



ASTROBIOLOGIA UMA CIÊNCIA EMERGENTE



ORGANIZAÇÃO:
DOUGLAS GALANTE
EVANDRO PEREIRA DA SILVA
FÁBIO RODRIGUES
JORGE E. HORVATH
MARCIO G. B. DE AVELLAR

FUTURO DA VIDA NA TERRA E NO UNIVERSO

CAPÍTULO 15

Douglas Galante, Gabriel Guarany de Araujo,
Marcio G. B. de Avellar, Rosimari Alves do Rosário,
Fabio Rodrigues e Jorge E. Horvath

A evolução da vida na Terra está, desde seu início, intrinsecamente ligada a eventos “evolutivos” astronômicos e planetários em nosso ambiente astrofísico, a começar pela região galáctica “privilegiada” na qual se encontra o Sistema Solar. Os elementos químicos em que a vida se baseia, e mesmo a abundância de cada um deles, é resultado de seus processos cósmicos de síntese, do Big Bang às estrelas, supernovas e raios cósmicos; a formação dos aglomerados de galáxias, das próprias galáxias e, por fim, dos sistemas planetários não é mais que um resultado da evolução natural da distribuição de massa no Universo; a disponibilidade de moléculas orgânicas na Terra primitiva é resultado dos processos químicos que ocorrem no meio interestelar, no disco protoplanetário e na superfície do próprio planeta, nos processos de química prebiótica. A origem da vida parece ser o simples resultado da combinação de todos os processos anteriores e da existência de

condições adequadas em nosso planeta, refletindo, assim, em última instância, apenas as leis matemáticas, físicas e químicas de nosso Universo (Pross, 2012).

Daquele momento inicial em diante, no qual o primeiro ser vivo emergiu do não vivo, toda a evolução da vida no planeta seguiu o processo de evolução darwiniana, respondendo, a cada instante, a processos interno-biológicos e externo-ambientais, fazendo que a biodiversidade florescesse e se estendesse por praticamente todos os ambientes do planeta, do fundo dos oceanos ao alto das montanhas e atmosfera – havendo um conjunto *mínimo* de condições, haverá vida.

Ao longo de seus quase 3,3 bilhões de anos documentados (de forma consensual) na Terra pelos cientistas, a vida passou por processos de extinção e especiação, às vezes com influência óbvia de eventos externos (Knoll, 2015). O fato é que a vida tem respondido às mudanças no ambiente do planeta, e muitas vezes são respostas às mudanças em nossa vizinhança astrofísica. E esse processo de resposta biológica continuará no futuro, conforme a evolução do Sol, de nossa atmosfera e do planeta como um todo, mesmo que novas extinções e especiações aconteçam, até que, em um futuro distante, atinjamos a total inviabilidade da vida na Terra, ao menos como a conhecemos.

Na Figura 15.1, apresentamos alguns dos eventos naturais que alterarão drasticamente as condições de nosso planeta e, provavelmente, influenciarão o curso da evolução biológica. No entanto, o processo de evolução não é determinístico; portanto, não podemos dizer como a vida irá responder a essas mudanças com certeza, e nem devemos ter essa pretensão. Muitas vezes, ao longo desses bilhões de anos, a vida apresentou soluções para situações aparentemente sem saída, e talvez isso volte a acontecer no futuro.

Apesar de muitas espécies terem se extinguido, cada extinção abriu nichos para novas espécies se estabelecerem desenvolvendo novas soluções evolutivas. Portanto, devemos enxergar esses processos como positivos e mesmo necessários para a manutenção, a longo prazo, da vida no planeta.

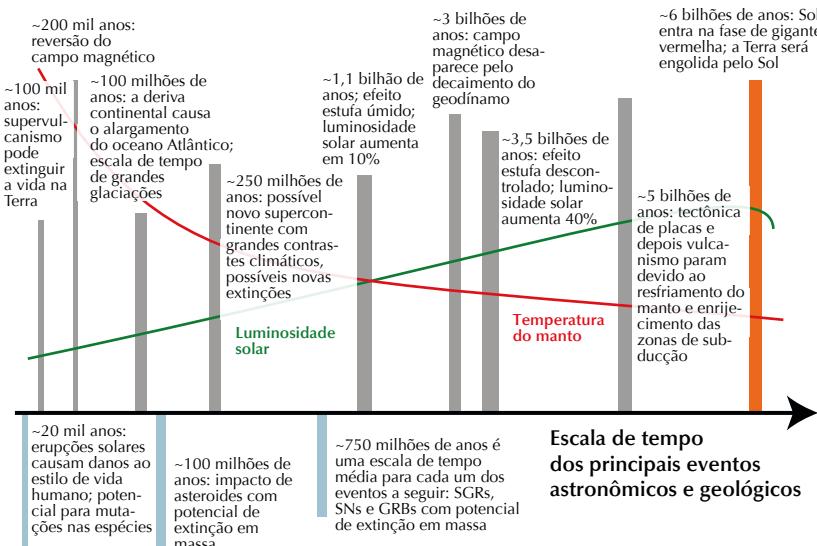


Figura 15.1. Escalas de tempo aproximadas para os eventos descritos no texto. Fonte: Adaptado de Pross (2012)

Para facilitar a discussão das escalas de tempo e da periodicidade dos eventos, separaremos, por ora, eventos em escala planetária de eventos em escala astronômica.

Eventos em escala planetária

O impacto dos supervulcões

Supervulcanismo é uma subclasse do vulcanismo, no entanto, de proporções muito maiores.

O cenário típico por trás desse tipo de vulcanismo é o de uma caldeira imensa, chegando a 50 quilômetros de diâmetro ou mais, sob a superfície, cheia de rocha derretida a altas pressões. O exemplo atual mais espantoso de um supervulcão se encontra sob o parque de Yellowstone, nos EUA, com um potencial para, no futuro, cobrir de lava boa parte do sudoeste norte-americano. Outros supervulcões são conhecidos na Califórnia, Nova Zelândia, Europa e Indonésia. Neste último país, o supervulcão Toba explodiu violentamente há 74 mil anos, com impactos globais mensuráveis, como

a diminuição da temperatura e extinções significativas da fauna e flora, incluindo, possivelmente, a quase extinção dos humanos.

A escala de tempo, ou periodicidade, de erupção de alguns supervulcões tem sido de cerca de 500 mil anos, mas levando-se em conta que há diversos espalhados pelo globo, o intervalo entre grandes erupções é bem menor, cerca de 100 mil anos. A erupção de um supervulcão pode lançar lava e detritos a uma altitude de 50 quilômetros de altura na atmosfera, fazendo que a vida sofra um grande impacto, em especial a macrofauna e flora, em um raio de milhares de quilômetros, cobrindo imensas áreas com lava.

A quantidade de poeira no céu poderia levar a um “inverno vulcânico” – diminuição da luz solar por um longo período de tempo, provocando quedas na temperatura da Terra. Além disso, com a diminuição da radiação solar, a fotossíntese pode ficar seriamente comprometida, com consequências para a cadeia alimentar dependente dos organismos fotossintetizantes (como ocorre em grande parte dos ecossistemas terrestres). Isso já foi observado em alguns eventos por meio de uma incursão negativa no δC_{13} , provavelmente associada à diminuição da produtividade biológica primária.

Registros de um evento desse tipo foram encontrados na região ártica do planeta, na Sibéria, e foi proposto como uma das possíveis causas para o maior evento de extinção em massa do planeta, a extinção do Permiano, há 250 milhões de anos (impactos de asteroides também são considerados uma hipótese alternativa ou complementar). Nesse evento, cerca de 95% de todas as formas de vida marinha e 70% da vida dos continentes anteriormente encontrada no registro fóssil desapareceu. Por exemplo, os trilobitas se extinguiram nesse evento, após quase 270 milhões de anos dominando os oceanos terrestres.

Essa grande extinção abriu caminho para a era dos dinossauros, com um subsequente aumento da biodiversidade no planeta.

O destino do campo magnético

Um dos primeiros processos geológicos em escala global que deve ocorrer é a reversão do campo magnético da Terra. Embora a reversão seja errática, sem período definido, dados das reversões

documentadas pelo estudo do paleomagnetismo (a última foi há 780 mil anos) sugerem um espaçamento temporal médio de 200 mil anos para esse fenômeno. O processo parece ser gradual, com uma diminuição da força do campo com o tempo, até um mínimo, voltando a aumentar em seguida, com sentido oposto.

O campo magnético é uma das proteções que temos contra a radiação na forma de partículas carregadas vinda do espaço (vento solar e raios cósmicos) e, ficando mais fraco, o planeta ficará vulnerável aos seus efeitos.

Apesar disso é possível que o campo residual já seja o suficiente para evitar grandes danos, sejam eles biológicos ou atmosféricos. Os impactos biológicos desse tipo de evento ainda são controversos, mas podemos imaginar que algumas espécies que usam o campo magnético como referencial geográfico sejam prejudicadas, e talvez alguns organismos expostos na superfície possam acumular doses de radiação mais elevadas, durante o período de diminuição/inversão do campo.

δC_{13} : Os átomos de carbono disponíveis na natureza existem em diferentes isótopos, ou seja, o mesmo elemento químico com diferente número de nêutrons. Em especial, existem 16 diferentes isótopos de carbono, de massa 8 a 23, mas apenas C^{12} e C^{13} são estáveis. Os processos biológicos que usam carbono ocorrem com maior eficiência para o isótopo estável mais leve, C^{12} , portanto, a matéria orgânica (de origem biológica) costuma apresentar um ligeiro enriquecimento natural nesse isótopo em relação à matéria inorgânica – a cada 1.000 átomos de carbono, ela tem 25 a mais de C^{12} , um número que pode ser medido em laboratório. Quando dizemos que ocorreu uma incursão negativa no δC^{13} estamos dizendo que a proporção de átomos C^{13} para C^{12} foi inferior ao de um determinado padrão, o que, em geral, indica que menos C^{12} estava sendo sequestrado da atmosfera pelos produtores primários (organismos fotossintetizantes). O caso contrário, em geral, está associado ao aumento da atividade de fotossintetizantes – por exemplo, no caso de aumento ligeiro da temperatura de algumas regiões.

O fato é que a Terra já passou por reversões magnéticas e a vida continuou, mas é interessante se perguntar quais os impactos biológicos desses eventos, mesmo sendo improvável uma extinção em massa.

Muito mais adiante no futuro, em algum momento ainda impreciso, a Terra perderá seu campo magnético de maneira definitiva, o que será muito mais grave.

Sem sua magnetosfera, a atmosfera terrestre receberá o impacto direto das partículas do vento solar e dos raios cósmicos (Figura 15.2), sendo lentamente degradada e perdida para o espaço, em um processo similar ao que aconteceu em Marte. Isso ocorrerá por uma série de fatores interligados, começando no núcleo sólido do planeta. Ao contrário do que muitas vezes nos foi ensinado, o campo geomagnético não é gerado por depósitos de material magnético no planeta (um grande imã subterrâneo), mas sim por um processo de dínamo eletromagnético, onde cargas elétricas em movimento geram o campo magnético, como em um eletroímã.

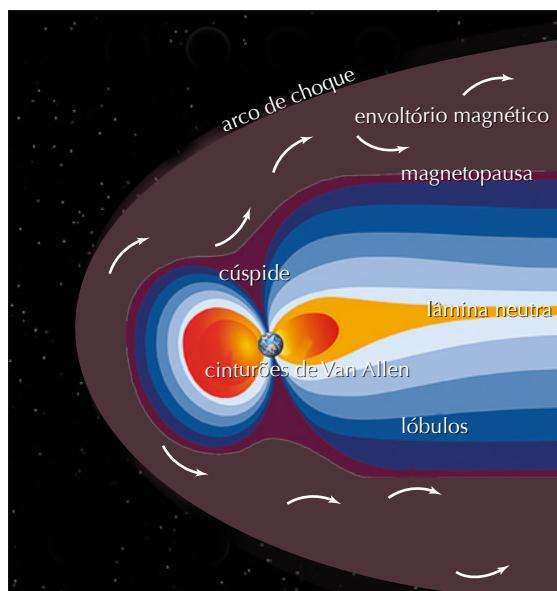


Figura 15.2. A magnetosfera terrestre forma um escudo protetor ao redor do planeta, evitando que partículas de alta energia do vento solar e raios cósmicos atinjam a superfície e destruam a atmosfera. Fonte: Adaptado de Dennis Gallagher / Wikimedia Commons

A fonte desse campo é a interface entre o núcleo sólido e o núcleo líquido da Terra, uma região onde o material que compõe o planeta está altamente aquecido, parcialmente ionizado e se movimentando rapidamente, como resultado da rotação do planeta, da hidrodinâmica do material e de processos caóticos locais. O movimento é variável com o tempo, o que resulta em um campo não estático (que podemos acompanhar nos mapas geográficos, nos quais as linhas de declinação magnética têm de ser atualizadas de tempos em tempos – os polos magnéticos mudam de posição).

À medida que a Terra perde calor e seu interior se resfria, o núcleo interno sólido aumenta de tamanho, sendo acrescido pela solidificação do núcleo externo líquido. Embora conheçamos a termodinâmica, não sabemos ao certo as temperaturas no interior da Terra nem os mecanismos dominantes na transferência de calor (por exemplo, convecção ou condução). Acredita-se que, atualmente, a convecção domine a transferência de calor no entorno do núcleo, mas conforme o manto se resfria, a convecção pode cessar, e a condução passaria a ser o mecanismo dominante. Isso poderia desligar o geodínamo e, consequentemente, o campo magnético terrestre. Enquanto isso, no manto (viscoso na escala de tempo geológica), a convecção (e, portanto, a tectônica) poderia continuar sendo efetiva por ainda cerca de 3 bilhões de anos.

Deriva continental e tectônica de placas: mudando a face da Terra

Em uma escala de tempo de centenas de milhões de anos, os continentes passam por grandes mudanças em sua organização, ora juntos, formando supercontinentes como os antigos Rodínia, Gondwana e Pangeia, ora separados, como atualmente.

Esse movimento, chamado deriva continental, é causado pelo fato de a crosta terrestre, sólida, ser feita de placas separadas que boiam sobre o manto que tem movimentos gerados principalmente por convecção do material.

Por uma combinação dos efeitos do movimento de convecção do manto, rotação da Terra, peso da própria crosta, sucção nas

zonas de subducção e outros, as placas são arrastadas ao longo do tempo, de uma maneira difícil, senão impossível, de prever, modificando a organização dos continentes e trazendo consequências globais para o clima e para a vida.

A variação na distribuição dos continentes altera, por exemplo, as correntes marinhas, que sabemos terem grande influência no clima. O aumento de massas de terra na região dos continentes também diminui o albedo do planeta (que é a refletividade da superfície – quanto mais escuro, menor o albedo, e mais radiação solar a superfície absorve), podendo assim aumentar a temperatura global.

O caso contrário também é válido – se os continentes se concentrarem na região polar, que recebe normalmente menos luz, as temperaturas do planeta tendem a diminuir.

Assim, o clima global é altamente dependente do movimento dos continentes, bem como o clima local, pois um supercontinente tem, em geral, um grande deserto em seu interior, por causa da distância das massas de água, enquanto vários continentes menores são mais úmidos. Dessa maneira, os habitats disponíveis no planeta foram diferentes em momentos diferentes da história geológica.

Além disso, durante o processo de tectonismo, o fundo oceânico é reciclado constantemente em uma escala de tempo de cerca de 100 milhões de anos. Novo material é expelido nas cristas meso-oceânicas (como a que existe no oceano Atlântico), empurrando o fundo oceânico em um ritmo de alguns centímetros por ano para as laterais da crista, literalmente abrindo o oceano.

Ao ser formado, esse fundo oceânico possui cerca de dez quilômetros de espessura e, conforme segue se resfriando, aumenta de espessura chegando até centenas de quilômetros, quando afunda em direção ao manto nas zonas de subducção, gerando as regiões mais profundas que conhecemos, como a Fossa das Marianas. Esse processo de reciclagem é extremamente importante, pois é fundamental no ciclo do carbonato-silicato, o qual é responsável, em parte, pela estabilização da temperatura do planeta.

Organismos vivos, ao sequestrarem o carbono da atmosfera (na forma de CO₂, para a fotossíntese), em especial organismos marinhos, acabam diminuindo a quantidade desse gás na atmosfera. Como o CO₂ é um dos causadores do efeito estufa que mantém a temperatura da Terra (nem todo efeito estufa é ruim, se não fosse por esse efeito, nosso planeta seria cerca de 20 °C mais frio), a diminuição sem controle do gás na atmosfera poderia levar rapidamente a uma glaciação global. No entanto, conforme os organismos morrem e caem no fundo oceânico, esse carbono é levado para o manto, reciclado pelas altas temperaturas e expelido pelos vulcões, retornando assim para a atmosfera. Dessa maneira, a concentração do gás na atmosfera permanece constante com o tempo.

A deriva continental parece ter também papel importantíssimo na evolução da vida do planeta, e talvez seja mesmo necessária para seu surgimento, evolução e manutenção no planeta. Conforme a configuração geográfica da Terra varia com o tempo, populações de organismos são expostas a diferentes condições e pressões seletivas; algumas vezes são divididas e isoladas por longos períodos e depois novamente reunidas. Esses processos são importantes para que ocorram os eventos de especiação e extinção, e talvez, sem eles, não houvesse a biodiversidade que hoje encontramos em nosso planeta.

Apesar de o fenômeno de deriva ser gradual e constante, grandes mudanças acontecem quando ocorrem separações ou encontros de placas e continentes, sendo razoavelmente regulares, na escala de centenas de milhões de anos. A própria separação da Pangeia ocorreu, aproximadamente, na mesma época da extinção do Permiano, sendo que alguns cientistas propõem que haja uma correlação entre os dois eventos, talvez pela diminuição da produtividade primária (atividade de organismos fotossintetizantes) e pela mudança da configuração das áreas costeiras nesse período.

Por esse motivo, apesar de a tectônica de placas poder causar grandes extinções, ela parece ser um item importante para garantir a habitabilidade de um planeta. No entanto, mesmo na Terra ela não será eterna – com o resfriamento do interior do planeta, talvez

pelos próximos 5 bilhões de anos a mobilidade das placas irá diminuir até que esse movimento cesse por completo e, com ele, a reciclagem do fundo oceânico, do carbono atmosférico e a criação de novas grandes barreiras geográficas. Essa nova realidade certamente irá criar grandes desafios para a vida e eventualmente uma nova grande extinção.

O aquecimento global

Apesar de nosso Sol estar em um período de estabilidade em sua evolução, conhecido como sequência principal, ele continua mudando, e grandes alterações climáticas são esperadas nesse processo.

Nossa atmosfera possui muitos tipos de gases do efeito estufa, sendo os principais o vapor de água, o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4). O princípio do efeito estufa aqui na Terra é que o equilíbrio entre a radiação absorvida (no visível) e emitida (no infravermelho) pelo planeta de volta ao espaço é quebrado. Isso acontece porque esses gases absorvem a radiação infravermelha da superfície terrestre, e a reemitem, fazendo a temperatura aumentar, mas o fluxo emitido para o espaço diminui ou fica constante.

Uma teoria razoavelmente bem estabelecida é a teoria do efeito estufa descontrolado. Conforme a superfície esquenta, a atmosfera se torna mais densa com vapor de água, o que limita a quantidade de radiação térmica que pode ser emitida para o espaço. Assim, a temperatura superficial aumenta muito. Em termos práticos, para que esse efeito seja acionado, o fluxo de radiação emitido em infravermelho deve ser maior que certo limite, chamado troposférico, calculado, em um modelo simples, em cerca de 290 W/m^2 (atualmente a Terra emite cerca de 240 W/m^2).

Ponto interessante é que a adição de CO_2 não leva diretamente ao aumento desse fluxo, a despeito dos intensos debates sobre a ação humana no aumento da concentração desse gás. O mais importante para o efeito estufa parece ser o vapor de água: conforme a superfície esquenta, mais vapor de água é liberado dos oceanos para a atmosfera, e mais absorção da radiação

infravermelha por esse gás acontece, aumentando ainda mais a temperatura.

Em um modelo simples, mantendo as condições da Terra atual, o efeito descontrolado começaria quando a temperatura da superfície atingisse cerca de 325 K ou 52 °C (lembrando que a temperatura média da Terra atual é 15 °C).

Dependendo apenas da evolução do Sol, especula-se que esse ponto está há cerca de 3,5 bilhões de anos no futuro, quando o Sol tiver aumentado sua luminosidade cerca de 50%. Uma das consequências desse tipo de efeito estufa é a evaporação total dos oceanos, mas não imediatamente: o aumento de vapor de água na atmosfera causará, em um primeiro momento, o aumento do ponto de ebulação da água. Teremos água líquida até que a temperatura atinja o valor crítico de 647 K ou 374 °C. A maior parte da vida da superfície pode estar perdida nesse momento, e se alguma vida marinha conseguir se adaptar a essas temperaturas, não será por muito tempo. A partir desse ponto, a temperatura fará que os oceanos se evaporem, e a Terra provavelmente ficará totalmente estéril. O vapor de água na atmosfera, por efeito da radiação, sofrerá foto-dissociação, e a água será perdida para o espaço. Esse aquecimento global desenfreado cessará quando a temperatura atingir 1.400 K ou 1.127 °C, uma nova janela de equilíbrio radiativo. Mas, nesse ponto, nosso mundo estará novamente sendo coberto por oceanos de magma.

Se tudo isso parece um futuro apocalipse inexorável, é preciso ficarmos atentos para um estado climático intermediário chamado efeito estufa úmido, que pode acontecer bem antes (isso mudaria um pouco o efeito descontrolado, principalmente no quesito “início a uma dada temperatura”), com escala de tempo estimada em 1,1 bilhões de anos, quando o Sol tiver aumentado 10% sua luminosidade.

No efeito estufa úmido, o vapor de água é o maior constituinte da troposfera, e a estratosfera torna-se mais úmida. A tropopausa, camada entre a troposfera e a estratosfera, move-se para cima, elevando-se conforme a temperatura aumenta. Esse tipo de efeito

estufa, entretanto, é estável, embora suas consequências sejam drásticas para a vida.

Três consequências iniciais forçarão a vida a se adaptar: enfraquecimento do gradiente de temperatura latitudinal (degelo) e consequente mudança da circulação atmosférica; mudança na química da estratosfera; destruição da camada de ozônio, entre outras coisas, por radicais livres advindos da quebra das moléculas de água.

Caso consigamos evitar, usando a geoengenharia, por exemplo, esse destino de efeito estufa intermediário, lembremos que o efeito estufa descontrolado pode ser inevitável e outros eventos em escala planetária acontecerão com potencial para extinguir a vida na Terra.

Eras glaciais: na solidão do gelo

Eras glaciais são eventos nos quais a Terra tem uma brutal queda de temperatura, recobrindo uma grande parte da superfície do planeta com gelo e neve (teoria da Terra bola de neve). No último bilhão de anos, a Terra passou por seis períodos documentados como esse, com uma frequência temporal estimada em cerca de 150 milhões de anos. São períodos de frio intenso com pouca variação climática que podem durar milhões de anos.

Também estão relacionadas com os maiores eventos de extinção em massa na história da Terra, extinguindo muitas famílias e gêneros de organismos, em uma espécie de reação em cadeia: quando o gelo recobriu os oceanos até muito perto da Linha do Equador, os organismos fotossintetizantes marinhos foram muito prejudicados, já que a luz solar fora bloqueada. Como a fotossíntese é a base de grande parte das cadeias alimentares terrestres, um bloqueio da luz solar diminui muito a quantidade de energia disponível para a vida. Essa diminuição brutal na produtividade orgânica é vista no registro geológico como uma incursão negativa no δC^{13} (ver Quadro), e pode estar relacionada com o desaparecimento de espécies que necessitam de grande aporte de energia. Além disso, os eventos

de glaciação podem estar relacionados a grandes variações nos níveis oceânicos e nas correntes marinhas, eventos que podem modificar profundamente o clima, a química e a biologia do planeta, em uma escala de tempo muito rápida. As causas das eras glaciais não estão totalmente estabelecidas, mas diversos fatores contribuem para seu início: além de ciclos solares, contribuem também mudanças no eixo e órbita da Terra, conhecidas como ciclos de Milankovitch, movimentação de placas tectônicas, expulsão de particulados pelos grandes vulcões ou impactos de meteoros que bloqueiem a luz solar, além de mudanças na composição da atmosfera. Mesmo eventos de aquecimento global podem gerar glaciações, pois com o aquecimento há um aumento nas precipitações – tanto de chuva quanto de neve – e nas áreas cobertas por neve, o que aumenta o albedo do planeta, a reflexão da luz solar e diminui a quantidade de calor preso na superfície. Como se pode ver, há muitos parâmetros envolvidos na geração de um evento de glaciação, o que os tornam muito difíceis de prever.

A última dessas grandes eras glaciais ocorreu há cerca de 60 milhões de anos, pouco depois da extinção dos dinossauros. Além dessas grandes eras glaciais, ocorreram na Terra pequenos períodos glaciais, nos quais a temperatura caiu e uma camada de gelo e neve cobriu parte da superfície da Terra. Esses períodos têm escala de tempo de 50 a 100 mil anos e podem durar poucos milhares de anos. O último desses períodos ocorreu há 20 mil anos, tendo durado aproximadamente 8 mil anos. Esses eventos menores normalmente não foram associados a grandes eventos de extinção, mas podem causar grande estresse biológico nos organismos, principalmente nos que vivem na superfície.

Eventos de escala astronômica

Explorões estelares

Talvez tão importante quanto o impacto de meteoros são os efeitos de eventos astrofísicos de alta energia, muito menos conhecidos: as

explosões de supernova, os surtos de raios gama e os soft gamma repeaters, além das erupções solares. Esses quatro tipos de surtos explosivos de radiação vindos do espaço podem causar sérios danos à vida na Terra e até mesmo podem ter tido papel importante em eventos de extinção em massa, uma vez que podem ter um efeito ionizante na atmosfera, alterando profundamente sua química.

Em termos gerais, essa radiação quebraria a ligação N₂, que compõe cerca de 80% da atmosfera. Nesse processo, muitos tipos de óxidos de nitrogênio, NO e NO₂, por exemplo, seriam formados, os quais ativariam uma reação catalítica que transformaria o ozônio (O₃), principal absorvedor de radiação ultravioleta (uv), em oxigênio comum (O₂). Torna-se evidente porque a depleção do ozônio é catastrófica: grande parte da vida conforme a conhecemos evoluiu nos últimos 540 milhões de anos (após o evento do rápido aumento de diversidade biológica, conhecido como Explosão do Cambriano), na atual era geológica chamada Fanerozoico. Essa evolução ocorreu em um tempo em que a atmosfera já estava “protegida” contra os efeitos da radiação. A vida atual é adaptada a essas condições, tendo a radiação uv perigosos efeitos sobre importantes moléculas biológicas, como o DNA e as proteínas em geral.

Para termos uma ideia mais clara da energia liberada nesses surtos de radiação, vamos colocar a energia média desses eventos em termos da energia liberada na explosão da bomba atômica de Hiroshima (10^{20} erg). As erupções solares liberam cerca de 10^{33} erg de energia ou, aproximadamente, 10 bilhões (10^{10}) de bombas de Hiroshima. O próximo na escala é a explosão de supernova, que libera cerca de 10^{51} erg. Isso equivale a 10 bilhões vezes 10 bilhões vezes 10 bilhões (ou 10^{30}) da energia daquela bomba. Ainda mais energéticos, os surtos de raios gama liberam 10^{51} erg ou 10^{28} Hiroshimas, e são os eventos mais energéticos do Universo desde o Big Bang.

Entretanto, sem alarde. Em primeiro lugar, a quantidade de energia que chega à Terra depende da distância. Em segundo, esses eventos são raros mesmo em escala geológica.

Começando pelas erupções solares, esses surtos são formados principalmente por prótons (os núcleos dos átomos de hidrogênio do qual o Sol é feito) acelerados a grandes energias pelo campo magnético estelar. Essas partículas são defletidas pelo campo magnético terrestre, causando o efeito visível das auroras nos polos, pela interação com a atmosfera.

O fato de termos um campo geomagnético e uma atmosfera acaba por proteger a vida na superfície do impacto da radiação. A vida nos oceanos e sob o solo também recebe proteção pela blindagem conferida por esses materiais, para a maioria dos tipos de partículas que atinge o planeta.

Apesar de, biologicamente, essas ejeções de prótons não serem diretamente preocupantes para a sobrevivência da vida no planeta, pela proteção atual natural, elas podem afetar a sociedade tecnológica atual e futura.

Em órbita e além da magnetosfera, nossos satélites e astronautas estão sujeitos a seus efeitos deletérios (esse é um dos grandes empecilhos para uma viagem tripulada para Marte, por exemplo). Na própria Terra, nossas linhas de transmissão de energia e de informação podem atuar como grandes antenas, absorvendo a energia das explosões solares e causando apagões em grande escala, como já aconteceu no Canadá em 1989, quando toda a província de Quebec ficou sem energia por causa de uma tempestade solar.

Acreditamos que efeitos biológicos causados por explosões solares de grande magnitude possam ser ou tenham sido importantes em situações como a que se encontrava a Terra primitiva (quando a atmosfera era mais tênué, tendo densidade aproximadamente 10 vezes menor que a atual), nas situações de reversão do campo magnético e no futuro, quando o campo geomagnético terrestre entrar em declínio.

Já os soft gamma repeaters são eventos associados ao campo magnético ultraforte de algumas estrelas de nêutrons, que se torce com a rotação estelar, acumulando energia que é liberada ocasionalmente em grandes explosões. A energia emitida equivale ao total irradiado pelo Sol em um milhão de anos, apenas em raios

gama, radiação mais energética que os raios X. Um dos principais efeitos desses surtos é secundário, na verdade. É o efeito conhecido como *flash de ultravioleta*, resultado do reprocessamento dos fótons de alta energia na atmosfera superior, que atinge todo um hemisfério do planeta com um intenso e rápido fluxo de luz UV. Além de ser diretamente deletéria para a vida, a radiação causa alterações químicas na atmosfera, como a depleção da camada de ozônio, o que faz aumentar, por consequência, também o fluxo de radiação solar chegando à superfície. Estudos sugerem que um surto desses a 10 pc de distância (aproximadamente 32 anos-luz) poderia causar uma mortalidade de 90% mesmo no organismo mais resistente à radiação conhecido, a bactéria *Deinococcus radiodurans*. Entretanto, os efeitos sobre toda a biota ainda precisam ser mais estudados, pois as relações ecológicas podem tornar a vida mais resistente que espécies isoladas. Além disso, a estatística não favorece a ocorrência desses surtos nas proximidades da Terra: a distâncias menores que 20 pc, a ocorrência estimada é, grosso modo, uma a cada 5 bilhões de anos (maior que a idade da Terra); e a 50 pc, a taxa de ocorrência estimada fica em torno de uma a cada 2 bilhões de anos.

Supernovas são conhecidas explosões estelares que marcam o fim da vida de uma estrela massiva, com ocorrência de uma ou duas por século em nossa galáxia. Esses eventos produzem uma grande emissão de radiação X, aceleram partículas carregadas a altas energias e, estando suficientemente próximos, produzem uma onda de choque que poderia varrer a superfície de um planeta. Talvez o efeito mais danoso, se considerarmos as escalas astronômicas no Universo, seja o das partículas aceleradas pela explosão: esses raios cósmicos podem quebrar moléculas de nossa atmosfera e criar outras, alterando sua química. Do ponto de vista biológico, provavelmente o maior dano causado seja a destruição do ozônio, que pode perdurar por anos depois da supernova. Os efeitos dos raios X são mais difíceis de prever, pois os espectros das supernovas são muito variados e mais estudos ainda são necessários para entender o impacto biológico dessas explosões astrofísicas. Com

uma taxa de ocorrência próxima a nosso planeta de uma ou duas a cada bilhão de anos, elas talvez sejam os eventos astrofísicos de alta energia com maior impacto para a vida no planeta. No entanto, é interessante pensar que esses eventos, ao mesmo tempo que podem causar um grande dano, também distribuem os elementos químicos produzidos no interior das estrelas pelo Universo, permitindo a formação de planetas e o aumento da complexidade química em suas superfícies, possibilitando assim a origem e evolução de vida como a conhecemos.

Por fim, talvez os mais perigosos sejam os surtos de raios gama, pois são as maiores explosões do Universo desde o Big Bang, emitindo uma quantidade imensa de energia na forma de radiação gama, concentrada em um cone, como um farol varrendo o Universo. Um planeta que estivesse exatamente nesse cone sofreria vários efeitos, dependendo da distância até a fonte da explosão, que poderiam ser mais intensos que todos os apresentados até agora. A radiação gama direta seria, em grande parte, absorvida pela atmosfera, mas poderia varrê-la para o espaço ou, no mínimo, alterar profundamente sua química, destruindo ozônio e gerando óxidos de nitrogênio que, a longo prazo, poderiam causar o resfriamento de todo o planeta. Parte dessa radiação seria transformada em luz ultravioleta, em uma quantidade muito maior que a produzida pelo Sol, o que poderia causar danos profundos aos organismos expostos vivendo na superfície, no ar e nos primeiros metros sob as águas, afetando profundamente os organismos fotossintetizantes, a base da cadeia alimentar do planeta. Apesar de os surtos de raios gama serem pouco frequentes no Universo, eles podem causar danos planetários a distâncias realmente astronômicas: mesmo do outro lado da galáxia eles poderiam ser perigosos se o farol de raios gama estiver apontado exatamente em sua direção. Vale salientar que esse tipo de alinhamento pode já ter ocorrido para a Terra, com taxa estimada de uma vez a cada bilhão de anos, mas ainda estamos aprendendo a buscar as provas de que passamos por isso no registro geológico e biológico.

Impacto de meteoros

Eventos astronômicos como a queda de asteroides representam ameaça mais imediata. Já aconteceu antes, ao menos uma vez, na grande extinção dos dinossauros, no período Jurássico, cerca de 65 milhões de anos atrás (apesar de existirem hipóteses alternativas). Na ocasião, acredita-se, um asteroide de aproximadamente 10 quilômetros de diâmetro caiu onde hoje é o golfo do México. O impacto foi tão grande que lançou toneladas de poeira na atmosfera, bloqueando a passagem da luz solar e impedindo a fotossíntese, o que resfriou a temperatura na superfície. Esse evento, e outros similares antes dele, contribuíram no processo evolutivo, mudando as relações ecológicas que prevaleciam até então, extinguindo predadores e abrindo espaço para o aumento de populações que antes eram muito mais limitadas, como a dos mamíferos. O impacto de asteroides acontecerá novamente e os potenciais danos à vida são, de certa forma, imprevisíveis. A curto prazo, essa é a ameaça de extinção em massa mais provável, ao lado de supervulcanismo, deriva continental e eras glaciais. Esses fenômenos talvez tenham contribuído para vários dos eventos de extinção da história do planeta e continuarão atuando no futuro. Em relação a impactos, a escala de tempo para eventos de extinção em massa, como o dos dinossauros, é de cerca de 100 milhões de anos. Entretanto, a Terra é constantemente bombardeada por meteoritos. A queda de objetos pequenos ainda assim pode causar danos e prejuízos enormes à sociedade humana: a atmosfera terrestre nos protege de impactos com o poder destrutivo de uma bomba atômica uma vez por ano, em média, mas um meteoro relativamente pequeno, com cerca de 1 km de diâmetro, atingindo uma área povoada, como São Paulo, poderia causar milhões de mortes.

O futuro da vida e as grandes extinções

A vida é um fenômeno que ainda não compreendemos completamente: não sabemos como ela surgiu no planeta e estamos ainda aprendendo o que ela precisa para existir e como evolui com o

tempo. Há um longo caminho pela frente, mas sabemos algo tão importante quanto impactante: é um fenômeno muito persistente, tendo resistido a vários eventos catastróficos na Terra. Esterilizar todo o planeta talvez seja praticamente impossível, mesmo para os eventos de altíssima energia, geológicos e astronômicos, pois há vida em quase todos os lugares que podemos imaginar da Terra. Talvez apenas se toda nossa crosta novamente derreter, seja por um gigantesco impacto, como o que formou a Lua, seja pelo aquecimento do Sol no futuro, a vida no planeta seria realmente extermada.

Ou seja, a vida em nosso planeta deve continuar existindo ainda por muito tempo, mas claro, sempre mudando – evoluindo. Espécies se extinguirão e outras surgirão em seu lugar, em um ciclo constante e necessário para a manutenção da biodiversidade. Estudando nosso registro fóssil, como mostrado na Figura 15.3, vemos que esse processo de surgimento e desaparecimento de espécies é inerente à vida, e talvez mesmo necessário para sua continuidade. Na figura, podemos ver que, depois de cada uma das grandes extinções, o número de espécies ou grupos retornou ao seu número inicial ou ainda, em alguns casos, aumentou.

A geologia divide a história da Terra em grandes intervalos de tempo. O maior e mais antigo é o Pré-Cambriano, que inclui eventos como a formação do planeta e o surgimento da vida. Na sequência, vem o Fanerozoico, caracterizado pela abundância de registros fósseis de vida animal e compreende até a atualidade. Nos 540 milhões de anos que abrange, os animais se diversificaram de organismos estruturalmente simples para várias formas mais intrincadas. A crescente biodiversidade é indicada pelo aumento no número de fósseis diferentes dos estratos geológicos mais antigos até os mais novos. Uma análise cuidadosa revela que, em certos pontos do tempo, a variedade biológica caiu bruscamente, com várias formas de vida desaparecendo de maneira simultânea. Essa é a marca de um evento maciço que devastou boa parte da biosfera global – uma extinção em massa.

Os principais eventos desse tipo foram identificados como as “cinco grandes extinções” que marcaram o Fanerozoico.

Biodiversidade durante o Fanerozoico

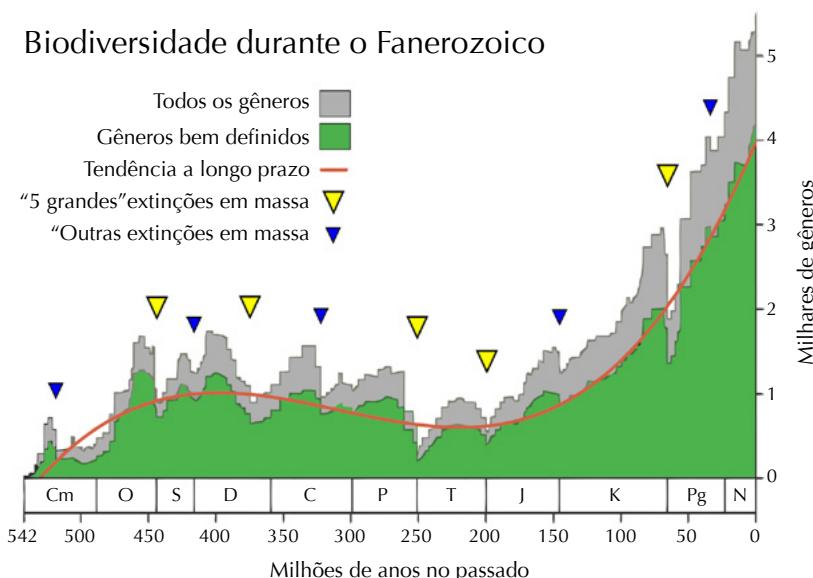


Figura 15.3. Número de espécies em relação às eras geológicas e suas subdivisões. Fonte: Wikimedia Commons

Cronologicamente, estão espalhadas entre suas subdivisões, denominadas períodos. Os dois primeiros períodos são respectivamente o Cambriano e o Ordoviciano, quando a vida animal primitiva ainda estava restrita a ambientes marinhos. Estavam presentes já os moluscos, equinodermas (como as estrelas-do-mar) e os artrópodes (como os trilobitas). O final do Ordoviciano é definido com a primeira grande extinção, decorrente de uma glaciação, formando grandes geleiras, o que causou a queda no nível do mar. Como é justamente na plataforma continental, na água mais rasa, em que a maioria da fauna deste período existia, os efeitos sobre a vida foram severos. Gatilhos propostos para isso incluem a desregulação do ciclo do carbono pelas primeiras briófitas (plantas avasculares) e a incidência de um surto de raios gama no planeta, mas os motivos reais ainda são controversos e debatidos na literatura.

Os períodos seguintes foram o Siluriano e o Devoniano. A colonização dos continentes se iniciou pelos artrópodes, enquanto

os vertebrados marinhos se destacaram com uma grande variedade de peixes. Ao final do Devoniano, outra extinção aconteceu por motivos semelhantes à última – mudanças climáticas e queda no nível do mar. Causas, ainda debatidas, para o fato envolvem a diversificação das plantas vasculares terrestres que desbalancearam o teor de CO₂ na atmosfera ou o impacto de um asteroide.

No Carbonífero, grandes florestas cobriram a terra firme, sob as quais os anfíbios são o grupo pioneiro de vertebrados a deixar o ambiente aquático. Seguindo para o Permiano, um evento importante ocorreu – a formação do supercontinente Pangeia, composto por quase todas as massas continentais atuais. A maior extinção de todas aconteceu no final desse período, há 250 milhões de anos. Aproximadamente 95% das espécies marinhas e 75% das terrestres, como estimado pelo desaparecimento de múltiplas formas de vida do registro fóssil, incluindo os últimos trilobitas. Muitas causas possíveis para isso foram propostas, e o que parece mais provável é que muitas delas tenham ocorrido em conjunto para explicar a dimensão do evento. Os principais fatores teriam sido um excesso de gás carbônico na atmosfera, somado à acidificação e anoxia nos oceanos. Os motivos mencionados para o fenômeno: um dilúvio de basalto (vulcanismo intenso) que ocorria na Sibéria, impactos de cometas ou asteroides, eventos astrofísicos de alta energia e até a proliferação descontrolada de um grupo de micro-organismos que produzem gás metano.

No Triássico, durante a lenta recuperação da última devastação, surgiram os primeiros dinossauros, que viriam a dominar o planeta pelas dezenas de milhões de anos seguintes. A Pangeia começa a se desintegrar, em um demorado processo que levaria à formação dos continentes atuais. Outra grande extinção ocorreu no final do período, causada por mudanças climáticas semelhantes às que ocorreram no final do Permiano, mas com efeitos menores. O provável causador foi um evento de dilúvio de basalto que ocorreu bem no centro do supercontinente que se desfazia; os sinais desse vulcanismo estão nos remanescentes da chamada Província Magmática Centro-Atlântica, hoje espalhada pelas Américas e pela África.

O Jurássico se inicia, surgem os primeiros mamíferos sob a supremacia dos grandes répteis. Isso segue até o Cretáceo, que se encerra com a extinção mais famosa de todas, 65 milhões de anos atrás. Notoriamente, o reino dos dinossauros chega ao fim, ainda que sua dizimação não tenha sido completa, e seus herdeiros diretos, as aves, existam até a atualidade. A principal causa provavelmente foi o impacto de um asteroide onde hoje é a península de Yucatán, no México, local em que foi encontrada a cratera de Chicxulub, submarina, com mais de 180 km de diâmetro. A colisão teria liberado uma grande quantidade de material particulado na atmosfera, causando mudanças climáticas e afetando os produtores primários dependentes da luz solar. Os organismos maiores então pereceram com o colapso da cadeia alimentar. Outro fator que estava presente, menos conhecido, foi mais um evento de vulcanismo intenso, agora na região do Decão, na Índia, que também teria afetado o clima global. Após esta última (mas não final) devastação, os nichos ecológicos antes ocupados pelos dinossauros foram disponibilizados para os mamíferos, que se diversificaram pelo planeta nas eras seguintes. A biosfera moderna é consequência direta de todos esses eventos, mas esta não é uma história acabada, apenas os participantes foram renovados – entre eles, os humanos.

A evolução do Sol: o apocalipse definitivo

O fim inexorável da vida na Terra provavelmente virá concomitantemente aos estágios finais da evolução do Sol. Pelos próximos 5 bilhões de anos, nossa estrela consumirá o hidrogênio em seu núcleo, formando hélio e liberando energia. Simulações computacionais sugerem que pelos próximos 2 bilhões de anos, o Sol, à medida que consumir o hidrogênio de seu núcleo, aumentará sua luminosidade e temperatura sem, no entanto, aumentar muito seu tamanho.

Entretanto, assim que as reações nucleares no núcleo do Sol tiverem consumido cerca de 10% da massa do hidrogênio presente, nossa estrela entrará em uma nova fase de evolução, saindo

do que chamamos de sequência principal, na qual esteve pelos últimos 5 bilhões de anos, aproximadamente. Começará então a fase de gigante vermelha, quando o Sol aumentará de tamanho, ultrapassando a órbita da Terra, engolindo-a. Mesmo antes disso, o fluxo radiativo que incidirá sobre a superfície será tão intenso que ela mais se parecerá com uma bola incandescente, muito similar ao que foi no início de sua história. Esse é o ponto final da vida em nosso planeta. Mas quem sabe se a vida não florescerá onde hoje nos parece impossível, como nas luas geladas dos planetas gigantes? Ou mesmo na superfície fria de Marte, que se tornará mais quente e talvez com uma maior atividade de água líquida?

Qual o futuro final da vida? Pelo que conhecemos sobre o processo de evolução biológica, é impossível prever. A única certeza que temos é que a vida se modifica com o tempo e com o ambiente, e acaba por modificá-lo também. Enquanto houver condições mínimas em nosso planeta e no Universo, a vida e sua evolução devem continuar, talvez apenas terminando quando todas as fontes de energia disponíveis se esgotarem, como as estrelas, os radioisótopos e as fontes gravitacionais.

Efeito da ação humana

Atualmente, fala-se muito dos efeitos ecológicos, com a interferência ou não do homem, para o futuro da vida na Terra. Debate-se muito, ainda sem grande consenso, os efeitos do ser humano no aquecimento global e em outras alterações globais. No entanto, a Terra já passou por períodos mais quentes e mais frios, e a vida continuou. É importante termos em mente que o *Homo sapiens* é apenas mais uma espécie no planeta, parte de uma rede ecológica complexa, imprevisível e, ao que parece, bastante robusta. Mas somos capazes de induzir grandes alterações no planeta e também na biosfera. Nossa influência em alguns ecossistemas, desde a destruição de habitats naturais para propósitos especificamente humanos até mudanças climáticas locais (talvez até mesmo globais) causadas pelo nosso progresso tecnológico podem causar uma diminuição na

biodiversidade e a extinção de muitas espécies, culminando no que hoje começa ser aceito como uma nova extinção, a do período do Holoceno. O impacto final das atividades humanas é incerto, mas não somos a primeira espécie a criar mudanças globais: por exemplo, o surgimento dos organismos fotossintetizantes no planeta, cerca de 2 bilhões de anos atrás, oxigenou a atmosfera, causando uma extinção em massa que varreu os organismos anaeróbios da superfície do planeta. É possível que estejamos criando um novo cataclismo global pelo aumento da temperatura, e é nosso maior interesse como espécie evitar esse tipo de evento, por representar um potencial desafio para nossa sobrevivência. No entanto, mesmo que cause nossa extinção, um evento de aumento de temperatura ou mesmo de congelamento global provavelmente não causaria a extinção de todas as formas de vida no planeta.

O fato é que ainda precisamos aprender muito sobre o funcionamento da evolução e as intrincadas relações ecológicas entre os seres vivos se quisermos ter alguma chance de prever a resposta da vida a mudanças em nosso planeta, sejam elas causadas pelo homem, geológicas ou astronômicas. Essa é uma linha de pesquisa que está apenas em seu início, mas é um fato que a vida como conhecemos está intrinsecamente conectada a seu ambiente, respondendo a mudanças e causando mudanças. Conhecermos nosso lugar nessa rede complexa certamente nos ajudará a compreender os impactos da atividade humana e a delinear nossas ações e o uso de nossa tecnologia para garantir nossa permanência e a de nosso ambiente planetário.

Para onde a evolução levará a vida? É muito difícil, senão impossível responder. A única certeza que temos é que a vida é muito resistente: enquanto nosso planeta tiver condições mínimas, a vida deve continuar e talvez se estenda até o final dos tempos, quando o Universo esgotar todas as suas fontes de energia e todas as estrelas se apagarem.

Sugestão de leitura

FORTEY, R. *Vida: uma biografia não autorizada*. Rio de Janeiro: Record, 2000.

Agradecimentos

Os autores agradecem Fernando Paolo, da UCSD, e o professor Rodrigo Santucci, da UNB, pelas informações e complementos.

Referências

ROSS, A. *What is Life? How chemistry becomes biology*. Oxford University Press, 2012.

KNOLL, A. H. *Life on a young planet: the first three billion years of evolution on Earth*. Princeton University Press, 2015.