

## Estabilidade vs. instabilidade nos geossistemas<sup>(\*)</sup>

**Luís Aires-Barros**

Laboratório de Mineralogia e Petrologia do I.S.T.. Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa. airesbarros@popsrv.ist.utl.pt

A Terra é um planeta vivo que evolui continuamente, modificando-se, sendo sede de importantes e vastos mecanismos de transporte e de incorporação de elementos químicos, originando novas associações.

A zona peculiar de contacto entre a litosfera, a atmosfera e a hidrosfera é sede de grandes e profundas transformações da superfície da Terra. Aqui a água é o grande agente corrosivo pois que percolando através das rochas carrega-se de iões que transporta até aos mares. Ao lado e concomitantemente com esta lixiviação química, a água tem uma acção física relevante de erosão e transporte dos materiais terrígenos tornados aptos a essa acção pelo ataque químico.

Mas se nesta peculiar interface de acções exógenas, o ciclo de meteorização, erosão e transporte procura transformar a Terra numa grande esfera com a superfície afeiçoada e aplanada, tal não sucede porque à vivência das acções exógenas responde a não menos vigorosa vivência das acções endógenas.

No seio da litosfera, desenvolvem-se dois grandes tipos de fenómenos. Uns decorrem das transformações metamórficas actuantes sobre os produtos da sedimentação. Assim os processos diagenéticos e metamórficos, por meio de recristalizações e por ganhos e perdas químicas por metassomatismo, promovem transformações em fase sólida, resultantes da energia posta em jogo por aumentos da pressão e temperatura. Outros fenómenos endógenos, igualmente relevantes, são de índole magmática, ígnea. É o resultado da evolução, mais ou menos longa no tempo e estendida no espaço, de banhos de fusão silicatados que se geram em zonas determinadas do manto superior. A evolução magmática ligada às actividades tectónicas e ao vulcanismo, dão-nos, muitas vezes, a noção mais nítida de como o nosso planeta, além de vivo, tem fúrias, correspondendo aos paroxismos vulcânicos e tectónicos.

A toda esta vida subterrânea, mais lenta e gradual no metamorfismo regional e até na geração e instalação dos plutões endógenos ou mais rápida e abrupta no vulcanismo

que se manifesta em inúmeras pontuações da face da Terra, sobrepõe-se a acção exógena sobre esta mesma face da Terra.

Assim pode afirmar-se que a Terra é uma fábrica química. Com efeito tal como uma fábrica química, a Terra trata e retrata os materiais combinando-os e/ou refinando-os de modos e segundo processos complexos.

Sabemos que o mundo está cheio de átomos em processo de destruição lento no decurso do qual os átomos de urânio, de tório, de rádio, de polónio, de actínio e de dezenas de outros se desagregam incessantemente. Esta fissão dá-se a velocidade constante que não pode ser aumentada, nem retardada, nem por elevadas temperaturas, sem por grandes pressões. Desde sempre, e por toda a parte, os átomos de urânio, de rádio, de tório se desintegram, no Universo, produzindo quantidades determinadas de hélio e de chumbo, estáveis e inertes. São estes últimos dois elementos que constituem o relógio da Natureza. Então é possível medir o tempo com um padrão mundial imutável.

Eis, pois que átomos diversos enchem o mundo com os seus sistemas electromagnéticos complexos. Irradiando energia, eles modificam-se e transmutam-se. Certos sistemas assim gerados são variáveis e duram muito tempo, porque o seu período de transmutação é muito longo para poder ser avaliado. Outros sistemas existem por biliões de anos, outros vivem apenas alguns anos, ou alguns dias, algumas horas ou, mesmo, alguns segundos ou suas fracções.

Os átomos que preenchem a Natureza estão submetidos às leis de transmutação dos sistemas atómicos, mas foi o tempo que regulou a sua distribuição quantitativa, foi o tempo que os repartiu pelo Universo e que criou a complexidade dos mundos, da nossa Terra, do Cosmos.

É nesta asserção que a Terra é uma fábrica química.

O que é notável nesta fábrica química é que certos processos químicos se efectuem a baixa temperatura e na presença da água, outros dão-se a altas temperaturas, outros, ainda, exigem elevadas pressões e dão-se no

(\*) - Lição jubilar, proferida no Salão Nobre do I.S.T. em 2002/06/06.

interior do nosso planeta. Verifica-se, pois, que esta fábrica actua em condições físico-químicas assaz diversificadas e excepcionais.

Questão importante e, inclusivamente de interesse económico, é a de saber quais e quantos os tipos de materiais que esta fábrica é capaz de produzir, sabendo que no seu armazém existem os 103 elementos químicos da Tabela Periódica. Todavia verifica-se que, por um lado o número de combinações entre estes elementos é reduzido, embora, teoricamente a sua combinação 2 a 2, 3 a 3, 4 a 4, etc. permitisse ter largos milhares de espécies minerais. Por outro lado as combinações de elementos químicos existentes não é feita aleatoriamente, mas comandada por afinidades.

Ou seja a Natureza, mais uma vez, mostra que rejeita a complexidade e os grandes números e que se gere por afinidades, por simpatias.

Acresce que estes elementos químicos foram fabricados no Universo, os primeiros, como o H ou He aquando do Big-Bang. Os outros foram sintetizados nas estrelas. Sucede que todos os elementos químicos terrestres foram fabricados antes do nascimento do Sol, sendo-lhes anterior.

Hoje em dia a Terra é um reactor atómico cuja reactividade no seu interior aquece o manto dando origem à fusão de largas partes do manto superior com a geração de magmas e a consequente movimentação das placas litosféricas sobrejacentes.

Há um fluxo de calor que se escapa à superfície da Terra e que é da ordem de grandeza da microcaloria por centímetro quadrado e por segundo, qualquer coisa como 10 000 vezes menor do que o fluxo de calor que vem do sol. No entanto este calor é suficiente para que, a 150 km de profundidade, tenhamos 1200 a 1300°C. Este gradiente de calor provoca movimentos dos materiais envolvidos da ordem do centímetro por ano. Ou seja, necessitamos de cem milhões de anos para que haja um deslocamento de 100 km.

Esta escala que nos parece muito lenta, não o é à escala geológica, já que a idade da Terra é de 4500 milhões de anos.

Mas para além dos movimentos lentos e discretos que o comum das gentes não se dá conta e que têm expressão quando os consideramos à escala geológica, em que a unidade é o milhão de anos, há a considerar as sugestivamente chamadas “cóleras da Terra”.

Estas cóleras resultam de movimentos da Terra, sejam internos e profundos, sejam superficiais. Uns e outros podem ter consequências catastróficas para a Humanidade. Então esta lembra-se que o seu planeta é algo de vivo, capaz de a perturbar e, mesmo, matá-la. Estão neste caso os sismos, as erupções vulcânicas, as deslocações de terras, as inundações, os tornados e os furacões.

Sabe-se que há zonas do planeta razoavelmente estáveis e que há outras partes em que os movimentos internos provocam catástrofes tais como terramotos e erupções vulcânicas. O modelo que hoje comanda a compreensão dos fenómenos geológicos em grande, a tectónica de placas, é um sistema unificador que procura explicar movimentos superficiais do nosso planeta por

causa internas. Assim os movimentos dos continentes são manifestações superficiais consequências de movimentos internos produzidos no manto superior.

Pode afirmar-se que a tectónica de placas nos permite desenhar como que uma geografia dos perigos.

O que é mais curioso é que os movimentos endógenos, no seio ou sob a crosta terrestre cujas velocidades são da ordem do centímetro por ano originam desastres que se manifestam em escalas de tempo do minuto, da hora ou do dia. É extraordinária a transferência de escala do tempo.

Vista de longe a Terra assemelha-se a uma bola, aparentemente sem relevo, ou seja as altitudes destes relevos não são importantes em relação ao raio da Terra. Os desníveis mais importantes são da ordem dos 10 km.

Estes relevos terrestres são fundamentalmente criados por duas causas: por um lado a colisão de placas litosféricas (v.g. os Himalaias), por outro lado as manifestações vulcânicas que promovem a ascensão do magma (v.g. os arquipélagos vulcânicos dos Açores, da Madeira ou de Cabo Verde).

Esta geração de relevo é contrabalançada pela sua destruição contínua devido à interacção da atmosfera e da hidrosfera com a litosfera por meio do ciclo da água. Ou seja, o relevo da Terra resulta de um enorme combate permanente entre a erosão que tende a transformar a Terra em uma bola lisa e os movimentos internos que originam as asperezas representadas pelos picos das montanhas e serras. É um processo geodinâmico que vem do fundo da geohistória, com acções dinâmicas alternantes e não coincidentes no tempo nem no espaço. Deste modo temos tido várias geografias correspondentes aos vários períodos da geohistória. A geografia actual não é mais do que um instantâneo da face da Terra na sua evolução de contínuo envelhecimento-rejuvenescimento temporo-espacial.

A primeira etapa da acção destrutiva da face da Terra é a alteração das rochas por meteorização.

Ao longo da história geológica foi-se verificando a alternância da criação dos relevos e da sua destruição, não simultaneamente, mas ora aqui, ora acolá!

Paralelamente aos fenómenos erosivos durante milhões de anos, tem havido a criação de montanhas. Só que a velocidade destas criações é muito diferente. A criação de relevos é muito mais rápida que a sua destruição.

Após a decomposição dos materiais pela meteorização, as rochas estão aptas a serem transportadas das zonas continentais mais elevadas para as áreas mais baixas, para as bacias de sedimentação onde os materiais serão depositados.

Eis como e porque o relevo da Terra está em evolução perpétua função da interacção, à superfície do nosso planeta, da atmosfera, da litosfera (os continentes) e da hidrosfera (cursos de água e oceanos).

A erosão nos e dos continentes remonta, avança regressivamente da foz dos rios para as suas nascentes. À medida que as zonas mais baixas vão ficando regularizadas o efeito erosivo vai subindo, remontando pelo curso da água.

Um outro aspecto é o que se refere à quantidade de sedimentos que são carreados para o mar pelos efeitos erosivos. O total de sedimentos levados até aos mares é da ordem de grandeza de 4 km<sup>3</sup>/ano.

Sucedem que estes dois fenómenos se dão a velocidades diferentes e que a criação de relevos é mais rápida do que a sua destruição. Em média pode dizer-se que um vulcão se forma em trezentos mil anos e uma montanha em três a cinco milhões de anos. Em contrapartida estes relevos são erodidos em trinta a cinquenta (mesmo cem) milhões de anos.

Outro factor relevante na erosão está ligado à vegetação. Com efeito a erosão depende da vegetação, em especial a erosão mecânica. Tenhamos em atenção que o solo é o que resta da erosão química e antes da intervenção da erosão mecânica. Um solo é uma fina película com espessura de cerca de um metro que recobre a Terra.

Se tivermos em consideração que a Terra tem um raio de 6 400 km e que a espessura média de solo é de 1 m, ele corresponde a uma epiderme, e é fonte de riqueza para o Homem.

Uma outra riqueza maior do nosso planeta, para além do solo, está no subsolo.

Verifica-se que o subsolo explorável não é profundo já que as maiores sondagens realizadas têm escasso número de quilómetros.

O Homem começou por explorar o sílex, a primeira grande matéria-prima usada como utensílio de guerra, de caça e doméstico. Durante alguns milénios os que dispunham de sílex, o exploravam e usavam convenientemente, dominavam os outros.

De entre os metais, foi o ferro o primeiro a ser descoberto e usado pelo Homem. Muito possivelmente por acaso o Homem descobriu como reduzir os óxidos de ferro vermelho dos solos lateríticos, tornando-se metalurgista. Mais misteriosa é a descoberta do bronze, envolvendo o cobre e o estanho. Entretanto o ouro faz a sua aparição na História impondo-se pelo seu brilho e inalterabilidade.

Verifica-se que só um restrito número de elementos existe no estado nativo. A maior parte ocorre como compostos sob a forma de sulfuretos, sulfossais, óxidos, etc. Em sùmula as jazidas dos minerais resultam da circulação das águas quentes no seio da Terra. Estas águas quentes colectam e dissolvem os metais que existem dispersos na crosta terrestre. Essas mesmas águas quentes transportam e precipitam de forma concentrada esses metais em locais privilegiados que funcionam muitas vezes como armadilhas que facilitam tais precipitações e concentrações.

Para além dos depósitos minerais metálicos, numa sociedade fortemente energívora como a nossa, ganha grande acuidade a existência de recursos minerais energéticos como o carvão, os hidrocarbonetos fósseis e o urânio.

O carvão esteve na base do enorme desenvolvimento económico da Europa central no século XIX. O carvão, tal como os fosfatos resultam de acidentes da sedimentação. Com efeito os fenómenos de sedimentação que originaram o carvão deram-se nas zonas privilegiadas do globo onde havia abundante vegetação brutalmente destruída e acumulada.

Outro recurso energético importante para a nossa civilização é o petróleo que resulta também da degradação de matérias biológicas antigas. Assim os jazigos petrolíferos situam-se em zonas intertropicais, já que são zonas de grande produtividade biológica. Depois é necessário que haja uma fonte de calor o que limita a sua repartição geográfica. Por fim são necessárias condições estruturais para que o petróleo armadilhado não se escape. Parece que a formação das montanhas e, em especial a produção de calor que originam, empurra à sua frente o petróleo.

O urânio é um metal que, como o ouro ou o cobre, se concentra em ambientes geológicos específicos.

Para além destes três recursos energéticos há que falar na água.

A água é a riqueza! Vimos como ela é um agente geológico erosivo poderoso. Mas também é a origem e o sustentáculo da vida. Daqui que o Homem continuamente, desde o fundo da História pesquise avidamente a água. O desrespeito do Homem pela preservação dos aquíferos tem preços elevadíssimos para ele próprio. Bem sabemos como o desrespeito pela preservação do ambiente e em especial pela água, seja ela nos seus escoamentos subaéreos, quer nos escoamentos subterrâneos, tem consequências terríveis. A Natureza revolta-se e o Homem sente-se hostilizado.

E posso bem recordar aqui o prémio Nobel Ramon y Cajal ao dizer que "la Naturaleza nos es hostil, porque no la conocemos; sus crueldades representan la venganza contra nuestra indiferencia. Escuchar sus latidos intimos con el fervor de apasionada curiosidad equivale a descifrar sus secretos, en converter la iracunda madrastra en ternissima madre".

E chegados aqui devemos abordar os climas da Terra e a sua correlação com a actividade antrópica.

Sabe-se que os climas variaram ao longo das eras geológicas e que vão continuar a variar no futuro. De momento encontramos-nos em pleno período interglaciar. A paleoclimatologia preocupa-se com a reconstituição dos climas antigos e ainda com o conhecimento das causas dos ciclos climáticos que a Terra tem conhecido.

Explicam-se as variações do clima pelas variações da iluminação solar que são devidas a modificações da inclinação do eixo de rotação da Terra e à geometria da sua órbita em torno do Sol. Contudo há alguém que entretanto chegou e tem atrapalhado as coisas. Esse alguém é o Homem que perturbou as condições naturais atmosféricas pela queima intempestiva de combustíveis fósseis. O aumento do teor em dióxido de carbono da atmosfera, que se tem acentuado durante os últimos cem anos, promoveu o aquecimento médio do globo terrestre.

Sem dúvida que no estudo da Geologia o aparecimento da Vida é algo de extremamente importante. Sabe-se que a Terra tem a idade de 4,5 mil milhões de anos. Todavia a vida organizada, comum hoje no nosso planeta, não tem mais do que 500 a 600 milhões de anos. Ou seja, durante cerca de três mil milhões de anos a vida balbuciou sobre a forma de algas, de vegetais pouco diferenciados e de seres muito primitivos como bactérias, antes de conseguir

organizar-se e evoluir, então, com celeridade. Há cerca de um milhão de anos, na caminhada evolutiva, aparece o Homem.

Esta evolução da vida foi acompanhada de uma oxigenação progressiva da atmosfera. A atmosfera ainda há dois biliões de anos era muita redutora, rica de CO<sub>2</sub> e pobre de oxigénio. A síntese clorofílica foi-se encarregando de consumir o CO<sub>2</sub> e de gerar o oxigénio. Então urge e impõe-se que encaremos, em conjunto, o sistema – Terra e o sistema – Vida, já que a vida só se pôde desenvolver, evoluir e diversificar à medida que a geração de oxigénio aumentava.

Mais do que o aparecimento do Homem, o que é verdadeiramente surpreendente é o aparecimento da Vida. Uma vez esta aparecida e desencadeada a evolução, já não é surpreendente o aparecimento de seres superiormente organizados.

O grande mistério do aparecimento da Vida é uma descontinuidade no trajecto espaço-temporal do nosso planeta. A experiência de Stanley-Miller já tem meio século. Ela consistiu em misturar gases simples em uma ampola (v.g. amoníaco, metano, água) e fazer passar descargas eléctricas. Como por milagre fabricaram-se, assim, as grandes moléculas constituintes da vida. Variantes desta experiência clássica mostram que é possível fabricar grandes moléculas a partir de diversos “caldos prébióticos” usando a acção energética dos raios infravermelhos, ou dos ultravioletas ou dos raios gama.

O grande problema está em conseguir moléculas que se reproduzam a elas próprias de maneira autónoma. Aqui reside o mistério da vida que só tem comparação com o aparecimento da consciência que leva à hominização. Os dois grandes saltos que na evolução do nosso velho planeta o marcam indelevelmente, são as faculdades de utilizar a energia para organizar a matéria, reproduzindo-a automaticamente, ou seja o aparecimento da força vital e a faculdade de reflectir, aprender e elaborar conhecimento. Ou seja, primeiro, o aparecimento da vida, depois, a capacidade de pensar.

Chegados aqui e tendo-nos dedicado ao passado da Terra, discorrendo sobre a sua constituição e evolução, é chegada a altura de reflectir sobre o seu futuro.

Possuímos, hoje, um corpus de conhecimentos que nos permitem encarar alguns cenários do futuro do nosso planeta nas próximas décadas de milhões de anos.

Assim, dentro de dez milhões de anos o Mediterrâneo não existirá, ficando a Europa e a África ligados. Israel ficará completamente separado do Egipto gerando-se entre eles um mar importante. Entretanto a África oriental, ao longo da linha dos grandes lagos africanos separar-se-á da África formando-se aí, um novo mar. A Austrália “subirá” rumo a norte e o Japão colar-se-á ao continente asiático. E poderíamos continuar nesta visão prospectiva. Do mesmo modo se pode perguntar que entretanto irá suceder ao Homem? Com certeza que irá também sofrer evolução mas nada podemos saber em que sentido.

Todavia se abandonarmos a escala geológica e nos detivermos na evolução do nosso planeta à escala da civilização humana algo de importante poderemos avançar.

O Homem que durante séculos respeitou e teve medo da Natureza está hoje em uma situação inédita. Pela primeira vez realiza que tem poder para desregular a Natureza. Do temor da Natureza, passou ao temor pela Natureza. O avanço civilizacional trouxe problemas cuja magnitude podem ultrapassar as capacidades de controlo do Homem. Referirei alguns: o problema dos resíduos gerados pela civilização humana, incluindo os resíduos nucleares, o problema do controlo da geoesfera fluida envolvente directa da litosfera, ou seja a qualidade da atmosfera terrestre e, por fim, o problema da água e da sua qualidade.

Estes problemas magnos chegam para perceber como o próprio Homem criou novos constrangimentos capazes de “mexer” com os dois acontecimentos magnos da evolução do nosso planeta: a vida vegetativa e a vida pensativa.

Detenhamo-nos um pouco sobre o que se está passando com a atmosfera terrestre. Tem-se assistido ao aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera como consequência da queima de combustíveis fósseis que cresceu espectacularmente com o advento do industrialismo.

O aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera conduz ao aumento da temperatura do globo pelo denominado efeito de estufa. Acresce que se sabe que o dióxido de carbono dissolvido na água é um factor relevante de meteorização química das rochas. Mas também acontece que o CO<sub>2</sub> pode ficar armazenado nos oceanos aquando da génese dos minerais carbonatados (calcite, aragonite e dolomite) das conchas. As plantas absorvem CO<sub>2</sub> e os animais rejeitam-no quando respiram. Não é perfeitamente conhecido o balanço geral destes fenómenos.

A Geologia mostra-nos que, à escala dos tempos geológicos, o teor de CO<sub>2</sub> da atmosfera tem tido flutuações consideráveis. Todavia o nosso planeta tem reagido a essas flutuações no sentido da diminuição da sua concentração. Não sabemos, contudo, os tempos de resposta a estas flutuações. Tudo indica que eles serão superiores, ao que pode tolerar o Homem e a sua civilização. Aqui reside o grande problema.

O aumento do teor de CO<sub>2</sub> da atmosfera, a destruição da camada de ozono, a queima dos combustíveis fósseis e a qualidade da água que circula na atmosfera e tomba sobre a Terra são problemas e fenómenos interligados que têm como causa principal e última, a actividade humana e em especial a actividade humana dos dois últimos séculos.

Com efeito o nosso planeta é único e pequeno e está sujeito à poluição atmosférica transfronteira. As grandes áreas florestais estão em regressão. Aumenta a poluição oceânica. A ideia de que os oceanos são imensos e inalteráveis é enganadora. Os mares não abertos, como o Mar Negro ou o Mediterrâneo estão muito poluídos. O mesmo sucede com as águas de circulação subaérea e o que é muito grave, com muitos aquíferos. Em muitas zonas do globo as chûvas são ácidas.

Todas estas modificações que o Homem foi introduzindo paulatinamente no nosso planeta estão a actuar diríamos a três níveis. Ao nível da vivência do próprio Homem, dificultando-lhe a subsistência; ao nível

da vida em si, já que se está colidindo com os pressupostos e garantias da sua existência e, por fim, ao nível da persistência dos próprios sistemas geológicos, por perturbações relevantes nas interações água-rocha e ar-rocha.

O Homem tornou-se o grande responsável pelo seu planeta e urge que tome consciência disso. A exploração do sistema solar ensinou-nos que não há planeta de substituição e que o nosso planeta tem um ritmo de evolução e de alternância de períodos de estabilidade e de instabilidade que é preciso conhecer e estudar para os prever, acompanhar e eventualmente explorar racionalmente.

E aqui voltamos ao problema de estabilidade vs. instabilidade do e no nosso planeta, bem como às questões da irreversibilidade dos fenómenos desencadeados e dos efeitos daí decorrentes.

A actividade humana vem-se repercutindo na evolução natural do nosso planeta de modo a pôr em causa o princípio das causas actuais definido por Charles Lyell há 150 anos. Com efeito o pensamento actualista que tem sido invocado para suporte de explicação dos fenómenos da Geodinâmica externa tem de ser devidamente balizado e repensado em função das influências antropogénicas. A influência da acção humana tem acelerado os processos erosivos pela desflorestação, pela drenagem artificial, pela dragagem de areias e cascalhos, etc..

A dinâmica da libertação, transporte e deposição de um elemento químico em ambientes superficiais terrestres é controlada pelas taxas de meteorização física e química das rochas. As taxas de meteorização são, por seu lado, função da exposição das rochas aos agentes de meteorização.

Um ciclo biogeoquímico global é um modelo conceptual dos fluxos dos elementos químicos ou dos seus compostos em ambientes superficiais terrestres. Estes fluxos de materiais à superfície da Terra são conduzidos por processos de natureza diversa tais como: forças físicas e tectónicas que controlam as formas das placas continentais; os principais processos climáticos que são responsáveis pelo fluxo global das águas; a distribuição da temperatura à superfície da Terra; os processos químicos e microbiológicos de que resultam a dissolução de algumas rochas crustais e a formação de componentes de rochas exógenas e o conseqüente transporte do material terrígeno continental para as bacias oceânicas. Todo este ciclo natural tem um registo temporal de referência geológica. As mudanças no número de vectores de fluxo e na sua grandeza que o Homem, pelas actividades industrial e agrícolas, introduziu traduzem-se em:

- i) modificações na transferência de carbono para a atmosfera
- ii) acumulação de metais no ambiente
- iii) acidificação da precipitação atmosférica e dos solos
- iv) concentração local de elevados níveis de radioactividade
- v) fertilização maciça dos solos
- vi) modificações nas proporções de terras de floresta e de pastagens.

Se tentarmos prever as consequências destas mudanças talvez possamos “medi-las” tomando dois ou três “parâmetros”, tais como:

- a desertificação
- o decaimento do património construído
- o problema da água.

Sobre estes “parâmetros” muito se tem escrito, investigado e prospectado. Vale a pena meditar sobre alguma informação disponível.

Os climas distribuem-se em função da orientação da esfera terrestre em relação aos raios solares. Dependem dos gradientes térmicos que se estabelecem entre as zonas polares e as zonas tropicais e entre as baixas e as altas altitudes. Estes gradientes mantêm as circulações atmosféricas e oceânicas.

Em grego a palavra clima significa inclinação. Já na Antiguidade se sabia do papel essencial das diferentes inclinações segundo as quais os raios solares atingem a Terra para a caracterização climática.

Os parâmetros principais dos climas são a pluviosidade, a temperatura e a humidade relativa do ar. Ou seja a latitude, a altitude e a distância ao mar de um local são determinantes na definição do seu clima.

Os climas mostram variações cíclicas como as que estão ligadas à precessão dos equinócios que induz variações climáticas sensíveis a causas acidentais ou acíclicas como as erupções vulcânicas e a inversão das circulações no Pacífico Sul (o tão célebre El-Niño).

Ao nível da Europa, sabe-se que no tempo dos gregos e dos romanos, o clima era bastante fresco e que houve um aquecimento posterior. Entre 1550 até meados do século XIX houve novo arrefecimento designado por “pequena era glacial”, em que o vale do Nilo e o Sahará conheceram grandes secas. Em seguida o clima europeu tornou a amenizar-se, conhecendo pelos anos 40 do século XX um ligeiro aumento da temperatura do ar.

Sabemos como as poeiras e gases vulcânicos residindo mais ou menos tempo na atmosfera funcionam de anteparo ao reaquecimento da Terra que arrefece enquanto que a estratosfera se reaquece. Assim, verificou-se que, entre 1900 e 1940, não tendo havido nenhuma erupção vulcânica de grande envergadura, se observou um aumento médio da temperatura do ar de 0,5°C. Em contrapartida, nas zonas sujeitas à influência do vulcão El-Chichon, no México, em 1982, registou-se um abaixamento da temperatura do ar de 0,4°C.

Compreendemos assim que a emissão dos mais variados poluentes antropogénicos para a atmosfera pode ter consequências não despreciables nas flutuações climáticas actuais.

Acresce que um problema que se nos põe está ligado à persistência dos oceanos na Terra comparado com a extrema secura de Marte ou de Vénus. Há o mistério da persistência cíclica do clima na Terra a despeito da contínua radiação calorífica do Sol. A Terra formou-se há cerca de 4,5 biliões de anos, e a atmosfera carregou-se de oxigénio há cerca de 2 biliões de anos. É a partir de então que se pode admitir uma evolução cíclica afectando os oceanos, a atmosfera e as terras emersas. Várias vezes no decurso

destes 2 biliões de anos, a Terra conheceu condições que não são as que conhecemos hoje. Várias vezes, no decurso destes 2 biliões de anos, a massa dos sedimentos foi reciclada. Quando se fala de ciclo quer dizer-se que várias vezes na história da Terra, acontecimentos semelhantes produziram-se ao mesmo tempo e se encontraram as mesmas situações.

E assim, hoje, ganha realce a hipótese de que a riqueza terrena em oxigénio e em água, ligada à relativa persistência de temperatura do ar estável podem estar relacionadas com a presença da vida e da sua interacção com o ambiente físico terrestre. Nasce, deste modo, a teoria Gaia que nos diz que o clima e a composição química da Terra são mantidos em homeostase durante longos períodos até que qualquer contradição interna ou força externa provoque um salto para um novo estado estável.

A evolução da superfície e da atmosfera da Terra é um facto certificado pelas análises geológicas. Mas esta evolução é causa ou é a consequência do desenvolvimento da vida? A primeira hipótese tem sido a aceite, mas Lovelock, nos princípios da década de 80 do século passado propôs a hipótese controversa de que os organismos vivos controlam a evolução dos oceanos, das terras e da atmosfera de modo a favorecer o seu próprio desenvolvimento a tal ponto que a própria Terra pode ser considerada um sistema vivo.

Na realidade não se vê qual poderia ter sido a origem do oxigénio atmosférico senão pelo metabolismo fotossintético. É provável que a atmosfera primitiva da Terra comportasse uma grande quantidade de  $\text{CO}_2$  devido ao vulcanismo intenso.

Se a fotossíntese pôde fixar massivamente o carbono na biomassa, uma grande quantidade de carbono foi igualmente fixada pelas precipitações no solo sob a forma de carbonatos e o fraco teor actual da atmosfera em  $\text{CO}_2$  pode ser explicado, em parte, pela forte baixa da actividade vulcânica.

A hipótese Gaia supõe que a atmosfera, os oceanos, o clima e a crosta terrestre estão regulados para manter um estado favorável à vida pelo comportamento dos próprios seres vivos. Ou seja: a temperatura do ar, o seu estado de oxidação, a acidez das águas, os tipos de solos, os fenómenos de alteração, evolução e génese das rochas sedimentares são constantes e esta homeostasia é mantida por processos de retroacção activa, determinados automaticamente e inconscientemente pela biota. A energia solar mantém condições favoráveis à vida que evoluem ao mesmo tempo que as necessidades variáveis da biota no decurso da sua evolução. Sendo assim, a vida e o seu ambiente estão estreitamente ligados e a evolução diz respeito a Gaia, como um todo e não aos organismos e ao ambiente tomados separadamente.

Com efeito as atmosferas de Marte e de Vénus são dominadas pela presença de  $\text{CO}_2$  com pequenas quantidades de oxigénio e de azoto. São atmosferas próximas do equilíbrio químico. Em contrapartida a Terra tem uma atmosfera dominada pelo azoto e pelo oxigénio. Uma comparação simples marca a diferença entre os dois

tipos de atmosferas: O ar da atmosfera terrestre funciona como a mistura gasosa que entra na câmara de um motor de explosão, ou seja é uma mistura de gases combustíveis. O ar das atmosferas de Vénus e Marte é como os gases de escape desse mesmo motor de explosão.

A atmosfera de um planeta é a sua face que nos indica, tal como para os homens, o seu estado de saúde. Podemos, inclusivamente, saber se ele está vivo, (contem vida), ou está morto (não contem vida).

A vida, no acto da fotossíntese, dissocia o  $\text{CO}_2$  em carbono e oxigénio. Se um pouco de carbono for absorvido pelas rochas da crosta, o saldo é nitidamente positivo para o oxigénio. Por cada átomo de carbono enterrado, restam dois átomos de oxigénio e correspondem-lhe quatro átomos de hidrogénio ou duas moléculas de água.

A passagem dos ambientes anóxicos a ambientes óxicos foi uma etapa crucial da História da Terra. Entre o Arcaico e o Proterozóico, o aparecimento do oxigénio como gás atmosférico dominante foi o acontecimento que marcou profunda modificação geofísica do nosso planeta com o desenvolvimento de uma nova química à superfície da Terra e na atmosfera.

Numa visão sintética diremos que, desde que se formou o nosso planeta, há 4,5 biliões de anos, que se gastaram cerca de 25% deste tempo até que aparecesse a protovida. Ela exigiu a formação de oxigénio na atmosfera de então que era particularmente rica de  $\text{CO}_2$ . Foram gastos cerca de 56% da idade da Terra para que a sua atmosfera se tornasse oxigenada. Todavia para que a vida se organizasse complexamente, ganhasse os continentes e se diversificasse nos reinos animal e vegetal que hoje proliferam, gastou-se 87% do tempo de existência do nosso planeta. Que longuíssima caminhada para oxigenar a atmosfera e para diversificar e estruturar a vida! Vida esta que depende fundamentalmente da quantidade de oxigénio à sua disposição. Se quisermos usar, ainda, os valores percentuais, em relação à idade da Terra, para balizar o advento do Homem, talvez melhor, da faculdade de reflectir, esta terá exigido uma caminhada de quase 99,98% da existência da Terra!

O nosso planeta está nas mãos deste recém-chegado, que procura ser um novo-rico, desbaratando aquele oxigénio que tanto tempo levou a gerar, pela própria actividade vital que o precedeu.

A Terra é o melhor dos mundos para os que se lhe adaptam. A Geoquímica mostra que a crosta terrestre, os oceanos e o ar são largamente modificados pela presença dos seres vivos que tiveram papel fundamental na sua génese.

No início da história da Terra, antes da existência da vida, a Terra com a sua atmosfera e os seus oceanos evoluiu apenas sob a acção das leis da física e da química. Evoluiu para um estado estável e sem vida de um planeta em quase-equilíbrio. A dada altura houve um estágio favorável à vida. A sua existência afectou o ambiente da Terra a ponto de evitar a sua corrida para o equilíbrio. Nesta altura os organismos vivos, as rochas, o ar e os oceanos, formam uma nova entidade: a Gaia. Eis porque não basta afirmar que os organismos melhor adaptados têm mais possibilidade de ter descendência. É necessário acrescentar

que o crescimento de um organismo afecta o seu ambiente físico e químico. A evolução das espécies e a evolução das rochas estão estreitamente associadas, formando um processo indivisível.

Chegado aqui, percorrida, ainda que, de leve, a vivência do nosso planeta, admitida a interdependência entre geologia e biologia na sua própria evolução, talvez seja necessário procurar a resposta para algumas questões que ficam em aberto, mas para as quais há que procurar soluções:

- até que ponto o geossistema actual é estável?
- que o pode perturbar?
- os efeitos das eventuais perturbações podem ser invertidos?
- sem os ecossistemas naturais actuais o nosso planeta teria este clima e a sua crosta teria a composição actual?

Verifica-se, pois, que a geologia nos permite sentir a instabilidade dos sistemas melhor ordenados, a fragilidade dos edifícios mais sólidos e o carácter provisório e contingente de todas as coisas criadas. Ela dá-nos a capacidade de compreender que tudo passa no Universo e que o próprio Universo está sujeito ao tempo.

A Terra ensina-nos um cântico de glória ao Acaso feito Certeza, para uns, a Deus para outros. É o cântico das gemas esplêndidas com o seu jogo com a luz, e dos minerais opacos onde se esconde o metal, é o cântico dos cristais onde nada foi deixado ao acaso e dos estratos sedimentares onde se acumulam restos de biliões de seres, é o cântico das rochas cristalinas geradas no seio da crosta sob pressões fabulosas ou que foram lavas de vulcões hoje desaparecidos, é o cântico das planícies que ainda ontem foram mares e que amanhã conhecerão, de novo, as vagas dos oceanos, é o cântico das montanhas, autênticas catadupas de pedras sobrepostas.

Quando alguma vez se teve, sob os olhos tais espectáculos, quando se foi iniciado nestas maravilhas, pensamos sempre nelas com a reconfortante sensação de observar o Belo. Mas também nos dão a noção de tocarmos o Desconhecido, o Mutável, o Instável. Estamos sempre a descobrir novas veredas que nos conduzem mais além onde há novos mistérios a desvendar.

No fundo, o que é importante na vida é nunca estar satisfeito consigo próprio, nem com os conhecimentos que se têm. E procurar sempre, esforçar-se sempre e subir sempre. Isto é válido para a Ciência, em geral, mas muito especialmente para as Ciências da Terra.

Na realidade a Ciência tem procurado, passo a passo, desvendar os mistérios do nosso planeta, da nossa vida, do Universo. E cada um dos investigadores é, em certa medida, o revelador de um domínio misterioso, embora os arcanos profundos deste domínio devam continuar a ser-lhes interditos.

Para os amantes das Ciências da Terra um dos grandes mistérios no qual tudo o que é mutável e instável se projecta, fluindo, é o tempo. Mais do que o espaço ou o

movimento, para nós é o tempo a noção fundamental que mede a duração de tudo o que é mutável.

O tempo apenas supõe a mudança. Praticamente avaliamo-lo pelo movimento dos astros. Todavia ele existiria mesmo que não houvesse astros, nem espaço, desde que existisse um ser que não fosse imutável.

Pode-se encarar o tempo como a quarta dimensão do Universo. Mas entre esta quarta dimensão e as outras três que definem o espaço, há uma diferença capital: o deslocamento sobre a dimensão tempo só se faz em um único sentido e com uma velocidade uniforme. Não se pode parar na escala do tempo, nem diminuir a sua velocidade, nem aumentá-la, nem voltar para trás.

Poincaré ao discorrer sobre “O valor da Ciência” salienta que foi a Astronomia que nos mostrou o carácter geral das leis naturais, foi ela que nos fez ver a pequenez da Terra no sistema solar e que este sistema é apenas um ponto imperceptível nos espaços infinitos. Mas se a Astronomia nos levou às margens dos espaços infinitos, a Geologia conduziu-nos à borda dos abismos ilimitados da duração. Alargou a noção de tempo, como a Astronomia alargou as noções de espaço e de movimento. Estes alargamentos ensinaram-nos o culto e o desejo do Infinito que está imanente no Homem.

Mas as Ciências da Terra vão ainda mais longe, ensinando-nos que nada, no mundo físico que nos rodeia, é eterno.

E recordo o belo estudo de Termier, professor da École des Mines de Paris, sobre o tempo: (cito) “Oh humanidade que passas, nada, salvo Deus, é eterno, e o Universo que te envolve também passa, como tu. Está atenta, escuta e vê: vais ver as coisas inanimadas esboroarem-se, vais vê-las envelhecer, apagarem-se, desaparecer como os seres vivos. O mundo está cheio de ruínas, o mundo é feito de ruínas. Mas como a escala da duração é diferente para o Universo e para ti”.

É ainda Pierre Thermier que diz que a geologia é a irmã do tempo. É ela que sabe o segredo inimaginável da aparição da vida. É ela que escreverá, com a sua mão tranquila, a última página da história da Humanidade.

A meditação sobre o tempo esboçada e familiar aos cultores das Ciências da Terra, predispõe estes a tornarem-se filósofos criando-lhes a necessidade do eterno, a sede inextinguível da eternidade, o desgosto por tudo o que passa, a nostalgia de um paraíso perdido de onde o tempo fosse banido.

No entanto como bem diz a poetisa Sofia de Mello Breyner:

“Os anos são degraus, a Vida a escada.  
Longa ou curta, só Deus pode medi-la.  
E a Porta, a grande Porta desejada,  
Só Deus pode fechá-la,  
Ou pode abri-la”

Esta meditação é também salutar para todos os homens. O tempo que a maior parte considera como um inimigo, como o único inimigo, deverá ser encarado, por todos nós, como um amigo seguro e doce, como o mensageiro fiel da Esperança.

Parafrazeando António Gedeão direi, e em especial aos que me têm acompanhado na minha caminhada nesta Escola:

“Toda a esperança que tive a dividi por quantos a quiseram receber.”

É esta a mensagem que vos deixo, passado parte do meu tempo e no limiar da mudança para outro tempo: de qualquer modo sempre tempos de Esperança.

É que segundo o versículo do Eclesiástico “Quando o homem tiver acabado, estará no começo; e quando cessar, ficará perplexo”.