e espectaculares vermes tubíporas com vários metros de comprimento. As bactérias, que constituem a base da cadeia alimentar, obtêm energia e nutrientes através de reações químicas (nas quais intervém o enxofre), e não da fotossíntese, pois no fundo do mar não há luz. Os fluídos hidrotermais correspondem bem aos postulados de Miller e Urey. Por estas razões, é muito aliciante a hipótese de que tenha sido em campos hidrotermais submarinos que se gerou a vida na Terra.



Fig. 2. Conjunto de chaminés hidrotermais produzindo um fluído negro, que brota a 360°C, e que alimenta comunidades biológicas com bactérias, mexilhões, camarões, etc., baseada em quimiossíntese e não na fotossíntese. Campo Rainbow, a 2300 m de profundidade, Crista Média Atlântica a sul dos Açores. Foto missão Saldanha, 1998 (ICTE-FCT, Portugal/lfrermer-França).

## A EVOLUÇÃO DAS PAISAGENS

A partir de idades de 3500 milhões de anos e mais recentes, 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 já então se produzia 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<sub>2</sub>) do Proterozóico Inferior (2200 a 2500 milhões de anos) 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. Parece certo 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 milhões de anos, provavelmente devidas à queda de um único meteorito, de dimensões 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) magnesianas 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 radioactividade, o arrefecimento é consequência lógica da diminuição da quantidade de material radioactivo. A tectónica de placas parece dominar há apenas cerca de mil milhões de anos, 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, sugere que a diferenciação do material sílico foi muito precoce. A enorme escassez de rochas terrígenas sugere, contudo, 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 a subducção de materiais sílicos até profundidades cada vez maiores e, por 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).