

O TEMPO PROFUNDO NA HISTÓRIA DO PLANETA TERRA E A DANÇA DOS CONTINENTES

Umberto G. Cordani – Instituto de Geociências da USP

A história da humanidade é medida em anos, séculos, milênios. Não é o caso da história de nosso planeta, que precisa do tempo profundo, o tempo geológico, medido em milhões de anos (Ma). Se vamos para o Cosmos, então, os astrofísicos precisam de bilhões de anos para estimar as idades das estrelas que se situam nos confins do Universo visível. A partir de medidas de grande precisão da chamada *radiação cósmica de fundo* em micro-ondas, a idade do Universo foi fixada em 13,7 bilhões de anos. Por sua vez, a idade das estrelas mais velhas de nossa galáxia, a Via Láctea, situa-se por volta de 8 bilhões de anos.

Datação direta de meteoritos, corpos rochosos que fazem parte do Sistema Solar, vem do espaço e caem sobre a Terra, indica que o Sol e os demais planetas do Sistema Solar se formaram há cerca de 4,57 bilhões de anos atrás. O processo de formação, pela teoria mais aceita, se deu através da condensação do gás e da poeira cósmica que constituíam a nebulosa solar. Dessa forma a Terra, nos primórdios de sua formação, consistia de uma mistura caótica de materiais, e a evolução do planeta resultou da transformação dessa mesma mistura em um corpo estruturado em camadas concêntricas. Nesse contexto formaram-se dois sistemas fundamentais: um núcleo interno constituído por Ferro e Níquel e um manto envolvente rochoso, de composição silicática. A crosta terrestre, a camada mais externa do planeta, originou-se mais tarde, por transformações a partir do manto. A dinâmica interna do planeta tem suas origens na mobilidade do material do manto, apesar de este ser quase que totalmente sólido. No presente, a temperatura no seu interior aumenta em direção ao centro, atingindo no limite manto/núcleo cerca de 4000 °C e no interior do núcleo por volta de 5500 °C. O calor interno, produzido através da desintegração de elementos radioativos de meia-vida longa existentes no manto, tais como Urânio, Tório, Potássio, e outros, é transportado para a superfície para, em seguida, ser dissipado para fora do planeta. Consequentemente, com a diminuição progressiva e inexorável dos elementos radioativos, o planeta vai lentamente se resfriando.

Pela distância muito oportuna em relação ao Sol, o resfriamento do planeta permitiu que a temperatura de sua superfície favorecesse a existência de oceanos, cuja água se acumulou em sua parte externa a partir da queda de cometas e também por desgaseificação do manto. Por sua vez, o ambiente dos primeiros oceanos favoreceu o aparecimento e o desenvolvimento da vida, e nesse sentido a Terra é um planeta muito especial. Todos os seres vivos da Terra possuem o mesmo código genético, evidência maior da evolução biológica, teoria de grande aceitação que preconiza a existência de organismos primitivos, ancestrais de todas as formas de vida que vieram mais tarde.

Os fósseis mais antigos conhecidos têm cerca de 3500 milhões de anos e possuem estruturas esféricas com carbono, muito parecidas com bactérias modernas. Organismos unicelulares primitivos dominaram e dominam os oceanos do planeta durante todo o tempo geológico. Microrganismos eucariontes multicelulares apareceram por volta de 2700 Ma,

mas os primeiros metazoários, ancestrais de todos os animais e plantas modernas, somente apareceram há cerca de 600 Ma. Por volta de 530 Ma, no período Cambriano, conforme se encontra no registro fóssil, ocorreu a “*explosão cambriana*” da vida, uma diversificação de organismos complexos e o surgimento, em um período de poucos milhões de anos, dos filos mais importantes conhecidos na biologia, incluindo os animais e o fitoplankton. Até esse tempo, toda a evolução biológica tinha ocorrido nos oceanos. A colonização dos continentes foi iniciada pelas plantas a partir de 470 Ma. Foi notável a época dos grandes répteis que se deu entre 200 e 65 Ma, Os primeiros homínídeos fósseis foram encontrados na África com idades de 6-7 Ma, e os primeiros fósseis atribuídos à espécie *Homo Sapiens* apareceram, também na África, por volta de 300 mil anos atrás.

Com relação à estrutura das camadas mais externas da Terra, tanto a crosta como a parte mais externa do manto são essencialmente sólidas e constituem, unidas, a *litosfera*, a camada rígida mais externa do planeta. A litosfera se sobrepõe à *astenosfera*, camada situada logo abaixo, inteiramente no manto, a qual pode incluir certa quantidade de fase líquida em forma de magma, adquirindo plasticidade e se movimentando por correntes de convecção. Há dois tipos de crosta: a *crosta continental*, de natureza granítica, e a *crosta oceânica*, de natureza basáltica. Da mesma forma, há dois tipos de litosfera, dependendo do tipo de crosta nela incluída: *litosfera continental* e *litosfera oceânica*. A profundidade do limite entre litosfera e astenosfera encontra-se normalmente entre 100 e 200 km de profundidade.

O resfriamento contínuo da Terra no tempo geológico, a partir de um possível “oceano de magma”, é o fator que governa a evolução geodinâmica do planeta. No início, a produção de calor por radioatividade induzia a formação das chamadas *plumas mantélicas* em grande quantidade. O processo denominado *tectônica de placas* apareceu há cerca de 3000 milhões de anos e daí em diante foi se tornando o principal mecanismo para a perda de calor do planeta. No presente, a litosfera encontra-se dividida em cerca de uma dúzia de placas litosféricas grandes (chamadas mais comumente de *placas tectônicas*) e muitas placas menores. Elas se movimentam tangencialmente à superfície do planeta, com velocidades da ordem de centímetros por ano. Nos limites entre placas tectônicas contíguas concentram-se os terremotos de grande intensidade e a grande maioria dos vulcões ativos do planeta. Esses limites podem ser *convergentes*, *divergentes* ou *conservativos*.

No caso de limites convergentes, as placas se aproximam e se chocam. Quando o choque se dá entre duas placas com litosfera oceânica, uma delas irá se aprofundar no manto ao longo de um sistema denominado de *subducção*. Esta placa, à medida que mergulha, se aquece, perde consistência e se integra no manto. Ao mesmo tempo, com o aquecimento, magmas essencialmente basálticos serão gerados e arcos de ilhas com crosta oceânica serão formados, como é o caso do Japão ou das ilhas Fiji. No caso de um processo convergente envolvendo duas placas de natureza continental, os magmas formados darão origem a rochas predominantemente graníticas. Ambas as placas sofrerão deformação e enrugamento em escala de centenas a milhares de quilômetros, e serão geradas cordilheiras de montanhas elevadas do tipo dos Alpes ou do Himalaia. Por fim, se o limite convergente envolver uma placa oceânica e uma placa continental, haverá subducção da placa oceânica, e os magmas formados aparecerão sob a forma de grandes *arcos magmáticos*, como ocorre presentemente nas cordilheiras dos Andes ou da Indonésia. Nos três casos a presença de sísmos é comum, incluindo-se aí terremotos de magnitude muito alta, catastróficos para as comunidades afetadas. Vulcanismo também é comum, sendo mais evidente quando há grande envolvimento da litosfera oceânica nos processos de subducção.

Quanto aos limites divergentes, aberturas na crosta são formadas ao longo de grandes sistemas de fraturamento, sendo preenchidas por magmas basálticos provenientes da astenosfera, caracterizando vulcanismo de fissura. É o caso dos muitos vulcões das chamadas *dorsais meso-oceânicas*, as imensas cordilheiras submersas que representam os locais de geração de crosta oceânica nova, pela subida dos magmas astenosféricos. Como a divergência entre as placas pode durar centenas de milhões de anos, com uma taxa de afastamento da ordem de vários centímetros por ano, formam-se áreas enormes com litosfera oceânica, como é o caso dos oceanos Atlântico e Índico.

Por sua vez, os limites conservativos apresentam grandes *sistemas de falhamentos*, em que as placas contíguas deslizam horizontalmente, uma em relação à outra, com movimentos opostos. O exemplo mais conhecido e mais característico é o sistema de falhas de San Andréas na costa ocidental da América do Norte.

Pelo exposto, os processos da dinâmica interna da Terra, que produzem as maiores modificações na fisiografia, estrutura e natureza do material da crosta terrestre, são mobilistas, isto é, decorrem da movimentação de placas litosféricas tangencialmente à superfície do planeta.

Os primeiros passos das ideias mobilistas, que incluem a deriva dos continentes, se deram por ocasião das grandes circum-navegações e dos descobrimentos do século XVI, quando o Oceano Atlântico em sua plenitude foi descrito nos mapas geográficos. Francis Bacon, em sua obra mestra “*Novum Organum*”, olhando para a forma do Brasil e da África ocidental delineada nesses mapas, ficou intrigado com o seu bom encaixe aparente e sugeriu que tais similaridades dificilmente seriam acidentais. Entretanto, o grande criador da teoria da deriva continental foi Alfred Wegener, que no início do século XX escreveu um minucioso estudo comparativo dos continentes que ladeiam o Oceano Atlântico, descrevendo as suas similaridades geológicas. Imaginou inclusive a existência de uma grande e única massa continental há cerca de 300 milhões de anos, que denominou “*Pangea*”, formada por todos os continentes atuais, ou seja Américas, Eurásia, África, Austrália e Antártica. Este supercontinente teria se fragmentado há cerca de 160 milhões de anos e seus fragmentos foram “derivando” gradativamente para as posições ocupadas atualmente.

Entre as muitas evidências geológicas apresentadas por Wegener, há duas que dificilmente podem ser atribuídas ao simples acaso:

1) - As similaridades notáveis entre rochas e fósseis das grandes bacias sedimentares do Paraná, na América do Sul, e do Karoo, na África do Sul, as quais passaram pelos mesmos eventos geológicos. A evidência mais palpável de que elas estiveram ligadas no passado é a do pequeno réptil fóssil *Mesosaurus*, que seguramente não teria como atravessar um oceano inteiro para aparecer nas camadas Permianas de ambas as bacias.

2) - As evidências de *glaciação continental de latitude* que afetou há cerca de 300 milhões de anos grandes regiões de África, América do Sul, Índia, Austrália e Antártica. A idade das camadas com origem glacial é a mesma nesses lugares todos, como demonstram os fósseis de plantas nelas encontrados, que caracterizam a “*Flora Glossopteris*”, ancestral de muitas plantas atuais. Estes fósseis indicam claramente que as regiões onde foram encontrados estiveram ligadas, no mesmo continente.

A partir dos anos 1950, as evidências em favor da deriva continental foram se avolumando, como seguem: (a) Levantamentos oceanográficos sistemáticos da topografia dos fundos oceânicos mostraram claramente a existência das imensas cadeias de montanhas

submersas, as “*dorsais médio-oceânicas*” dos oceanos Pacífico, Atlântico, Índico e Antártico. (b) As primeiras medidas paleomagnéticas sugeriram que alguns continentes estiveram unidos no passado, mas foram gradativamente se afastando um do outro, até a posição atual. (c) Ao longo da dorsal meso-oceânica do Atlântico foram feitos levantamentos geofísicos que confirmaram a hipótese levantada por Harry Hess, de crescimento do assoalho oceânico. Muitos levantamentos de geofísica marinha foram efetuados nos anos seguintes, ao longo de todas as dorsais médio-oceânicas do planeta, que deram o suporte necessário para a confirmação desse mecanismo. (d) Um teste geocronológico foi instituído entre o MIT (USA) e o laboratório de geocronologia da Universidade de São Paulo, para obter e datar amostras do nordeste brasileiro e da África Ocidental. Os resultados revelaram-se de uma coerência impressionante, e mostraram, além de qualquer dúvida, a excelente correlação existente entre as províncias tectônicas dos dois lados do Atlântico.

Com a tectônica de placas funcionando pelo menos desde 3000 Ma, construindo e destruindo litosfera oceânica, as placas com litosfera continental formaram de tempos em tempos grandes aglomerados, denominados supercontinentes. A Pangea, o supercontinente imaginado por Wegener, reuniu todas as massas continentais que existiam entre 350 e 300 Ma, e foi contemporâneo de um enorme oceano, denominado Pantahalassa, precursor do atual Oceano Pacífico. Supercontinentes anteriores à Pangea, tais como Gondwana (600 Ma), Rodínia (1000 Ma), e Columbia (1500 Ma), foram formados por amalgamação de fragmentos de litosfera continental. Eles existiram durante algum tempo e se quebraram, dando origem a fragmentos que se tornariam componentes de um supercontinente sucessor. No caso da Pangea, a sua fragmentação ocorreu entre 200 e 150 Ma, dando origem aos oceanos Atlântico, Índico e Antártico e aos continentes atuais.